



HAL
open science

Relation entre la performance et la cinétique de l'appui, au cours d'un virage en ski alpin.

Clément Delhayé

► **To cite this version:**

Clément Delhayé. Relation entre la performance et la cinétique de l'appui, au cours d'un virage en ski alpin.. Biomécanique [physics.med-ph]. Université Savoie Mont Blanc, 2021. Français. NNT : . tel-04247418

HAL Id: tel-04247418

<https://hal.science/tel-04247418v1>

Submitted on 18 Oct 2023

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC

Spécialité : **Biologie de la motricité**

Arrêté ministériel : 25 Mai 2016

Présentée par

Clément DELHAYE

VERSION SOUMISE A EXPERTISE

Thèse académique dirigée par **Frédérique Hintzy** et

préparée au sein du **Laboratoire Interuniversitaire de la Biologie
de la Motricité (LIBM)**

dans l'**École Doctorale Science et Ingénierie des Systèmes de
l'Environnement et des Organisations (SISEO)**

Relation entre la performance et la cinétique de l'appui, au cours d'un virage en ski alpin.

Thèse académique soutenue publiquement le « 8 Juillet 2021 »,

devant le jury composé de :

Pr. Laurence CHEZE

PU, Université Lyon 2 (Rapporteur)

Pr. Benoit BIDEAU

PU, Université Rennes 2 (Rapporteur)

Dr. William BERTUCCI

PU, Université Champagne Ardennes (Examineur)

Dr. Nicolas COULMY

Fédération Française de Ski (Examineur)

Dr. Pierre SAMOZINO

MCF, Université Savoie Mont-Blanc (Examineur)

M. Valery BOGET

Salomon SAS (Encadrant Industriel)

Dr. Frédérique HINTZY

MCF-HDR, Université Savoie Mont-Blanc (Directrice)

Résumé :

Relation entre la performance et la cinétique de l'appui, au cours d'un virage en ski alpin.

Les connaissances actuelles en cinétique du ski alpin portent principalement sur la charge verticale (F_z) au cours d'un virage, présentant une montée en charge, un plateau et un relâchement de charge entre deux périodes d'allègement (Lüthi 2003). La valeur maximale de F_z est le seul marqueur étudié dans la littérature sur cette signature de force. Il varie en fonction du niveau de performance (Supej 2010, Supej 2011), du tracé de course et de la géomorphologie du terrain (Nakazato 2011, Spörri 2012, Falda 2017). A partir de ce constat nous avons déterminé trois principaux objectifs de travail :

(i) Une description de la signature de force en 3D, et son interprétation au regard de la motricité du skieur. Cette analyse atteste la synchronicité entre les événements cinématiques du virage décrites dans la littérature et l'apparition de points remarquables de la signature de force mesurée. Chacune des phases est caractérisée par des marqueurs cinétiques qui lui sont propre. La phase d'initiation est caractérisée par un fort moment Y vers l'avant, un pic de charge latéral (F_y) et une forte montée en charge verticale (F_z). La phase de conduite est caractérisée par une période de maintien de l'intensité de force et de moment sur tous les axes. La phase de complétion présente des actions cinétiques latérales caractérisées par une inversion de signe de F_x , F_y , et M_x , une forte intensité M_y vers l'arrière et une diminution importante de F_z .

(ii) Une étude des interactions entre l'évolution des signatures de force et le niveau de performance des skieurs. D'après nos résultats le niveau de performance des skieurs a une influence sur leur signature de force, cet effet varie en fonction des axes mesurés et des phases du virage. Les résultats observés montrent que plusieurs paramètres sont linéairement corrélés au temps de course : 1) la signature en F_z est caractérisée par des valeurs de plateau plus hautes, d'allègement plus faibles, de pentes de montée et de relâchement de force plus raides. 2) Ces deux derniers résultats associés à des proéminences de F_z plus marquées, et une anticipation des marqueurs cinématiques de changement de carre semblent indiquer que les skieurs de haut niveau sont caractérisés par des phases d'allègement plus marquées et privilégient des transitions par impulsion. 3) La répartition de F_z sur le pied extérieur augmente avec le niveau des skieurs jusqu'à un certain seuil à partir duquel la jambe extérieure ne peut plus supporter les contraintes musculaires et/ou à partir duquel l'interaction ski-neige est trop faible pour supporter les contraintes cinétiques induites par les caractéristiques cinématiques du virage.

(iii) La quantification de l'influence des singularités cinématiques provenant des virages (iiia) et des skieurs (iiib) sur les signatures de force. (iiia) En fonction des profils de virage, les objectifs des skieurs

sont soit d'atteindre une vitesse élevée (sous-vitesse), soit de maintenir cette vitesse élevée (sur-vitesse) soit de maintenir une vitesse la plus élevée possible sans possibilité d'en regagner (plat). Le profil de virage induit trois principales modifications sur la signature de force F_z qui sont : la durée du plateau, les pentes de montée et de relâchement de charge et la différence d'intensité entre le début et la fin de la conduite. Ainsi, durant une course, les skieurs modulent leurs signatures de force et de moment en fonction de leurs objectifs de virage. Il semble que cette capacité de modulation entre les virages soit de plus en plus marquée avec l'augmentation de leur niveau de performance. (iiib) Bien que le nombre de sujets évalués soit trop faible pour en tirer des conclusions générales, les tendances observées sur F_z démontrent une prise de carre plus progressive des skieurs privilégiant la stratégie de trajectoire en Z, une forme en U plus marquée du plateau de F_z sur le pied intérieur et un changement de signe de M_x en fin de virage plus brusque et tardif.

Mots clés : Ski Alpin, Performance, Cinétique, Virage, Plateforme de force, Trajectoire.

Relation between skier's performance and kinetics during turn in alpine skiing.

The current knowledge of force production during alpine skiing is mainly limited to vertical load (F_z) during a turn, characterized by a force increase, a plateau and a force release (Lüthi 2003). The maximum value of F_z is the only marker studied on this force signature, which varies according to the level of performance (Supej 2010, Supej 2011) and the course setting and geomorphology of the slope (Nakazato 2011, Spörri 2012, Falda 2017). Based on this observation, that project had three main working objectives:

(i) A description of the 3D force signature, and its interaction with motor actions. This analysis attests the synchronicity and the strong interaction between the kinematic phases of the turn described in the literature and the signatures of measured forces. Each phase is characterized by specific kinetic markers. The initiation phase is characterized by a strong forward M_y peak, a lateral force peak (F_y) and a strong vertical force increase (F_z). The steering period is characterized by a maintenance of force intensity and torque on all axes. The completion phase is characterized by lateral kinetic actions demonstrated by a sign switch of F_x , F_y , and M_x , a strong backward M_y peak and significant F_z reduction.

(ii) A study of the interactions between the evolution of force signatures and the performance level of skiers. The results of this study, that the performance level influences force signatures, even if the correlation varies depending on the measured axes and the phases of the turn. Several parameters are linearly correlated to the race time: 1) the F_z signature is characterized by higher plateau values, lower

values between plateau, and steeper slopes of force increase and release; 2) these last two results associated with more pronounced F_z prominences, and an anticipation of kinematic edge change markers, suggest that high-level skiers are characterized by a more pronounced period of lowest force production and favour “push” transitions and 3) F_z applied via the outside foot increases performance until the point at which the outside leg appears to no longer support force output and/or the ski-snow interaction cannot support the kinetic stresses induced by turn characteristics.

(iii) The quantification of the influence of kinematic singularities from turns (iiia) and skiers (iiib) on force signatures. (iiia) Depending on the turn situation three turns profiles could be define: skiers try to reach high velocity (under-speed), to maintain this high speed (over-speed) or to maintain the highest possible speed without the possibility of regaining speed (flat). According to this classification, the difference in turn profile induces three main changes to the F_z force signature: the duration of the plateau, the slope of loading increase and release, and the balance between the intensities at the beginning and end of the line. During a race, skiers seem to modulate timing and intensities of their force and torque signatures according to their turn objectives. It seems that this modulation is more pronounced among higher performing skiers with the increase in their level of performance. (iiib) Unfortunately, the study power was not sufficient to draw strong conclusions. Nevertheless, the F_z data from homogeneous skiers appeared to show more gradual ski edging a favoring of the Z-shaped line-strategy, a more pronounced U-shape of the F_z plateau on the inside foot and a change of M_x sign at the end of a sharper and later turn.

Key words: Alpine Skiing, Performance, Kinetics, Turn, Force plates, Trajectory.

Remerciements :

S'investir dans un projet de recherche ayant pour thématique une activité qui nous passionne est un privilège sans égal. Ce privilège est d'autant plus grand que j'ai eu la chance d'être aidé, soutenu, et accompagné par toutes les personnes qui m'entourent. Je tiens à remercier dans cette partie les personnes ayant contribué à ce travail de thèse et m'ayant permis de m'épanouir professionnellement durant cette aventure.

Premièrement, je tiens à remercier les rapporteurs **Laurence Chèze** et **Benoit Bideau** ainsi que l'ensemble des membres du jury notamment **Nicolas Coulmy** et **William Bertucci** de me faire le privilège de m'accorder de leur temps et leur expertise dans ce processus d'évaluation de mon travail de doctorat. C'est un honneur pour moi de vous présenter ce travail de thèse qui m'a passionné pendant sa réalisation et son écriture.

Merci à **Frédérique Hintzy** de m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce projet et de m'avoir fait confiance durant l'ensemble de cette thèse. Merci de la liberté que tu m'as laissé dans la gestion de ce travail, mais aussi pour m'avoir guidé et réorienté sur les étapes clés de ce travail lorsque, par exemple, ma « fougue du traitement de données » se faisait trop présente. Tu as su durant ces trois années, me soutenir dans les moments où je manquais d'aisance. Je te remercie pour ton encadrement et tout le travail que tu as réalisé pour ce projet de l'organisation d'expérimentations à la communication autour de nos travaux. Ce travail est le résultat de cette belle collaboration.

Je tiens également à remercier mon précieux collègue de thèse, **Matt Cross**. C'est un honneur d'avoir partagé une thématique de recherche avec quelqu'un comme toi. Merci de tes conseils de valeur qu'ils soient scientifiques ou personnels et ton aide durant les phases d'écriture. Ta gentillesse et ta bonne humeur même dans les moments difficiles ont été d'un grand soutien pour moi. Merci pour les moments passé ensemble que ce soit à 6h du matin sur une piste de ski, durant les interminables journées (et nuits) de traitement de données ou durant les plus agréables descentes en luge pour tester les RTK.

Mille mercis à **Maximilien Bowen**, pour ton aide indéfectible sur tout ce projet. Merci d'avoir ressoudé 100 fois ces satanés Lemos, de ton expertise pour le traitement de données, la mécanique, l'électronique, la mécatronique, la physique, et les sciences en général... Sans toi ce projet aurait été bien différent. C'est un plaisir de travailler avec toi et nos sessions de Matlab resteront parmi les meilleurs souvenirs de mon doctorat.

Merci à **Baptiste Morel** et **Pierre Samozino** pour votre expertise et vos conseils toujours avisés. Merci d'avoir toujours laissé votre porte ouverte et d'avoir pris le temps de m'aider et de me faire découvrir les dernières innovations méthodologiques ou statistiques. C'est toujours un plaisir de travailler avec vous deux. Votre vision de la science et votre passion pour la recherche représentent pour moi, un modèle du chercheur que j'aimerais devenir.

Merci à **Patricia Coulié**, **Laurent Messonier**, **Alexis Gsell** et le reste de l'équipe du LIBM de faire de ce laboratoire un lieu vivant et toujours en éveil. Merci à tous les copains (ex)doctorants Thomas, Flo, Marlène et Seb, Mr. Cusin, José, Jean-Rom, Arthur, Vévé, J.B, Brice, Léo, Jerem, Thibault, Manon, Caro, Julia pour votre aide à un moment ou l'autre de ma thèse.

Merci à tous les collègues de Salomon qui m'ont chaleureusement accueilli à l'ADC, notamment : Valéry, Fred, Aldric, Bernard, Jérôme, Alex, Patrick, Christophe, Jean-Bruno, Sly, Jo, Nelly, Matthieu et Odin. Merci de m'avoir fait découvrir le travail fascinant de développeur d'équipement de sport. Merci pour votre curiosité et de votre expertise dans le milieu de ski. Travailler avec vous m'a permis de grandir et d'apprendre énormément.

Merci à ma famille, de m'avoir fait découvrir les joies du ski, et surtout de m'avoir encouragé à choisir une voie dans laquelle je m'épanouis même si ce n'est pas toujours la plus facile. Merci à tous mes amis et surtout aux « loutres » de leur soutien durant cette période de la vie riche en émotions.

Enfin merci à toi **Charlotte**, d'être si extraordinaire et de faire partie de ma vie. Tu fais de moi une meilleure personne et sans toi ces 3 années de thèse n'auraient pas été aussi belles.

Table des matières :

Résumé.....	3
Remerciements	6
Table des matières	8
Table des figures.....	11
Introduction générale :.....	16
1 Analyse générale du ski alpin :	18
1.1 Description virage et trajectoire :.....	18
1.1.1 Cycle de virage :.....	18
1.1.2 Découpage des virages :.....	21
1.1.2.1 Approche cinématique	22
1.1.2.2 Approche cinétique	23
1.1.2.3 Liens entre les approches cinématiques et cinétiques	23
1.2 Indices de performance :.....	23
1.2.1 Temps de course et temps de section :.....	23
1.2.2 Dissipation d'énergie :.....	25
1.2.3 Vitesse et distance parcourue :.....	26
1.3 Tracé de course et morphologie de piste :.....	29
2 Analyse cinétique du ski alpin :	33
2.1 Description générale des forces en ski alpin :	33
2.2 Forces et interactions ski-neige :.....	34
2.2.1 Fondamentaux de la mécanique Newtonienne :	34
2.2.2 Application mécanique aux situations de ski alpin :	34
2.2.2.1 Descente en ligne droite :	34
2.2.2.2 Traversée de piste :	38
2.2.2.3 Virage en conduite dérapée :	41
2.2.2.4 Virage en conduite coupée :.....	43
2.3 Mesures des forces :.....	46
2.3.1 Historique des outils de mesure des forces en ski alpin :	46
2.3.2 Méthode indirecte d'évaluation des forces :	51
2.3.3 Présentation du capteur de force 3D utilisé :.....	53
2.4 Etat des connaissances en cinétique du ski alpin :	56
2.4.1 Description des signatures de force :	56

2.4.2	Influence de la trajectoire des skieurs sur les signatures de force :	61
2.4.3	Influence du niveau de performance des skieurs sur les signatures de force :	63
3	Hypothèses de travail :	66
4	Protocole de recherche :	69
4.1	Population :	69
4.2	Design expérimental :	70
4.3	Matériel et outils de mesure :	72
4.3.1	Equipement de ski :	72
4.3.2	Equipement de mesure cinématique :	72
4.3.3	Equipement de mesure cinétique :	73
4.4	Traitement de données :	74
4.4.1	Ouverture et synchronisation des données cinétiques et cinématiques :	74
4.4.2	Calcul des paramètres cinétiques et cinématiques :	75
5	Analyse des signatures de force :	77
5.1	Analyse descriptive des signatures de force :	77
5.1.1	Données brutes :	78
5.1.2	FX :	83
5.1.3	FY :	85
5.1.4	FZ :	88
5.1.5	MX :	93
5.1.6	MY :	97
5.1.7	MZ :	100
5.1.8	Analyse globale :	101
5.2	Influence du niveau de performance sur les signatures de force :	107
5.2.1	Hypothèses de travail :	107
5.2.2	Méthodologie :	109
5.2.2.1	Méthodologie d'évaluation des interactions signature de force et performance :	109
5.2.2.2	Méthodologie de détection des différentes phases de signal :	111
5.2.2.3	Calcul des paramètres descriptifs de la signature de force (Feature extraction) :	118
5.2.3	Résultats :	120
5.2.3.1	Résultats SPM :	120
5.2.3.1.1	FX :	121
5.2.3.1.2	FY :	122
5.2.3.1.3	FZ :	124

5.2.3.1.4	MX :	126
5.2.3.1.5	MY :	128
5.2.3.2	Feature Extraction :	129
5.2.4	Analyse globale :	134
5.3	Influence des singularités cinématiques sur les signatures de force :	140
5.3.1	Singularité des virages :	140
5.3.1.1	Définition des profils de virage et hypothèses :	140
5.3.1.2	Méthodologie :	145
5.3.1.3	Résultats :	146
5.3.1.4	Interactions entre la singularité des virages et les marqueurs de la performance de la signature de force :	152
5.3.1.5	Discussion et analyse :	154
5.3.2	Singularité des athlètes et stratégie préférée par les athlètes :	157
5.3.2.1	Interactions entre stratégie et performance :	157
5.3.2.2	Lien entre stratégie et dispersion des marqueurs de signature de force :	159
5.3.2.3	Lien entre stratégie et signature de force :	162
5.3.2.3.1	Contexte et hypothèses :	162
5.3.2.3.2	Méthodologie :	163
5.3.2.3.3	Résultats :	165
5.3.2.3.4	Discussion :	170
6	Discussion générale et perspectives :	173
7	Bibliographie :	186
8	Table des annexes :	196

Table des figures :

Figure 1 : Victor Schuller pendant la descente homme Audi FIS Ski World Cup, le 25 Janvier 2020 à Kitzbühel en Autriche	19
Figure 2 : Evolution des angles articulaires de genou et de bassin et des régimes de contraction pour la jambe intérieure et extérieure dans les 4 disciplines.....	21
Figure 3 : Evolution de la trajectoire du CG d'un skieur au cours d'une ligne droite entre deux phases tournantes et mise en évidence des différentes approches de découpage des virages.	22
Figure 4 : Evolution de la vitesse de déplacement au cours de plusieurs virages pour 6 skieurs.....	26
Figure 5 : Evolution de la trajectoire du CG de skieurs réalisant une trajectoire en S et en Z.....	27
Figure 6 : Evolution du rayon du courbure de skieurs réalisant une trajectoire en S et en Z.....	28
Figure 7 : Modèle conceptuel des interactions conduisant à la réalisation de virage en ski alpin.....	33
Figure 8 : Représentation du bilan des forces extérieurs appliquées à un skieur descendant dans la ligne de pente.	35
Figure 9 : Représentation de l'intensité de friction ski/neige en fonction de l'épaisseur de film d'eau sous le ski.....	37
Figure 10 : Représentation du bilan des forces d'un skieur descendant dans une pente d'une inclinaison avec un angle de traversée.....	39
Figure 11 : Représentation du bilan des forces vue depuis l'arrière d'un skieur dans une pente d'une inclinaison avec un angle de traversé	41
Figure 12 : Représentation graphique des forces appliquées à un ski durant une phase de conduite dérapée et coupée	42
Figure 13 : Modèle basique représentant par des cônes la relation entre le ski et le sillon créé à la surface de la neige.....	43
Figure 14 : Modèle basique représentant par des cônes la relation entre le ski et le sillon créé à la surface de la neige en phase d'initiation et en phase de conduite.....	44
Figure 15 : Représentation graphique des forces appliquées à un ski durant une phase de conduite coupée	46
Figure 16 : Méta-analyse des forces maximales mesurées en ski alpin par différentes études en 1987.	49

Figure 17 : Photos représentant la vue globale, avant et arrière du capteur de force 3D	53
Figure 18 : Photo prise durant la phase de création des matrices de calibration.....	55
Figure 19 : Représentation graphique de l'évolution des intensités normalisées au poids de corps des forces et des moments dans les 3 axes normalisés au cours d'un virage.....	59
Figure 20 : Représentation graphique des conditions de tracés réalisées dans l'étude de Nakazato <i>et al.</i> 2011.....	61
Figure 21 : Distribution des skieurs en fonction du temps de course réalisé.....	69
Figure 22 : Représentation graphique de l'évolution au cours du temps de la somme des forces normales au ski des deux pieds et de la position latérale du skieur.....	75
Figure 23 : Photo de la plateforme de force 3D en conditions d'expérimentation	77
Figure 24 : Représentation graphique de l'évolution temporelle des intensités brutes de force sur l'axe Z au cours d'un cycle.	79
Figure 25 : Représentation graphique du contenu fréquentiel de l'évolution des données brutes de force typiques sur l'axe Z.....	80
Figure 26 : Représentation graphique de l'évolution des signatures de force et de moment dans les trois dimensions pour un cycle avec quatre fréquences de coupure différentes.....	82
Figure 27 : Représentation graphique de l'évolution de la force en X au cours d'un cycle en ski alpin.	83
Figure 28 : Représentation graphique de l'évolution de la force en Y au cours d'un cycle en ski alpin.	85
Figure 29 : Représentation graphique de l'évolution de la force en Z au cours d'un cycle en ski alpin.	88
Figure 30 : Evolution de la Fz d'un skieur au cours d'un cycle (%).....	90
Figure 31 : Représentation graphique de l'évolution de la Fz au cours du virage, adossée à la trajectoire du CG.	91
Figure 32 : Représentation graphique de l'évolution du moment en X au cours d'un cycle en ski alpin..	93
Figure 33 : Représentation graphique de l'évolution de Mx au cours du virage, adossée à la trajectoire du CG.	95

Figure 34 : Bilan des couples de force à l'origine des moments sur l'axe X au cours d'un virage en ski alpin.....	96
Figure 35 : Représentation graphique de l'évolution du moment en Y au cours d'un cycle en ski alpin.	97
Figure 36 : Représentation graphique de l'évolution du moment en Z au cours d'un cycle en ski alpin.	100
Figure 37 : Représentation graphique de l'évolution des intensités normalisée au poids de corps des forces et des moments dans les 3 axes normalisés au cours d'un virage.....	102
Figure 38 : Représentation schématique du levier de force à l'origine d'une partie du moment sur l'axe M_x	103
Figure 39 : Représentation des signatures de force et de moment au cours d'un cycle dans 3 dimensions, mises en relation avec la durée des différentes phases cinématiques du virage	105
Figure 40 : Représentation de la détection de PIP au cours de 5 itérations.....	113
Figure 41 : Définition des points utilisés dans le calcul de PIP sur un segment spécifique.	114
Figure 42 : Exemple de détection des évènements de début et de fin de plateau sur F_z grâce à la méthode PIP	114
Figure 43 : Exemple de détection des évènements bornant les différentes phases du virage sur F_z grâce à la méthode PIP.....	115
Figure 44 : Evolution de la courbe de F_z du pied extérieur dans 6 virages d'un sujet filtrée à 12Hz et à 4Hz et mise en évidence des PIP déterminées à partir du signal filtré à 12Hz	117
Figure 45 : Evolution moyenne de la signature de F_x et de sa dérivée au cours d'un cycle de virage. L	121
Figure 46 : Evolution moyenne de la signature de F_y et de sa dérivée au cours d'un cycle de virage.	123
Figure 47 : Evolution moyenne de la signature de F_z et de sa dérivée au cours d'un cycle de virage.	124
Figure 48 : Evolution moyenne de la signature de M_x et de sa dérivée au cours d'un cycle de virage.	127
Figure 49 : Evolution moyenne de la signature de M_y et de sa dérivée au cours d'un cycle de virage.	128

Figure 50 : Résultats de la corrélation linéaire du ratio de force entre le pied intérieur et extérieur (<i>Rinout</i>) avec le temps de course.	129
Figure 51 : Résultats de la corrélation linéaire de MFzCin (a) et MFzCout (b) avec le temps de course	130
Figure 52 : Résultats de la corrélation polynomiale d'ordre 2 de <i>Rinout</i> avec le temps de course	
Résultats de la corrélation linéaire entre les données <i>Rinout</i> expérimentales et les valeurs issues du modèle polynomial d'ordre 2.....	130
Figure 53 : Résultats de la corrélation linéaire du temps : d'allègement pré-conduite <i>tA1</i> , d'allègement post-conduite <i>tA2</i> , d'allègement total <i>tAt</i> , de conduite <i>tC</i> , de montée en charge <i>tMC</i> , et de relâchement de charge <i>tRC</i> avec le temps de course.	132
Figure 54 : Résultats de la corrélation linéaire de <i>ProPIP5out</i> avec le temps de course.....	133
Figure 55 : Position en 3D du CG du skieur au cours de l'ensemble des cycles mesurés du tracé. Les cycles de descente sont catégorisés dans les profils sous-vitesse, sur vitesse ou plat.....	142
Figure 56 : Représentation des résultats des tests post hoc ANOVA(SPM) de Fz, la dérivée de Fz, My et la dérivée de My.....	146
Figure 57 : Représentation graphique des résultats de l'ANOVA (SPM-1D) des signatures de force moyenne en Fz entre les cycles de profils sous-vitesse, sur vitesse ou plat.....	147
Figure 58 : Représentation graphique des résultats de l'ANOVA (SPM-1D) des signatures de force moyenne de diff-Fz entre les cycles de profils sous-vitesse, sur vitesse ou plat	148
Figure 59 : Représentation graphique des résultats de l'ANOVA (SPM-1D) des signatures de force moyenne de My entre les cycles de profils sous-vitesse, sur vitesse ou plat.....	149
Figure 60 : Représentation graphique des résultats de l'ANOVA (SPM-1D) des signatures de force moyenne de diff-My entre les cycles de profils sous-vitesse, sur vitesse ou plat.	150
Figure 61 : Evolution moyenne de la signature de Fz au cours des cycles de virage de profil en sous-vitesse.....	152
Figure 62 : Evolution moyenne de la signature de Fz au cours des cycles de virage de profil en sur-vitesse.....	153
Figure 63 : Evolution moyenne de la signature de Fz au cours des cycles de virage de profils plat...	154
Figure 64 : Résultats des corrélations linéaires entre le temps de course et différents paramètres cinématiques.....	159

Figure 65 : Représentation graphique du clustering 3D des profils de stratégie de ligne des skieurs en fonction de la distance parcourue en ligne droite, du temps relatif passé en ligne droite et de la vitesse gagnée durant la ligne droite.	164
Figure 66 : Représentation graphique des résultats du T-test (SPM-1D), pour F_y et $\text{diff-}F_y$ entre les skieurs de niveau homogène favorisant une stratégie de ligne en S et en Z.....	166
Figure 67 : Représentation graphique des résultats du T-test (SPM-1D), pour F_z et $\text{diff-}F_z$ entre les skieurs de niveau homogène favorisant une stratégie de ligne en S et en Z.....	167
Figure 68 : Représentation graphique des résultats du T-test (SPM-1D), pour M_x et $\text{diff-}M_x$ entre les skieurs de niveau homogène favorisant une stratégie de ligne en S et en Z.....	168
Figure 69 : Représentation graphique des résultats du T-test (SPM-1D), pour M_y et $\text{diff-}M_y$ entre les skieurs de niveau homogène favorisant une stratégie de ligne en S et en Z	169
Figure 70 : Représentation des corrélations entre les variables de force isométrique et les performances.....	176

Introduction générale :

En ski alpin, quel que soit le niveau de pratique, la motricité du skieur est complexe, tant dans la gestion des activations musculaires, de l'orientation du corps, de l'équilibre ou de la coordination (Supej and Holmberg, 2019). Chacun de ces attributs de la motricité a un lien direct sur les caractéristiques cinétiques et cinématiques de la descente. La relation entre la gestuelle du skieur et son déplacement sur la piste est associée à la gestion par le skieur de l'interface ski-neige (Reid et al., 2020). En effet, la modulation de la charge et de l'orientation des skis par rapport à la neige permet au skieur de modifier les forces de friction entre le ski et la neige. Le skieur peut ainsi moduler sa vitesse, sa trajectoire ou son équilibre. L'analyse de l'interface ski-neige semble donc être un des points clés de la compréhension de la motricité en ski alpin.

Les faibles écarts temporels entre les skieurs d'une course de ski alpin témoignent de la pertinence d'étudier ces comportements dans le but d'améliorer la performance en compétition. Un des attraits de l'étude de la performance en ski alpin réside dans sa pluridisciplinarité (Hébert-Losier et al., 2014). D'après certaines approches de l'activité (Supej and Holmberg, 2019), la performance en ski alpin est la somme des performances dans chacun des compartiments d'entraînement et de motricité du skieur. Elle est donc le résultat d'une équation aux multiples variables (musculaire, énergétique, technique, stratégique, perceptive) dont les coefficients s'ajustent aux caractéristiques intrinsèques du skieur, aux conditions environnementales, à l'équipement (ski, fixation, chaussure), au tracé (positionnement des portes), à la fatigue et à l'enjeu.

L'apparition des skis paraboliques sur le marché en 1997/1998 a radicalement changé la typologie de virage en ski alpin (Supej et al., 2002). Depuis, le renouvellement chaque année des gammes de matériel sportif est associé à un accroissement de la performance et de la polyvalence du matériel skis-fixations-chaussures. En reprenant l'idée que la performance est le résultat d'une équation multiple, la prescription d'un matériel de ski adapté au skieur pourrait représenter une valeur d'ajustement à ses caractéristiques physiques et techniques ou à la situation de la course. En effet, en comparaison avec la typologie musculaire, ou les capacités techniques ou perceptives, l'ajustement du matériel au skieur est un des coefficients de l'équation le plus facile à modifier pour améliorer la performance dans une situation spécifique de course. Ce point explique l'intérêt croissant des équipementiers du ski alpin pour l'analyse objectives et rigoureuse du matériel de ski et son interaction avec les skieurs ou l'environnement.

Malgré son indéniable intérêt à être un champ d'étude, le ski alpin reste une motricité peu étudiée. Il existe depuis plusieurs années certains retards entre les connaissances académiques dans le domaine

et les problématiques des entraîneurs de haut-niveau (Bacharach and Beltz, 2019). Ce décalage s'explique par les contraintes importantes d'expérimentation. Les difficultés d'expérimentation sont premièrement liées à l'altitude, au froid et à la variabilité météorologique et nivologique inhérentes aux expérimentations en milieu montagnard. Ces caractéristiques induisent l'utilisation d'outils de mesure adaptés à ses contraintes environnementales. De plus, elles sont associées à des difficultés d'accès aux athlètes de haut niveau dues à des emplois du temps chargés rendant de fait, les journées d'entraînement précieuses, ainsi qu'à une durée d'expérimentation réduite aux saisons d'enneigement.

Les deux premières parties de ce travail de thèse compose l'introduction qui consiste respectivement en une revue de la littérature des concepts généraux et cinétique en ski alpin. A partir de cet état de l'art nous dresserons trois principaux objectifs de travail détaillés dans la partie 3. Pour y répondre une expérimentation sur une période unique a été réalisée. Le design expérimental, le matériel et les méthodes utilisés sont détaillés dans la partie 4. Les parties 5.1 à 5.3 détaillent respectivement les hypothèses, la méthodologie spécifique, les résultats et l'interprétation des trois objectifs de travail. Au sein de cette section chaque partie repose sur les résultats de la précédente. Enfin une analyse et une discussion globales des résultats de la partie 5 et leurs interactions sont présentées dans la partie 6.

1 Analyse générale du ski alpin :

1.1 Description virage et trajectoire :

1.1.1 Cycle de virage :

Tout en partageant un pattern commun, la réalisation d'un virage est un processus multifactoriel, dépendant du skieur, de l'environnement et des virages précédant et suivant. De ce fait, chaque virage de ski alpin est unique. En compétition, les virages sont contraints par les portes placées sur la piste. Le type de portes, leurs espacements vertical et horizontal diffèrent en fonction de la discipline étudiée (Erdmann and Aschenbrenner, 2008). Ces paramètres influencent ainsi les caractéristiques des virages réalisés par les skieurs. Quelle que soit la discipline étudiée chaque virage est associé à un passage de porte. L'activité se définit donc par un enchaînement alterné de phases d'appui (pendant les virages) et de phases de relâchement (entre les virages). Chaque virage est latéralisé avec une alternance de direction et de jambe (extérieure ou intérieure). Cette alternance de phase conduit à considérer le virage en ski alpin comme un cycle. Différents découpages ont été proposés afin de définir les bornes de ce cycle et les différentes phases au sein de celui-ci. (Fasel and Gilgien, 2017). Le choix de bornes du cycle sera discuté dans la partie **1.2.2**). Dans l'ensemble de ce travail de thèse le cycle de ski alpin sera considéré comme l'enchaînement de deux virages. Le premier virage durant lequel le ski étudié est le ski intérieur et le second où le ski étudié est extérieur au virage. Ainsi, la latéralité du ski étudié est identique au début et à la fin du cycle. La durée des virages sera normalisée afin que le changement de virage ait lieu à exactement 50% du cycle. Dans certains articles de notre revue de littérature, des paramètres temporels sont exprimés en % de virage entre 0 et 100%. Une division par deux permet de convertir le temps de virage en temps de cycle sur le pied intérieur (par exemple 20% du virage intérieur correspond à 10% du cycle). Cette même division doit être associée à une soustraction de 50% pour le pied extérieur (par exemple 20% du virage extérieur correspond à 60% du cycle)

Ce travail de thèse s'intéresse à la description cinétique des virages compétitifs contemporains. Ainsi la description analytique des phases et des actions du skieur s'appuiera sur la bibliographie (parfois ancienne) afin de décrire un virage de type Slalom Géant en conduite coupée contemporaine (largement utilisée en compétition). Nous tacherons ici de décrire les actions du skieur pendant ces virages. Le virage de slalom géant (GS) peut être défini selon 3 phases distinctes : l'initiation, la phase de conduite I et la phase de conduite II (Müller et al., 1998).

La phase d'initiation est composée :

- (i) d'un allègement du skieur soit par avalement (flexion des genoux entre les virages), ou plus rarement par impulsion (impulsion du skieur à la fin du virage précédant) (Brierley and Bartlett, 1991).
- (ii) d'un changement de carre considéré comme simultané avec l'allègement et facilité par celui-ci. Le

changement de la carre amont vers la carre aval est déclenché par la modification de l'orientation des tibias dans le plan frontal. Il est nécessaire au virage mais ne le déclenche pas à lui seul.

(iii) d'une orientation du skieur en direction de la ligne de pente, en engageant le corps vers l'avant et l'intérieur du virage.

(iv) d'un ajustement optionnel de la vitesse par dérapage (le skieur modifie l'orientation de ses skis afin qu'elle soit différente de l'orientation du déplacement de son centre de masse). Cet ajustement peut avoir lieu durant la ligne droite avant la phase d'initiation mais il peut aussi remplacer ou retarder la phase de conduite I. On parle alors d'entrée en dérive (« *Stivoting* » dans la littérature). L'entrée en dérive consiste en un dérapage durant la première partie du virage (remplaçant ou retardant l'apparition de la phase de conduite I) suivi d'une conduite coupée en deuxième partie du virage. La partie de dérapage permet de réduire la vitesse du skieur et d'ouvrir sa trajectoire afin de carver efficacement en fin de virage.

Les phases suivant la phase d'initiation sont les phases de conduites I et II caractérisées par une gestion du skieur de sa trajectoire, de son équilibre et de sa vitesse. Toujours d'après Müller *et al.* la phase de conduite I est la phase de conduite avant la ligne de pente et la phase de conduite II est celle située après la ligne de pente. Dans d'autres études la séparation entre les phases de conduites I et II est déterminée par l'instant du passage de la porte (Supej *et al.*, 2015). Ces deux phases de conduites seront parfois regroupées sous l'appellation « la phase de conduite » dans ce travail de thèse. Durant la phase de conduite, l'angle ski-neige augmente grâce à l'inclinaison du corps du skieur à l'intérieur du virage et à l'abaissement de son centre de gravité. Lors de la transition entre les phases de conduite



Figure 1 : Victor Schuller pendant la descente homme Audi FIS Ski World Cup, le 25 Janvier 2020 à Kitzbühel en Autriche (Photo de Hans Bezard/Agence Zoom).

I et II, la jambe extérieure est en extension (bassin à 128° et genou à 132°) et la jambe intérieure est en flexion (bassin à 90° et genou à 64°). Cette différence d'angulation du bassin et du genou est visible sur la Figure 1 et la Figure 2 (Kröll *et al.*, 2015; Alhammoud *et al.*, 2020). Durant la phase d'appui en Slalom géant on notera également un régime contractile très asymétrique avec la jambe

extérieure en quasi-isométrie et la jambe intérieure en contraction excentrique puis concentrique. Le skieur, dans le but d'augmenter son inclinaison vers l'intérieur du virage et l'angle ski-neige, réalise une angulation de corps par une flexion de bassin dans le plan frontal et un empilement articulaire en abaissant l'épaule extérieure (Lind and Sanders, 2004). La phase de conduite est associée aux rayons

minimaux du CG durant le cycle. La Figure 6 (partie 1.2.3) détaille l'évolution du rayon du virage pendant le cycle. Il est intéressant de noter que l'évolution du rayon semble suivre une courbe en forme de W où le rayon atteint des valeurs plus faibles au début et à la fin de la phase de conduite en comparaison avec sa partie médiane (Supej, 2008).

La littérature contemporaine considère l'existence après les deux phases de conduite, d'une phase de complétion du virage (Hintermeister et al., 2006; Supej et al., 2015). Cette phase empiète sur les phases de conduite II et d'initiation décrites par Müller *et al.*, et se caractérise par des enjeux moteurs propres. Durant cette phase, le skieur cherche à finaliser son virage, à réaliser une traversée et à se préparer pour le virage suivant. Pour cela il réduit son angle d'inclinaison latéral. La phase de complétion de virage est marquée par une contraction des muscles quadriceps de type concentrique sur la jambe intérieure et excentrique sur la jambe extérieure (Alhammoud et al., 2020 - Figure 2). Notons que les vitesses articulaires sont relativement lentes en ski alpin (de l'ordre de $90^{\circ} \cdot s^{-1}$). Une autre technique utilisée pour mettre fin au virage lors de la phase de complétion est de reporter son centre de gravité vers l'arrière afin de réduire la flexion longitudinale du ski sous le pied et la concentrer au niveau du talon (LeMaster, 2009). Grace à cette bascule vers l'arrière l'avant du ski retrouve une flexion nulle et supprime les effets de rotation due à la flexion du ski (détaillés dans la partie 2.2.2.4). D'après l'étude de Supej *et al.* 2015, les phases d'initiation, de conduite I et II et de complétion s'étendent respectivement de 0% à 18%, de 18% à 55% et de 55% à 86% et de 86% à 100% du temps de virage. Les évènements séparant les phases d'initiation, de conduite et de complétion sont généralement déterminés à partir des données cinématiques du skieur. Ainsi, les phases de conduite sont définies comme la période où le rayon de virage du skieur est inférieur à un certain seuil. Ces évènements sont simultanés à des changements : cinétiques (Meyer et al., 2019), de position articulaire (Kröll et al., 2015) ou de régime de contraction (Alhammoud et al., 2020). Le choix des évènements à prendre en compte pour proposer le découpage d'un cycle en phases a donc une importance sur la compréhension des phénomènes mécaniques et musculaires en ski alpin.

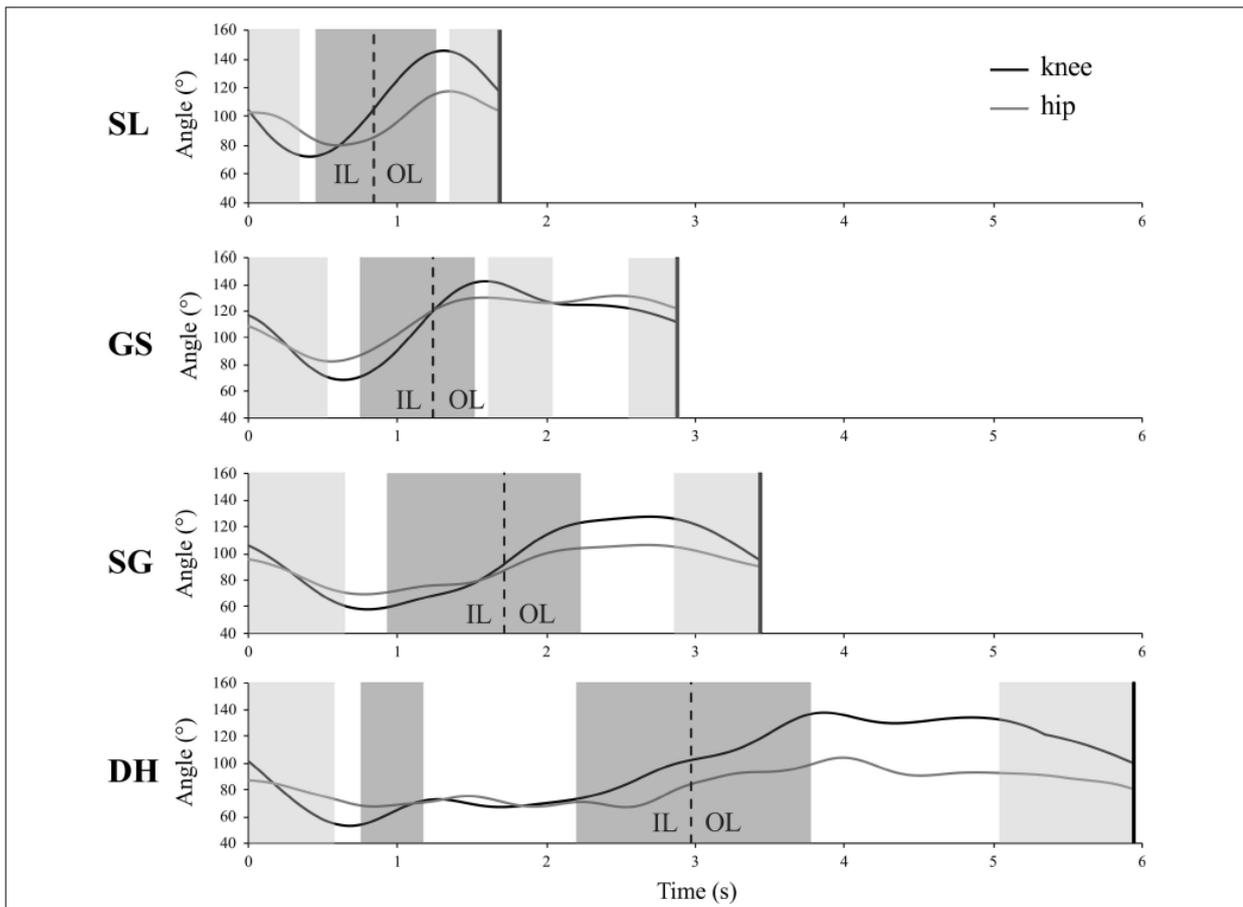


Figure 2 : Evolution des angles articulaires (°) de genou (trait noir-*knee*) et de bassin (trait gris-*hip*) et des régimes de contraction excentrique (zone gris clair) concentrique (zone gris foncé) ou quasi isométrique (zone blanche) pour la jambe intérieure (IL) et extérieure (OL) en fonction du temps (s-*time*) dans les disciplines SL : Slalom, GS : Slalom géant, SG : Super Géant et DH : Descente. Issue de Alhamoud *et al.* 2020.

1.1.2 Découpage des virages :

Le découpage du virage a pour but de segmenter chacun des virages d'une descente afin de faciliter l'analyse de la motricité du skieur. Le choix de l'évènement utilisé pour séparer les virages est dépendant du sujet de recherche (*i.e.* et des exigences qui y sont liées) et des outils de mesures utilisés. Deux logiques co-existent pour déterminer les évènements de découpage des virages (Figure 3). Les évènements choisis pour le découpage des virages vont soit correspond à la fin d'un virage et au début du suivant (Figure 3 *Approche 1*), soit correspondre à la fin de la partie tournante du virage et au début de la ligne droite suivante (Figure 3 *Approche 2A*) ; et de façon complémentaire correspondre à la fin de la ligne droite et au début de la partie tournante suivante (Figure 3 *Approche 2B*). L'approche 1 consiste donc à séparer entre eux les virages alors que l'approche 2 différencie les phases de ligne droite des phases tournantes des virages. Ces deux approches peuvent être réalisées à la fois par l'utilisation de données cinétiques et cinématiques.

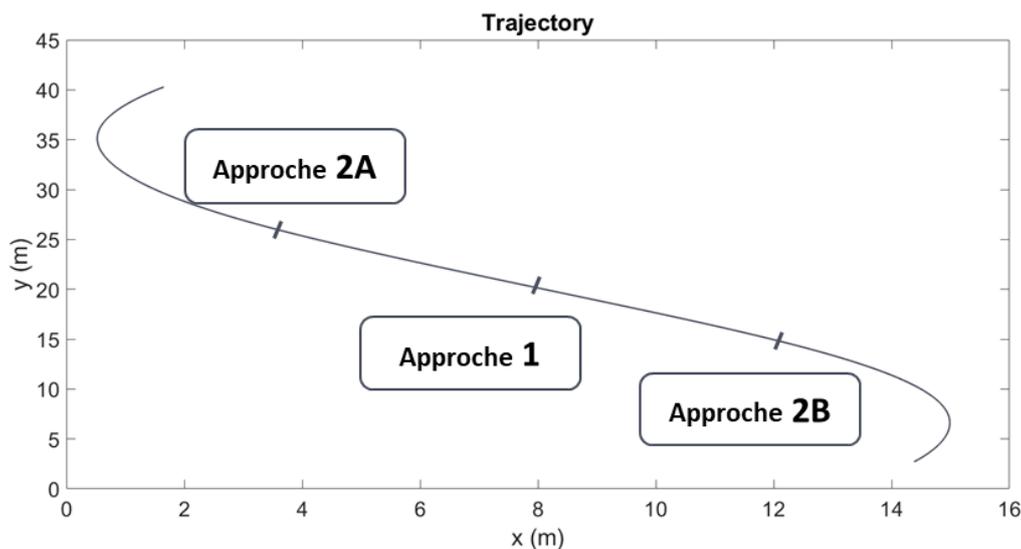


Figure 3 : Evolution de la trajectoire du centre de gravité d'un skieur sur les axes longitudinal et latéral en mètres, au cours d'une ligne droite entre deux phases tournantes et mise en évidence des différentes approches de découpage des virages. Les approches mentionnées sont reliées avec les méthodes découpages de virages. Issue de Delhaye *et al.* 2019.

1.1.2.1 Approche cinématique

La méthode de référence utilisée à partir des données cinématiques (relevant de l'approche 1) détermine l'évènement de changement de virage comme l'intersection entre la projection dans le plan de la piste du CG du skieur et la moyenne des trajectoires des skis (Supej and Nemeč, 2003). Durant la prise d'angle du skieur son CG (et sa projection dans le plan de la piste de celui-ci) se trouve plus à l'intérieur du virage que ses skis. Due à l'alternance des virages, le CG passe alternativement de gauche à droite des skis. Le point de croisement entre ces trajectoires est considéré comme l'évènement de changement de virage. Cet évènement correspond au changement de côté d'inclinaison du skieur. Cette méthode de découpage est pertinente et en adéquation avec la définition d'un virage. Elle permet de déterminer avec précision l'évènement de changement de virage, et a été utilisée dans plusieurs articles (Gilgien et al., 2013; Supej et al., 2015; Spörri et al., 2016). Néanmoins, cette méthode requiert la mise en place et le traitement complexe à partir d'images issues de cameras 3D stéréoscopiques, rendant difficile l'analyse de plusieurs virages successifs. Les trajectoires du CG et des skis peuvent être déterminées à partir de la fusion de données de centrales inertielles (IMU) et de géolocalisation différentielle par satellites (dGPS) (Fasel and Gilgien, 2017). Les résultats obtenus grâce à cette méthode sont précis à condition d'utiliser un modèle de pendule pour remonter au mouvement du CG. Ce modèle implique une analyse géomorphologique de la piste au préalable (Gilgien et al., 2015b) et un post traitement complexe (Fasel et al., 2016b, 2017).

Une autre méthode définit l'évènement de changement de virage (Approche 1) comme le point

d'inflexion de la trajectoire du CG (Adelsberger et al., 2014). Cette méthode ne nécessite pas la détermination de la position moyenne des skis, permettant ainsi un calcul simplifié de l'évènement. La précision temporelle de l'évènement est déterminée par la précision spatiale du CG, soumis aux mêmes problématiques que les méthodes détaillées ci-dessus. Avec des systèmes de mesures identiques, la différence entre ces deux définitions est inférieure à 30 ms (Fasel and Gilgien, 2017).

La trajectoire du skieur peut aussi être utilisée pour séparer les lignes droites et les virages entre eux (méthode relative à l'approche 2), à partir du rayon de courbure de la trajectoire du CG. En slalom géant, l'évènement de fin de virage et de début de ligne droite est déterminé lorsque le rayon du déplacement du CG devient supérieur à 30m. La fin de la ligne droite et le début du virage suivant est déterminé lorsque le rayon du CG devient inférieur à 30m (Spörri et al., 2012b).

1.1.2.2 Approche cinétique

Bien que moins utilisés, les évènements de changement de virage peuvent être déterminés à partir des données cinétiques. La méthode de référence cinétique qui relève de l'approche 1, correspond au minimum de la somme de force verticale des deux pieds durant un cycle (Nakazato et al., 2011). Cet évènement correspond à l'allègement maximal du skieur entre deux virages. Cette méthode de détermination ne nécessite que peu de post-traitement, et permet de découper avec précision les virages. Les forces normales aux skis suivent un pattern en créneau (Schaff et al., 1996) grâce auquel il est possible de déterminer, non pas uniquement le changement d'un virage à l'autre, mais les bornes de la période d'allègement entre deux virages (méthode relative à l'approche 2). Ainsi, les évènements de fin d'application de force sur le pied extérieur et de début d'application de force sur le pied extérieur du virage suivant, correspondent aux bornes de l'allègement entre deux virages. Pour cela il est nécessaire de déterminer avec précision les instants de début et de fin d'application de la force de manière automatisée (détaillés dans la partie 5.2.2). Ces évènements correspondent à la fin et au début de la prise de carres (Yoneyama et al., 2008).

1.1.2.3 Liens entre les approches cinématiques et cinétiques

A notre connaissance, la relation et les écarts temporels entre les évènements déterminés par méthode cinétique et cinématique n'ont pas été étudiés. Pourtant, le choix des évènements marquant le début ou la fin d'un virage peut avoir une influence sur les marqueurs observés et l'interprétation des résultats d'une étude. De plus, cette variété de définition et de découpage des virages rend la comparaison de données et résultats entre les études plus complexe.

1.2 Indices de performance :

1.2.1 Temps de course et temps de section :

En ski alpin, le classement d'une course est défini par les règles de la fédération internationale de ski (FIS) sur la base du plus petit temps de course (entre le portillon de départ et l'arrivée). La performance en ski alpin réside dans la mise en action de facteurs variés, dans les conditions de course spécifique à la manche de l'athlète, afin d'atteindre le temps de course le plus court possible. Cette spécificité d'adaptation à la manche de course est inhérente au déroulement d'une course de ski alpin. En fonction de leurs dossards, les différents athlètes qui s'élancent lors d'une compétition peuvent rencontrer des conditions météorologiques et nivologiques différentes. On notera aussi une dégradation croissante de la piste avec les passages des skieurs et la formation de microreliefs au niveau de la trajectoire. Le premier du classement est le skieur plus performant dans sa condition de course, que les autres dans les leurs. Cette caractéristique des compétitions de ski alpin semble déjà en contradiction avec la méthode scientifique visant à comparer toutes choses égales par ailleurs.

Dans le but de mieux comprendre la performance et ses facteurs, l'utilisation des temps de sections (portion de course) est régulièrement utilisée par les entraîneurs. Les sections en course sont généralement définies par des caractéristiques morphométriques de la piste ou du tracé (mise en action, murs, plat, enchainements). L'analyse du temps gagné ou perdu par un skieur sur une section par rapport à ses concurrents au regard de son attitude ou de ses caractéristiques physiques et techniques est une pratique courante chez les entraîneurs afin de déceler les points forts et les points faibles des athlètes (Lind and Sanders, 2004). Certains articles utilisent le même procédé pour corroborer les trajectoires des skieurs et les temps de sections (Lesnik and Zvan, 2007). A niveau égal, la variance de trajectoire entre les skieurs induit des variations de temps de section de l'ordre de 10% (Supej and Cernigoj, 2006). La mesure du temps de section induit certaines problématiques (Supej et al., 2011): (i) le temps de section est influencé par la vitesse, la position et l'orientation du skieur à son entrée dans la section. Un bon temps dans la section étudiée peut être la conséquence d'une bonne performance dans la section précédente. (ii) Une erreur commise en début de section diminuant la vitesse du skieur, aura une plus grande conséquence sur le temps de section que si elle avait été commise en fin de section. (iii) La position, la vitesse et l'orientation du skieur à la fin de la section par rapport à la porte suivante n'auront qu'un faible impact sur le temps de la section, mais peuvent influencer grandement les performances dans la section suivante. (iv) Dans le cas d'un exercice ou d'une expérimentation, un skieur peut volontairement sacrifier son temps sur les sections précédentes et suivantes pour minimiser son temps sur la section étudiée. La variabilité d'apparition de ce comportement entre les skieurs peut créer un biais lors des expérimentations. De plus, la mesure du temps de section n'informe pas sur les mécanismes sous-jacents induisant des différences entre les skieurs. Du fait de ces limites, la mesure du temps de section n'est quasiment plus utilisée dans les études récentes afin de quantifier la performance instantanée ou comprendre les mécanismes de la performance. La mesure du temps de course totale est encore utilisée dans certains articles comme

une mesure macroscopique utile pour différencier des groupes d'athlètes (Spörri et al., 2018b).

1.2.2 Dissipation d'énergie :

La méthode actuellement la plus utilisée dans la littérature pour caractériser la performance est le calcul du différentiel d'énergie mécanique spécifique. L'énergie mécanique du skieur (E_{mech} , Équation 3) à chaque instant peut être facilement calculée, à partir de son énergie potentielle (E_p , Équation 1) et cinétique (E_c , Équation 2, avec m masse, g constante gravitationnelle, h hauteur, v vitesse obtenue en dérivant la position 3D du CG) :

$$\text{Équation 1} \quad E_p = m \times g \times h$$

$$\text{Équation 2} \quad E_c = \frac{1}{2} m \times v^2$$

$$\text{Équation 3} \quad E_{mech} = E_p + E_c$$

Pour permettre une comparaison quantitative exacte entre les skieurs, l'énergie mécanique spécifique (e_{mech} , Équation 4) est calculée par une normalisation par la masse (Supej, 2008) :

$$\text{Équation 4} \quad e_{mech} = \frac{E_{mech}}{m} = \frac{v^2}{2} + g \times h$$

Sur la totalité de l'énergie mécanique dissipée durant une course, 15% est liée aux forces de friction aérodynamiques et 85% aux forces de friction ski-neige (Supej and Nemec, 2003). L'énergie mécanique spécifique e_{mech} peut être calculée à chaque point de la descente. La quantité d'énergie mécanique spécifique dissipée par unité d'altitude perdue peut être calculée par la dérivation de e_{mech} selon la perte d'altitude ($\text{diff}(e_{mech})$, Équation 5) (avec ∂z = la différence d'altitude sur la section étudiée).

$$\text{Équation 5} \quad \text{diff}(e_{mech}) \equiv \partial e_{mech} / \partial z$$

Un autre indice est plus souvent utilisé, ΔE_{mech} est calculé afin de comparer la variation d'énergie mécanique entre les skieurs sur une section observée. Ce marqueur n'est pas normalisé par la masse du skieur. Il correspond à la différence des valeurs d'énergie mécanique de début et de fin de la section étudiée.

La normalisation de l'énergie dissipée (Δe_{mech}) par la vitesse d'entrée (v_{in}) permet de tenir compte de la performance lors de la section précédente et la normalisation à la masse permet de comparer les sujets entre eux ($\Delta e_{mech} / v_{in}$, Équation 6).

$$\text{Équation 6} \quad \Delta e_{mech} / v_{in} = \frac{\Delta E_{mech}}{m \times v_{in}}$$

En effet les skieurs ayant une faible vitesse d'entrée dans une section peuvent plus aisément gagner de la vitesse durant celle-ci et donc dissiper peu d'énergie, réduisant de fait ($\Delta e_{mech} / v_{in}$). En cela, le delta d'énergie mécanique spécifique normalisé par la vitesse d'entrée ($\Delta e_{mech} / v_{in}$) est un marqueur pertinent afin d'étudier la performance des skieurs de haut niveau dans les disciplines techniques (Supej et al., 2011; Spörri et al., 2018b). La meilleure performance dans une section est donc définie par un $\Delta e_{mech} / v_{in}$ faible, induit par une vitesse maximale à l'entrée de la section et une dissipation

d'énergie minimale. En revanche, cet indice comprend certaines limites. En effet il ne prend pas en compte l'orientation du skieur à l'entrée et à la sortie de la section, ni la distance parcourue par celui-ci, ni l'énergie extérieure injectée dans le système par les activations musculaires du skieur. Ainsi, certaines études mesurent des valeurs d'énergie dissipée négatives au cours d'un virage (Supej, 2008; Reid, 2010; Supej and Holmberg, 2010). Elles apparaissent lorsque l'énergie dissipée par friction est plus faible que l'énergie musculaire injectée par le skieur pour augmenter sa vitesse. Il est fortement probable que cette énergie musculaire soit présente dans la plupart des virages (Lind and Sanders, 2004), mais ne soit mise en évidence dans le calcul que dans certaines conditions de tracé et de stratégie de skieur. Enfin ce modèle ne prend pas en compte l'énergie stockée dans la déformation des skis sous forme d'énergie élastique. En effet, pendant la phase de conduite, une partie de la force de réaction du skieur va contraindre les skis et les fléchir sur l'axe longitudinal. A la fin du cycle cette énergie peut être restituée au skieur sous forme d'énergie cinétique. Une hypothèse en recherche et développement du matériel décrit qu'il est possible que les skieurs de haut niveau puissent utiliser cette énergie élastique pour se projeter en avant à la fin du virage.

La performance en ski alpin est définie comme l'optimisation du compromis entre une vitesse de passage maximale et un chemin parcouru minimal (Hébert-Losier et al., 2014). D'un point de vue macroscopique le temps de course est un indicateur pertinent du niveau de performance. Néanmoins, afin de comprendre les mécanismes expliquant les différences de performance entre les skieurs il est recommandé de calculer l'indice $\Delta e_{mech}/v_{in}$.

1.2.3 Vitesse et distance parcourue :

La vitesse de passage et la vitesse verticale des skieurs sont fortement corrélées à leur niveau de performance (Federolf, 2012). Cette vitesse varie au cours d'un virage en ski alpin. Elle est maximale au début de la partie tournante du virage durant laquelle elle décroît pour être minimale à sa fin. La phase de transition entre les parties tournantes est caractérisée par une accélération du skieur (Figure

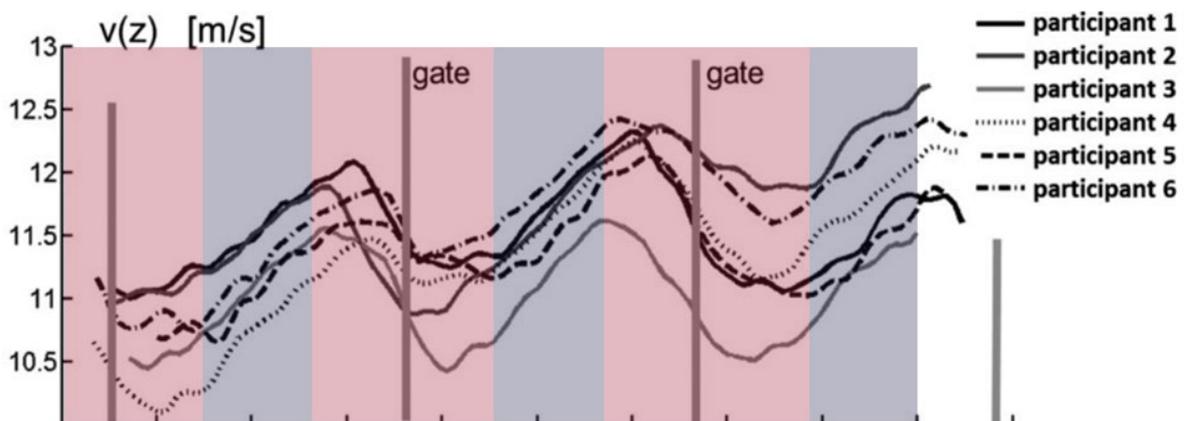


Figure 4 : Evolution de la vitesse de déplacement (en m/s) de 6 skieurs durant 3 virages successifs, les zones rouges représentent approximativement les phases tournantes du virage, et les zones bleues les phases de ligne droite. Les traits verticaux représentent le passage de la porte. Issue de Federolf *et al.* 2012.

4). Le niveau de variabilité de la vitesse durant le cycle est déterminé par la stratégie de trajectoire du skieur.

Lors de la phase d'initiation de chaque virage, le skieur doit planifier ses actions et la trajectoire qu'il cherche à réaliser. La trajectoire réalisée par le skieur a une influence sur le temps de passage du virage (Brodie et al., 2008) et le temps de section (Supej and Cernigoj, 2006) en GS. D'après les informations

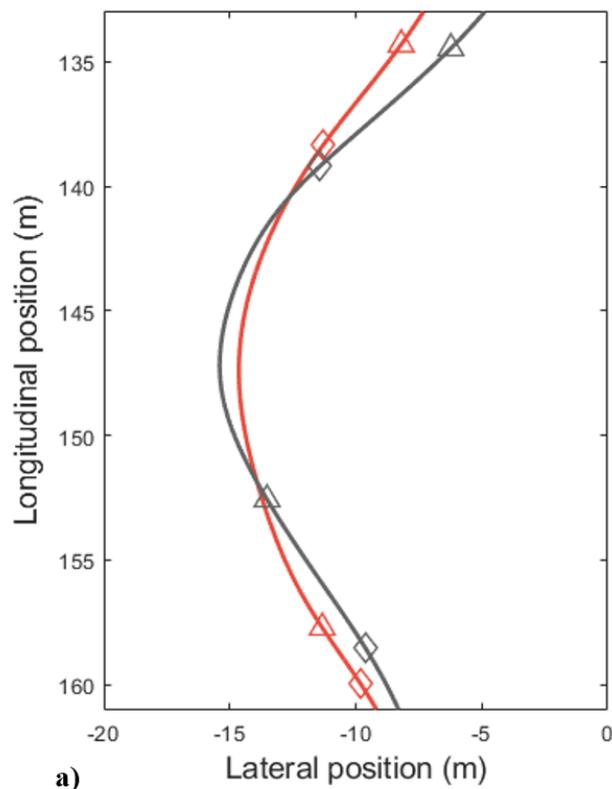


Figure 5 : Evolution de la trajectoire sur les axes longitudinal et latéral en mètres du centre de gravité de deux skieurs réalisant soit une trajectoire en S (orange) soit en Z (gris). Les triangles et les diamants représentent respectivement les positions de passage du rayon du virage au-dessus et en dessous d'un seuil de 30m. Issue de Delhaye *et al.* 2020.

à notre disposition, la trajectoire optimale peut être définie par : la trajectoire la plus courte tout en minimisant la perte d'énergie cinétique (Hébert-Losier et al., 2014). La trajectoire optimale correspond à un compromis entre la trajectoire faisant perdre le moins de vitesse (stratégie en S) et la trajectoire la plus courte (stratégie en Z) (Hirano, 2006). Ces deux stratégies de trajectoire (ou stratégie de ligne) sont représentées sur la Figure 5. Dans la suite de ce document de thèse le terme stratégie se rapportera aux stratégies de trajectoire choisies par le skieur pour réaliser un enchaînement de virages. La stratégie en S se concentre sur la minimisation de la dissipation d'énergie ce qui se concrétise pour le skieur par une minimisation de l'utilisation de la conduite dérapée. Ainsi, cette stratégie vise à maximiser l'utilisation de la conduite coupée (ou carvée) durant la

plus grande part de cycle de virage possible. Le virage en S se définit alors par de longs virages ronds, initiés haut sur la ligne de pente, avec des rayons de courbe élevés et réguliers sur l'ensemble de la phase de conduite. Conformément à l'approche 2 de découpage de cycle (partie 1.1.2), un cycle de virage selon la stratégie en S se définit par une courte phase de ligne droite et une longue partie tournante. Le skieur gagne peu de vitesse durant la partie de ligne droite à cause du faible temps passé dans celle-ci et généralement d'un angle de traversée plus éloigné de la ligne de pente. Durant la partie tournante du virage le skieur doit limiter au maximum le dérapage pour réduire l'énergie dissipée par friction. Plus le rayon du virage est grand, plus il est facile de limiter le dérapage. Les entraîneurs conseillent l'utilisation de cette stratégie durant les phases de course peu dynamiques, c'est-à-dire les

sections plates, et peu tournantes à haute vitesse. Cette stratégie n'est pas recommandée après une grande dissipation d'énergie (par exemple un virage dérapé dû au tracé ou une erreur du skieur) car elle ne permet pas de regagner rapidement de l'énergie cinétique. (Lind and Sanders, 2004). La stratégie de ligne en Z repose sur la maximisation du transfert d'énergie potentielle en énergie cinétique pendant la phase de ligne droite, suivie d'une trajectoire la plus proche possible de la ligne de pente pendant la partie tournante du virage. Les skieurs prolongent au maximum la phase de ligne droite entre les portes en retardant l'initiation de la partie tournante permettant un gain de vitesse important entre les virages. Cependant cette

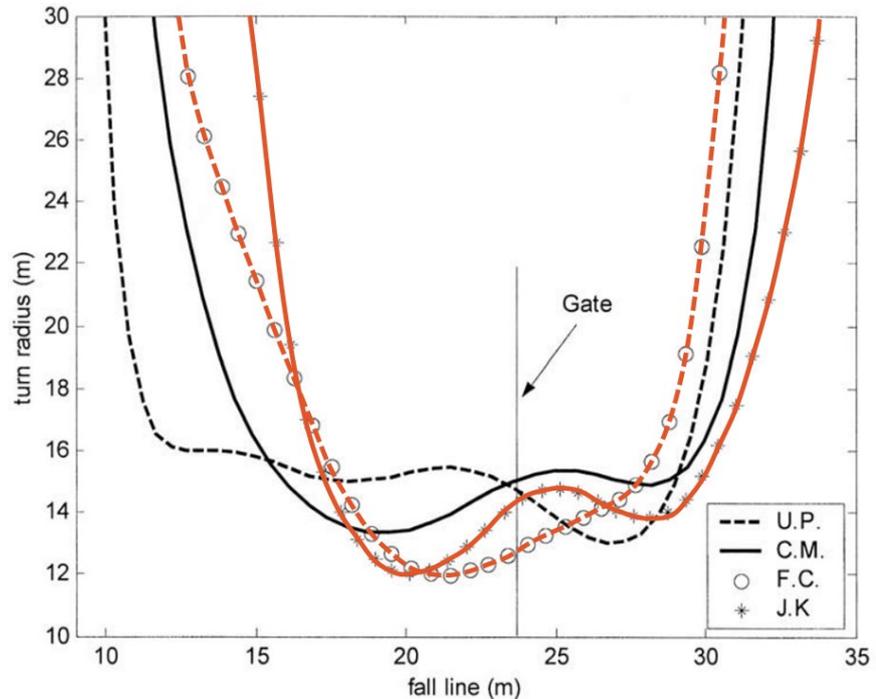


Figure 6: Evolution du rayon du courbure (m) en fonction du déplacement longitudinal (m) de quatre skieurs réalisant soit une trajectoire en S (orange) soit en Z (gris). Issue de Supej *et al.* 2008.

plus serrés (i.e. de plus faible rayon – Figure 6) demandant de capacités techniques élevées pour conserver une conduite coupée. Une autre caractéristique de la stratégie en Z est une distance parcourue plus courte que la stratégie en S (Hébert-Losier *et al.*, 2014). Lorsque le rayon devient trop faible, la conduite coupée devient impossible à maintenir en raison de force radiales trop importante et le skieur dérape (concept détaillé dans la partie 2.2) induisant une forte dissipation d'énergie cinétique. Les entraîneurs conseillent cette stratégie dans les sections dynamiques, raides et tournantes.

Ces deux stratégies de ligne induisent des comportements de dissipation énergétique drastiquement différents notamment en termes de variabilité de dissipation d'énergie au cours du virage. Théoriquement ces deux stratégies représentent les bornes opposées d'un continuum stratégique identifiable à partir de la longueur de la ligne droite. Peu d'études ont évalué l'interaction entre la stratégie de ligne et le niveau de performance des skieurs. Les articles qui se sont concentrés sur la corrélation entre l'énergie spécifique dissipée non normalisée à la vitesse d'entrée (Δe_{mech}) (voir partie 1.2.3) et la stratégie de ligne utilisée ne présentent pas de corrélations claires entre ces paramètres ni en slalom (Federolf, 2012) ni en GS (Supej, 2008). Des études similaires ont été menées

en observant l'interaction entre la trajectoire et la dissipation d'énergie mécanique spécifique normalisée à la vitesse d'entrée ($\Delta e_{mech}/v_{in}$) en slalom (Supej et al., 2011) et en GS (Spörri et al., 2018b). Dans cette dernière, les auteurs testent l'hypothèse d'un modèle explicatif de la performance (temps de course) à partir de l'énergie spécifique dissipée normalisée à la vitesse d'entrée et à la distance parcourue pendant le virage. Les meilleurs skieurs sont ceux qui minimisent $\Delta e_{mech}/v_{in}$ sur l'ensemble du virage. En revanche, la distance de course parcourue n'est pas un paramètre prédictif de la performance de course. Pourtant certaines informations laissent penser que la trajectoire en Z pourrait être favorisée par les athlètes de haut niveau. En effet le faible rayon de virage est associé à des forces radiales plus importantes durant la partie tournante du virage (partie 2.2.2.4) (Nakazato et al., 2011), et requiert de ce fait des forces musculaires plus importantes. Les athlètes de haut niveau présentent des capacités techniques (capacités à carver à faible rayon de virage) et musculaires (Vogt and Hoppeler, 2014) élevées. Ces capacités leur offrent la possibilité de choisir une trajectoire plus directe (plus proche de la borne extrême Z) tout en conservant un contact ski-neige évitant le dérapage. Enfin la stratégie utilisée par un skieur dans un virage semble être la même pour toute sa descente (Federolf, 2012). Cette constatation tend à considérer l'hypothèse selon laquelle le skieur ne choisit pas seulement une trajectoire en fonction des caractéristiques d'entrée de virage (vitesse, trajectoire, équilibre, fatigue...), mais également d'un profil stratégique le faisant favoriser une trajectoire en Z ou en S basée sur ses capacités physiques et techniques.

En résumé la trajectoire choisie par le skieur est un facteur explicatif important de la performance en ski alpin. La modification de la trajectoire va influencer directement les actions du skieur durant le cycle ainsi que l'interaction ski-neige. Chacune des stratégies possède des avantages et des mouvements caractéristiques qui lui sont propres. L'absence dans la littérature d'une mise en évidence de l'interaction entre performance et stratégie semble indiquer qu'un compromis entre les deux stratégies doit être trouvé par le skieur à chaque virage pour être performant. Il semblerait enfin que les skieurs aient une stratégie privilégiée. De ce fait deux skieurs peuvent avoir des stratégies opposées et une performance identique sur une même section, ce qui complexifie l'analyse de l'interaction entre trajectoire et performance en ski alpin.

1.3 Tracé de course et morphologie de piste :

Comme nous l'avons précédemment abordé, chaque virage en ski alpin est unique. La motricité du skieur dans un virage est influencée par de nombreux paramètres comme sa vitesse et sa position d'entrée dans le virage, son équilibre, son choix stratégique, son niveau de fatigue, ses capacités musculaires et techniques. Beaucoup de ces paramètres sont dépendants de la morphologie de la piste et du tracé de course. Chaque discipline du ski alpin est caractérisée par son tracé et sa morphologie de piste. Entre les disciplines du Slalom géant (GS), du Super géant (SG) et de la Descente

(DH), il existe des différences significatives sur de nombreux paramètres comme la distance de course, le dénivelé, la pente, le nombre de portes et les distances entre les portes (absolue, horizontale et verticale) (Gilgien et al., 2015a). Dans cette étude les différences entre les trois disciplines précédemment citées et le slalom (SL) n'ont pas été évaluées.

Au sein d'une même discipline, on retrouve certaines relations entre tracé de course et morphologie de piste bien décrites dans la littérature. En GS, avec l'augmentation de la pente de la piste, la distance absolue entre les portes a tendance à diminuer alors que la distance horizontale entre les portes augmente. Ce positionnement des portes induit pour les skieurs des virages plus courts et plus tournants dans les phases de pente raide. De la même manière, en slalom (SL), le rayon de virage diminue lorsque la pente augmente (Supej et al., 2015). L'énergie mécanique spécifique dissipée dans le virage ($\text{diff}(e_{\text{mech}})$) augmente également avec la pente de la piste.

Ces relations entre morphologie de piste et tracé de course influent également sur la cinétique du skieur. En effet, plus la pente est faible plus les vitesses de passage mesurées sont importantes. Cette relation est décrite entre les disciplines et au sein du GS et du SG. D'après Gilgien *et al.*, les sections de course (SG et GS) dans les pentes raides sont donc caractérisées par de plus larges changements de direction. En SG, cette relation est complétée par une corrélation négative entre la vitesse du skieur et la distance horizontale entre les portes. L'interrelation entre morphologie, tracé et cinétique du skieur semble présente en SL, GS et SG. En GS les sections raides caractérisées par des pentes supérieures à 25° sont généralement plus dynamiques (plus grande distance horizontale et plus faible distance absolue) générant des virages plus compacts (plus grande quantité de rotations concentrée en une faible durée). Ces virages sont caractérisés par des vitesses de passage plus faibles et des rayons de virages plus courts. Ces résultats proviennent de mesures quantitatives réalisées sur des tracés de coupe du monde (572 en GS, 201 en GS, 271 en DH). Cependant un manque de consensus existe dans la littérature sur ce point. Les résultats abordés précédemment sont différents de ceux d'un article comparant des tracés dans des situations de neige et de morphologie de piste identiques (Spörri et al., 2012a). Dans l'étude de Spörri *et al.*, deux tracés sont skiés par les skieurs dans la même pente, l'un avec des distances verticales et horizontales respectivement de 26m et 12m et l'autre de 26m et 10m. D'après leurs résultats, à pente égale un tracé avec des distances horizontales plus importantes n'induit pas de différence de vitesse de passage moyenne ou maximale pendant le virage. L'origine de cette absence de différence statistique peut s'expliquer par des vitesses de passage sous la vitesse barrière dans les deux conditions.

La vitesse barrière peut être considérée comme la vitesse maximale pour laquelle un skieur peut effectuer une trajectoire dans une condition donnée. En effet comme discuté précédemment, la vitesse en ski alpin a pour origine principale la transformation d'énergie potentielle et non la

production musculaire de l'athlète. De ce fait, contrairement à d'autres sports où il est impossible pour l'athlète d'atteindre des vitesses supérieures à ses capacités de production musculaire, les vitesses en ski alpin peuvent nécessiter des forces musculaires surpassant les capacités du skieur. L'augmentation de la vitesse de passage est généralement associée à un gain de performance (Supej, 2008; Spörri et al., 2012b; Supej et al., 2013). Cependant, au-dessus d'un certain niveau cette vitesse sera supérieure aux capacités techniques et physiques du skieur et induira une dégradation de la motricité du skieur (équilibre, organisation posturale...) (Supej and Holmberg, 2019). Cette dégradation implique généralement une perte d'efficacité dans la réalisation d'un virage ce qui cause une grande dissipation d'énergie mécanique notamment par dérapage, et expose le skieur à des erreurs pouvant entraîner des chutes et des blessures (Supej et al., 2011). Cette vitesse limite est caractérisée dans la littérature comme la vitesse barrière (*i.e.* « *velocity barrier* »). Les mécanismes sous-jacents à ce principe de vitesse barrière sont souvent évoqués mais difficiles à évaluer expérimentalement. En effet elle n'est pas seulement dépendante du skieur, mais de l'ensemble des facteurs influençant un virage en ski qu'ils soient internes au skieur (capacités musculaires, physiologiques, techniques, perceptives et le niveau de fatigue du skieur) et externes (trajectoire, nivologie, visibilité, matériel...). Il semblerait cependant qu'elle soit déterminante du niveau de performance du skieur à condition que tous les skieurs soient en situation de l'atteindre. En effet dans une situation de course où tous les skieurs sont en dessous de la vitesse barrière (comme au départ d'une course), cette caractéristique n'est pas déterminante de la performance. La capacité à atteindre rapidement la vitesse barrière pourrait en revanche être un marqueur de la performance.

Dans la situation détaillée dans l'article de Spörri *et al.* (2012), il est très probable que le skieur ait la marge suffisante pour réaliser son virage dans les deux conditions de dynamisme de tracé. En effet, dans les conditions expérimentales de cette étude, une vitesse d'approche plus élevée aurait certainement permis de révéler des différences cinématiques et cinétiques importantes entre les deux tracés. Il semble important de différencier (indépendamment du tracé) les situations au regard de la vitesse du skieur par rapport à sa vitesse barrière. Lorsque la vitesse de déplacement du skieur est inférieure à sa vitesse barrière celui-ci est dans une situation de recherche de vitesse pour combler cette marge. A l'inverse lorsque le skieur a une vitesse supérieure à sa vitesse barrière, il doit au choix diminuer sa vitesse ou modifier sa trajectoire (en augmentant le rayon de virage) pour effectuer son virage. La vitesse du skieur au regard de sa vitesse barrière semble donc un point déterminant dans sa motricité.

Il est néanmoins primordial de prendre les paramètres de tracé et de morphologie de piste en considération dans l'analyse de la pratique du ski alpin. D'autant plus que ces paramètres semblent avoir une influence sur la cinétique du skieur. En effet la temporalité d'apparition et la durée des

phases de virage (Spörri et al., 2012a) sont dépendantes du tracé de course. Lorsque la distance horizontale augmente de 2 mètres, la phase de conduite est plus longue de 6%. Spörri *et al.* (2012) décrivent que la vitesse de passage dans la phase de complétion est plus faible lorsque la distance horizontale augmente. Ces virages seront donc caractérisés par des vitesses de sortie de virage plus faibles. Ce résultat a une taille d'effet importante mais n'est pas significatif pour le virage étudié. Ce point peut nous laisser penser que la distance horizontale entre deux portes peut avoir certes des conséquences sur le virage étudié, mais surtout sur le virage à suivre.

2 Analyse cinétique du ski alpin :

2.1 Description générale des forces en ski alpin :

Comme abordé précédemment, la performance en ski alpin est complexe et multifactorielle. L'objectif de ce chapitre est de comprendre l'interaction entre les actions cinétique du skieur et les conséquences sur la performance. Une synthèse de ces interactions est présentée dans la Figure 7, issue des articles de travaux de thèse de de Robert C. Reid. (2010) Elle a été modifiée pour correspondre aux connaissances actuelles et au vocabulaire utilisé dans cette thèse. Les actions du skieur (case n°1) sont décrites dans la partie 1.1.1. Les conséquences de l'orientation du ski (case n°2), sur les forces normale, latérale et transverse (case n°4) seront décrites dans la partie 2.2.2. La revue des connaissances relatives aux forces appliquées au ski (case n°3) sera détaillée dans la partie 2.4. Dans cette partie, l'influence des caractéristiques techniques et physique du skieur sur les paramètres cinétiques (case n°5) seront décrits dans la partie 2.4.3 ; celles des caractéristiques de la neige (case n°6) et de l'équipement (case n°7) seront respectivement discutées dans les parties 2.2.2.1 et 2.2.2.4. Enfin les études détaillant les interactions entre la trajectoire et la vitesse des skieurs avec leurs performance en course (case n°9) seront détaillées dans la partie 1.2.2.

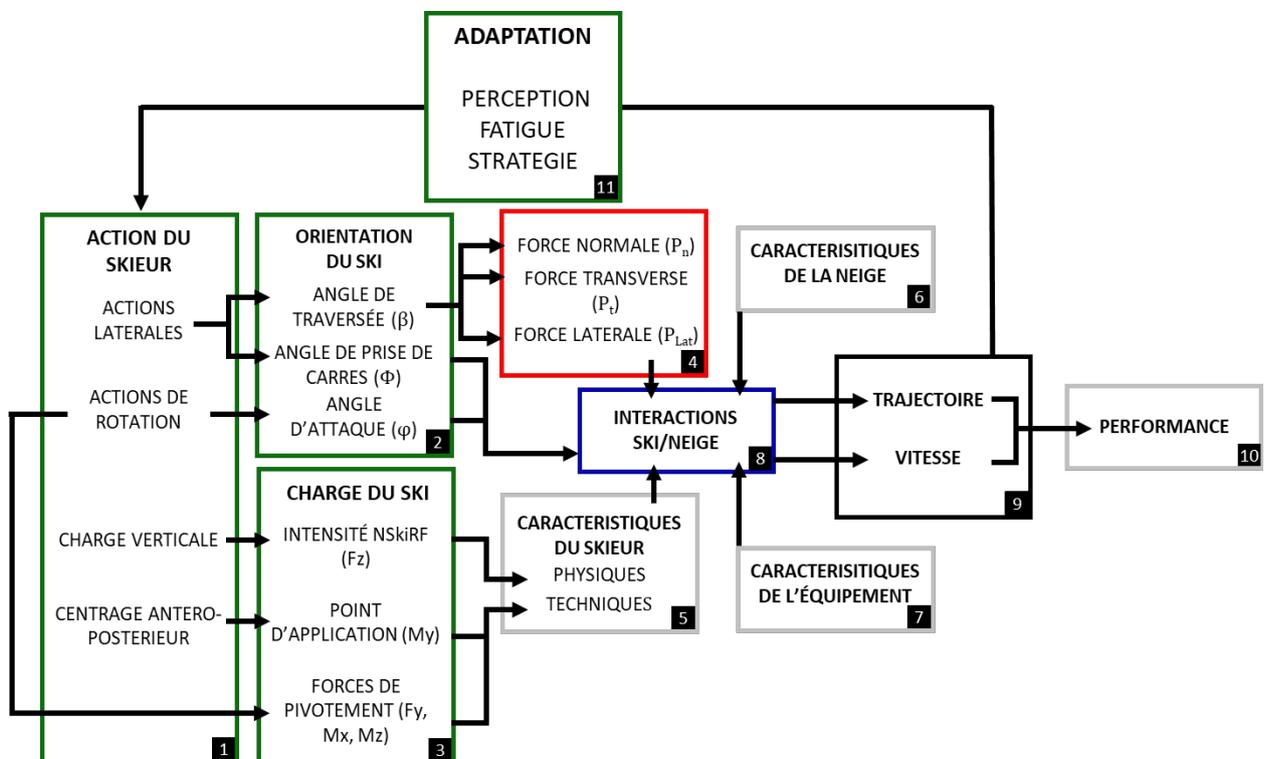


Figure 7 : Modèle conceptuel des interactions conduisant à la réalisation de virage en ski alpin. Issue et adapté de Reid *et al.* 2010

2.2 Forces et interactions ski-neige :

2.2.1 Fondamentaux de la mécanique Newtonienne :

Afin de comprendre les enjeux de l'interaction ski/neige et les mécanismes biomécaniques sous-jacents à leurs techniques, il est nécessaire de comprendre les fondamentaux de la mécanique Newtonienne. En mécanique Newtonienne, une force est la modélisation d'une action mécanique exercée par un objet sur un autre. La force est représentée en mécanique par un vecteur ayant un point d'application, une direction, un sens et une intensité. L'unité utilisée dans le système international pour caractériser une force est le Newton (N). Le lien entre les forces appliquées à un système et son mouvement sont régis par les 3 lois fondamentales de la mécanique (Newton, 1687) : Le principe d'inertie : « Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui, et ne le contraigne à changer d'état. »

Le principe fondamental de la dynamique : « La dérivée dans le temps de la quantité de mouvement est égale à la somme des forces extérieures qui s'exercent sur le solide. »

Le principe d'action réaction : « L'action est toujours égale à la réaction ; c'est-à-dire que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales et de sens contraires. »

La notion de moment de force (τ) est la capacité d'une force à faire tourner un objet autour d'un centre de rotation. Il se calcule par le produit de la force (F) et du bras de levier réel, c'est-à-dire la distance perpendiculaire par rapport à la direction de la force entre son point d'application et le centre de rotation ($d \perp$) défini par l'Équation 7 :

$$\text{Équation 7} \quad \tau = d \perp \times F$$

L'unité utilisée dans le système international pour caractériser un moment de force est le Newton mètre (Nm). Le principe fondamental de la dynamique s'applique également aux moments de force. Ainsi un objet en rotation a tendance sans application de force extérieure à continuer sa rotation autour de son point de rotation.

2.2.2 Application mécanique aux situations de ski alpin :

2.2.2.1 Descente en ligne droite :

Nous pouvons commencer l'analyse du ski alpin par une description des forces extérieures appliquées au skieur lorsque le skieur descend une pente d'inclinaison α en ligne droite et dans l'axe de la ligne de pente (Figure 8). Nous considérons dans cette situation que le skieur ne réalise que des actions musculaires isométrique afin de conserver sa position. Les informations détaillées dans ce document proviennent principalement de l'ouvrage de *Physics of Skiing : skiing at triple point* (Lind and Sanders, 2004)

La force motrice principale en ski alpin est le poids (P en N, Équation 8). Il est défini par le produit de la masse du skieur et de la constante gravitationnelle :

Équation 8
$$P = m \times g .$$

Dans un référentiel galiléen, le poids est toujours dirigé verticalement vers le bas. Il est possible de décomposer ce poids en 2 composantes selon le référentiel de l'avancement du skieur sur la piste. Le référentiel d'avancement du skieur sur la piste est représenté par les fines lignes rouges sur les Figure 8, 10, 11. Il peut être défini comme l'axe x longitudinal à l'avancement du ski, l'axe y transversal du ski, et l'axe z perpendiculaire au ski et à la pente. Le point d'application de la force est situé au niveau du centre des masses du skieur. Dans les figures de cette partie (8, 10 ,11 et 15) et pour des raisons de clarté le poids sera arbitrairement représenté au niveau de l'interaction ski/neige. Les implications de cette représentation sont détaillées dans la partie 2.2.2.2. Dans le référentiel x, z l'intensité de la composante du poids projetée sur l'axe Z (normale à la piste) est notée P_n . Il est possible dans le triangle rectangle coplanaire à l'avancement du skieur (en rouge sur la Figure 8) de calculer l'intensité

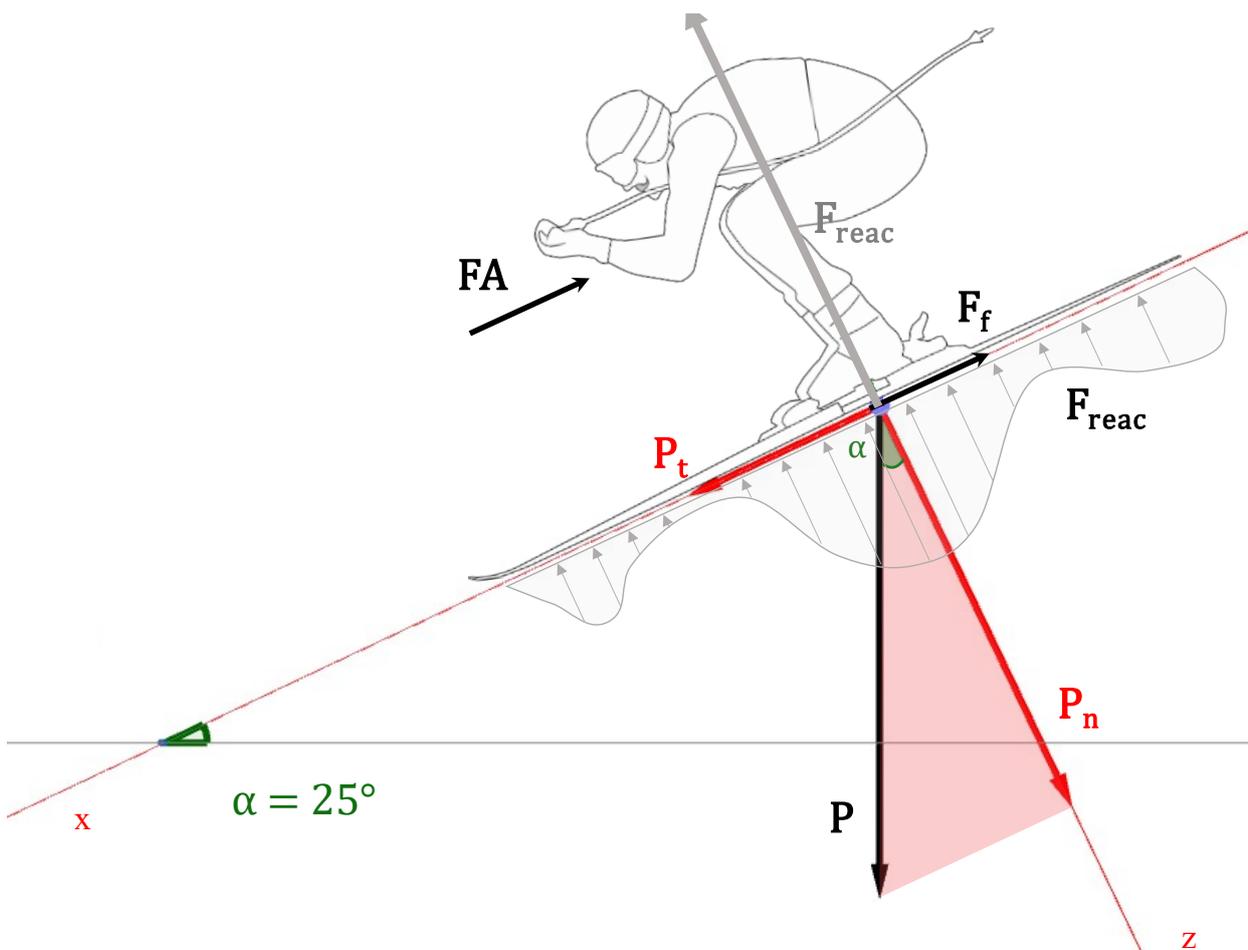


Figure 8 : Représentation du bilan des forces extérieures appliquées à un skieur descendant dans la ligne de pente d'une piste d'une inclinaison $\alpha=25^\circ$. Les différentes forces sont représentées par des flèches : Le poids (P), la composante normale du poids (P_n), la composante tangentielle du poids (P_t), la force de réaction au sol résultante et sa distribution représenté sous le ski (F_{reac}) et les forces de friction aérodynamique (FA), et de friction ski/neige (F_f).

de P_n (Équation 9). La part du poids projetée sur l'axe X et tangente à l'avancement du skieur (P_t) peut être calculée à partir de l'angle de pente (

Équation 10). Elle est parfois considérée dans la littérature comme la composante motrice du poids (Vaverka et al., 2012). En plus d'être dépendante de la masse du sujet, les intensités de ces deux composantes sont dépendantes de l'angle d'inclinaison (α) de la piste. Plus la pente est importante plus P_t augmente et P_n diminue.

$$\begin{aligned} \text{Équation 9} \quad & P_n = m \times g \times \cos \alpha \\ \text{Équation 10} \quad & P_t = m \times g \times \sin \alpha \end{aligned}$$

La force de réaction (F_{reac}) au sol résultante correspond à la somme des forces de réaction distribuées sur toute la surface du ski en contact avec la neige. Cette répartition est dépendante des caractéristiques géométriques et mécaniques du ski utilisé ainsi que de la position relative du CG du skieur par rapport à celui du ski. Sans déformation du support, l'intensité et la direction de la force de réaction sont rigoureusement égales à celles de P_n . Seul le point d'application (situé à l'interface ski neige) et le sens diffèrent. Ainsi, F_{reac} résultante est perpendiculaire à la pente. L'intensité de la résultante de force de réaction est donc dépendante des caractéristiques du poids et de la pente. Dans certaines situations en ligne droite, en ski alpin, la F_{reac} peut être inférieure à P_n , à cause de la déformation de la neige. Dans cette situation on observe une accélération du skieur sur l'axe z respectant la 2nd loi de Newton (avec $F_{\text{reac}} - P_n = m \cdot a_z$).

Le skieur est également soumis à la force aérodynamique (FA), pouvant être décomposée selon ses composantes : la trainée (FA_t Équation 11) et la portance (FA_p). La portance est la force perpendiculaire à l'écoulement de l'air et dirigée vers l'extrados (face bombée d'une aile d'avion). Le corps d'un skieur ne présentant pas de forme en aile d'avion, son coefficient de portance C_z est quasi nul. La dépression d'air au-dessus du skieur est minime, l'intensité de la portance est donc quasi nulle. Cette force est d'ailleurs négligée dans les études portant sur les résistances aérodynamiques en ski alpin (Barelle et al., 2004). La trainée est parallèle à l'écoulement de l'air sur le skieur et opposée au sens de déplacement. Elle est dépendante de la masse volumique de l'air (ρ , $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), de la surface frontale du skieur (S , m^2), du coefficient de forme du skieur (C_x , sans unité) et de la vitesse d'écoulement de l'air (v , $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). En l'absence de vent cette vitesse est égale à l'avancement résultant du skieur. La trainée est calculée grâce à la formule suivante :

$$\text{Équation 11} \quad FA_t = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times C_x \times v^2$$

En moyenne, l'intensité de cette force représente 15% de l'énergie totale dissipée sur une course en slalom géant (Supej et al., 2013), mais le pourcentage à un instant t varie en fonction de la vitesse.

La dernière force en action dans cette situation est la force de friction de la neige sur le skieur F_f . Sa

direction est parallèle au déplacement du skieur et son sens est opposé à son déplacement. L'interaction de friction entre le ski et la neige est très complexe et dépendante de nombreuses variables. La structure de la semelle, le fart présent sous les skis et les frottements liés au déplacement font fondre momentanément la neige créant une mince pellicule d'eau entre le ski et la neige réduisant les F_f . On parle alors de friction lubrifiée. Par opposition, lorsque le ski est à l'arrêt et la neige très froide cette pellicule d'eau ne se forme pas, on parle alors de frottement sec.

Les frottements secs sont bien définis par la loi de Coulomb. Lorsque le système est statique la force de friction est considérée comme la force d'adhérence F_{f0} . Cette force est dépendante de la force normale entre le ski et le support (P_n), et du coefficient d'adhérence (ou coefficient de friction statique) entre les deux surfaces μ_0 (Équation 12) :

$$\text{Équation 12} \quad F_{f0} = P_n \times \mu_0$$

Une fois le ski en mouvement, la force de frottement sec entre deux solides est définie par le produit du coefficient de friction dynamique (μ) et de la force normale (Équation 13):

$$\text{Équation 13} \quad F_f = P_n \times \mu.$$

Notons que μ n'est pas constant sous le ski. Il varie en fonction de la partie du ski en contact avec la neige, les carres du ski ayant un coefficient de friction plus important que la semelle. La friction entre le ski et la neige selon le modèle simple de Coulomb n'est influencée ni par la surface de contact ni par la vitesse de déplacement. Néanmoins, en pratique, ce modèle ne pourra être appliqué que dans très

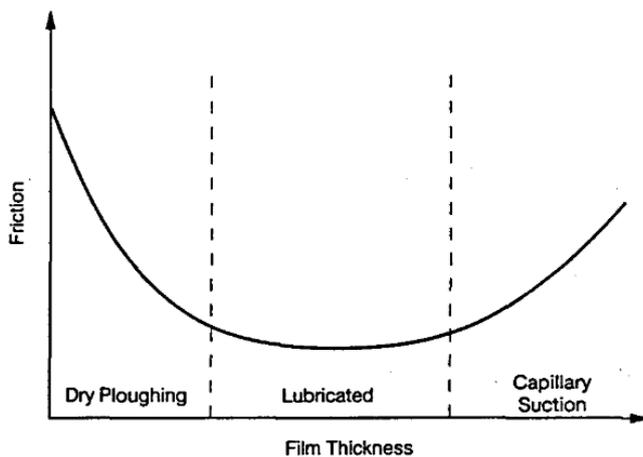


Figure 9 : Représentation de l'intensité de friction ski/neige en fonction de l'épaisseur de film d'eau sous le ski. La friction peut être caractérisée de sèche (*Dry ploughing*), lubrifiée (*lubricated*) ou induire une succion capillaire (*capillary suction*) en fonction de l'épaisseur du film d'eau (*film thickness*) Issue de Colbeck *et al.* (1994)

peu de situation en ski alpin, et n'est pas applicable à la situation de ski de compétition traitée dans ce manuscrit. Dès lors qu'une pellicule d'eau se crée entre le ski et la neige, le modèle de Coulomb ne peut plus être appliqué et sera remplacé par le modèle de frottements lubrifiés. Ce modèle décrit les forces hydrodynamiques associées au cisaillement du film d'eau présent entre le ski et la neige et il dépend de l'épaisseur de ce film. Le modèle est aussi influencé par la surface de contact réelle entre le ski et la neige (A , m^2), l'épaisseur du film

d'eau (h , m), la vitesse de déplacement du ski (v , $m.s^{-1}$) et la viscosité du film d'eau (η , $kg.m^{-3}$) (Colbeck, 1994). La force de friction du film (F_{film} , Équation 14) est donc définie par la formule suivante :

Équation 14
$$F_{Ffilm} = \frac{\eta \cdot A \cdot v}{h} \times P_n.$$

Selon cette équation, plus la valeur h est importante, plus les F_{Ffilm} seront faibles. Cette équation n'est pourtant pas en accord avec les résultats expérimentaux de Colbeck *et al.* (1992). Un modèle empirique fondé sur des valeurs expérimentales propose l'existence d'une relation polynomiale entre la hauteur du film d'eau et la F_f (Figure 9). Si la hauteur du film est trop faible, les frottements entre le ski et la neige deviennent secs augmentant la F_f . Au contraire, lorsque la hauteur du film d'eau est trop importante, une attraction capillaire apparaît, augmentant ainsi la F_f . Il existe, d'après ce modèle, une hauteur de film optimal pour réduire la F_f . Nous pouvons également noter que η (Équation 15) est influencé par la température de la neige (T_n , °C) et définie par la formule suivante :

Équation 15
$$\eta = (1.79 - 0.054T_n) \times 10^{-3}$$

Ce modèle permet d'expliquer une part plus importante des frottements subis en ski de compétition. Les forces de frottement seront ainsi plus importantes avec l'augmentation de la température de la neige. Les forces de friction peuvent être également influencées par les forces de compactage et de déplacement de la neige par le ski induites par le déplacement du skieur ($F_{dép}$). Cette force est influencée par la densité de la neige (ρ_n , kg.m⁻³), la largeur du ski, la profondeur verticale de la trace (L , Δp , m) et la vitesse du skieur. Ainsi la F_f diminuera avec la densité de la neige. $F_{dép}$ est calculée avec (Équation 16).

Équation 16
$$F_{dep} = \rho_n \times L \times \Delta p \times v^2$$

En conclusion, les forces de friction ski-neige sont complexes à calculer même en ligne droite, et sont dépendantes de nombreux paramètres qu'ils soient environnementaux (température et dureté de la neige), matériels (longueur, profil du ski et fart utilisé) ou liés à la motricité du skieur comme l'angle de prise de carre (Federolf *et al.*, 2010b). Enfin ils sont fortement influencés par l'intensité et l'orientation de la charge appliquée par le ski sur la neige.

2.2.2.2 Traversée de piste :

En ski alpin les skieurs sont aussi amenés à réaliser des lignes droites ne suivant pas la ligne de pente, notamment entre deux virages en compétition. Cette situation est qualifiée de traversées de piste. L'angle de traversée par rapport à la ligne de pente (β) influence la part du poids qui accélère le sujet (Figure 10). La composante P_t suivant l'axe x (transversale au mouvement) est désormais calculée en considérant l'angle de traversée de la pente β (Équation 17). La composante du poids perpendiculaire au sens du mouvement (P_{lat}) doit aussi considérer β dans son calcul (Équation 18). Le cas abordé précédemment est un cas particulier où $\beta=90^\circ$ le skieur est alors face à la pente, donc $\sin \beta = 1$. Dans ce cas particulier l'

Équation 10 est égale à l'Équation 17.

Équation 17 $P_t = m \times g \times \sin \alpha \times \sin \beta$

Équation 18 $P_{lat} = m \times g \times \sin \alpha \times \cos \beta$

A partir des vecteurs P_t et P_{lat} , il est possible de tracer un triangle rectangle coplanaire à la piste dans le plan (x,y) (en bleu sur la Figure 10). Dans ce triangle rectangle, il est possible de calculer la force attirant le skieur dans la ligne de pente (F_p) grâce au théorème de Pythagore (Équation 19, Équation 20 et Équation 21). Notons que durant une traversée, la force P_{lat} est compensée par la force de friction longitudinale du ski. Néanmoins, lorsque P_{lat} est suffisamment importante pour vaincre les forces de friction, le skieur se retrouve en situation de dérapage. Dans cette situation l'avancement du skieur n'est plus colinéaire avec l'axe des skis. Le déplacement du skieur tend alors vers la ligne de pente.

Équation 19 $F_p = \sqrt{P_t^2 + P_{lat}^2}$

Équation 20 $F_p = m \times g \times \sqrt{(\sin^2 \alpha \times \sin^2 \beta) + (\sin^2 \alpha \times \cos^2 \beta)}$

Équation 21 $F_p = m \times g \times \sin \alpha \times \sqrt{\sin^2 \beta + \cos^2 \beta}$

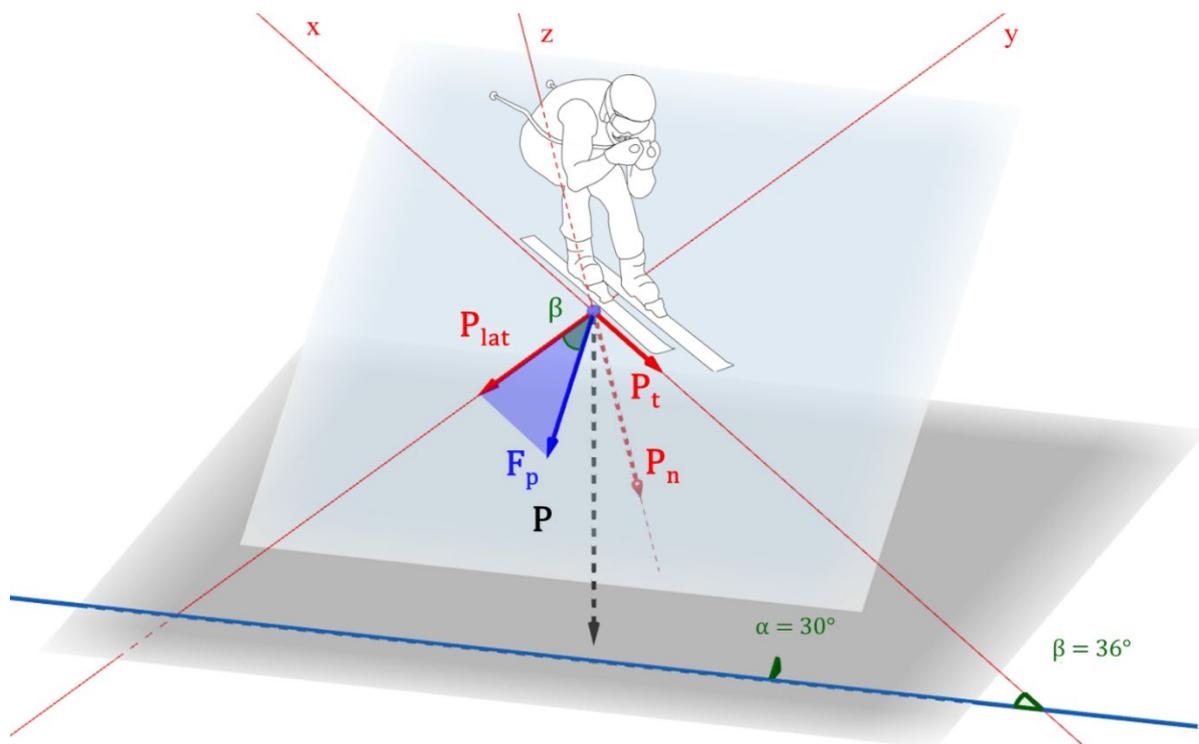


Figure 10 : Représentation du bilan des forces d'un skieur descendant dans une pente d'une inclinaison $\alpha=25^\circ$ avec un angle de traversée $\beta=36^\circ$. Les différentes forces sont représentées par des flèches : Le poids (P), sa composante normale (P_n), sa composante transverse (P_t), sa composante latérale (P_{lat}), et la force tirant le skieur dans la pente (F_p).

Afin de conserver son équilibre en ligne droite, le skieur doit garder son CG au-dessus de son polygone

de sustentation afin d'éviter un moment latéral (sur l'axe X) le faisant basculer dans la pente (Figure 11). Autrement dit, le CG du skieur doit être aligné verticalement avec le point d'application de la force de réaction au sol. Le skieur s'incline ainsi latéralement autour de l'axe longitudinal de ses skis d'un angle Φ . Afin de calculer l'angle Φ , un triangle dans le plan (y,z) (transversal au skieur) doit être tracé, défini par les vecteurs P_n et P_{lat} (en vert sur la Figure 11). Ainsi Φ est calculé grâce à l'Équation 22 et l'Équation 24 et la démonstration présentée à l'Équation 23. Enfin, dans le même triangle rectangle, il est possible de calculer la force transmise perpendiculairement au ski (F_{load}) selon l'axe du skieur grâce au théorème de Pythagore (Équation 25).

$$\text{Équation 22} \quad \tan \Phi = \frac{P_{lat}}{P_n} = \frac{\sin \alpha \times \cos \beta}{\cos \alpha}$$

$$\text{Équation 23} \quad \frac{\sin \vartheta}{\cos \vartheta} = \frac{\frac{AC}{BC}}{\frac{AB}{BC}} = \frac{AC}{BC} \times \frac{BC}{AB} = \frac{AC}{AB} = \tan \vartheta$$

$$\text{Équation 24} \quad \tan \Phi = \tan \alpha \times \cos \beta.$$

$$\text{Équation 25} \quad F_{load} = m \times g (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \times \cos^2 \beta)^{1/2}$$

Notons que si le skieur traverse perpendiculairement la piste alors $\beta = 0^\circ$, et l'angle $\Phi = \alpha$. Dans cette situation P_{lat} est égale à zéro et la force de réaction du sol est égale au poids. Pour conclure, la force verticale que doit appliquer le skieur lors d'une traversée est dépendante de la constance gravitationnelle, de sa masse, de l'angle de la pente et de son angle de traversée. En négligeant les techniques d'angulation utilisées par les skieurs, l'angle d'inclinaison Φ correspond à l'angle de prise de carre du skieur. Dans la situation où le skieur dérape à vitesse constante vers la ligne de pente, les forces de friction latérales du skieur sont égales à P_{lat} .

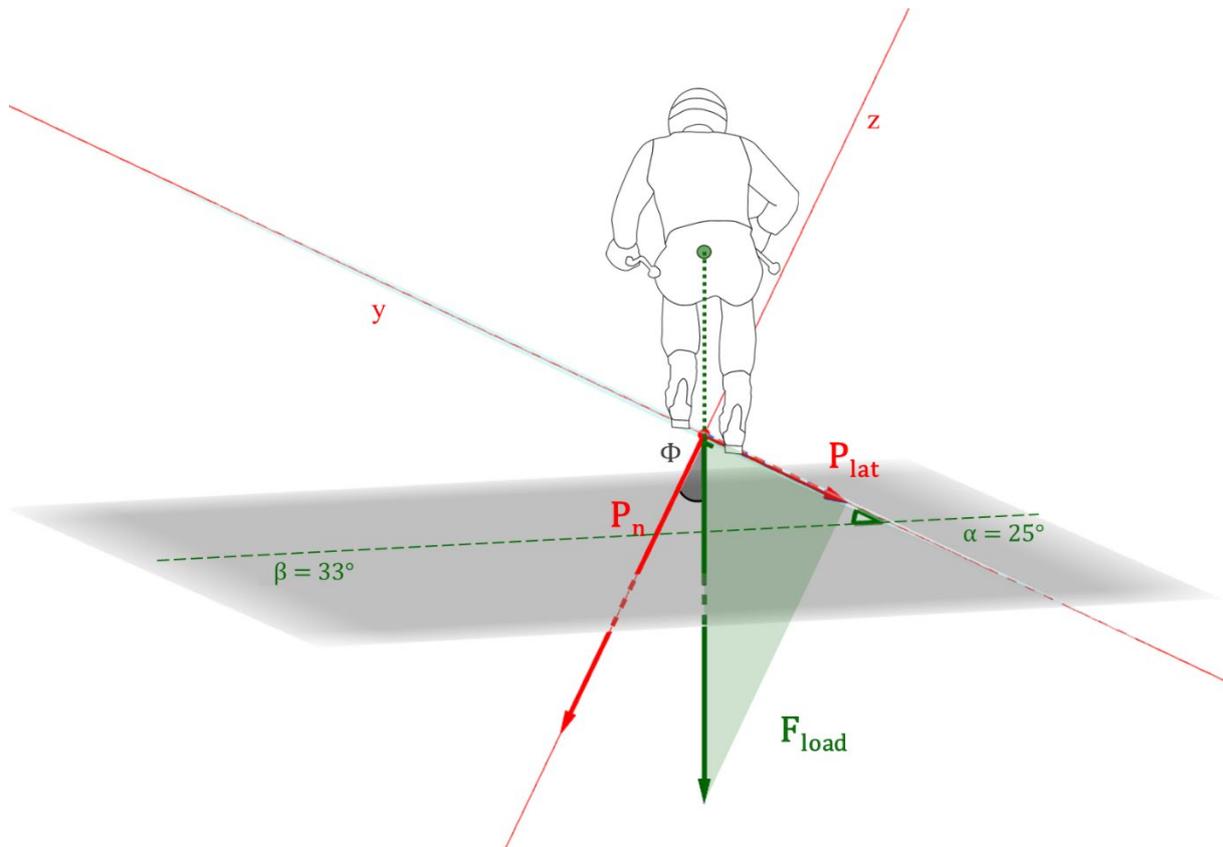


Figure 11 : Représentation du bilan des forces vue depuis l'arrière d'un skieur dans une pente d'une inclinaison $\alpha=25^\circ$ avec un angle de traversé $\beta=33^\circ$ et un angle d'inclinaison Φ . Les différentes forces sont représentées par des flèches : la composante normale du poids (P_n), sa composante latérale (P_{lat}), et la composante de force appliquée verticalement aux skis (F_{load}).

2.2.2.3 Virage en conduite dérapée :

La situation de conduite dérapée peut prendre différentes formes. Le chasse neige est une technique de ski couramment utilisée chez les débutants dans le but de maîtriser leur vitesse et/ou tourner. Elle consiste à dérapier face à la pente dans une position où les skis forment un V (pointes des skis rapprochées). Cette technique permet de générer des forces de friction latérales sur les deux skis. Dans cette position, la flexion et la rotation interne des genoux a tendance à créer un angle ski-neige tendant à concentrer les frottements sur les carres internes des skis. Plus le skieur augmente cet angle plus les frictions latérales sont importantes. Pour cela le skieur doit augmenter l'écartement entre ses pieds pour ouvrir l'angle créé par les skis. La manipulation de la répartition de la masse du skieur entre les deux skis va moduler les forces de friction latérales entre les skis mais aussi permettre au skieur de modifier sa trajectoire. Néanmoins, lors de l'augmentation de l'angle α de la pente, il devient anatomiquement de plus en plus difficile d'écarter les skis pour augmenter les forces de frottement et réduire sa vitesse. Ainsi la technique du chasse neige n'est plus suffisante pour ralentir le skieur. Les skieurs utilisent alors la technique du dérapage parallèle.

Cette technique correspond aux cas particuliers présentés dans la section 2.2.2.2 où le skieur réalise une traversée de pente avec un angle $\beta=0^\circ$. La projection du poids sur l'axe x du ski est nulle et $P_t = 0$. Le skieur manipule son angle d'inclinaison Φ afin de moduler les forces de frottement latérales. Lorsque celle-ci deviennent inférieures à P_{lat} il dérape avec les skis perpendiculaires à la ligne de pente. Cette conduite dérapée peut également être réalisée dans une direction différente de la ligne de pente afin de diminuer la vitesse de déplacement. L'angle d'attaque (φ , Figure 12)) est décrit comme l'angle entre l'axe longitudinal (E) du ski et la direction du mouvement (V). Cet angle détermine la nature des interactions entre le ski et la neige et le comportement du ski et du skieur. Historiquement, lorsque cet angle est non-nul la conduite est considérée comme dérapée, par opposition, une conduite glissée ou coupée est considérée lorsque cet angle est nul (Lieu and Mote, 1985). Néanmoins d'après certains auteurs cette classification est trop simpliste et des conduites coupées et dérapées peuvent avoir lieu simultanément en différents points sur la longueur du ski (Reid et al., 2020), notamment à cause des variations mécaniques et géométriques du ski.

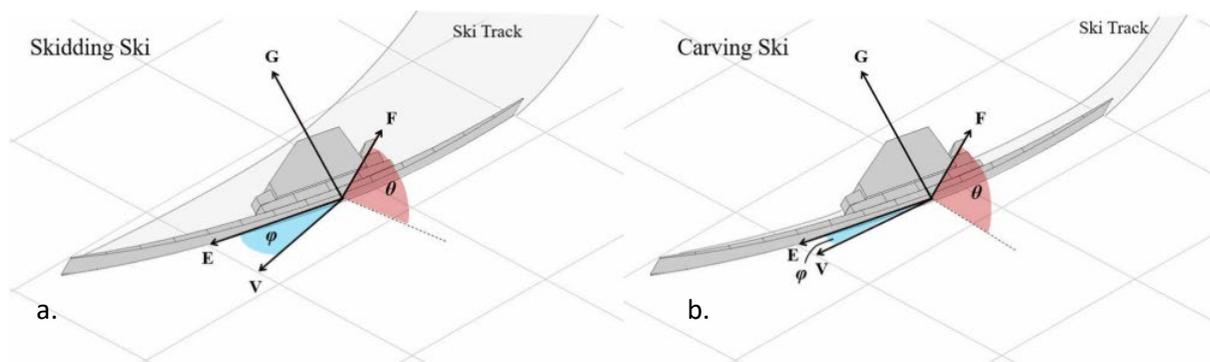


Figure 12 : Représentation graphique des forces appliquées à un ski durant une phase de conduite dérapée (a-*skidding*) et coupée (b-*carving*). Les forces de réactions normales au support sont représentées par la flèche F, les forces radiales par la flèche G, la direction du mouvement du CG du skieur par la flèche V, l'axe longitudinal du ski par la flèche E. L'angle φ correspond à l'angle d'attaque et θ à l'angle ski/neige. Issue de Reid *et al.* 2020

2.2.2.4 Virage en conduite coupée :

L'apparition en coupe du monde FIS en 2002 (avec la nouvelle réglementation) d'une nouvelle géométrie de skis a significativement modifié la façon de skier en compétition (Supej et al., 2002). Le virage coupé ou carvé est comme un virage dans lequel l'angle d'attaque global du ski est inférieur à 8° (Reid et al., 2020). L'interaction ski-neige entre conduite dérapée et coupée suit donc un continuum

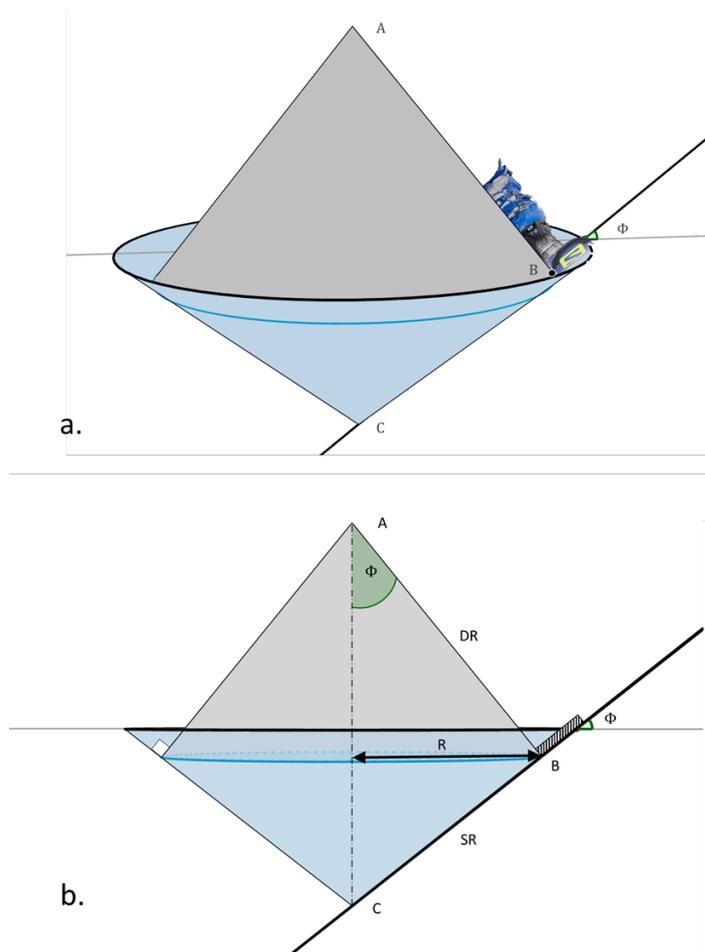


Figure 13 : Modèle basique représentant par des cônes (points A,B,C) la relation entre le ski et le sillon créé à la surface de la neige avec les rayons de déformation (*deformation radius* - DR) et de courbe du ski (*side radius* - SR), en vue 3D (a.) et en coupe frontale (b.) avec l'angle de prise de carres Φ . Issue de Yoneyama *et al.* 2018

défini par l'angle d'attaque φ du ski. La borne la plus extrême du continuum est un dérapage perpendiculaire à l'avancement du ski comme la situation de dérapage parallèle décrite dans la section précédente. A l'autre extrémité du continuum, un carving « pur » peut être théoriquement défini, même si son existence en compétition est incertaine.

Dans cette situation de carving pur, tous les points du ski, de la spatule au talon, passent par le même point de la piste par translation et rotation du ski. Cette conduite est possible grâce à la forme du ski plus étroite au centre qu'à ses extrémités. Cette forme induit un rayon de courbe de ski (*Side radius*, SR, m – Figure 13), qui aide le skieur à enclencher un virage. Plus le SR est faible plus les virages réalisés avec le ski seront de rayons courts. Lorsque le skieur s'incline par rapport à la piste d'un angle Φ les points d'appuis du ski sur la neige sont

situés aux extrémités du ski où la largeur est la plus importante. La force perpendiculaire appliquée au ski déforme alors le ski autour de son axe transversal. Cette déformation permet à l'ensemble de la longueur du ski d'être en contact avec la neige. Ce phénomène crée un sillon dans la surface de neige de la piste. Le rayon de déformation (DR) suit cette surface. DR est influencé par la charge appliquée par le skieur et par la raideur du ski. On considère généralement que le ski extérieur au virage est responsable de la majorité des effets de pivotement pendant le virage. Ainsi le rayon de virage (R) est influencé par les deux rayons SR et DR et l'angle Φ de prise de carres (Yoneyama, 2018). Il est possible

de représenter cette relation comme dans la Figure 13: le carre interne du ski (point B) est le sommet de l'angle Φ relatif à l'angle de prise de carres par rapport au plan de la piste. La surface de la semelle du ski glisse dans un sillon de neige dessinant une surface conique. Ainsi la semelle du ski est une

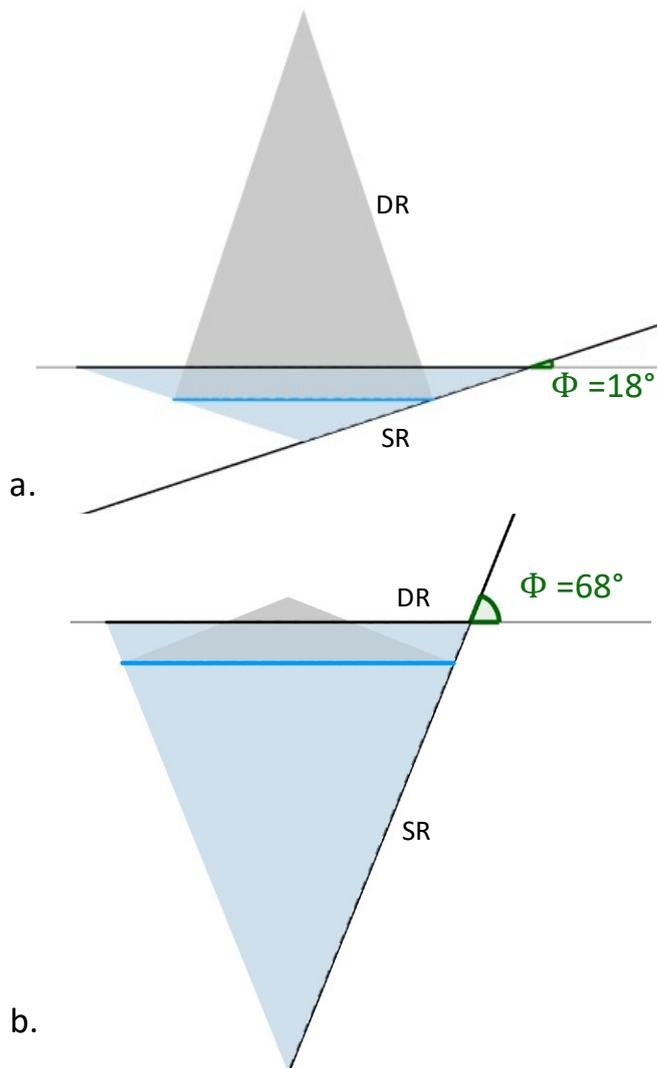


Figure 14 : Modèle basique représentant par des cônes la relation entre le ski et le sillon créé à la surface de la neige avec les rayons de déformation (*deformation radius* - DR) et de courbe du ski (*side radius* - SR), en phase d'initiation (a.) et en phase de conduite (b.) avec l'angle de prise de carre Φ . Issue de Yoneyama *et al.* 2018

surface particulière du cône bleu (de sommet C). Durant le virage, le mouvement du ski dessine un cône perpendiculaire à la surface de glisse de sommet A (en gris sur la Figure 13). Notons que le SR du ski correspond au cercle créé par l'intersection des deux cônes sur le cône bleu. Ainsi le distance BC correspond à SR. Le DR du ski correspond quant à lui au cercle créé par l'intersection des deux cônes sur le cône gris. Le DR correspond donc à la distance AB. Dans ce modèle, plus un des rayons est grand plus son influence sur le changement de direction du CG est faible. Au début d'un virage, l'angle de prise de carre Φ est faible, la part de DR est alors importante et celle de SR est faible (Figure 14.a). Ainsi durant la première partie du virage SR a un rôle important dans le virage (car sa valeur est faible). Dans le cas particulier où le ski est à plat à l'initiation du virage, $\Phi = 0$ et aucun sillon ne se forme. Ainsi le cône gris devient un cylindre de rayon $SR=R$. Dans cette

situation particulière l'intégralité du changement de direction est dû au SR. Le DR ayant une valeur infinie son influence est nulle. Notons que dans cette situation SR est égale au rayon de courbe indiquée sur les côtes du ski. Théoriquement, lors d'une conduite coupée pur, SR ne peut pas être inférieur à cette valeur. Lors de la phase de conduite du virage, l'angle Φ est important (Figure 14.b) donc la part de SR est importante et celle de DR est faible. DR a donc un rôle important dans cette partie du virage. Dans le cas théorique ou l'angle $\Phi = 90^\circ$ le cône gris devient un disque, et le bleu un cylindre de rayon $DR=R$. Dans cette situation particulière la totalité de l'effet de rotation est due en

intégralité à la déformation du ski. DR et SR peuvent être calculé en utilisant R et Φ (Équation 26 et Équation 27). Dans une situation de ski, SR est dictée par les côtes du ski, et ne change pas durant le virage. Ainsi le skieur module le rayon de son virage grâce à l'angle de prise de carre Φ et DR.

$$\text{Équation 26} \quad DR = \frac{R}{\sin \Phi}$$

$$\text{Équation 27} \quad SR = \frac{R}{\cos \Phi}$$

Lorsque le skieur réalise un virage, le centre de masse de celui-ci subit un changement de direction. Cette modification de trajectoire d'un mouvement rectiligne uniforme nécessite une force extérieure selon la première loi de Newton. Ce changement de direction implique l'apparition de la force radiale (F_r) dirigée vers l'intérieur du virage. F_r (Équation 28) est localisée au niveau de l'interface ski-neige et dirigée vers le centre du rayon du virage. Elle est calculée selon le principe fondamental de la dynamique appliquée à l'accélération angulaire.

$$\text{Équation 28} \quad F_r = \frac{v^2 \times m}{R}$$

La force d'inertie de rotation aussi appelée force centrifuge (F_{cent}) est une force fictive c'est-à-dire qu'elle n'est observable que dans un référentiel non linéaire. Cette force est réelle dans un mouvement relatif accéléré (en rotation) ici le référentiel de notre skieur, mais ne l'est pas dans le mouvement absolu, ici le référentiel de la piste. Cette force ne sera donc pas représentée dans le bilan des forces du référentiel galiléen, elle est en revanche subie par le skieur. Cette force subie par le skieur, appliquée au centre de gravité du skieur suit la direction du rayon du virage et est dirigée vers l'extérieur du virage. La formule de calcul de son intensité est la même que pour la force radiale (Équation 28). Si la force centrifuge (qui pousse le skieur vers l'extérieur) du virage dépasse les forces de réaction latérales ski-neige, le skieur glisse latéralement par rapport à l'axe de ses skis soit de façon maîtrisée (dérapage) soit non maîtrisée (décrochage). La valeur de la force radiale est donc plafonnée par les forces de friction latérales du ski. Une deuxième limite à l'intensité de la force radiale est la force musculaire du skieur. Ainsi le skieur capable de produire des forces musculaires plus importantes peut réaliser un virage à plus haute vitesse ou à plus faible rayon (Nakazato et al., 2011) et ainsi augmenter sa vitesse de passage limite (*velocity barrier*). La force centrifuge n'est pas liée à la réciprocité des forces établies dans la seconde loi de Newton. Il faut la différencier de la force de réaction réciproque à la F_r au niveau de l'interface ski-neige qui influence la rotation du globe (dans le sens inverse de celui de la rotation du skieur) et la force centrifuge détaillée précédemment. Ainsi ces deux forces de valeurs égales situées respectivement à l'interface ski-neige et au CG du skieur (Figure 15) créent un moment de rotation (M_x) autour de l'axe x (longitudinal au ski). La gestion de cet équilibre des forces est un point capital de la motricité en ski (Brodie et al., 2007).

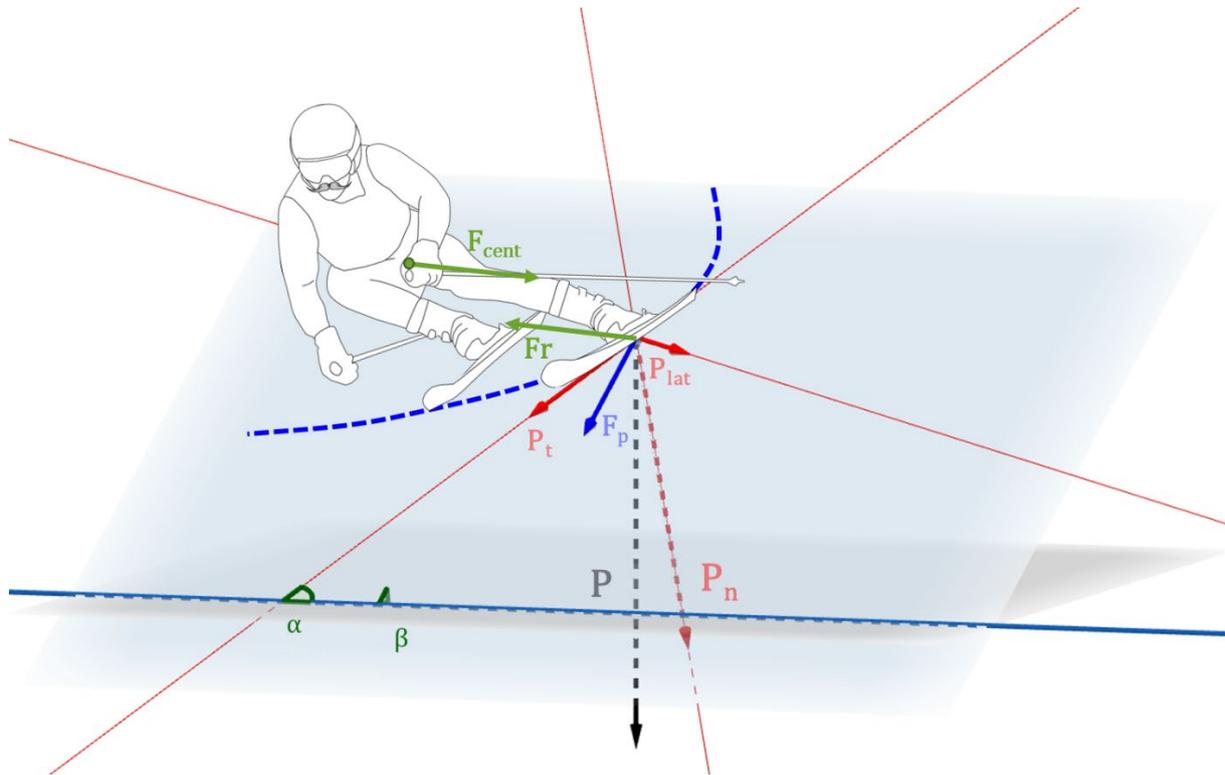


Figure 15 : Représentation graphique des forces appliquées à un ski durant une phase de conduite coupée dans une pente d'une inclinaison α avec un angle de traversée β . Les différentes forces sont représentées par des flèches : Le poids (P), sa composante normale (P_n), sa composante transverse (P_t), et sa composante latérale (P_{lat}), la force tirant le skieur dans la pente (F_p), les forces radiales (F_r), et la force centrifuge interne au skieur (F_{cent}).

2.3 Mesures des forces :

2.3.1 Historique des outils de mesure des forces en ski alpin :

La nécessité de mesurer les contraintes entre le ski et la chaussure est née du besoin d'amélioration de la sécurité des fixations de ski. Les rôles d'une fixation de ski sont : le maintien et le déchaussage. La fonction de maintien doit assurer le lien entre le ski et la chaussure pour toutes les intensités de forces et de moments non traumatisantes pour le membre inférieur. Lorsque ce seuil est franchi, le déchaussage doit s'effectuer. Néanmoins, la définition de ces rôles ne constitue pas, en soit, des exigences de conception des fixations. En effet la protection contre les blessures ne peut pas être garantie si les forces impliquées par la pratique se situent au-dessus de leur seuil d'apparition et si ce seuil n'est pas individuellement déterminé. Ainsi, les données apportées par les systèmes de Hull et Mote (Hull and Mote, 1975; Hull and Mote, 1980), Sher (1972), Outwater et Woodard (1966, 1968) ont permis d'améliorer la compréhension des processus des blessures du genou en ski alpin. Les données mesurées ont été comparées avec des études de modélisation et d'évaluation des seuils de blessure pratiquées sur cadavre (Reilly and Burstein, 1975). L'accidentologie en ski alpin est, depuis la démocratisation de l'activité, extrêmement lourde (0.3% de blessures par journée de ski en 1980, Hull

and Mote, 1980). Ainsi la compréhension des processus de blessure a été au cœur des problématiques de recherche bien avant la compréhension de la performance. La plupart de ces études se sont focalisées sur la mesure des forces et des moments entre la chaussure et le ski, puis leur calcul au niveau du centre de la chaussure et enfin l'estimation des contraintes au niveau du genou (Maxwell and Hull, 1989). Les premières mesures de forces en ski alpin ont été réalisées sur des outils de mesure similaires à ceux de Hull et Mote, composés de deux plateformes de force par ski, une située sous la butée avant, l'autre sous la talonnière de fixation. Ce design est induit par la nécessité de la mesure des contraintes indépendamment sous la talonnière et la butée de la fixation du ski. Ces études ont permis de décrire avec précision (2% de variabilité sur M_x , 4% de variabilité sur F_x et F_y et M_z , 100N de variabilité sur F_z , et 27 Nm pour M_y) les forces et les moments dans différentes situations de ski, de neige et de skieur.

Toujours dans la volonté d'améliorer la sécurité des skieurs, un système de fixation-capteur électronique a été développé dans les années 1980. Ce système associait un dynamomètre 6 axes et un système de libération du ski géré électroniquement (MacGregor et al., 1985). Néanmoins la précision de ce système était relativement mauvaise avec une variabilité de 10 à 15% en moyenne principalement due à la non-linéarité du dynamomètre. Malgré les imprécisions du système, celui-ci a été installé, dans une autre étude, sur un chariot permettant d'isoler le système de mesure des forces de compression liées à la flexion du ski. Afin de caractériser cet effet Wimmer, M.A et Holzner, R. (1997) ont réalisé un test de flexion normalisé avec deux montages de jauges de contraintes. La première entre les fixations et le ski subissant donc les contraintes de flexion du ski, la seconde sur un chariot afin d'éviter cet effet. Cette expérimentation met en évidence la présence de contraintes longitudinales importantes. Ces contraintes sont dues à la raideur de la chaussure qui limite la flexion naturelle du ski. De ce fait, plus la raideur du système chaussure-fixation-plaque est importante plus cette flexion naturelle du ski est entravée. Il est important de noter que le design des plateformes de force en acier indéformable placées sous la chaussure dégrade le comportement du ski, d'autant plus durant les phases de carving où la flexion longitudinale du ski est importante.

Certains articles pointent du doigt l'insuffisance des données de force à prédire seules l'apparition de blessures en ski alpin (Mote, 1987). En effet la contraction musculaire liée à l'activité peut modifier la raideur musculaire et ainsi modifier les seuils de blessures. Dans ce but, plusieurs études ont cherché à mesurer l'activité musculaire électromyographique (EMG) en plus des forces et des moments. Ces systèmes de chaussage fondés sur un biofeedback (Lieu and Mote, 1980) reposent sur des jauges de contraintes montées sur la butée et la talonnière des fixations (Anderson 1975 US3892980A). Un ordinateur résout une équation différentielle de second ordre par pied. Si celle-ci dépasse le seuil la fixation déchausse. L'activité EMG des adducteurs, du quadriceps et du tibial antérieur est elle aussi mesurée. Quand l'activité musculaire excède un certain niveau, le seuil de déchaussage est augmenté.

D'après leurs résultats cette conception permet un serrage moindre des fixations et une adaptation dynamique à la situation de ski. Néanmoins, l'industrialisation de ce système induit des coûts de développement très élevés. De plus, l'utilisation de batteries rend le système lourd et vulnérable à des problèmes d'alimentation. Enfin l'utilisation de l'EMG génère des problématiques de positionnement et de calibration des électrodes, et des problématiques d'acquisition et de traitement des données. Toujours dans un objectif de développer des fixations à déchaussage électronique, des évolutions de capteurs ont eu lieu afin d'améliorer la qualité de mesure. Une évolution du système de Hule et Mote a été développée et présentée par Wunderly *et al.* en 1985. Ce système est composé d'un capteur de force et de moment composé de 7 transducteurs (4 pour F_z , 1 pour F_y et 2 pour F_x), un système de déchaussage électromécanique et un microcontrôleur d'acquisition et de pilotage du système. Chaque transducteur est composé de 4 jauges de contraintes : 2 sur une face concave et 2 sur une face plate montée selon un pont de Wheatstone. Ce montage permet d'améliorer la précision notamment sur les faibles amplitudes et de réduire les variations parasites liées aux forces dans un autre axe ou à la température. Le calcul des moments se fait ensuite par résolution d'équation simple à partir de la position des transducteurs et des forces mesurées. D'après leurs mesures en laboratoire et sur neige cette conception de capteur permet un excellent découplage des forces et des moments. Cette géométrie sera largement réutilisée à l'avenir dans la conception d'autres capteurs (Quinn and Mote, 1992; Meyer et al., 2019).

La moyenne des valeurs de force de réaction normale au ski (nSKiRF) mesurées en virage avec les systèmes présentés ci-dessus sont de l'ordre de 1500N (Hull and Mode en 1975). D'autres valeurs sont présentées dans la Figure 16 extraite des travaux de Mote 1987. Mais elles sont bien faibles par rapport aux mesures présentées dans les études actuelles, qui sont de l'ordre de 2300N. Ce décalage entre les mesures actuelles et passées peut être imputé à plusieurs facteurs : les faibles valeurs de vitesse de 40km/h (relative au matériel et à la préparation de neige de l'époque), les techniques de virages radicalement différentes et le matériel de mesure dégradant énormément la performance (5.8 kg uniquement pour le seul système de télémétrie). Enfin l'ensemble de ces capteurs ne permettaient la mesure de la force que sur un seul ski, limitant la compréhension de la motricité et des stratégies de répartition des masses. L'ensemble de ces facteurs rend les conclusions de ces premières mesures de nSKiRF inexploitable pour comprendre les mécanismes sous-jacents de la performance actuelle en ski alpin. Ces limites liées aux facteurs listés précédemment vont traverser toute la lecture de la bibliographie de la biomécanique du ski alpin, tendant à porter plus d'attention aux études récentes réalisées dans des conditions expérimentales plus proches des problématiques actuelles de course.

Dans le but d'étudier la performance, les systèmes de mesure et d'acquisition des forces et moments entre la chaussure et le ski ont donc évolués. Afin de dénaturer au minimum l'activité, plusieurs critères de développement étaient à améliorer : réduire le poids du capteur et du système d'acquisition, diminuer la surélévation de la chaussure liée à la présence du capteur, et permettre la flexion naturelle du ski en courbe. Les premiers designs de plateformes de force visant à analyser la performance ont été développés après l'émergence des skis paraboliques. Deux designs de plateforme de force ont

Maximum Force Measured at the Ski Boot During Skiing

Reference	Force or moment	Range maximum
Outwater & Woodard (1966, 1968)	Torsion (Nm)	26
Asang, Grimm, & Krexa (1975)	Toe force (N)	
	Vertical	490
	Horizontal	100
	Heel force (N)	
	Vertical	490
	Horizontal	100
	Ball of foot (N)	1000
Mote & Hull (1978)	Torsion (Nm)	55
	Bending (Nm)	415
	Ball of foot (N)	1400
Lieu, Mote, Brown, & Ettlinger (1982)	Toe force (% body wt)	25
	Heel hold-down force (% body wt)	125
Hull & Mote (1982)	Torsion (Nm)	64
	Bending (Nm)	432
Mote & Lee (1982)	Torsion (Nm)	40
Louie, Kuo, Gutierrez, & Mote (1984)	Torsion (Nm)	60
Kuo, Louie, & Mote (1985)	Torsion (Nm)	60
	Bending (Nm)	580
	Ball of foot (N)	2650

Torsion = Resultant torsion at the boot, Nm; Bending = Resultant bending at the boot, Nm; Toe force = Vertical or horizontal component of force, N; Heel force = Vertical or horizontal component of force, N; Ball of foot = Compressive force between boot and ski, N.

Figure 16 : Tableau résumant les forces et moments maximaux mesurées en ski alpin par différentes études en 1987. Issue de Mote *et al.* 1987

émergés : des plateformes placées sous les fixations (Jandova et al., 2005; Jandova and Vaverka, 2008; Stricker et al., 2010; Nakazato et al., 2011) ou au-dessus des fixations (Kiefmann et al., 2006; Saito et al., 2015; Meyer et al., 2019). Dans le cadre de l'évaluation de l'équipement du skieur, la solution au-dessus des fixations est privilégiée car elle permet de pouvoir changer le ski testé sans avoir à modifier le perçage du ski. La plateforme utilisée par Stricker et al., 2010 est une plateforme développée par l'entreprise Kistler utilisant des capteurs piézoélectriques. Ces plateformes permettent une acquisition à 500 Hz et chaque capteur pèse 1.8 kg pour 3.6 cm de surélévation. Ces plateformes sont peu sensibles aux variations de température et au crosstalk. La précision des plateformes diffère selon les axes et les charges. Sur l'axe vertical, l'erreur moyenne de mesure est de 4.6% pour des charges comprises entre 97 et 292N, puis se réduit à 0.3 % pour les charges plus importantes. Sur les autres axes l'erreur de mesure varie entre -2.2% et 2.0%. Les erreurs moyennes de mesure des moments de force sont

comprises entre -8.3% et 6.8% en fonction des axes. Les valeurs de répétabilité sont comprises entre 0.2 et 2.7% en fonction des axes et des charges appliquées (excepté pour les charges faibles en $F_y = 4.03\%$). Sur la plage d'utilisation *in situ* les plateformes Kistler sont donc suffisamment véloces, précises et répétables pour analyser le comportement cinétique des skieurs en virage. Néanmoins l'encombrement et le poids des plateformes est important comme celui du système d'alimentation et d'acquisition. Il nécessite également un perçage spécifique des skis pour y visser les plateformes empêchant les skieurs d'utiliser leur propre matériel. Le système rigide placé sous les fixations modifie la flexion naturelle du ski sous le pied du skieur. Les plateformes développées par Meyer *et al.* reprennent la structure des plateformes de Kiefmann *et al.* 2006. Le système de mesure peut être installé comme interface entre la chaussure et le ski. Il est composé de 6 jauges de contraintes avec une fréquence d'échantillonnage de 20 Hz. Il surélève le pied de 25mm et sa masse n'est pas précisée. La méthode de validation consiste uniquement à faire skier des athlètes de niveau et de gabarit homogène sur le même parcours et d'évaluer la répétabilité des signaux. La variabilité est comprise entre 9 et 19%. Ce chiffre renseigne sur la variabilité du capteur mais aussi des skieurs entre eux et des virages entre eux. La précision du système est donc moins bonne que celle des plateformes de force Kistler, cependant les conditions expérimentales de « validation » sont plus proches de la réalité du terrain. En conclusion, il est difficile d'estimer la précision de ces plateformes. D'autres limites sont à noter : elles ne peuvent accueillir que les chaussures dont la longueur est comprise entre 310 et 315mm, elles empêchent également la flexion naturelle du ski sous le pied du skieur, et ne permettent pas de mesurer indépendamment les contraintes appliquées localement à la talonnière et à la butée de fixation. Malgré ces limites, ces plateformes de force et les articles qui y sont associés (Meyer, 2012; Meyer *et al.*, 2019) font actuellement référence dans la description des forces en ski alpin compétitif. L'autre outil généralement utilisé pour la mesure des forces en ski alpin est la semelle de pression. Cette semelle instrumentée se glisse à l'intérieur de la chaussure permettant alors son utilisation avec n'importe quel système ski-chaussure-fixation. Elle est suffisamment légère pour ne pas dégrader la pratique et permet un large volume de mesure. Les semelles sont composées de multiples zones de mesure (généralement de 6 à 99 par pied). Chacune d'entre elles est associée à un capteur de pression. Selon le modèle les capteurs peuvent être capacitifs, résistifs, piézoélectriques ou piezorésistifs. Les semelles de pressions permettent de connaître avec précision la localisation des pressions et leurs intensités durant l'activité. Les pressions maximales mesurées en ski alpin sont de l'ordre de 16 N.cm^{-2} pendant la phase de conduite sous le talon, l'hallux, et le 1^{er} métatarsien (Lamontagne, 2001). Plus la pente est importante plus le centre des pressions est situé proche du talon. Quel que soit l'angle de la pente, le centre des pressions est plus avancée durant la phase d'initiation que les autres phases du virage (Falda-Buscaiot *et al.*, 2017). Par leurs technologies, les semelles de pression ne sont capables de mesurer que la force normale transmise sous le pied du skieur. Contrairement aux plateformes de

force elles ne permettent donc pas de connaître les contraintes medio-latérales et antéropostérieures et n'ont, de ce fait, jamais été utilisées pour caractériser les forces dans le but de déterminer les seuils de déchaussage des fixations. L'inconvénient principal des semelles de pression est qu'elles sous-estiment les valeurs de force mesurées de 21 à 54 % en ski libre (Stricker et al., 2010) et de manière significativement plus faible en slalom géant (Nakazato et al., 2011). Cette sous-estimation est liée aux forces normales au ski non mesurées qui sont appliquées par le skieur en dehors de la semelle de pression, notamment au niveau du collier de la chaussure.

2.3.2 Méthode indirecte d'évaluation des forces :

Il est possible de déterminer les forces de réaction au sol grâce à une méthode de calcul indirect basée sur des données cinématiques du skieur (Reid, 2010; Meyer, 2012; Gilgien et al., 2013; Spörri et al., 2016; Supej et al., 2020). Le calcul des forces externes nécessite de déterminer avec précision la position du CG. Plusieurs méthodes sont alors utilisées, comme détaillé dans la partie 1.1.2. Généralement les méthodes utilisées sont basées soit sur une fusion de GPS et d'analyse vidéo (généralement des caméras stéréoscopiques) (Lüthi et al., 2004; Schiestl et al., 2006), soit sur une fusion de GPS et de centrale inertielle permettant d'augmenter le volume de capture (Brodie et al., 2008; Meyer, 2012; Supej et al., 2013). Les méthodes basées sur l'analyse vidéo utilisent des capteurs passifs associés à des caméras stéréoscopiques (caméras numériques, synchronisées entre elles dans un espace calibré). Cette méthode nécessite un nombre important de caméras pour un volume de mesure faible. Cette méthode nécessite également une calibration de l'espace entre les caméras et surtout une analyse géomorphologique de la piste. Pour cela, il est nécessaire de placer des points de référence dans le volume de mesure. Ces jalons sont placés en dehors de la trajectoire du skieur. La géomorphologie de cette zone est généralement interpolée à partir de ces mesures environnantes (Reid, 2010). Cette étape permet également de déterminer la position des caméras entre elles. Lors du passage du skieur l'ensemble des caméras doivent être synchronisées, soit par un trigger électronique (solution la plus précise mais nécessitant un matériel spécifique) soit par un évènement sur la vidéo (généralement le skieur tape la neige avec son ski). Si les caméras zooment, tournent ou s'inclinent, la reconstruction de l'espace doit prendre en considération ces paramètres. La construction de l'espace se fait à partir de l'image initiale et des déplacements des coordonnées 2D des points de contrôle (fixes) d'une image à l'autre (Drenk, 1994). Pendant la phase de ski le skieur peut utiliser n'importe quel équipement (ski chaussure ou autre). Le matériel de mesure (capteur passif et GPS) est généralement suffisamment petit et léger pour ne pas dénaturer la pratique. La détection des marqueurs est souvent difficile à déterminer à cause de la forte luminosité liée à la réverbération de la lumière sur la neige ou aux projections de neige cachant les marqueurs pendant les virages. Le calcul de la position des marqueurs est réalisé *à posteriori* à partir des vidéos obtenues. Chaque marqueur

doit être repéré sur au minimum 3 caméras pour être repositionné dans l'espace. Un modèle de skieur est ensuite reconstruit sur la base de segments rigides (Spörri et al., 2012b), puis son CG est déterminée à partir de modèles anthropomorphiques.

Une autre méthode consiste à placer des accéléromètres sur différents segments du skieur pour reconstruire un modèle de celui-ci. A partir d'une position de départ statique normalisée, une double intégration des signaux d'accélération permet de connaître la position 3D des segments relative à la position initiale et ainsi de reconstruire un modèle de skieur sur la piste. Cependant, le ski alpin est caractérisé par des vitesses de déplacement et des vibrations importantes, ainsi que par l'absence de phase statique. De ce fait, des vitesses résiduelles sur le signal entraînent la dérive des signaux rendant les données inexploitable après seulement quelques secondes de mesure. Contrairement à la marche, l'absence de phase statique en ski alpin empêche la remise à zéro des vitesses résiduelles lorsque les accélérations sont nulles (Roetenberg et al., 2009, 2013). De fait, cette méthode est donc généralement couplée à des mesures de positions GPS. La fusion des données de centrales inertielles (IMU) et GPS grâce à un filtre un de Kalman, permet de prédire la position des capteurs sans dérive. Enfin la position du CG est déterminée grâce à un modèle de pendule à partir des données géomorphologiques de la piste (Gilgien et al., 2013).

A partir des accélérations du CG du skieur, les forces subies peuvent être recalculées dans le référentiel du skieur en utilisant le principe d'inertie. En réutilisant les formules vues dans le bilan des forces dans la partie 2.2.2, il est possible de calculer la force selon l'axe médio-latéral (axe Y). (Équation 29 avec α la pente de la piste, β l'angle de traversée et Φ l'angle de prise de carre. (Équation 30)

$$\text{Équation 29} \quad F_y = \frac{m \times v_{CG}^2}{R_{CG}} \times \tan \Phi + (m \times g \times \sin \alpha \times \cos \beta) \times \cos \Phi$$

$$\text{Équation 30} \quad F_z = \frac{m \times v_{CG}^2}{R_{CG}} \times \cos \Phi + (m \times g \times \sin \alpha \times \cos \beta) \times \tan \Phi$$

Ce modèle permet de renseigner sur les contraintes cinétiques subies par le skieur imposées par le changement de trajectoire du skieur. Cette analyse peut être utilisé pour déterminer les contraintes musculaires impliquées par le mouvement (Supej et al., 2020). Néanmoins il demeure limité par la précision de mesure et de calcul de la position et de la vitesse du CG. Il nécessite également la mesure ou la détermination précise de l'angle d'inclinaison latérale du skieur et un relevé 3D de la géomorphologie de la piste afin de déterminer l'angle β . De plus il ne prend pas en compte de nombreux facteurs tels que : la position antéro-postérieure du CG par rapport au ski, les actions musculaires de pivotement réalisées par le skieur, ou encore le moment selon l'axe longitudinal lié à l'inertie de rotation. Les variations articulaires réalisées par le skieur au cours du virage ou encore les modifications de force liées aux actions musculaire ou aux microreliefs de la piste ne sont également pas considérées. Enfin, que le calcul de la position du CG soit réalisé à partir de données vidéo ou IMU, ces méthodes nécessitent un temps d'expérimentation et de post traitement beaucoup plus long que

des mesures directes. Ce modèle est donc intéressant dans le but de quantifier les sollicitations musculaires globales associées à la pratique du ski alpin, mais ne permet pas une compréhension précise des mécanismes et de la motricité du skieur durant un virage.

2.3.3 Présentation du capteur de force 3D utilisé :

Ce travail de thèse s’ancre dans la continuité du travail de thèse de Thomas Falda réalisé de 2014 à 2017 au LIBM et intitulé « Analyse biomécanique en ski alpin : conception et validation d’un nouveau capteur d’efforts 3D à l’interface skieur-environnement » (Falda-Buscaiot, 2017). Le travail de développement réalisé pendant cette thèse a abouti à la création d’une plateforme de force embarquée permettant de mesurer les forces et les moments de force à l’interface chaussure-fixation dans le référentiel lié au ski (Figure 17).



Figure 17 : Photos représentant la vue globale, avant et arrière du capteur de force 3D développé au cours de la thèse de T. Falda.

La plateforme de force se compose de deux capteurs distincts situés à l’interface entre la chaussure et la fixation (Figure 17). Ce choix de design permet l’utilisation de notre plateforme sur l’ensemble des fixations et chaussures de ski alpin à patin standard (ISO 8364:2007). Il est fixé à la chaussure par 12

vis de petites tailles sur la zone où se placent habituellement les lifteurs. Ils sont donc peu invasifs pour la chaussure. Cette zone de fixation sous la coque est la zone la plus rigide de la coque garantissant la sécurité du skieur et une bonne cohésion du système capteur-chaussure. Ce choix de design permet donc l'utilisation du capteur sur les chaussures des athlètes leur permettant ainsi de skier avec leurs propres équipements. Contrairement à d'autres capteurs existants (voir 2.3.1) les éléments de mesure sont placés à l'avant et à l'arrière de la chaussure (Figure 17). Chaque capteur est entouré de deux pièces en aluminium. Ces deux pièces sont isolées entre elles et servent de connecteur respectivement à la fixation et à la chaussure. Ce choix de design permet une surélévation minimum de la chaussure (6mm) permettant de dénaturer le moins possible la pratique. Le design de plateforme de force en deux parties (avant et arrière) permet également la flexion naturelle du ski contrairement aux capteurs monoblocs qui rigidifient totalement la zone située sous la chaussure. Enfin, grâce à cette construction, le capteur s'adapte facilement à toutes les longueurs de coques. Cependant, le positionnement des éléments de mesure devant et derrière la chaussure induit une augmentation de la longueur totale à chausser de 60mm. Cette augmentation de longueur (i) nécessite un réglage des fixations suffisamment ample pour accueillir le capteur sans reperçage des skis et (ii) induit un espacement plus important entre la butée et la talonnière rigidifiant le ski sur une plus grande partie. Le système de mesure pèse 1.4 kg. Deux capteurs d'effort 6-composantes (Sensix, Poitiers, France) sont utilisés par pied. Chaque capteur embarque 6 jauges de contraintes montées en pont de Wheatstone. L'alimentation est commune pour toutes les jauges et les tensions de sortie sont individuelles. Les capteurs sont compensés électroniquement en température. L'annexe 1 correspond au cahier des charges de développement du capteur et contient des informations complémentaires sur ses caractéristiques.

Les 6 jauges de contraintes sont placées de manière à ce que chacune d'entre elles réagissent à l'application d'une force monodirectionnelle. De ce fait, l'application d'une force induit la variation de tension de toutes les jauges du capteur. L'utilisation d'une matrice de calibration est nécessaire pour convertir les variations de signal (en Volt) en variation de force (en N) et de moment (en N. m). Si l'on considère une mesure de longueur n points, alors le torseur de force (T) appliqué sur la chaussure [$T = (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z)$ en N et Nm] peut être considéré comme une matrice de n lignes * 6 colonnes. Afin de quantifier le torseur de force, il est nécessaire d'observer les variations de signal issues des jauges de contraintes. La concaténation horizontale des 12 jauges de contraintes des deux capteurs du pied étudié [$S = (S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}, S_{11}, S_{12})$ en Volt] peut être considérée comme une matrice de n lignes * 12 colonnes. Alors il existe une matrice de transfert (M) entre ces deux matrices mesurant 12 lignes * 6 colonnes. Les opérations de calcul entre les matrices S, M et T sont des produits matriciels simples détaillés dans les équations suivantes (Équation 31, Équation 32 et Équation 33.)

Équation 31

$$S \times M = T$$

Équation 32

$$\begin{pmatrix} S_{1,1} & \cdots & S_{1,12} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n,1} & \cdots & S_{n,12} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} M_{1,1} & \cdots & M_{1,6} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{12,1} & \cdots & M_{12,6} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{1,1} & \cdots & T_{1,6} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{1,n} & \cdots & T_{6,n} \end{pmatrix}$$

Équation 33

$$\begin{pmatrix} S_{1,1} \times M_{1,1} + S_{1,2} \times M_{2,1} + \cdots + S_{1,12} \times M_{12,1} & \cdots & S_{1,1} \times M_{1,6} + S_{1,2} \times M_{2,6} + \cdots + S_{1,12} \times M_{12,6} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n,1} \times M_{1,1} + S_{n,2} \times M_{2,1} + \cdots + S_{n,12} \times M_{12,1} & \cdots & S_{n,1} \times M_{1,6} + S_{n,2} \times M_{2,6} + \cdots + S_{n,12} \times M_{12,6} \end{pmatrix} = T$$

La phase de calibration consiste à fixer le système de mesure sur une plateforme de force de référence. La plateforme de force de référence mesure ainsi le torseur de force, et les plateformes embarquées mesurent les tensions de sortie. Il est possible de déterminer la matrice de calibration M correspondant au produit matriciel (Équation 34) des transposées de S et de T.

Équation 34

$$S' \times T' = M$$

Du fait des différences de géométrie, et de rhéologie entre les différentes paires de chaussure, une matrice de calibration doit être réalisée pour chaque paire (et chaque pointure) mesurée. Le protocole de calibration consiste à lier de manière isométrique le système plateforme embarquée/ski/chaussure/fixation et la plateforme de force de référence (Falda-Buscaiot et al., 2016). Ainsi les

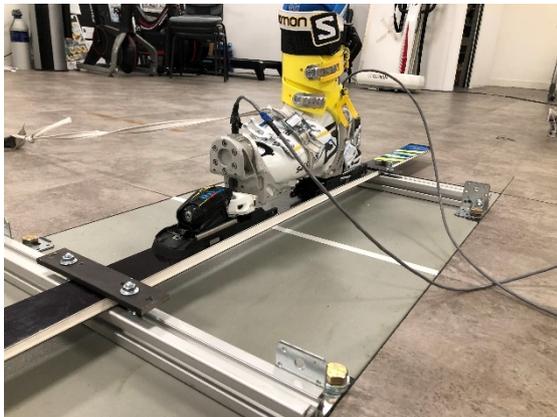


Figure 18 : Photo prise durant la phase de création des matrices de calibration. Le capteur, le ski et la chaussure sont montés de façon isométrique sur une plateforme de force de référence synchronisée.

forces subies par la plateforme de forces embarquées générant la matrice de signal (S) sont les mêmes que celles subies par la plateforme de forces de référence (AMTI – Watertown- Etats unis) générant le torseur de référence (T). Afin de prendre en considération la compression de la chaussure due à la flexion naturelle du ski pendant la calibration, le ski est surélevé par rapport à la plateforme et fixé en avant et en arrière des fixations (Figure 18). En fonction de la force en Z appliquée sur le ski, le ski fléchi et compresse la chaussure créant des forces en X convergentes sur la

chaussure (vers l'arrière sur le capteur avant et vers l'avant sur le capteur arrière). Néanmoins les plateformes de référence ne subissent pas de force en X. La matrice de calibration ne considère donc pas les forces convergentes dans le calcul du torseur. La phase de calibration consiste à appliquer des forces sur la chaussure sur des axes mono, bi et tri directionnels pendant deux périodes de 100

secondes. Les forces sont appliquées à l'aide de sangles fixées à la chaussure. Durant la première période, des forces sont appliquées sur la chaussure non chargée. Sur la deuxième période ces mêmes forces sont appliquées avec un skieur sur les plateformes de force. Les valeurs des deux périodes de mesures sont concaténées pour obtenir des matrices S et T de 200 secondes. A l'état initial (chaussure à vide et sans contrainte) les valeurs de jauges de contraintes et de la plateforme de force sont tarées. De fait, les variations de tension des jauges de contraintes à partir de l'état initial sont associées à des variations de force. Cette méthode implique de tarer les jauges de contraintes durant les expérimentations pour pouvoir interpréter les résultats. L'alimentation et les données des capteurs transitent par des câbles 9 voies auxquels ils sont connectés par des connectiques LEMO EGG.0B.309.CLL coté capteur et LEMO FGG.1B.310 (Lemo – Ecublens – Suisse) coté carte d'acquisition. Durant ce travail de thèse, une nouvelle carte d'acquisition a été développée afin de rendre l'acquisition des données plus stable et éviter les pertes de données dues à des déconnexions. La carte d'acquisition est alimentée par une batterie 12V. Elle permet l'enregistrement des données à 200 Hz, une étendue de mesure de +/- 10V et une résolution de carte de 12 bits. La résolution du système de mesure est de 4.9mV. La carte d'acquisition est placée dans une petite sacoche à l'arrière du bassin du skieur. L'ensemble du système d'acquisition pèse 1 kg. L'acquisition est déclenchée par un bouton poussoir. Chaque acquisition peut être précédée par une phase de calibration durant laquelle le skieur lève un pied puis l'autre. Cette calibration permet de créer des fichiers de mesure sans force nécessaires en post traitement afin de tarer les signaux.

En résumé, le travail de thèse mené précédemment donne accès à un nouvel outil de mesure. Par rapport aux anciennes générations de plateforme de force (présenté dans la partie 2.3.1) cet outil est plus léger au niveau des capteurs et du système d'acquisition et il surélève moins la chaussure. Ces caractéristiques ont pour conséquence de moins dénaturer la pratique du ski, permettant des mesures plus écologiques (sans dénaturer l'activité) même en situation de compétition. Enfin le design choisi permet une meilleure adaptation aux équipements et à la morphologie du skieur facilitant son utilisation dans un cadre d'entraînement ou de développement de produit.

2.4 Etat des connaissances en cinétique du ski alpin :

2.4.1 Description des signatures de force :

Comme précédemment évoqué, du fait des modifications profondes de la motricité en ski avec l'apparition des skis paraboliques, seules les études postérieures à cet évènement seront présentées dans ce travail de thèse. On dénombre actuellement assez peu d'études récentes ayant mesuré directement la force et les moments de force en situation réelle de skis alpin avec des plateformes de

force. Seules 6 études récentes présentent des données de force ou de moment sur un ou plusieurs axes et leurs caractéristiques sont résumées dans le Tableau 1 (Federolf, 2005; Jandova et al., 2005; Jandova and Vaverka, 2008; Vaverka and Vodickova, 2010; Nakazato et al., 2011; Vaverka et al., 2012; Klous et al., 2014).

Les données de l'ensemble de ces articles sont représentées dans la Figure 19. Les données présentées dans ces articles ont été digitalisées à l'aide de WebPlotDigitizer (Version 4.4 - Pacifica, California, Etats unis). Les données ont été normalisées au poids de corps du sujet d'après les informations tirées de chacun des articles présentés et à la durée d'un cycle (conformément à la définition donnée dans la partie 1.1.1). Le sens des forces a été harmonisé entre les études. Ainsi F_x est positive lorsque la force est dirigée vers l'avant, F_y est positive lorsque la force est dirigée vers l'extérieur du virage, et F_z est positive lorsque la force est dirigée vers le bas. M_x est positive lors d'un mouvement d'adduction, M_y lors d'une flexion plantaire des chevilles (bassin vers l'avant) et M_z lorsque le bassin subit une rotation vers l'extérieur du virage. Un cycle correspond à l'enchaînement de deux virages où le pied mesuré est situé à l'intérieur (0 à 50% du cycle) puis à l'extérieur. La méthode de découpage des virages est propre à chaque étude et peut générer un décalage temporel en fonction des études (Fasel and Gilgien, 2017). Sur ses 6 études, 3 ont été réalisées sur des plateformes Kistler, les 3 autres sur des plateformes spécifiquement développées par l'équipe de recherche. A l'exception de l'étude de Nakazato *et al.* (2011), le nombre de sujet et de virages étudiés est faible pour l'ensemble des études. Deux études portent sur du slalom tandis que les 4 autres analysent des situations de slalom géant. Les niveaux de pente sont également très variables d'une étude à l'autre. Enfin les différences de traitement appliqué aux données rendent les comparaisons entre les études difficiles. En effet, certaines études (Federolf, 2005; Klous et al., 2014) présentent les données individuelles des sujets sans filtrage ou lissage. De ce fait les données présentées dans ces études sont plus sensibles aux microreliefs de la piste, induisant des vibrations et des impacts, mais elles sont également caractéristiques d'un seul sujet dans une situation donnée. Les données présentées sont donc représentatives d'une évolution particulière de la force pendant l'appui. D'autres études présentent les données lissées et moyennées entre différents skieurs (Nakazato et al., 2011; Meyer et al., 2019). Dans ces deux études, les ordres de grandeur sont plus faibles que dans celles détaillées précédemment. En effet, il semble que les impacts liés aux microreliefs apparaissent aléatoirement durant le virage. En moyennant plusieurs virages et plusieurs sujets, ces pics sont noyés dans la moyenne. Même sans filtrage important (i.e. lissage sur 5 points dans l'étude de Meyer) les données présentées comportent moins d'irrégularités et traduisent plus d'une évolution typique de la force durant un appui.

Tableau 1

Etudes	Système de mesure	Axes mesurés	Nombre de sujets	Niveau des sujets	Type de tracé	Pente	Skis	Fréquence d'acquisition et filtre
Federolf (2005)	Kistler	Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz	1 ♂	Non renseigné	5 Portes Géant (2 analysées)	11°	Stöckli Spirit Fun 170 cm	200Hz - Pas de filtre Force et moments dans le référentiel de la piste
Klous <i>et al</i> (2014)	Kistler	Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz	3 ♂	Moniteurs	3 portes Géant (19m)	21°	All round ski 170 cm	200Hz Pas de filtre
Meyer <i>et al</i> (2019)	Meyer Force plateforme	Fy, Fz, Mx, My, Mz	3 ♂	Coupe d'Europe	6 Portes Géant (24m) (2 analysées)	22°		500 Hz Moyenne glissante 5 points
Jandova <i>et al</i> (2005 & 2008)	Vaverka & Jandova plateforme	Fz, Mx	6 ♂	Moniteur → Retraité équipe nationale Slovene	5 portes Slalom (14m)	26°	Blizzard SLK 168	100 Hz Passe-bas 10Hz
Vaverka <i>et al</i> (2010 & 2012)	Vaverka & Jandova plateforme	Fz	7 ♂	Moniteur → Retraité équipe nationale Slovene	6 portes Slalom (14m)	26°	Blizzard SLK 169	100 Hz Passe-bas 10Hz
Nakazato <i>et al</i> (2011)	Kistler	Fz	Expert (8 ♂ + 2 ♀) Intermédiaire 10 ♂	Intermédiaire → Expert	20 portes (15m 20m)	15° /23°	Atomic FIS GS 184cm / Atomic Drive Fibre Sport 169cm	200Hz Pas de Filtre

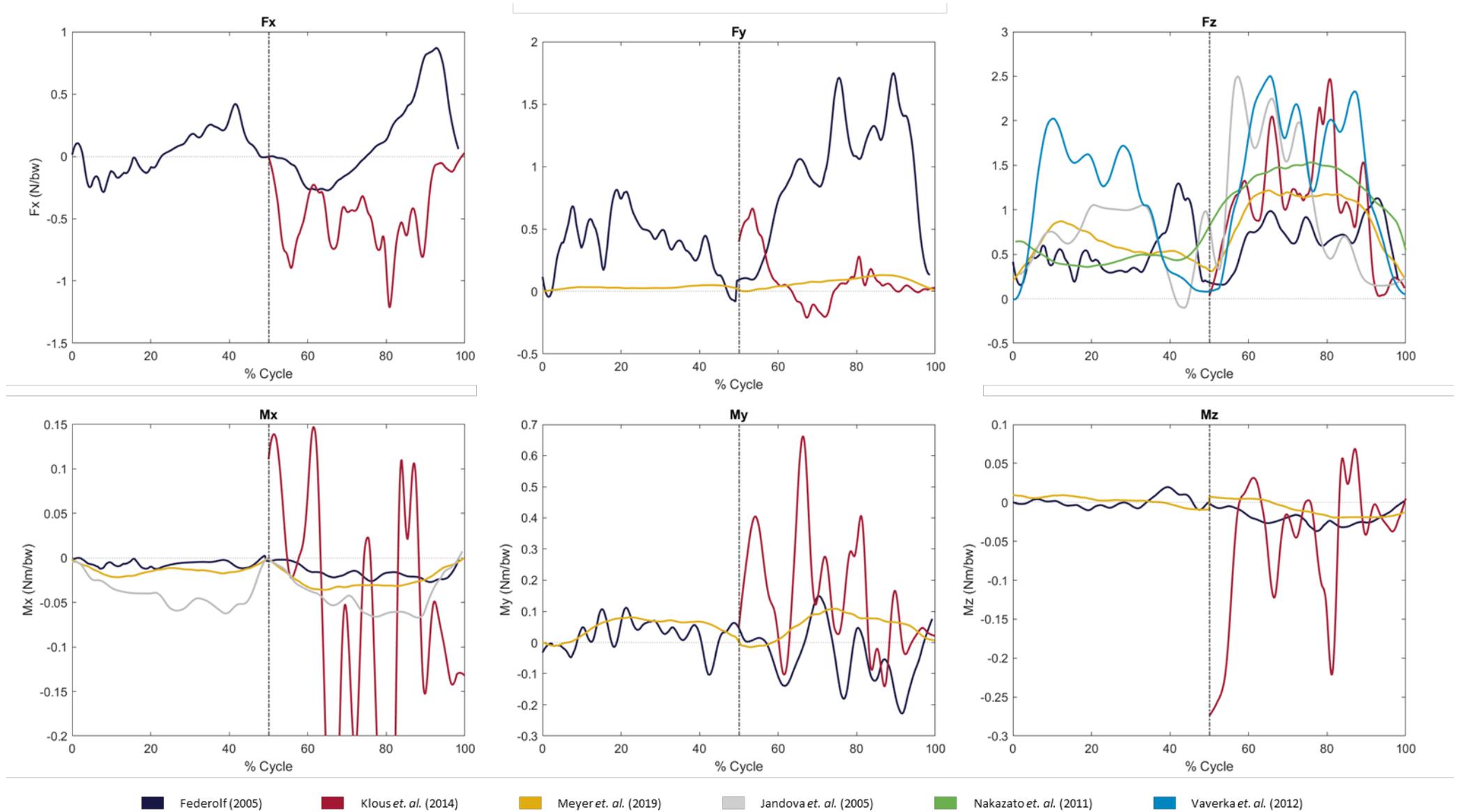


Figure 19 : Représentation graphique de l'évolution des intensités normalisées au poids de corps des forces et des moments dans les 3 axes normalisés au cours d'un virage. Chaque couleur correspond aux résultats présentés dans 6 études différentes.

La force F_z appliquée perpendiculairement au ski est la force la plus décrite dans la littérature. A l'exception des variations dues aux différentes méthodes de traitement des données, le pattern d'évolution de la force durant un cycle est relativement stable d'une étude à l'autre. Quel que soit le pied, F_z est proche de zéro au début du virage, et suit le schéma suivant : montée de force, plateau, baisse de force. Cette forme typique correspond également à la forme de l'évolution de l'angle du genou durant un virage (Figure 2). D'après l'étude de Supej *et al.* 2015, les phases d'initiation, de conduite I et II s'étendent respectivement de 0% à 18%, de 18% à 55% et de 55% à 86% du temps de virage. La phase de complétion dure de 86% à 100% du temps de virage. Les phases de montée de force, plateau, et diminution de force semblent donc correspondre au découpage cinématique des phases de virage proposées par Supej *et al.* Sur l'ensemble des études, F_z est plus importante sur le pied extérieur que sur le pied intérieur. Enfin F_z est la plus élevée des 3 composantes de force. Ces courbes, répétables dans leurs formes mais dont les valeurs varient en fonctions des études, des sujets et des conditions, peuvent être définies comme des signatures de force du skieur. Dans sa définition, une signature (manuscrite) possède une structure stable, mais dont la forme varie légèrement en fonction de paramètres extérieurs (stylo, papier...). Celle du skieur semble stable dans sa structure et varie légèrement selon les paramètres environnementaux et internes au skieur. Dans le reste de ce travail de thèse, l'évolution du signal de force au cours du cycle sera dénommée signature de force. A l'exception de F_z , les signatures de force et de moment dans les différents axes diffèrent beaucoup entre les études. On notera principalement d'importantes différences d'intensité entre les études de Meyer *et al.* (2019) et celles de Klous *et al.* (2014) et Federolf (2005) sur les axes F_x et F_y . Les moments normalisés de l'étude de Klous *et al.* (2014) sont également d'intensité grandement supérieure aux moments détaillés dans d'autres études. Si l'on écarte les moments sur l'axe X mesurés par Klous *et al.* (2014), ceux-ci semblent correspondre à une signature de force semblable. Sur le pied extérieur elles respectent toutes le schéma suivant : augmentation d'un moment négatif, plateau, retour à la valeur initiale. Ces phases semblent également cohérentes avec les phases cinématiques du virage précédemment décrites. La signature de force en M_x semble suivre le même schéma d'évolution que la force en Z.

En conclusion, aucun consensus clair ne se dégage des résultats de ces études sur les axes F_x , F_y , M_y , M_z . Il semble donc nécessaire avant de décrire les interactions entre signature de force et performance, d'établir un compte rendu descriptif des forces et des moments mesurés sur une population vaste de skieurs et dans des contraintes de virages variées.

2.4.2 Influence de la trajectoire des skieurs sur les signatures de force :

Comme vu précédemment, un consensus semble se dégager autour de la forme de la signature de force sur l'axe Z. La stabilité dans la signature de force repose sur des mesures réalisées sur des skieurs de niveaux différents, sur des tracés différents et en utilisant des équipements différents. Il est possible d'en extrapoler que quelle que soit la trajectoire du skieur (imposée par le tracé) la signature de force en Fz moyenne suivra le schéma présenté ci-dessus (montée de force, plateau, baisse de force). Néanmoins, même si la forme générale est respectée, celle-ci semble sensible aux caractéristiques de la trajectoire du skieur. L'étude de Nakazato *et al.* (2011) est la principale étude ayant évalué les interactions entre le tracé d'une course et la signature de force. Quatre conditions de tracé ont été réalisées dans cette étude. Chaque tracé comporte 20 portes permettant d'analyser 10 cycles de virage. Deux tracés ont été réalisés dans une section raide de 23° et deux dans une section plate de 15°. Dans chacune des pentes un tracé dynamique et un tracé peu dynamique ont été effectués par les skieurs. Les caractéristiques des tracés sont détaillées dans la Figure 20 ci-dessous (traduite depuis les travaux de Nakazato).

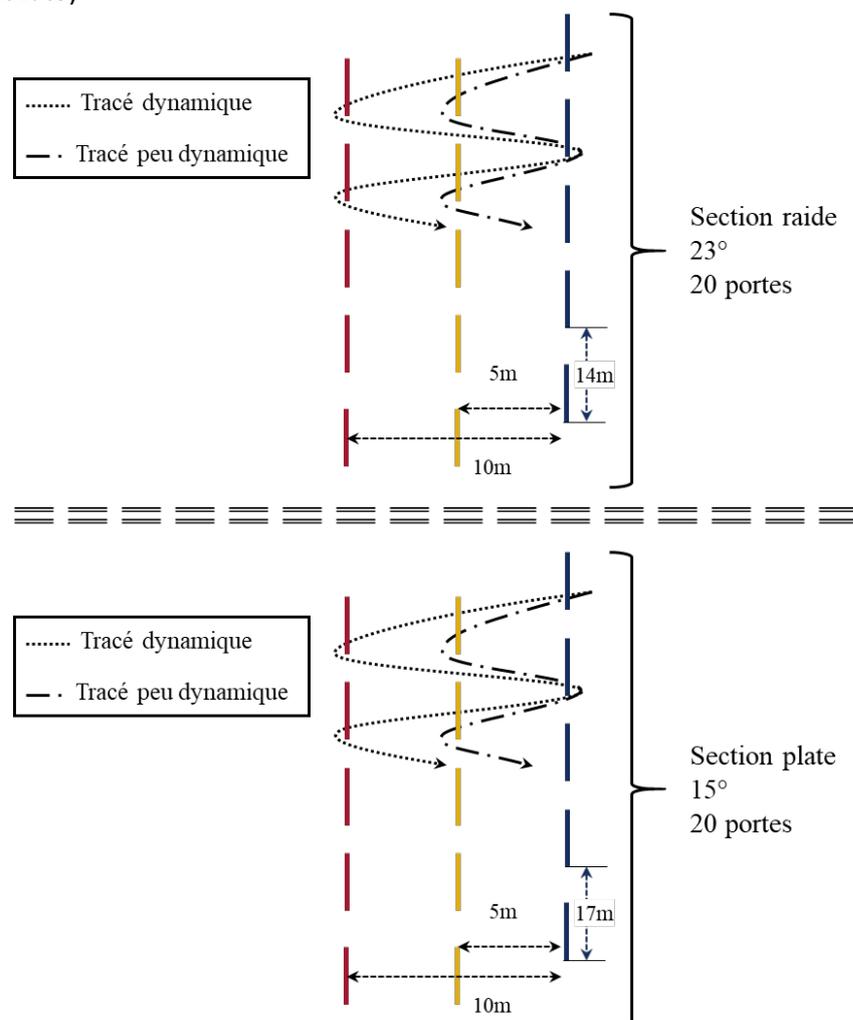


Figure 20 : Représentation graphique des conditions de tracés réalisées dans l'étude de Nakazato *et al.* 2011.

Seule la force sur l'axe Z est analysée, et trois phases du cycle sont considérées : lorsque le pied est à l'extérieur (de 0 à 50% du cycle), lorsqu'il est à l'intérieur (de 50 à 100% du cycle), ou au moment de l'allègement entre deux virages de 40 à 60% du cycle. Notons que la phase d'allègement devrait également intégrer les valeurs de 0 à 10% du cycle et de 90 à 100%. Nakazato et son équipe ont certainement exclu ces phases pour des raisons de clarté. Cependant il est important de noter pour l'interprétation des résultats que les paramètres calculés sur le pied intérieur et extérieur prennent en considération les phases d'allègement. Le Tableau 2 ci-dessous résume les résultats de cet article.

Tableau 2

Variable		Tracé dynamique		Tracé peu dynamique	
		Section plate	Section raide	Section plate	Section raide
FZ moyenne Ski extérieur	(N.bw)	1.22 (SD: 0.105)	1.08 (SD: 0.095)	1.21 (SD: 0.095)	1.11 (SD: 0.1)
FZ max Ski extérieur	(N.bw)	1.795 (SD: 0.215)	1.83 (SD: 0.205)	1.675 (SD: 0.115)	1.73 (SD: 0.165)
FZ moyenne Ski intérieur	(N.bw)	0.535 (SD: 0.07)	0.575 (SD: 0.095)	0.465 (SD: 0.06)	0.47 (SD: 0.09)
FZ min Ski intérieur	(N.bw)	0.265 (SD: 0.06)	0.175 (SD: 0.095)	0.265 (SD: 0.06)	0.225 (SD: 0.105)
FZ moyenne Phase d'allègement	(N.bw)	0.69 (SD: 0.115)	0.545 (SD: 0.115)	0.725 (SD: 0.17)	0.6 (SD: 0.15)
FZ min Phase d'allègement	(N.bw)	0.305 (SD: 0.1)	0.12 (SD: 0.085)	0.34 (SD: 0.105)	0.205 (SD: 0.125)

La population testée était séparée en deux échantillons de niveau différent. Le Tableau 2 présente les données moyennes (pondérées au nombre de sujet) de la population totale. Nous nous attarderons sur les différences entre les niveaux de performance dans la partie 2.4.3. Les marqueurs cinétiques calculés dans cette étude sur Fz en N/bw (moyenne ± écart type) sont : la Fz moyenne et Fz maximum sur le ski extérieur, la Fz moyenne et Fz minimum sur le ski intérieur et phase d'allègement pour les deux conditions de tracé et les deux conditions de pente. L'objectif de l'étude n'étant pas de caractériser l'influence du tracé sur les paramètres de la signature de force, aucun test statistique ni discussion n'est présenté en ce sens-là. A partir des résultats présentés, nous nous permettons de proposer une analyse de l'interaction entre le tracé et certains marqueurs de la signature de force, à partir de certaines tendances émergentes. Il faut également noter qu'aucun détail sur les filtres utilisés

ne sont présentés dans l'article. En cas d'absence de filtrage ou de lissage des données, les valeurs maximales et minimales sont très sensibles aux vibrations ou aux conséquences aléatoires des microreliefs de la piste.

Sur le pied extérieur, le tracé dynamique induit des niveaux de force maximum 6 % plus élevés que le tracé peu dynamique. La force moyenne semble elle peu influencée par le type de tracé (-0.8%). Ce résultat peut s'expliquer par une différence de durée de virage entre les deux tracés. En effet, le tracé dynamique est caractérisé par une distance parcourue plus longue induite par une plus grande distance entre les portes. De ce fait la phase tournante du virage est plus courte (relativement à la durée de cycle). Ainsi les forces maximales plus importantes mesurées dans cette condition sont moyennées avec une phase de traversée plus longue (caractérisée généralement par de plus faibles forces). Sur les sections plates la F_z moyenne sur le ski extérieur est 11% plus importante de que dans les sections raides alors que la F_z max semble peu influencée par le niveau de pente. Cet écart peut venir d'une forme de signature de force différente entre les pentes, avec un plateau de force plus long sur la section plate. Les vitesses de passage et les temps de virage ont peut-être également une influence sur ce résultat mais ne sont pas détaillés dans l'article.

De même, le dynamisme de tracé semble influencer la F_z moyenne sur le ski intérieur et durant la phase d'allègement. La pente de la piste modifie la F_z minimum sur le ski intérieur et la F_z minimum et moyenne durant la phase d'allègement. Comme pour la force sur le ski extérieur, les mécanismes sous-jacents à ces interactions ne peuvent être définis sans les rayons de virage, les vitesses de passage, les temps de virage ou la signature de force. Pour conclure, des interactions semblent exister entre le tracé, la pente et les caractéristiques de la force mais les données présentées dans la littérature sont insuffisantes pour déterminer les mécanismes sous-jacents à ces interactions.

Aucune autre étude n'a mesuré directement l'influence du tracé sur la signature de force. Une analyse des signatures de force dans tous les axes, couplée à une analyse cinématique semble nécessaire pour éclaircir ces interactions.

2.4.3 Influence du niveau de performance des skieurs sur les signatures de force :

La relation entre performance et énergie dissipée présentée dans la partie 1.2.2 détaille l'interaction entre la trajectoire et la dissipation d'énergie mécanique spécifique normalisée à la vitesse d'entrée ($\Delta e_{mech}/v_{in}$) en slalom (Supej et al., 2011) et en slalom géant (Spörri et al., 2018b). Les skieurs les plus performants ont pour caractéristique de limiter le $\Delta e_{mech}/v_{in}$ sur l'ensemble du virage. Cette minimisation ne peut avoir que deux origines, une réduction des frottements aérodynamiques ou une réduction des frictions skis-neige. D'après les résultats de Supej *et al.* (2011), la force de réaction au sol résultante (recalculée à partir des données cinématiques) est positivement corrélée à la quantité

d'énergie mécanique spécifique dissipée par unité d'altitude ($\text{diff}(e_{\text{mech}})$). Dans cette étude Supej *et al.* observent que la présence de force de réaction élevée (entre 2 et 3 N/bw) est plus fréquente chez les skieurs de niveau intermédiaire que chez les skieurs de haut niveau. De même, les forces de réaction au sol sont négativement corrélées à l'accélération du skieur. La présence de ces forces élevées de réaction au sol est donc associée, par les auteurs, à des phases de forte friction (i.e. dérapages) induisant une grande dissipation d'énergie. D'un point de vue énergétique Supej *et al.* (2011) conseillent alors d'éviter les rayons courts et les forces de frictions importantes afin de maximiser la performance en slalom.

Cependant, ces résultats sont remis en cause par les mesures directes réalisées par Nakazato *et al.* (2011). Le protocole expérimental est le même que présenté dans la partie 2.4.2, Nous analyserons dans cette partie les différences entre deux groupes de sujets de niveaux de performance différents. Le groupe expert (GE) est composé de 8 hommes et 2 femmes (Age = 25.7 ± 3.9 ans ; Taille = 1.79 ± 0.09 m ; Poids = 75.7 ± 12.0 kg) et le groupe intermédiaire (GI) de 10 hommes (Age = 23.6 ± 3.0 ans ; Taille = 1.77 ± 0.07 m ; Poids = 71.7 ± 5.1 kg). Les critères d'attribution des groupes de niveau ne sont pas présentés. L'objectif de l'étude n'était pas de caractériser l'influence de la performance sur les paramètres de la signature de force, aucun test statistique n'est présenté en ce sens-là.

Nakazato *et al.* (2011) rapportent néanmoins des valeurs de force maximum et moyenne plus importantes chez les experts que chez les intermédiaires sur le pied extérieur durant la phase de conduite quel que soit le tracé ou la pente. La Fz moyenne sur le pied intérieur durant la phase de conduite est également plus importante chez les skieurs experts. Ces deux résultats peuvent être expliqués par des vitesses de passage plus élevées induites par un niveau de performance plus important. Cette vitesse de passage plus élevée dans le même tracé induit pour les skieurs de devoir réaliser certaines actions en un temps plus court (à l'exemple de la phase de transition entre les virages). Ils subissent de fait une pression temporelle plus élevée. De plus et en accord avec l'Équation 28, à rayon égal, des vitesses de passage plus importantes induisent des forces radiales plus élevées. Ainsi la force Fz plus élevée peut s'expliquer par la projection des forces radiales sur cet axe due à l'angle de prise de carres (Φ). Cette augmentation des niveaux de force Fz liée à l'augmentation des vitesses de passage induit des contraintes musculaires plus importantes pour les skieurs. Certaines hypothèses de travail suggèrent donc que la force maximum des membres inférieurs puisse être un prédicteur de la performance. En effet, une capacité accrue de production de force est généralement acceptée comme une composante physique nécessaire à la performance en ski (Turnbull *et al.*, 2009; Hydren *et al.*, 2013) ou directement corrélée à la performance (Keränen *et al.*, 2010). En revanche, la répartition des forces entre le ski extérieur et intérieur n'a jamais été directement étudiée dans la littérature. Aux vues des résultats présentés par Nakazato *et al.* (2011), la performance en ski alpin est associée à une augmentation de Fz moyenne sur les skis intérieur et extérieur. Enfin, durant la phase

d'allègement, les skieurs experts appliquent des niveaux de force moyen et minimum plus importants que les skieurs intermédiaires. D'après ces résultats, les différences de motricité et d'application des forces entre les niveaux de performance semblent être présentes lors de toutes les phases du cycle. En conclusion, l'interaction entre niveau de performance et signature de force est mise en évidence dans plusieurs études, mais les résultats divergent. Cette divergence peut être liée à la méthode de mesure indirecte des forces utilisée par Supej *et al.* (2011), mesurant une résultante globale et non une force normale au ski. L'interaction entre la signature de force et la performance pourrait aussi être situationnelle et/ou liée à la discipline. En effet les fortes pentes et les rayons courts caractéristiques du slalom pourraient favoriser une influence négative énergétiquement forces de réactions au sol. Enfin une analyse de la signature de force sur l'ensemble du cycle et spécifique aux différentes phases du cycle semble nécessaire afin d'éclaircir ces interactions avec la performance.

3 Hypothèses de travail :

Chaque virage en ski alpin est composé d'une phase d'initiation, une phase de conduite et une phase de complétion. Chacune de ces phases est associée à une activité motrice spécifique et latéralisée. Chaque phase, selon le pied étudié, est associée à un angle articulaire, un régime de contraction, des objectifs moteurs (partie 1.1.1) et une évolution cinématique propre (partie 2.4.1). Cependant, à l'exception de la force sur l'axe Z, aucun consensus ne se dégage dans les autres axes quant à la cinétique standard (intensité et temporalité) d'un virage en ski alpin, appelée signature de force. Cette absence de consensus peut être liée à la variabilité des conditions expérimentales entre les précédentes études, aux faibles tailles d'échantillons mesurés, ou à une motricité dénaturée liée aux outils de mesures utilisés.

Le **premier objectif de travail** est donc de mesurer les forces et les moments sur les trois axes au cours d'un cycle typique en ski alpin et d'analyser ces évolutions au regard des différentes phases de virage. Cette description a pour but de déterminer et d'interpréter les invariants de la signature de force typique en ski alpin. Dans la littérature existante, seule la force sur l'axe Fz est précisément décrite, l'absence de consensus autour du pattern et des intensités de force et de moment dans les autres axes entraîne des difficultés d'interprétation de la motricité en ski. Afin de compléter cette littérature, la description des actions cinétiques du skieur doit reposer sur un vaste échantillon de skieurs de niveau varié et un tracé varié typique d'une course de SG. Nous utiliserons pour cela un outil de mesure innovant mesurant de façon directe les forces et les moments en 3D de manière la plus écologique possible. La gestion de l'interaction entre le ski et la neige est le seul outil du skieur pour évoluer sur la piste. Cette gestion des interactions permet au skieur de moduler sa vitesse, sa trajectoire ou son équilibre. L'analyse de ces interactions est donc un point déterminant de la compréhension des différences de performance entre les skieurs. Les skieurs de haut niveau sont caractérisés par des vitesses de passage plus élevées (partie 1.2.3) impliquant de fait, des forces radiales plus importantes durant les virages (partie 2.2.2.4). D'après la littérature, ces différences entraînent des niveaux de force normale au ski plus importants et une plus faible quantité d'énergie mécanique dissipée au niveau de l'interaction ski-neige (partie 2.4.3).

Le **deuxième objectif de travail** est de quantifier et qualifier l'influence du niveau de performance sur la signature de force dans un cycle de ski alpin. En conséquence des temps de virage plus courts et des niveaux de force normale plus importants (liés à des vitesses de passage plus élevées), nous émettons l'hypothèse que les intensités et les pentes d'évolution de ces intensités sont influencées par la performance des skieurs. Actuellement, seule la force normale au ski est précisément décrite dans la littérature. La réalisation de cet objectif de travail induit de nombreuses sous-hypothèses qui ne pourront être déterminées qu'après l'état des lieux des signatures de force et moment dans les 3 axes.

Les hypothèses spécifiques seront décrites dans la partie *Analyse descriptive des signatures de force 3D* (partie 3.1). Au regard de la faible quantité d'informations dans la littérature scientifique, certaines hypothèses seront proposées en se basant sur des observations empiriques communément admises par les observateurs ou les entraîneurs de ski alpin.

Le **troisième objectif de travail** est donc de quantifier l'influence des singularités cinématiques sur les signatures de force. Les paramètres cinématiques du CG du skieur et leurs interactions avec la performance cristallisent de nombreux questionnements dans la littérature scientifique en ski alpin. La formule de détermination de la force radiale relie les paramètres cinématiques du CG du skieur (vitesse et trajectoire) et les forces auxquelles celui-ci est soumis. Le niveau de pente et le tracé ont également une influence sur le comportement cinématique du skieur. Cependant les conséquences d'un changement de trajectoire du skieur sur les caractéristiques cinématiques n'ont jamais été évaluées directement. En situation de compétition, un skieur doit adapter sa motricité à de nombreuses singularités cinématiques, qu'elles soient imposées par la géomorphologie de la piste, la vitesse du skieur au regard de sa vitesse barrière ou la trajectoire privilégiée du skieur. Deux hypothèses principales sont associées à cet objectif de travail.

- Différentes stratégies de trajectoire existent pour réaliser un virage. Une stratégie de trajectoire idéale unique ne semble pas se dégager des informations de la littérature. Le même temps de course pouvant être réalisé avec des stratégies de trajectoire opposées. Cependant certaines études mettent en évidence l'existence d'un profil de skieur privilégiant une stratégie stable durant une course. A partir de ces informations nous pouvons faire l'hypothèse que les différences d'approches de trajectoire entre les skieurs entraînent des modifications des paramètres de la signature de force.
- Les paramètres liés à la morphologie de pente et au tracé de course ont une influence sur la cinétique et la cinématique du skieur. De plus la vitesse d'entrée du skieur dans un virage au regard de sa vitesse barrière semble être un paramètre explicatif de son comportement. Le skieur peut être ou non en recherche de vitesse dans ce virage, ce qui modifiera sa motricité. L'ensemble de ces paramètres (tracé, morphologie de piste, et vitesse barrière) définissent des profils singuliers de virage (partie 1.3). A partir de ces informations nous émettons l'hypothèse que la singularité du virage influe sur certains marqueurs de la signature de force.

Les trois objectifs de thèse et les étapes pour y répondre sont détaillés dans le Tableau 3.

Tableau 3



PRESENTATION DES TRAVAUX DE THESE
 Etapes d'analyse

RESULT LIST

Premier objectif de travail		
5.1	Analyse descriptive des signatures de force	
	▶	Description des signatures de force
	▶	Mise en relation avec la motricité du skieur
	▶	Comparaison avec la littérature
Deuxième objectif de travail		
5.2	Influence de la performance sur les signatures	
	▶	Analyse SPM
	▶	Feature Extraction
Troisième objectif de travail		
5.3	Influence des singularités sur les signatures	
	▲ 1	Singularité des virages
	▲ 2	Singularité des athlètes

4 Protocole de recherche :

L'ensemble des résultats décrits et discutés dans ce travail de thèse est issu d'une seule base de données obtenues sur une période d'expérimentation unique. La partie protocole de recherche détaillera l'ensemble des informations relatives à la population étudiée, au design expérimental mis en place dans cette période d'expérimentation, aux outils de mesure utilisés, et aux traitements de données appliqués afin d'obtenir cette base de données de mesure. L'ensemble des traitements de données spécifiques à un objectif de travail ou une hypothèse de recherche sera détaillé dans la partie dédiée. L'expérimentation réalisée et détaillé dans cette partie a déjà été décrite dans les articles publiés (Cross et al., 2019, 2021; Delhayé et al., 2019, 2020) en annexes 5-6-2-3.

4.1 Population :

Dix-sept skieurs alpin masculins ont participé à l'étude (moyenne \pm SD : 28.6 \pm 9.3 ans, taille 179.7 \pm 5.7 cm, masse 75.6 \pm 9.3 kg). Le niveau de performance des skieurs était volontairement varié et de grande amplitude. Les skieurs au plus faible niveau de notre échantillon sont des skieurs réguliers skiant en loisir et occasionnellement dans un tracé de compétition (ils sont de fait, non classés par la Fédération internationale de ski [FIS]) Les exigences du tracé, des skis et du matériel de mesures rendent impossible la sélection de skieurs de niveau plus faible pour cette expérimentation. Les skieurs ayant le meilleur niveau de notre échantillon sont des concurrents parmi les mieux classés actuellement en Coupe du monde FIS élite (points FIS < 2) ou récemment (< à 2 ans) retraités de la Coupe du Monde FIS élite. Entre ces deux bornes, un continuum de niveau e été recherché dans notre population. Si l'on considère le temps de course

comme marqueur macroscopique de la performance, sa répartition ne suit pas la loi normale et s'approche d'une répartition plate attendue (Figure 21). Il existe cependant, au sein de notre échantillon, un groupe homogène de 10 skieurs ayant réalisé des temps de course compris entre 28 et 30 secondes. Ce sous-groupe sera étudié spécifiquement dans la partie 5.3.2. Chaque skieur a été informé du contenu de l'étude et a

donné son consentement écrit pour y participer. L'expérience a été menée dans le cadre de la Déclaration d'Helsinki et a été approuvée par le comité local d'éthique de l'Université Savoie Mont-Blanc.

Notons que plusieurs interprétations dans ce travail de thèse reposent sur les relations entre le niveau

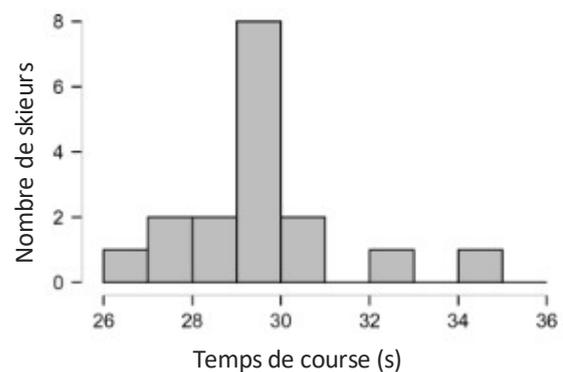


Figure 21 : Distribution des skieurs en fonction du temps de course réalisé.

u(de performance des skieurs et leurs caractéristiques intrinsèques physiques et techniques. La première étant la corrélation entre les capacités physiques (hors neige) des skieurs et leur niveau de performance. Celle-ci a déjà été détaillée dans des échantillons de niveau plus homogène que le nôtre (Turnbull et al., 2009; Hydren et al., 2013; Cross et al., 2020). Les résultats de cette étude seront détaillés dans la partie 6, les niveaux de corrélation varient entre les indices choisis et les comparaisons réalisées. Toutefois, une des conclusions de l'article atteste de la bonne corrélation entre les caractéristiques de force maximale volontaire et de niveau de montée en force avec le niveau de performance des skieurs. Nous pouvons alors considérer la corrélation entre niveau de performance et capacités musculaires spécifiques au ski alpin comme existante pour notre échantillon, au sein duquel les différences de niveaux sont bien plus vastes. La deuxième relation à considérer est celle entre le niveau de performance des skieurs et leurs qualités techniques. Il est difficile d'estimer la qualité technique d'un athlète tant celle-ci repose sur des paramètres variés (coordination, organisation motrice et sensorielle dans l'espace, timing de déclenchement, « toucher de neige », adaptation...). L'ensemble de ces capacités techniques est nécessaire afin d'appliquer efficacement les forces aux skis et à la neige (Supej et al., 2020). Ainsi, l'apparition de hautes intensités de force et de moment démontre des capacités techniques et physiques intrinsèques suffisantes à leurs observations. Aux vues de l'importante variabilité de niveau des skieurs étudiés, nous considérerons leurs qualités techniques comme intrinsèquement et globalement corrélées à leur niveau de performance. Conscient des implications de ce postulat, celui-ci ne sera utilisé que pour des interprétions globales appliquées à l'ensemble de la population (Erdmann et al., 2017).

4.2 Design expérimental :

La phase d'expérimentation s'est déroulée sur une piste fermée du domaine skiable d'Avoriaz, sur une période portant du 22 mars 2018 au 19 avril 2018. Tout au long de l'expérimentation (5 semaines), la qualité de la neige (dureté, humidité < 60%, température $\approx 1^{\circ}\text{C}$) et les conditions environnementales (température, vent, visibilité) ont été observées. Les expérimentations ont eu lieu au cours des trois premières heures suivant l'ouverture de la station. La piste a été damée toutes les nuits précédant les expérimentations et un lissage de la neige a été effectué entre chaque course pour limiter la formation de microreliefs. Les essais n'ont été effectués que si la température au cours de la nuit précédente était suffisamment froide pour geler la neige. Si ces facteurs n'étaient pas jugés acceptables, l'expérimentation était décalée à un autre jour jusqu'à ce que les conditions se stabilisent. Enfin durant la fin de la période d'expérimentation, la température au lever du soleil était moins froide et le réchauffement de la piste arrivait également plus rapidement. Les expérimentations se sont alors concentrées en début de matinée afin de conserver des températures acceptables et reproductibles. Durant cette période, la température maximale relevée durant les expérimentations était de l'ordre

de 8°C. Pour éviter le ramollissement trop important de la neige celle-ci était salée aussi afin de la durcir.

Les skieurs ont réalisé 2 à 4 descentes de familiarisation dans le tracé de l'expérimentation. Ces descentes permettaient aux skieurs de reconnaître le tracé de course et de s'habituer aux skis, chaussures et fixations d'expérimentation ainsi qu'au matériel de mesure qui les équipait. Puis, avant le départ pour la descente de mesure, les skieurs suivaient le protocole de tarage des plateformes de force. Installés sur un support plat et rigide (planche en bois) et comme détaillé dans la partie 2.2.4, cette calibration consistait à lever alternativement le pied gauche et le pied droit. Les skieurs étaient équipés avec tout le matériel d'expérimentation (skis, chaussures, équipement, capteurs, carte acquisition) de sorte que lorsqu'ils lèvent un pied, les forces de compression de la fixation et le poids du ski soient mesurés par les plateformes. Après cette calibration le skieur frappait la neige avec le ski gauche. Cette action générait un important pic visuel, de force et d'accélération mesurés par les capteurs permettant la synchronisation *à posteriori* des différents signaux de mesures entre eux.

Puis les skieurs ont effectué une ou deux descentes de mesure, chronométrées sur le tracé d'expérimentation. La consigne donnée aux skieurs était la suivante : « skier le plus rapidement possible tout en évitant le risque de chute ». Les athlètes ont donc reçu la consigne de finir la course en priorité, et dans cette contrainte de réduire le temps de course autant que possible. Les descentes étaient séparées d'une période de récupération passive d'environ 15 minutes (incluant la remontée en télésiège et la phase de calibration). Le meilleur temps des deux descentes était conservé pour l'analyse. Les skieurs étaient questionnés sur leur ressenti de course à la fin de la descente. Le tracé d'expérimentation a été initialement tracé par un entraîneur-formateur de ski national. Le tracé de type GS est composé de 16 portes espacées d'une distance moyenne horizontale de $\approx 23\text{m}$ et d'un décalage de $\approx 8\text{m}$ sur une pente non injectée inclinée en moyenne à $\approx 25^\circ$. La configuration était proche de la configuration de la compétition avec des irrégularités dans le traçage et dans la pente. Pour des raisons de sécurité, la mise en place du tracé ne contenait pas de pente latérale (*i.e.* devers), de saut, ni de rupture de pente dans les virages. Les caractéristiques de chacun des virages sont détaillées dans le Tableau 5.

En tout, 14 matinées d'expérimentations ont été réalisées. A la fin de chaque journée, les portes devaient être retirées pour assurer le damage de la piste. Pour s'assurer de la répétabilité du tracé jours après jours, nous avons mis en place une méthodologie de traçage basée sur des jalons fixes plantés sur le côté de la piste, à l'extérieur de la zone de damage. Ces jalons n'ont pas bougé durant l'ensemble de la période de mesure. Lors du traçage initial, les distances portes à portes et les distances portes-jalons ont été mesurées. Lors des autres traçages, la position de chaque porte a été triangulée en fonction de deux jalons fixes et des deux portes précédentes afin de reproduire précisément le tracé

initial. Plusieurs vérifications ont été réalisées au cours de la période d'expérimentation et n'ont pas mis en avant de dérive dans le positionnement des portes.

4.3 Matériel et outils de mesure :

4.3.1 Equipement de ski :

Tous les skieurs utilisaient la même paire de skis de course (SALOMON Lab X-Race 2018– Annecy – France ; rayon : 30 mètres, longueur : 193 cm) et de fixations (SALOMON X19 2018– Annecy – France). Un technicien préparait la semelle et les carres des skis avant chaque jour d'expérimentation. Le perçage des fixations a été modifié pour accueillir les plateformes de force en élargissant celui-ci de 60 mm. Il permettait de chausser des coques de skis d'une pointure de 24.5 à 28.5. Les plaques d'interface entre le ski et la fixation utilisées sont celles habituellement utilisées avec la fixation X19. Elles sont normalement composées de deux parties en polymère sous chaque partie de la fixation. Elles ont ici été séparées de 60 mm supplémentaires. Tous les skieurs étaient équipés du même modèle de coque de chaussure de ski (SALOMON XLAB 140+ WC 2018 – Annecy - France), dans leur pointure respective. Certains skieurs ont fait le choix d'utiliser leurs propres chaussons pour des raisons de confort. Les skieurs utilisaient leur propre combinaison de course et d'autres vêtements de course et équipements de protection approuvés par la FIS (p. ex., gants, casque, masque, protection dorsale).

4.3.2 Equipement de mesure cinématique :

Les athlètes étaient équipés d'un système de Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites (GNSS) portable de sport (≈ 20 g) (modèle : Stadium tracker, Mac-Lloyd Sport – Paris – France) monté dans un petit sac ceinture fixé à peu près à la hauteur du centre de masse (vertèbre L5). Le GNSS a recueilli des données positionnelles provenant à la fois des systèmes de constellations de satellites russes (GLONASS) et américains (GPS) avec une fréquence d'acquisition variable (en fonction des constellations satellitaires) entre 1 et 18 Hz. Ce GNSS intègre une centrale inertielle (IMU) accéléromètre/gyroscope/magnétomètre avec une fréquence d'acquisition à 100 Hz. Les données ont été recueillies à l'aide du logiciel fourni par le fabricant, qui comportait un algorithme de fusion (Caron et al., 2006) conçu pour améliorer la précision du positionnement en combinant les données issues d'un satellite avec les capteurs inertiels. Cette méthode est désormais fréquemment utilisé en ski (Brodie et al., 2008; Brodie, 2009; Fasel et al., 2016b; Gløersen et al., 2018). Cet algorithme de fusion fournit des données de positions X,Y,Z et des vitesses recalculées par méthode Doppler à une fréquence d'échantillonnage variable entre 1 et 10 Hz.

Les unités GNSS sont largement utilisées dans la littérature scientifique sportive (Boffi et al., 2016; Gløersen et al., 2018). Elles permettent l'acquisition de données pertinentes pour l'analyse de la

performance en ski (Supej et al., 2020) notamment pour le calcul de la dissipation d'énergie mécanique spécifique. Cependant, la précision entre les systèmes est très variable (Gilgien et al., 2014). Pour tester la précision du système Mac-Lloyd utilisé et de notre approche méthodologique, nous avons effectué deux études de validité. La première étude consistait à valider la précision et la répétabilité d'un système GNSS cinétique en temps réel (RTK) sur un parcours cinématiquement proche des conditions d'une descente en ski mais parfaitement répétable, *i.e.* une piste de lugé d'été sur rail en montagne (Article en cours de publication, Cross, 2020, pages 121-145- Annexe 4). Les résultats ont montré une variabilité longitudinale de 0.023 ± 0.0075 m et une variabilité en altitude de 0.19 ± 0.066 m du système RTK. La deuxième expérimentation visait à comparer lors d'une situation de ski alpin la précision des paramètres cinématiques intra-skieurs issus soit du système RTK soit du système GNSS Mac-Lloyd utilisé durant l'expérimentation. Les paramètres cinématiques choisis sont les paramètres classiquement utilisés dans la littérature (temps de virage, vitesse moyenne en virage, vitesse d'entrée en virage, distance parcourue et $\Delta e_{mech}/v_{in}$). Les résultats montrent un biais généralement faible (<1.5% pour toutes les variables, à l'exception de la dissipation d'énergie [4.5%]), avec une concordance allant de modérée à très forte pour toutes les variables.

Le temps entre le départ et la fin de la course a été mesuré à l'aide d'un chronomètre sans fil approuvé par la FIS (Tag Heuer- La Chaux-de-Fonds - Suisse). Ce système se compose d'un portillon de départ et une cellule photo voltaïque à double faisceau réglée à environ la hauteur de cuisse à la porte finale de la course. Les informations sur les événements d'ouverture du portillon et de passage dans les cellules laser sont transmises respectivement par onde radio et par liaison filaire. La résolution du chronomètre est de 0.001 seconde.

Dans le but d'enregistrer les événements de course et la motricité globale du skieur, deux caméras (modèle : Hero 5, GoPro – San Mateo – USA) ont été utilisées pour filmer chaque skieur. L'une était actionnée par un expérimentateur filmant les portes 6 à 9, et la seconde était tenue par un autre expérimentateur suivant en ski le skieur à environ 5 à 10 m. Les deux caméras ont été apposées sur des stabilisateurs portatifs (modèle : G5, FeiyuTech – Guilin – Chine). Les caméras étaient synchronisées manuellement avec chaque essai en filmant une partie du processus d'étalonnage.

4.3.3 Equipement de mesure cinétique :

La plateforme de force utilisée dans l'expérimentation est celle déjà largement détaillée dans la partie 2.3.3. Aucune modification sur les plateformes n'a été réalisée pour cette expérimentation. La fréquence d'échantillonnage pour l'ensemble des mesures cinétiques est de 200 Hz.

Durant les expérimentations, la chute d'un des skieurs a entraîné l'apparition d'un court-circuit interne entre la masse d'alimentation et la voie n°2 du capteur avant droit. Ce court-circuit induit une

imprécision de la mesure du pied droit sur les passages de nombreux skieurs. Aucune calibration fiable n'a été réalisée avec les chaussures d'expérimentation avant l'apparition de ce court-circuit, rendant la détermination des contraintes cinétiques impossible pour ces fichiers. Il est possible d'estimer globalement les intensités de force et de moment sur le pied droit avant la chute, mais cette estimation implique une erreur de l'ordre de 0 à 60 N en fonction des axes et des pointures des chaussures. A la suite de cet événement, nous avons décidé pour ce travail de thèse de ne traiter et analyser les variations d'intensité de force et de moment que sur le pied gauche. La seule exception est l'utilisation des valeurs approximatives du pied droit dans le découpage des virages (détaillé dans la partie 4.4).

4.4 Traitement de données :

L'intégralité du traitement de données a été réalisée sur Matlab (R2017b – R2021a, *The Mathworks Inc* – Natick – États-Unis). Plusieurs codes ont été utilisés afin de réaliser le traitement de données. La première étape consiste à ouvrir et synchroniser les fichiers cinétiques et cinématiques, puis de calculer les indices cinématiques et enfin de générer la base de données des signatures de force.

4.4.1 Ouverture et synchronisation des données cinétiques et cinématiques :

Les fichiers GNSS sont importés sur Matlab. Sur ces fichiers, lorsque les informations de position sont inférieures à 6 Hz (à cause d'une réception satellitaire insuffisante), le logiciel d'export du GNSS génère une auto-interpolation au plus proche voisin (*1D nearest-neighbour*). Nous réalisons des interpolations linéaires sur ces zones afin d'obtenir un déplacement continu sur la ligne de temps. Une interpolation à 200 Hz est ensuite réalisée grâce à la fonction `interp1` en utilisant la méthode « *Makima* ». Cette méthode permet de générer moins d'ondulation que la méthode cubique « *spline* » et génère moins de changements abrupts que la méthode « *pchip* ». Puis les fichiers sont rognés pour conserver uniquement la descente du skieur.

Les deux fichiers de calibration (un pour chaque pied levé) et le fichier d'acquisition de la descente sont importés dans Matlab. Ces fichiers sont composés des données brutes (en V) des 24 voies des plateformes de force. Les fichiers de calibration ont une durée comprise entre 2 et 4 secondes. La moyenne des données brutes de chaque voie du pied levé est calculée pour les deux fichiers de calibration. Les valeurs moyennes de chaque voie du fichier de calibration où le pied est levé sont soustraites au pied correspondant sur fichier d'acquisition de la descente pour chaque skieur. Le calcul matriciel présenté dans la partie 2.3.3 est réalisé en utilisant la matrice de calibration correspondant à la pointure de la chaussure. Lorsque le skieur réalise les phases de calibration, 100% de son poids de corps se situe sur le pied non levé. La force résultante (F_r) durant cette période est calculée (Équation

35) et utilisée pour normaliser les fichiers d'expérimentation au poids de corps du skieur :

Équation 35
$$F_r = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

Les fichiers de GNSS et de force sont synchronisés en utilisant une cross-corrélation basée sur les pics de force et d'accélération induits sur les signaux lorsque le skieur frappe le sol avec son ski. Pour tous les passages, l'ajustement temporel entre les deux fichiers est validé visuellement. La longueur du fichier de force est ajustée pour correspondre à la longueur du fichier GNSS.

4.4.2 Calcul des paramètres cinétiques et cinématiques :

A partir du set de données de cette expérimentation, nous avons déterminé que les différentes méthodes de découpage de virage généraient des différences notables dans la définition même du virage. Celles-ci peuvent amener des variations dans le calcul de certains paramètres cinétiques et cinématiques (Delhaye et al., 2019 - Annexe 2). A partir de ces observations et résultats, nous avons conclu que la méthode de découpage choisie doit être en adéquation avec le type d'analyse réalisée. Dans ce travail de thèse centré sur l'analyse cinématique de la performance, la méthode de découpage que nous utiliserons est la méthode de référence cinématique proposée par Nakazato *et al.* (2011) (relative à l'approche 1).

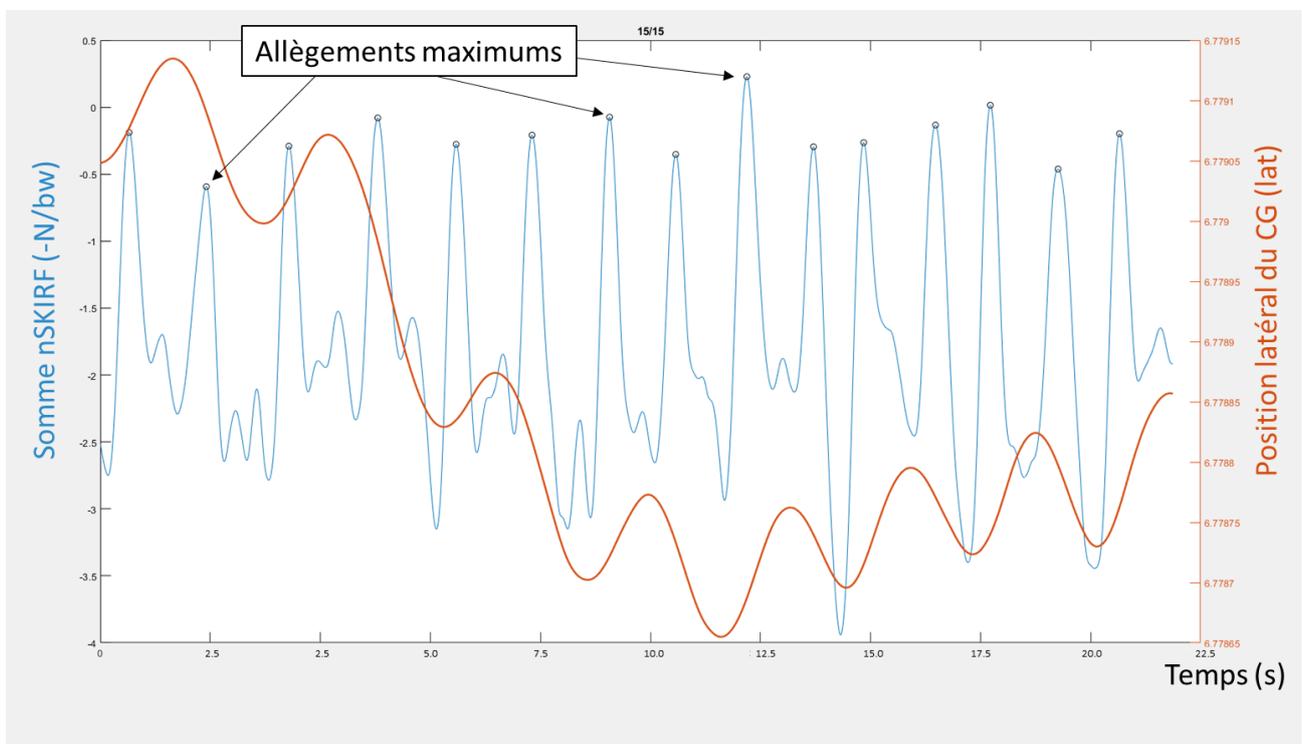


Figure 22 : Représentation graphique de l'évolution au cours du temps de la somme des forces normales au ski des deux pieds normalisée au poids de corps (bleu-N/bw) et de la position latérale du centre de gravité du skieur (orange-°lat). Les cercles noirs représentent les événements de pics d'allègement maximum déterminant les événements de découpage cinétique des virages.

Dans cette méthode, les forces de réaction normale (nSKiRF) des deux skis sont sommées puis filtrées par un filtre butterworth, passe bas, d'ordre 2 avec une fréquence de coupure à 1.5 Hz. Cette somme est multipliée par -1 afin que les valeurs de force soient négatives et que les zones maximums d'allègement créent des pics (et non des creux). Les pics maximums d'allègement sont ensuite détectés automatiquement avec les critères suivants (empiriquement déterminés) : la hauteur maximale du pic est au minimum de -1 N/bw, sa prééminence minimum est de 0.5 N/bw et la durée minimum entre deux pics est d'une seconde. La détection des pics est à *posteriori* validée visuellement (Figure 22) et la position des pics peut être modifiée manuellement par l'expérimentateur. Les données brutes (non filtrées) de force et de moment dans les 3 axes ainsi sont coupées en virage, à partir des évènements temporels déterminés par cette méthode cinétique. Les données sont filtrées à l'aide d'un filtre Butterworth, d'ordre 2, passe-bas. La fréquence de coupure, choisie à ce moment, dépend de l'hypothèse de travail. Ces données dans les 3 axes de chaque virage sont interpolées temporellement sur 300 points en utilisant la méthode « *makima* ». Les données du pied gauche de deux virages à suivre sont concaténées afin de recréer un cycle. Cette procédure est réalisée pour l'ensemble des virages de l'ensemble des skieurs et constitue la base de données cinétiques de l'expérimentation. La méthode de calcul des autres paramètres cinétiques spécifiques à un axe de la signature de force est détaillée dans les parties relatives aux hypothèses impliquées.

Plusieurs paramètres cinématiques sont calculés pour l'ensemble des virages des skieurs, en gardant le découpage cinétique comme méthode de détection du virage. La vitesse issue de la fusion de données des capteurs Mac-Llyod est utilisée pour le calcul de la vitesse moyenne durant le virage (en m.s⁻¹). La variation de vitesse au cours du virage (en m.s⁻¹) est calculée par soustraction entre la vitesse à la sortie du virage et la vitesse à l'entrée du virage. Les données de longitude et de latitude (en degrés) issues du système GNSS sont converties sur un plan ellipsoïde en utilisant la transformation standard WGS84 (référentiel Lambert étendu II). Les vitesses de déplacement et de rayon de courbure sont calculées uniquement à partir des données 2D, la distance parcourue est calculée à partir des données 3D. Ces données sont traitées en utilisant un filtre Savitzky – Golay, d'ordre 2, sur une fenêtre d'une seconde. Les rayons de courbure sont calculés pour l'ensemble de la descente par ajustement à un cercle en utilisant la méthode de Pratt (Pratt, 1987). A partir des données GNSS interpolées, plusieurs paramètres cinématiques sont calculés. Le rayon minimum de chaque virage est déterminé. Les évènements de passage du rayon de courbure au-dessus et en dessous d'un seuil de 30 mètres permettent de séparer le virage en deux phases : la ligne droite (SL) et la phase tournante du virage (TP). Les temps de ces deux phases sont calculés (respectivement t^{SL} et t^{TP} en s) et utilisés pour calculer la durée relative du virage passée en ligne droite (t%SL) grâce à l'Équation 36 :

Équation 36
$$t\%SL = \frac{t^{SL}}{t^{SL} + t^{TP}}$$

5 Analyse des signatures de force :

5.1 Analyse descriptive des signatures de force :

Le **premier objectif de travail** est de mesurer les forces et les moments en trois dimensions au cours d'un cycle typique en ski alpin et d'analyser leurs évolutions au regard des différentes phases de virage. Cette partie de thèse exploratoire n'est reliée à aucune hypothèse sous-jacente. Elle a pour but une meilleure description des signatures de force dans 3 dimensions. Il est à rappeler qu'elle porte sur 17 skieurs de niveau loisir à coupe du monde, au cours de 7 cycles lors d'un GS d'un tracé varié. Il en ressort une variabilité inhérente, assumée, permettant une description large du ski en GS. Nous détaillerons ici les forces et les moments dans les trois axes (Figure 23- Pied extérieur).

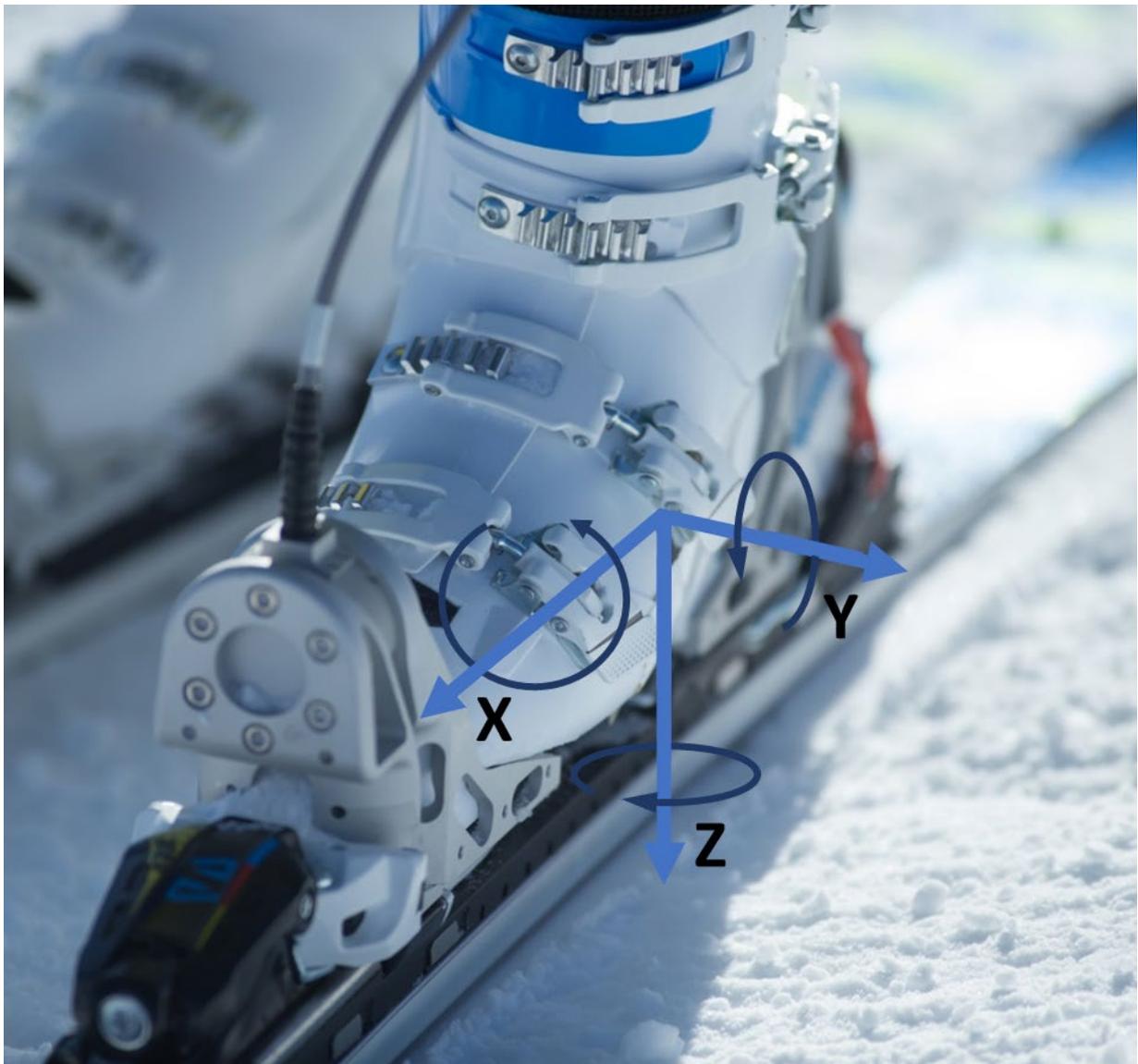


Figure 23 : Photo de la plateforme de force 3D en conditions d'expérimentation. Les flèches représentent la direction et le sens des axes de mesures de F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z pour le pied gauche lorsque celui-ci est située à l'extérieur du virage.

L'ensemble des résultats descriptifs des signatures de force est présenté sous la forme de graphique dans la partie 5.1.2 (Figure 27, Figure 28, Figure 29, Figure 32, Figure 35, Figure 36). Comme expliqué dans la section 1.1.1 les forces sont décrites en fonction du pourcentage de cycle. La première moitié du cycle correspond à la situation durant laquelle le pied étudié est le pied intérieur, la deuxième partie du cycle correspond à la situation durant laquelle le pied étudié est le pied extérieur. De ce fait, 100% du cycle correspond à l'enchaînement de deux virages. L'ensemble des valeurs sont exprimées en Newton normalisées par le poids de corps (exprimé lui aussi en Newton noté N/bw). Afin de faciliter la lecture des courbes, les données présentées dans cette partie sont filtrées avec un Butterworth d'ordre 2, passe-bas, avec une fréquence de coupure à 4 Hz. La ligne bleue correspond à la moyenne de tous les virages de tous les skieurs (n=17). Les lignes pointillées rouges correspondent aux valeurs minimales et maximales parmi l'ensemble des courbes moyennes des skieurs. La surface grisée correspond à l'écart type entre les courbes moyennes de chaque skieur. Nous détaillerons individuellement chaque axe étudié en conservant un schéma explicatif stable pour chaque partie. (i) Nous détaillerons le sens et la direction des intensités de forces de l'axe étudié. (ii) Puis, pour les forces et les moments dans chaque axe, nous réaliserons une description de l'évolution de l'intensité au cours du cycle. Cette description est construite sur la base de valeurs remarquables des courbes d'intensité. La détermination de ces points remarquables est réalisée visuellement *a posteriori*. Ces points renseignent sur les événements majeurs de modification de la signature de force au cours du cycle. Ils sont détaillés *à posteriori* ainsi leur nombre peut varier suivant les axes en fonction de la forme de la signature de force. Un tableau de données détaille les valeurs absolues et normalisées au début et à la moitié du cycle et pour chaque des points remarquables de la signature de force. (iii) Le descriptif des forces est suivi d'une mise en relation avec les actions motrices du skieur pendant le virage. La description de la motricité du skieur dans la littérature scientifique a été abordée dans la partie 1.1.1. et est mise en relation avec le bilan des forces réalisé dans la partie 2.2.2. Ces informations seront complétées par des connaissances techniques et empiriques décrites dans des documents édités par les fédérations nationales de ski ou dans les programmes de formation des moniteurs. Les principaux documents utilisés sont les documents édités par l'ENSA en France, la *Deutscher Skilehverband* en Allemagne, l'*U.S Ski and Snowboard Association* aux Etats-Unis et la *NZSIA* en Nouvelle-Zélande. (iv) Enfin une comparaison entre les données des forces et des moments mesurés et les données de la littérature scientifique complète cette analyse. Les données mises en comparaison sont celles présentées dans la partie 2.4.1.

5.1.1 Données brutes :

Avant de commencer la description des signatures de force moyenne de l'ensemble de la population, il est intéressant d'observer l'évolution des données brutes obtenues durant la phase expérimentale de quelques cycle typique d'un skieur. La Figure 24 représente l'évolution des données brutes de force sur l'axe Z au cours des cycles 1 à 4 du skieur n°3. Les ordres de grandeur, la variabilité entre les virages et la forme des signatures des données non filtrées de ce sujet sont représentatives de l'ensemble de la base de données mesurées. Les réflexions discutées dans cette partie à partir de ces 4 cycles sont donc globalement applicables à l'ensemble des signaux bruts.

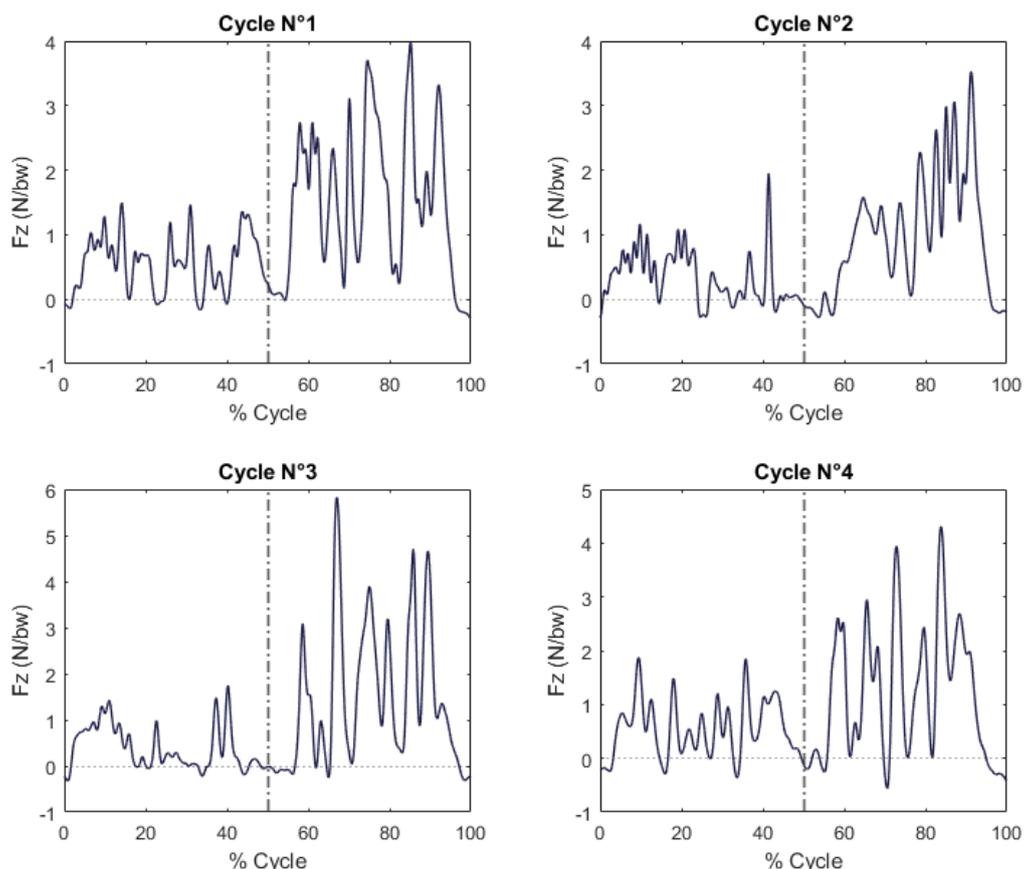


Figure 24 : Représentation graphique de l'évolution temporelle des intensités brutes de force sur l'axe Z au cours d'un cycle (pied étudié à l'intérieur puis à l'extérieur). Ici au cours des cycles 1 à 4 du skieur n°3.

Comme pour les données non filtrées présentées dans la littérature (Federolf, 2005; Nakazato et al., 2011; Klous et al., 2014), les signaux bruts sont caractérisés par d'importantes variations d'intensité au cours du cycle. La Figure 25 représente le contenu fréquentiel de Fz pour les 4 mêmes cycles.

La distribution observée sur le spectre de fréquence correspond à des distributions observées précédemment en GS dans la littérature (Fasel et al., 2016a; Spörri et al., 2017). Les signaux bruts sont caractérisés par des variations sur de très faibles fréquences (inférieures à $\approx 0.7-0.9$ Hz) qui

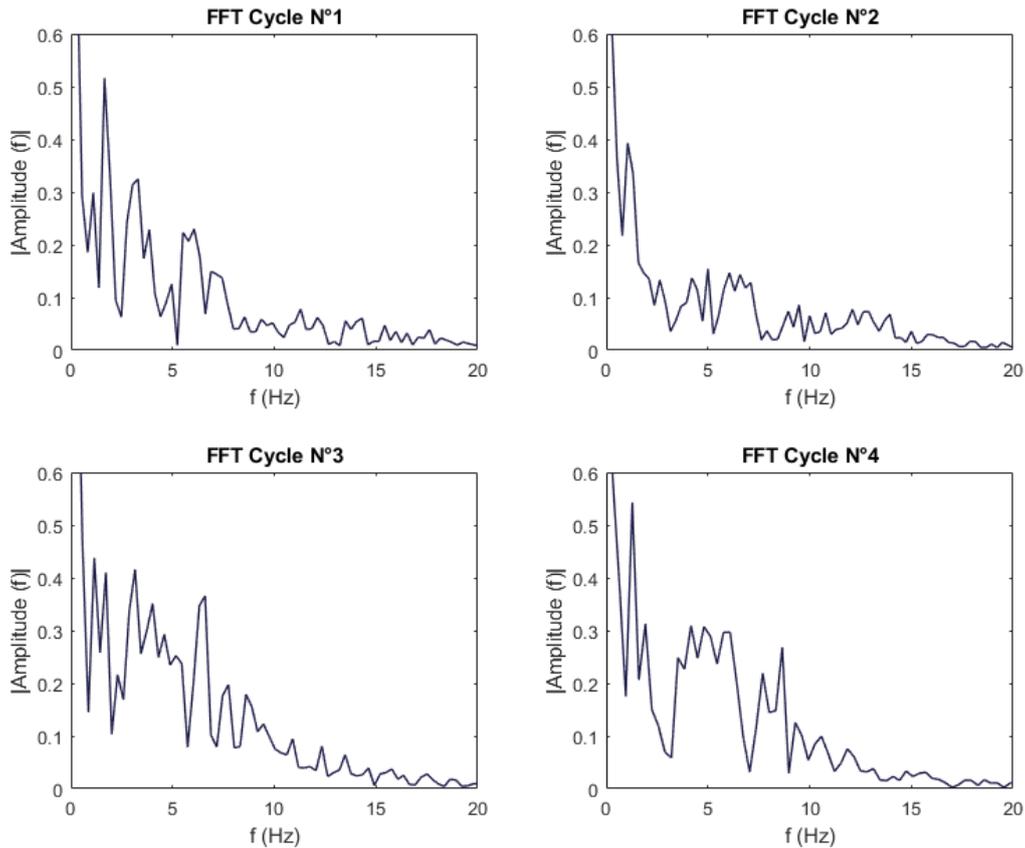


Figure 25 : Représentation graphique du contenu fréquentiel de l'évolution des données brutes de force typiques sur l'axe Z au cours d'un cycle. Ici au cours des cycles 1 à 4 du skieur n°3.

correspondent à la porteuse de signal liée aux virages (d'une durée comprise entre 1.1 et 1.5 s en géant). Une deuxième enveloppe fréquentielle comprise entre ≈ 0.8 et ≈ 5 Hz est observable sur les spectres fréquentiels. Elle correspond aux variations de signal de fréquence modérée au cours d'un virage. Les durées des événements reliées à ces fréquences correspondent à la durée des différentes phases de virage (initiation, conduite, complétion). Dans la littérature, ces fréquences ont précédemment été associées à la motricité du skieur (Reid, 2010; Spörri et al., 2012b, 2017; Supej and Ogrin, 2019). L'enveloppe observée entre 5 et 15 Hz est principalement la conséquence directe de surfaces de neige inégales ou cahoteuses. Ces microreliefs de la neige induisent le « rataillage » des spatules et des skis lors de l'interaction avec la surface de la neige durant la phase de conduite. Le rataillage, mot d'argot du ski alpin, signifie que durant un virage les carres du ski alternent rapidement entre des phases de contact (associées à des hauts niveaux de force) avec la neige et des phases de vol/dérapiage (sans force ou forces faibles). Ce phénomène n'a jamais été directement évalué dans la littérature. Mais certains auteurs y font allusion pour justifier la présence de ces pics de fortes intensités dans ce spectre fréquentiel. Notons que dans le domaine temporel, la présence, l'intensité et le timing de ces pics est variable d'un virage à l'autre, ce qui vient appuyer l'hypothèse du rataillage. Les caractéristiques de ces pics peuvent également varier en fonction du skieur, du matériel et de la

neige (Federolf et al., 2008; Supej, 2013). Ces pics de force ne semblent pas liés à du bruit de mesure. Les valeurs de forces observées pendant ces pics sont réelles et sont subies par l'athlète et son matériel. Enfin les variations au-dessus de 15 Hz sont associées aux vibrations du ski. Les amplitudes de vibrations entre 15 Hz et 25 Hz sont principalement influencées par la technique de virage (dérapage vs carving), le rayon de virage du ski, et les conditions de neige (Federolf et al., 2008; Supej, 2013). Pour conclure, les signaux bruts nous apportent des informations importantes sur la cinétique précise d'un cycle et les interactions ski neige qui lui sont propres. Cependant le caractère instable du rataillage et sa grande variabilité temporelle perturbe la mise en évidence de l'allure générale de la signature de force.

Ainsi, la Figure 26 présente les signatures de force 3D pour le cycle 1 du skieur n°3 avec quatre fréquences de coupure de filtre différentes. Le filtre utilisé est un filtre Butterworth d'ordre 2, passe-bas. En fonction de la fréquence de coupure, certaines informations sont ou non lisibles sur les signaux. Cette figure met en avant que la fréquence de coupure choisie doit être en adéquation avec le type d'observations recherchées. Dans l'objectif d'analyser les effets de rataillage et ses interactions, la fréquence de coupure doit être supérieure à 15 Hz. A l'inverse pour décrire globalement la signature de force et les actions globales du skieur pendant le cycle, une fréquence de coupure aux alentours de 4 Hz comme réalisé dans la partie 5.1 sera plus adaptée.

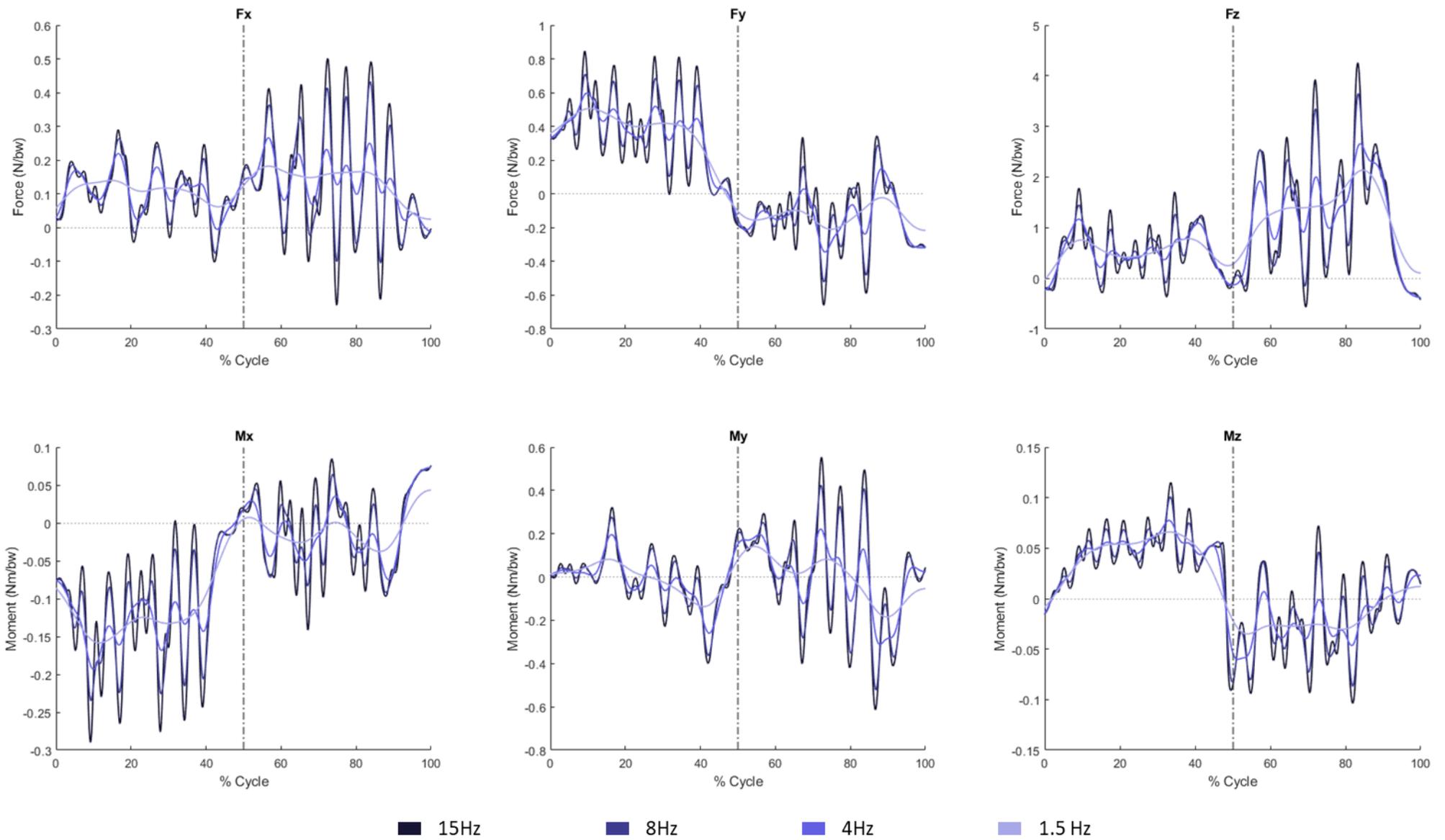


Figure 26 : Représentation graphique de l'évolution des signatures de force et de moment dans les trois dimensions pour un cycle. Les signaux sont filtrés par un filtre Butterworth d'ordre 2 passe bas à quatre fréquences de coupures différentes (15 Hz, 8 Hz ;4 Hz, 1.5 Hz)

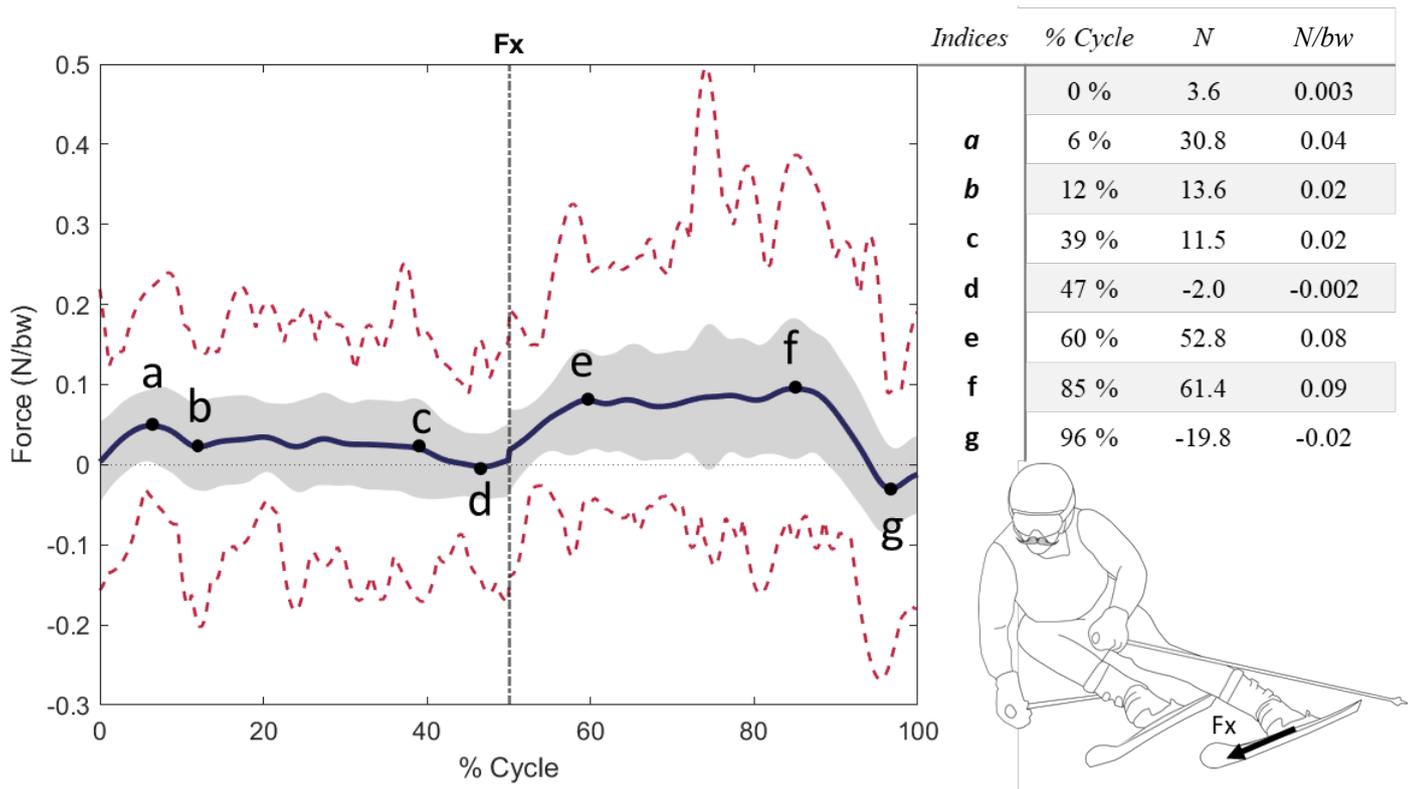


Figure 27 : Représentation graphique de l'évolution de la force en X (exprimé en N normalisé au poids de corps) au cours d'un cycle en ski alpin. La ligne bleue correspond à l'intensité moyenne de l'échantillon. Les lignes pointillées rouges correspondent aux valeurs minimales et maximales parmi l'ensemble des courbes moyennes des skieurs. La surface grisée correspond à l'écart type entre les courbes moyennes de chaque skieur. Le tableau rapporte les valeurs de force en Newton et en Newton normalisé au poids de corps des points remarquables de la signature de force a à g.

5.1.2 FX :

La Figure 27 représente la force sur l'axe FX qui suit l'axe longitudinal du ski. Cette force dans l'axe antéro-postérieur du skieur est positive vers l'avant du ski. L'intensité des variations observées sur cet axe est faible. La courbe moyenne de la population varie entre -10N et 75N, soit -0.02 et 0.1 N/bw une fois normalisée au poids de corps. Les points remarquables de la signature de force sont mentionnés par les lettres **a** à **g** sur la Figure 27. La courbe moyenne de la population est fortement croissante et largement positive entre 0 et 6 % du cycle (avant le point **a**), puis évolue vers un plateau positif légèrement décroissant qui se maintient entre 12% (point **b**) et 39% (point **c**) du cycle. La force en Fx décroît ensuite vers une valeur quasi-nulle légèrement négative à 47% du temps de cycle (point **d**). Sur la deuxième partie du cycle (sur le pied extérieur) la signature de force de Fx prend une forme typique de montée de force, plateau de force (entre 60% (point **e**) et 85% (point **f**) du cycle) et diminution de force (jusqu'à 96% du cycle (point **g**)). On note sur cet axe une asymétrie de pattern et d'intensité entre le pied intérieur et extérieur.

Le timing de ces événements sur le pied extérieur correspond au timing d'évènements cinématiques

précédemment décrits dans la littérature (Supej et al., 2015). Pour rappel, d'après l'étude de Supej et al. 2015, les phases d'initiation, de conduite I et II et de complétion s'étendent respectivement de 0% à 18%, de 18% à 55% et de 55% à 86% et de 86% à 100% du temps de virage. Sur le pied intérieur comme sur le pied extérieur on observe une augmentation de la force durant cette période (point **a** et **e**). Les valeurs positives peuvent être associées aux forces de friction ski-neige qui font « reculer le ski » dans le référentiel du skieur et le freinent. L'intensité des forces de friction est en partie déterminée par l'intensité de la force normale au ski (partie 2.2.2.1). Ces augmentations de force pendant la phase d'initiation semblent coïncider avec la flexion longitudinale de la spatule du ski (Yoneyama et al., 2008). Durant cette phase le skieur engage son corps vers l'avant afin de créer une flexion longitudinale des spatules déclenchant le pivotement des skis (partie 1.1.1). Cette flexion de la spatule en phase d'initiation permet au skieurs d'infléchir sa trajectoire, les forces observé sur ce timing semblent être les prémisses des forces radiales générant une part de friction longitudinale (Federolf, 2005; Federolf et al., 2010a). D'après les valeurs mesurées, durant la phase de conduite (points **b** à **c** et points **e** à **f**) le ski extérieur est associé à des forces de friction plus importantes que le ski intérieur. Ce résultat est en adéquation avec les précédentes études présentant des forces normales sur le ski extérieur plus importantes que sur le ski intérieur (Jandova and Vaverka, 2008). Le ski extérieur subit une flexion plus importante que le ski intérieur (Adelsberger et al., 2014) induite par ces forces normales. Ce point peut expliquer la différence d'intensité de F_x pendant la phase de conduite entre les deux skis. Les phases de très faible friction (point **d** et **g**) correspondent aux phases d'allègement du skieur réduisant l'énergie mécanique spécifique dissipée par le skieur.

Comme dit précédemment, seules trois études récentes (Federolf, 2005; Klous et al., 2014) présentent des forces en action sur l'axe X. Ce manque d'information dans la littérature est lié aux limites méthodologiques et de mesure de la force dans cet axe. Les données mesurées dans nos études sont largement inférieures aux données précédemment rapportées dans la littérature. Les valeurs rapportées par Klous et al. en 2014 sont de l'ordre de -0.3 à -0.6 N/bw soit 5 fois plus importantes par rapport aux données de notre étude. Les formes des signatures de force sont elles aussi très différentes. Les différences observées entre les études proviennent certainement de différences métrologiques liées à la conception des plateformes de force. En effet comme décrit dans la partie 2.3.1 la mesure des forces en X est fortement parasitée par la flexion longitudinale dans le virage. La méthodologie d'atténuation de ce bruit de mesure n'est pas détaillée dans l'article de Klous et al. ou de Federolf et al. La méthode de calibration utilisée pour nos mesures vise à réduire l'influence des forces de compression induites par la flexion naturelle du ski sur les mesures de F_x . Ainsi, le design atypique de notre capteur et la méthode unique de calibration ne permet pas de comparer nos données avec celles de la littérature.

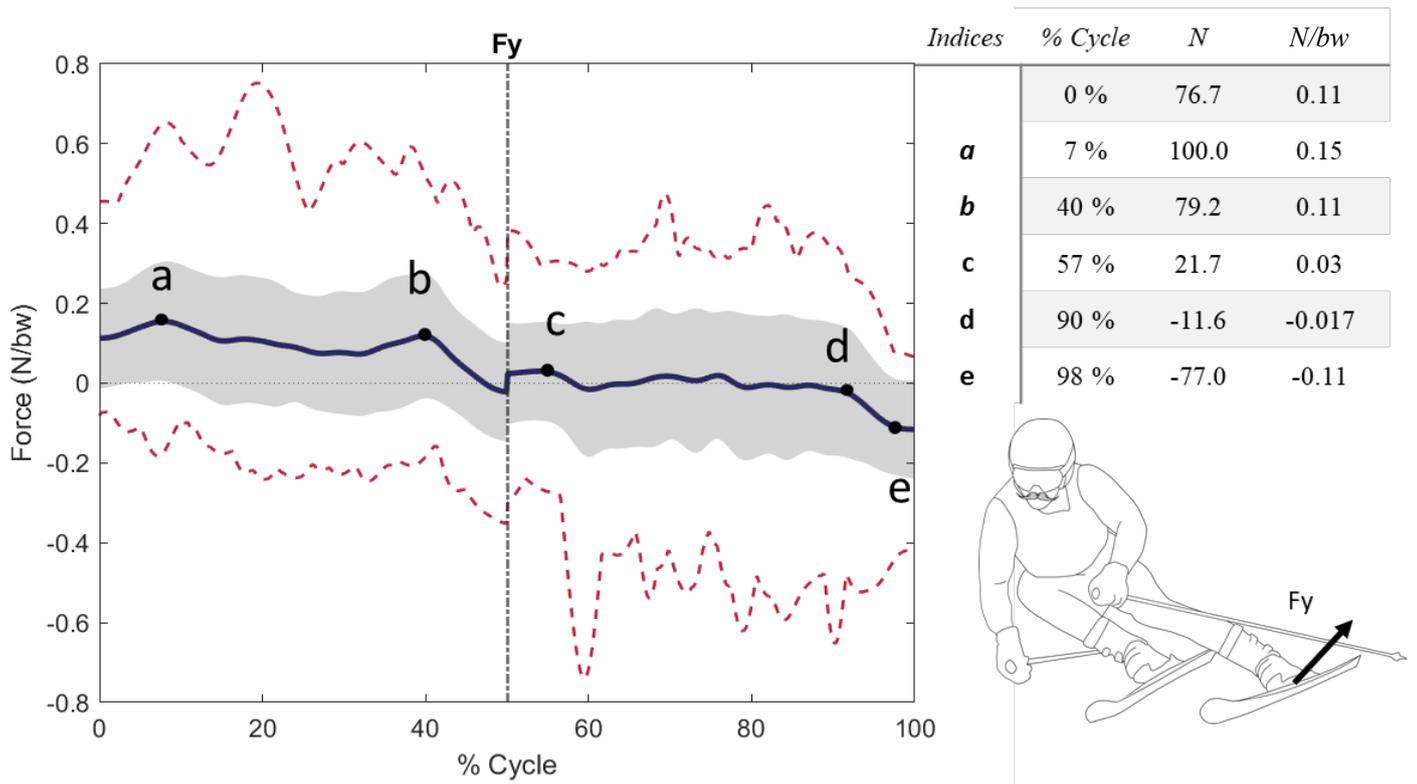


Figure 28 : Représentation graphique de l'évolution de la force en Y (exprimé en N normalisé au poids de corps) au cours d'un cycle en ski alpin. La ligne bleue correspond à l'intensité moyenne de l'échantillon. Les lignes pointillées rouges correspondent aux valeurs minimales et maximales parmi l'ensemble des courbes moyennes des skieurs. La surface grisée correspond à l'écart type entre les courbes moyennes de chaque skieur. Le tableau rapporte les valeurs de force en Newton et en Newton normalisé au poids de corps des points remarquables de la signature de force a à e.

5.1.3 FY :

La force sur l'axe F_y suit l'axe perpendiculaire du ski (et parallèle à la piste). Elle est positive vers l'extérieur du virage. A l'inflexion de la trajectoire du CG, le centre du virage change de côté par rapport au référentiel gauche/droite du skieur. De ce fait à chaque virage le sens de F_y change. Les intensités observées sur cet axe sont plus élevées que celles observées sur F_x . La courbe moyenne de la population varie entre -90N et 110N, soit -0.12 et 0.15 N/bw. Les points remarquables de la signature de force sont mentionnés sur la Figure 28 par les lettres **a** à **e**. La courbe moyenne de la population augmente légèrement de 0% à 7% du cycle (avant le point **a**), et décroît légèrement jusqu'à 40% du cycle (point **b**). La force en F_y diminue ensuite fortement jusqu'à 50% du cycle. En conséquence du changement de référentiel, la force de -7.5N juste avant 50% du cycle devient égale à 7.5N juste après 50% du cycle. Cette valeur augmente légèrement jusqu'à 57% (point **c**). Elle diminue ensuite lentement (tout en restant proche de 0) jusqu'à 90% du cycle (point **d**). Elle diminue fortement par la suite jusqu'à 98% du cycle (point **e**). Bien que faibles, les intensités de force sur l'axe Y, nous apportent des informations pertinentes sur la compréhension de la cinétique au cours du virage. On note sur cet axe une asymétrie d'intensités entre le pied intérieur et extérieur. Cependant le pattern d'évolution entre

les skis intérieur et extérieur semble lui être symétrique.

Les positions des points **a**, **b** et **d** correspondent également aux phases du virage décrites précédemment par Supej *et al.* (2015). Quel que soit le pied étudié, la signature de force en Y semble suivre un schéma stable. La force a tendance à être stable de 0 à 40% et de 50 à 90 % du cycle (phases d'initiation et de conduite) puis diminue fortement durant la phase de complétion. On notera seulement des pics de force au niveau de la transition entre la phase d'initiation et la phase de conduite (point **a** et **c**). Le point **c** apparaît légèrement plus tôt (14% du virage) que le plateau de force sur Fx (20% du virage) ou que le découpage proposé par Supej (18% du virage). La phase d'initiation semble ainsi correspondre à une augmentation temporaire de la force latérale. Cette force est liée à l'augmentation de la force radiale induite par la diminution du rayon de virage. Il est important de préciser que l'axe Fy est parallèle à la neige lorsque le ski est à plat, mais qu'avec l'augmentation de l'angle de carre (Φ) lors du virage, une partie de la force mesurée en Y correspond à la force appliquée verticalement (dans le référentiel de la piste). Comme détaillé précédemment, la pente, l'angle de traversée de la piste et l'angle de prise de carre influencent la part la force sur l'axe Y (Equation X partie 2.3.2). Notons que cette composante de la force est négative dans le référentiel de l'axe Y.

Durant la phase de conduite, Fy est plus importante sur le pied intérieur (>100N) que sur le pied extérieur (≈ 0 N). La part plus importante de Fy sur le pied intérieur peut être expliquée par une part plus importante des forces radiales sur la jambe intérieure qu'extérieure. Le ski intérieur ayant par définition un rayon de virage plus court il est possible qu'il subisse des forces radiales plus importantes que le ski extérieur. De plus, l'angle de prise de carre (Φ) du ski intérieur est plus faible que celui du ski extérieur (Sahashi and Ichino, 2001). De ce fait les forces radiales négatives ont tendance à être plus réparties sur l'axe Y sur le ski extérieur qu'intérieur. Il est intéressant de noter que les forces en Y sont quasi nulles sur le ski extérieur durant la phase de conduite. Ce phénomène semble lié à un équilibre entre la part du poids et la part des forces radiales sur l'axe Y.

On remarque qu'à partir des point **b** et **d** (i.e. 40% et 90% du cycle), Fy diminue fortement sous les skis et devient négative sur le pied extérieur en fin de virage. Le sujet n'applique donc plus de force vers l'extérieur du virage mais vers l'intérieur (ou vers l'extérieur du virage suivant). La nette diminution de Fy peut être liée à différents phénomènes. Tout d'abord, à la fin du virage le rayon du virage augmente ce qui induit une diminution de force radiale. De plus, la fin de virage est associée à la réduction de l'angle ski-neige. Pour cela, le skieur se redresse en appliquant une force horizontale et vers le bas. Cette force associée à l'angle de prise de carres résiduel se transfert en partie sur l'axe Y avec une intensité négative par rapport au référentiel. La force négative en fin de cycle (lorsque le ski est à plat) peut aussi être liée à une poussée du skieur dans l'axe transversal au ski visant à faire basculer le centre de gravité vers l'intérieur du virage à venir.

Les ordres de grandeur mesurés correspondent aux valeurs précédemment décrites dans la littérature

(Klous et al., 2014; Meyer et al., 2019) et diffèrent des mesures réalisées par Federolf *et al.* qui rapportent des valeurs de F_y de 0.12N/bw sur le pied extérieur et de 0.05 N/bw sur le pied intérieur. Même si les ordres de grandeur sont proches et cohérents, les formes des signatures de force entre ces deux études (Klous et al., 2014; Meyer et al., 2019) sont différentes. A l'inverse de nos résultats, Meyer *et al.* mettent en évidence (i) des forces latérales plus importantes sur le pied extérieur que sur le pied intérieur et (ii) un F_y sur le pied intérieur qui suit la signature typique de montée en force, plateau et baisse de force. Sur le pied intérieur la signature suit donc le même pattern dans ces deux études (Klous et al., 2014; Meyer et al., 2019) mais avec des amplitudes différentes. Les évènements séparant ces phases apparaissent à approximativement 20% et 85% du virage comme dans nos mesures mais la valeur atteinte lors du plateau est de 0.02N/bw pour Meyer contre 0.15N/bw dans nos mesures sur le ski intérieur. En revanche sur le ski extérieur, Meyer *et al.* décrivent une F_y qui croit progressivement jusqu'à 0.13N/bw à 75% du cycle. Il est difficile d'expliquer les origines de ces différences entre les skieurs tant elles peuvent être nombreuses. Dans l'étude de Meyer *et al.* le rayon de courbure était plus court (24m vs 30m), les skieurs étaient tous de haut niveau (3 skieurs de coupe d'Europe) et plus lourds (avec l'équipement de mesure ; 113 kg vs 88 kg). Du fait de leurs différences anthropométrique et de niveau, ces skieurs présentent potentiellement des patterns de force différents. Enfin, contrairement à nos résultats aucune valeur négative n'a été relevée dans cette étude. Un découpage des virages différent (utilisant d'autres marqueurs que la minimum de la somme des forces des deux pieds) entre nos données et celles de Meyer et al., (2019) pourrait expliquer cette absence de valeur négative. Si l'évènement de changement de virage utilisé par Meyer et al., (2019) est plus précoce que celui que nous avons utilisé, le changement de référentiel pourrait être synchronisé avec le changement de signe. Néanmoins aucune information sur le découpage du cycle n'est détaillée dans l'article de Meyer *et al.* (2019)

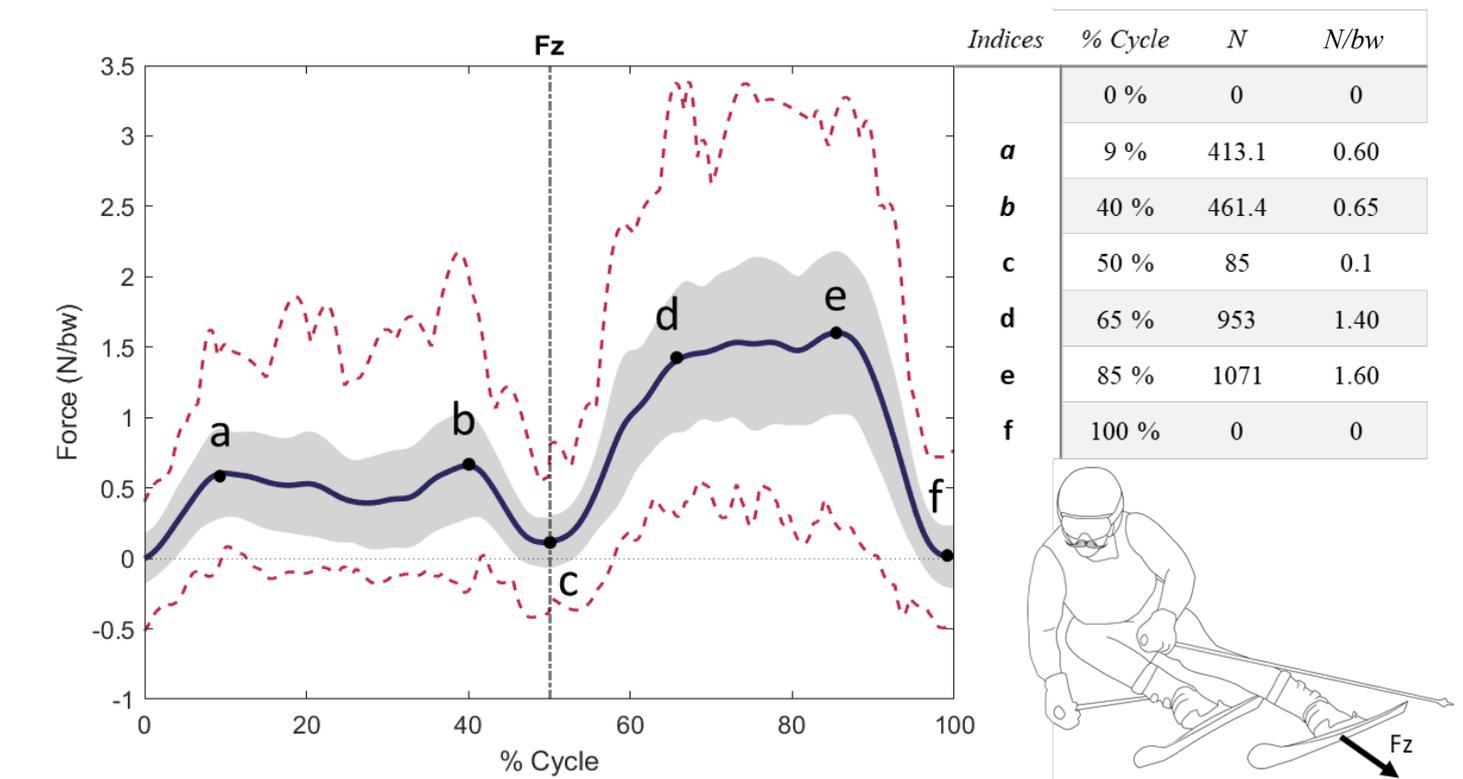


Figure 29 : Représentation graphique de l'évolution de la force en Z (exprimé en N normalisé au poids de corps) au cours d'un cycle en ski alpin. La ligne bleue correspond à l'intensité moyenne de l'échantillon. Les lignes pointillées rouges correspondent aux valeurs minimales et maximales parmi l'ensemble des courbes moyennes des skieurs. La surface grisée correspond à l'écart type entre les courbes moyennes de chaque skieur. Le tableau rapporte les valeurs de force en Newton et en Newton normalisé au poids de corps des points remarquables de la signature de force a à f.

5.1.4 FZ :

La force sur l'axe FZ est normale à la surface du ski (d'où sa dénomination nSKiRF). Elle est positive lorsqu'elle est orientée vers le sol. L'intensité des variations observées sur cet axe est élevée. La courbe moyenne de la population varie entre 27N et 1135N, soit 0.03 et 1.6 N/bw. La valeur maximale mesurée parmi l'ensemble des courbes moyennes des skieurs est de 2282 N ou 3.33N/bw sur le pied extérieur. Les points remarquables de la signature de force moyenne sont mentionnés par les lettres **a** à **f** sur la Figure 29. La courbe moyenne de la population est fortement croissante et largement positive entre 0 et 9 % du cycle (avant le point **a**), puis évolue vers un plateau positif qui se maintient jusqu'à 40% (point **b**) du cycle. La force en Fz décroît ensuite vers une valeur quasi-nulle légèrement positive à 50% du temps de cycle (point **c**). Sur la deuxième partie du cycle (sur le pied extérieur) la signature de force de Fz prend également une forme typique en créneau : une montée de force jusqu'à 65% du cycle (point **d**), un plateau de force élevé jusqu'à 85% du cycle (point **e**) et une diminution de force jusqu'à 100% du cycle (point **f**). On note sur cet axe une asymétrie d'intensités entre le pied intérieur et extérieur. Cependant le pattern d'évolution entre les skis intérieur et extérieur semble lui être symétrique.

La force en Z moyenne de la population est exclusivement positive durant un cycle mais la courbe moyenne de certains skieurs est légèrement négative, surtout sur le ski intérieur. Les valeurs négatives correspondent à la force nécessaire pour soulever les skis. Les valeurs positives élevées, par rapport aux autres axes, s'expliquent par l'application du poids du skieur sur l'axe Z. Cette part du poids est de plus en plus faible à mesure que la pente de la piste augmente, et que l'angle de traversée et d'inclinaison du skieur diminuent (Équation 25). A l'arrêt, à plat et en position équilibrée la force en Z mesurée du skieur est de l'ordre de 0.5 bw. Durant le virage la force radiale et la force musculaire de poussée s'ajoutent à la part normale du poids, ce qui explique les valeurs de force supérieures au poids de corps.

Les phases de faible charge verticale (F_z faible), situées à proximité des points c et f sont associées aux phases d'allègement entre deux virages. Le positionnement des points **a**, **b**, **d** et **e** correspond aux instants de changements de phases décrits précédemment dans la littérature. Cette forme de signature de force typique est présente sur quasiment l'intégralité des virages mesurés. Les larges amplitudes de variation de force inhérentes à la signature de force en Z rendent plus facile l'identification des phases, en comparaison aux autres axes. Il est donc plus simple de considérer les points **c**, **d**, **e**, et **f** comme les points bornant respectivement les phases d'initiation, de conduite et de complétion du virage sur F_z que sur les autres forces ou moments.

La force en Z est plus élevée sur le pied extérieur qu'intérieur. D'après les valeurs moyennes pendant la phase d'appui, la répartition de la charge en Z est de 26.6% sur le pied intérieur et 73.4% sur le pied extérieur. Meyer *et al.* (2019) ont mesuré sur l'ensemble de leur population une répartition légèrement plus équilibrée entre les deux pieds de 35/65%. Nakazato *et al.* (2011) rapportent un ratio identique de 27/73% dans les situations de faible pente, et de 31/69% sur l'ensemble de sa population (deux groupes de niveau et deux pentes moyennées). Ce déséquilibre dans la répartition des forces entre les deux skis est une des bases de la conduite coupée (LeMaster, 2009). En chargeant davantage le ski extérieur (i.e. augmentation de F_z), celui-ci fléchit de façon plus importante. Cette augmentation du rayon de déformation réduit le rayon du virage (partie 2.2.2.4). Charger le ski extérieur augmente aussi les forces latérales nécessaires au maintien du ski sur la carre. Cela induit également une augmentation des frottements longitudinaux du ski en augmentant la pénétration du ski dans la neige et la force normale (déterminante des coefficients de friction sec et lubrifié (Federolf *et al.*, 2006)). L'augmentation de F_z implique une augmentation des contraintes musculaires notamment pour les quadriceps pour que le skieur conserve sa position excentrique durant la phase de conduite (Franchi *et al.*, 2019).

La force en Z est la force la plus étudiée dans la littérature scientifique (Jandova *et al.*, 2005; Jandova and Vaverka, 2008; Stricker *et al.*, 2010; Nakazato *et al.*, 2011; Klous *et al.*, 2014; Meyer *et al.*, 2019). L'ordre de grandeur des amplitudes mesurées correspond aux valeurs de la littérature à rayon de

virage similaire mais nos données révèlent quelques spécificités et points de discussion originaux. La majorité de nos données sur la jambe intérieure présente tout d'abord une spécificité lors du plateau de force : une forme caractéristique en U. Dans la littérature, aucune étude n'a reporté des valeurs en début et fin de plateau supérieures à la moyenne du plateau. Ceci peut être expliquée par des filtres plus importants que ceux utilisés dans notre étude ou des comportements différents des skieurs entre les études dus aux tracés. Sur nos données, cette forme peut être attribuée à l'augmentation de la force normale au ski. Pour les skieurs de notre échantillon, un virage est caractérisé par deux temps forts (fortes activation musculaire) ; en début et fin de phase de conduite. Ces temps forts peuvent être les observables d'une transition entre les virages par impulsion (Brierley and Bartlett, 1991). En effet lors d'une transition par impulsion le skieur produit une poussée musculaire pour mettre fin au virage afin de créer un allègement, cette poussée a pour conséquence une brève augmentation de force à la manière d'une Squat-Jump en fin de phase de conduite. Cette poussée génère une phase d'allègement. A la fin de celle-ci (donc au début de la phase de conduite), l'augmentation de F_z liée aux forces radiales se cumule à la force induit par la « réception » de la phase d'allègement (Figure 30). Sur notre échantillon la proéminence de fin de cycle est en moyenne plus importante sur le pied intérieur qu'extérieur.

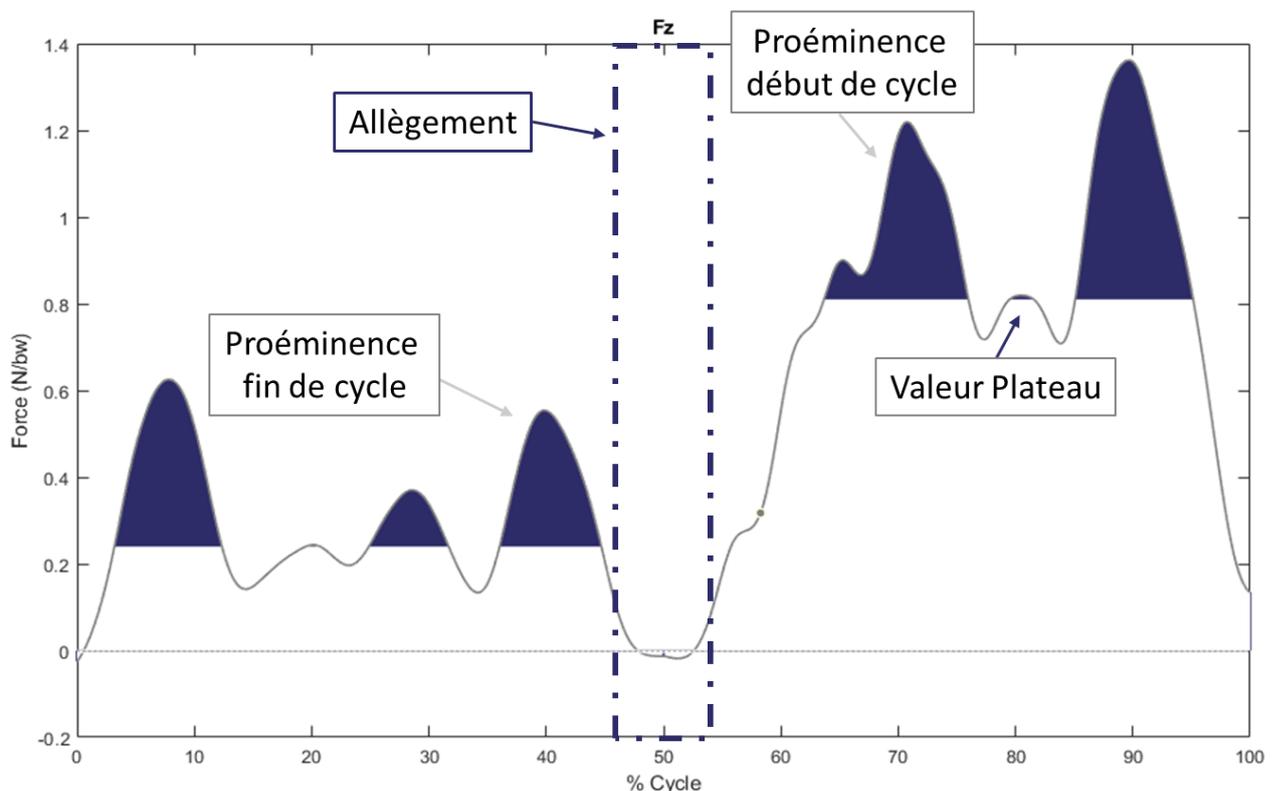


Figure 30 : Evolution de la F_z (exprimé en N normalisé au poids de corps) d'un skieur au cours d'un cycle (%). Le skieur présentant ici des pics de proéminence de début et de fin de cycle importants à la fois sur le pied intérieur (0-50% du cycle) et le pied extérieur (50-100% du cycle) représentés en bleu sur la figure.

Si cette hypothèse est vérifiée, plus la poussée de fin de conduite est faible, plus le skieur utilise une technique d'avalement. Une technique d'avalement vise à réduire F_z dans le but d'arrêter la phase de conduite, en déchargeant les skis par flexion des genoux et du bassin. A l'inverse, plus la poussée de fin d'appui est importante, plus le skieur utilise une technique d'impulsion. La technique d'impulsion vise à créer l'allègement par une phase de poussée (en fin de plateau) induisant une augmentation de l'intensité de F_z . D'après les données cinématiques durant la phase de complétion, le skieur réalise une ouverture des angles de bassin et genoux de la jambe intérieure et une fermeture des angles bassin et genoux de la jambe extérieure (Alhammoud et al., 2020) (Figure 2). Ces résultats corroborent l'hypothèse qu'une phase de poussée de la jambe intérieure a lieu en fin de phase de conduite, dans le but de créer à un allègement. Il est également possible que certains skieurs cherchent à stocker de l'énergie dans le ski sous forme élastique avant l'allègement. Ce phénomène pourrait avoir lieu simultanément à la poussée sur la jambe intérieure, amplifiant ainsi la force en fin d'appui.

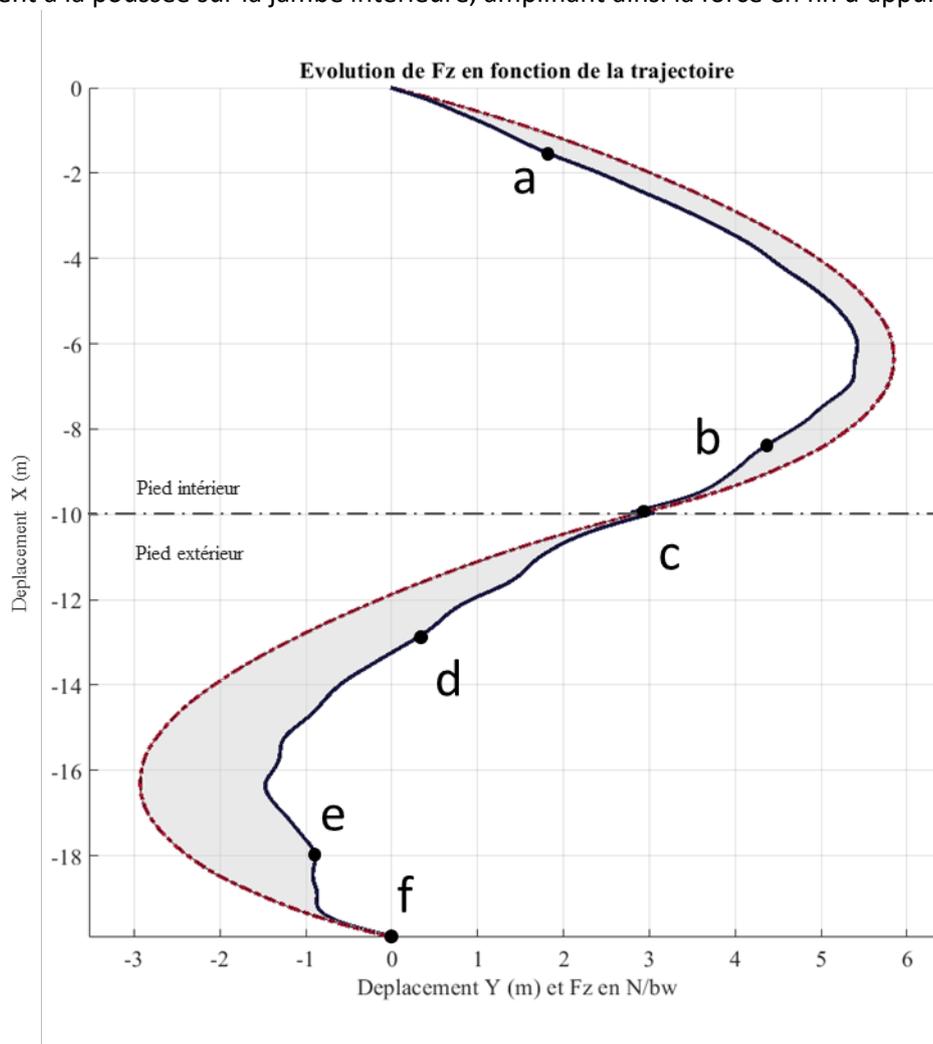


Figure 31 : Evolution de la position moyenne en X et en Y (m) du CG du skieur au cours d'un cycle (en rouge). Le trait bleu est une représentation graphique de l'évolution de la F_z au cours du virage, en s'adossant à la trajectoire du CG. Pour cette représentation la force en N/bw est soustraite à la position horizontale (m) sur le pied intérieur et additionnée sur le pied extérieur.

Enfin, la Figure 31 représente l'évolution moyenne de la trajectoire du CG au cours du cycle (en rouge) à laquelle est ajoutée la moyenne de la F_z de la population au cours du cycle (en bleu). Cette représentation graphique permet de décrire l'évolution de F_z relativement à la modification cinématique. La force en N/bw est soustraite à la position horizontale (en Y) sur le pied intérieur et additionnée sur le pied extérieur. Les points **a** à **f** correspondent aux points présentés précédemment. Le plateau de force apparaît durant la phase de conduite de virage où le rayon du CG du skieur est le plus faible. Les phases de ligne droite entre deux virages sont associées à des phases de faible F_z . Cette représentation met en évidence la relation entre cinétique et cinématique avec les phases d'initiation, de conduite et de complétion de virage précédemment décrites.

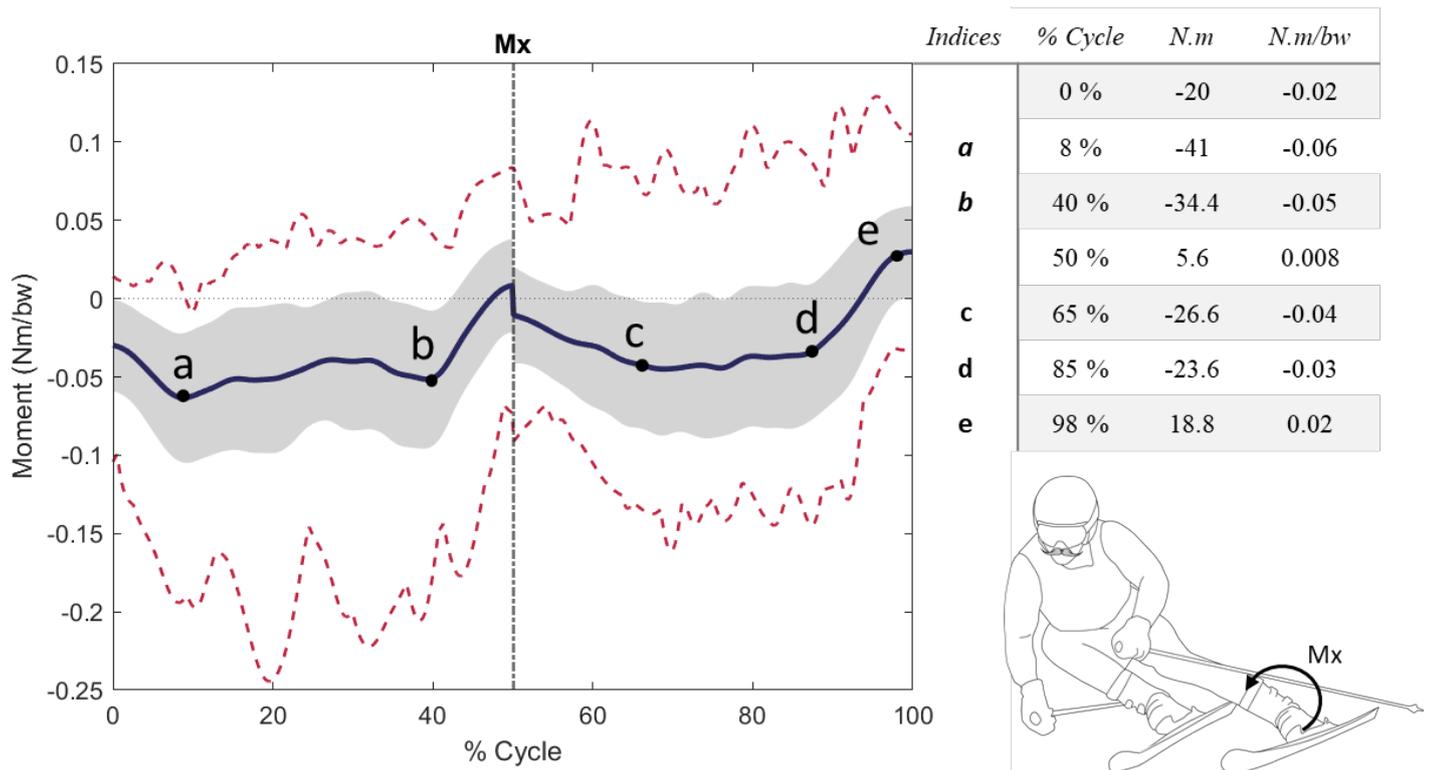


Figure 32 : Représentation graphique de l'évolution du moment en X (exprimé en N.m normalisé au poids de corps) au cours d'un cycle en ski alpin. La ligne bleue correspond à l'intensité moyenne de l'échantillon. Les lignes pointillées rouges correspondent aux valeurs minimales et maximales parmi l'ensemble des courbes moyennes des skieurs. La surface grisée correspond à l'écart type entre les courbes moyennes de chaque skieur. Le tableau rapporte les valeurs de force en Newton et en Newton normalisé au poids de corps des points remarquables de la signature de force a à e.

5.1.5 MX :

Le moment sur l'axe Mx est le moment qui génère une rotation autour de l'axe longitudinal du ski (et colinéaire à l'avancement du skieur), soit un mouvement d'abduction/adduction de la cheville dans le référentiel du skieur. Un moment positif crée une rotation de la chaussure où le collier de la chaussure penche à l'intérieur du virage. A l'inflexion de la trajectoire du CG, le centre du virage change de côté par rapport au référentiel du skieur. De ce fait, à chaque virage (i.e. 50% du cycle), le sens du référentiel de Mx change. La courbe moyenne de la population varie entre -34 Nm et 18 Nm, soit -0.05 et 0.02 Nm/bw une fois normalisée au poids de corps. Les points remarquables de la signature de force sont mentionnés sur la Figure 32 par les lettres a à e. La courbe moyenne de la population diminue de 0% à 8% du cycle (avant le point a), et se stabilise jusqu'à 40% du cycle (point b). Le moment sur l'axe X augmente ensuite fortement jusqu'à 50% du cycle. Due au changement de référentiel la force de -5.6 Nm juste avant 50% de cycle devient égale à 5.6 Nm juste après 50% du cycle. Le moment en X diminue alors progressivement jusqu'à 65% (point c) puis, il se stabilise jusqu'à 85% du cycle (point d). On note enfin une forte augmentation par la suite jusqu'à 98% du cycle (point e). Sur cet axe, on observe une symétrie d'intensités et de pattern entre le pied intérieur et extérieur.

Sur les deux pieds les valeurs sont majoritairement négatives. Le moment sur l'axe X a donc plutôt tendance à générer une rotation du haut du collier vers l'extérieur du virage. L'évolution du moment sur l'axe X suit la forme typique en créneau d'une signature de force F_z , à la seule différence que les valeurs du plateau sont négatives à cause du référentiel. La temporalité d'apparition des points **a**, **b** et **d** correspond aux inflexions de courbes visibles sur la force dans les autres axes (notamment l'axe Z). La pente de diminution du moment lors de la phase d'initiation sur le pied extérieur est plus faible que les pentes observées lors de cette phase sur les autres axes. Sur le pied extérieur, le début du plateau (représenté par le point **c**) arrive également légèrement plus tard que le début de la phase de conduite définie à partir de F_z (65% contre 60% pour F_z). La phase d'initiation semble ainsi correspondre à une diminution temporaire de M_x due à l'augmentation de la force radiale liée à la diminution du rayon de virage. Ce moment se maintient durant la phase de conduite. Durant cette phase, les valeurs de M_x entre le pied extérieur et intérieur sont comparables. Comme pour F_y , les vitesses de variation de M_x sont faibles de 0 à 40% et de 50 à 90 % du cycle (phases d'initiation et de conduite) puis augmentent fortement durant la phase de complétion. La fin de cycle est donc caractérisée par des valeurs positives générant une rotation telle que le collier de la chaussure pousse vers l'intérieur du virage (ou l'extérieur du virage suivant). Sur le ski extérieur M_x devient positif à partir de 93% du cycle. Ce changement de signe pourrait être le marqueur de l'initiation du changement de carre sur le ski extérieur. Ce changement a lieu avant l'allègement maximal du skieur (Figure 33).

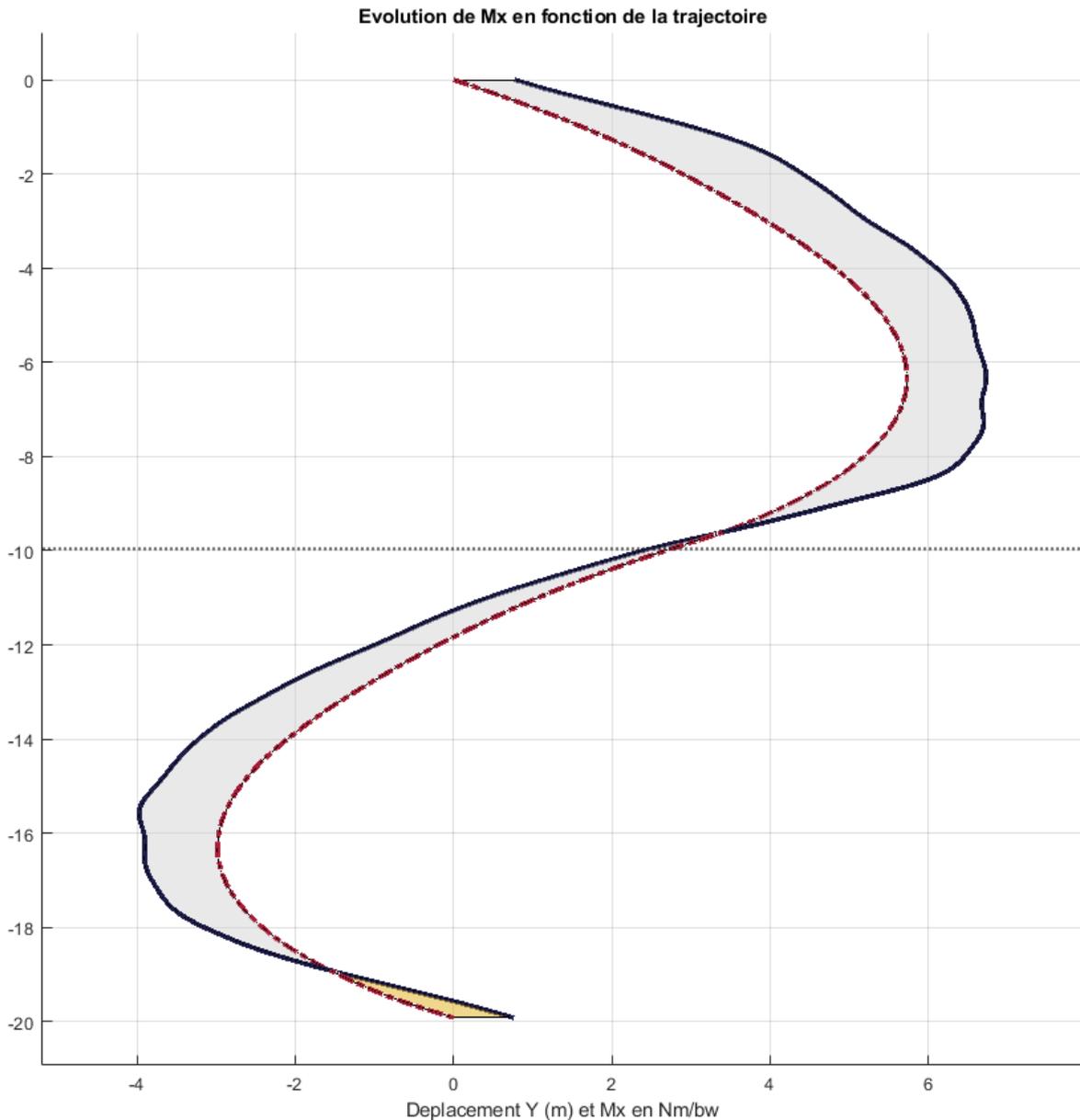


Figure 33 : Evolution de la position moyenne en X et en Y (m) du CG du skieur au cours d'un cycle (en rouge). Le trait bleu est une représentation graphique de l'évolution de M_x au cours du virage, en s'adossant à la trajectoire du CG. Dans cette représentation la force en Nm/bw est soustraite à la position horizontale (m) sur le pied intérieur et additionnée sur le pied extérieur. La surface entre les deux courbes est grisé lorsque le moment est négatif et jaune lorsqu'il est positif.

Théoriquement, le moment en X n'apparaît que lorsque le CG du skieur n'est pas aligné verticalement avec le point d'application de la force ski-neige. Dans cette situation, l'apparition de M_x a deux origines. La première est le couple créé par le poids (appliqué au CG du skieur) et la réaction normale du support (Figure 34, $M_{x_{poids}}$). Ce couple génère une rotation entraînant le collier de la chaussure vers l'intérieur du virage. La seconde origine du moment en X est le couple créé par la force centrifuge (appliquée au CG du skieur), et la force radiale (appliquée à l'interface ski /neige). Ce moment (Figure 34, $M_{x_{inert}}$) d'origine inertielle a tendance à générer une rotation du collier de la chaussure vers

l'extérieur du virage. Les valeurs négatives de M_x pendant les phases de conduite indiquent donc que le moment lié à l'inertie est de plus forte intensité que le moment lié au poids du skieur. Globalement, l'évolution au cours du cycle et les ordres de grandeur mesurés correspondent aux valeurs décrites par la littérature (Federolf, 2005; Jandova et al., 2005; Meyer et al., 2019). Meyer *et al.* présentent des données de l'ordre de 0.30 Nm/kg soit approximativement 0.03 Nm/bw et la forme de signature de force est identique à celle que nous avons mesurée. Néanmoins, Meyer *et al.* (2019) rapportent des valeurs de M_x plus importantes sur le ski extérieur qu'intérieur et ne présentent pas d'inversion de signe durant la phase de complétion. Enfin Klous *et al.* (2014), présentent des données aux ordres de grandeur très éloignés de nos mesures, la différence d'intensité entre leurs mesures et le reste de la littérature est d'un ordre $\times 10$. L'absence de filtrage sur les données présentées dans cet article rend

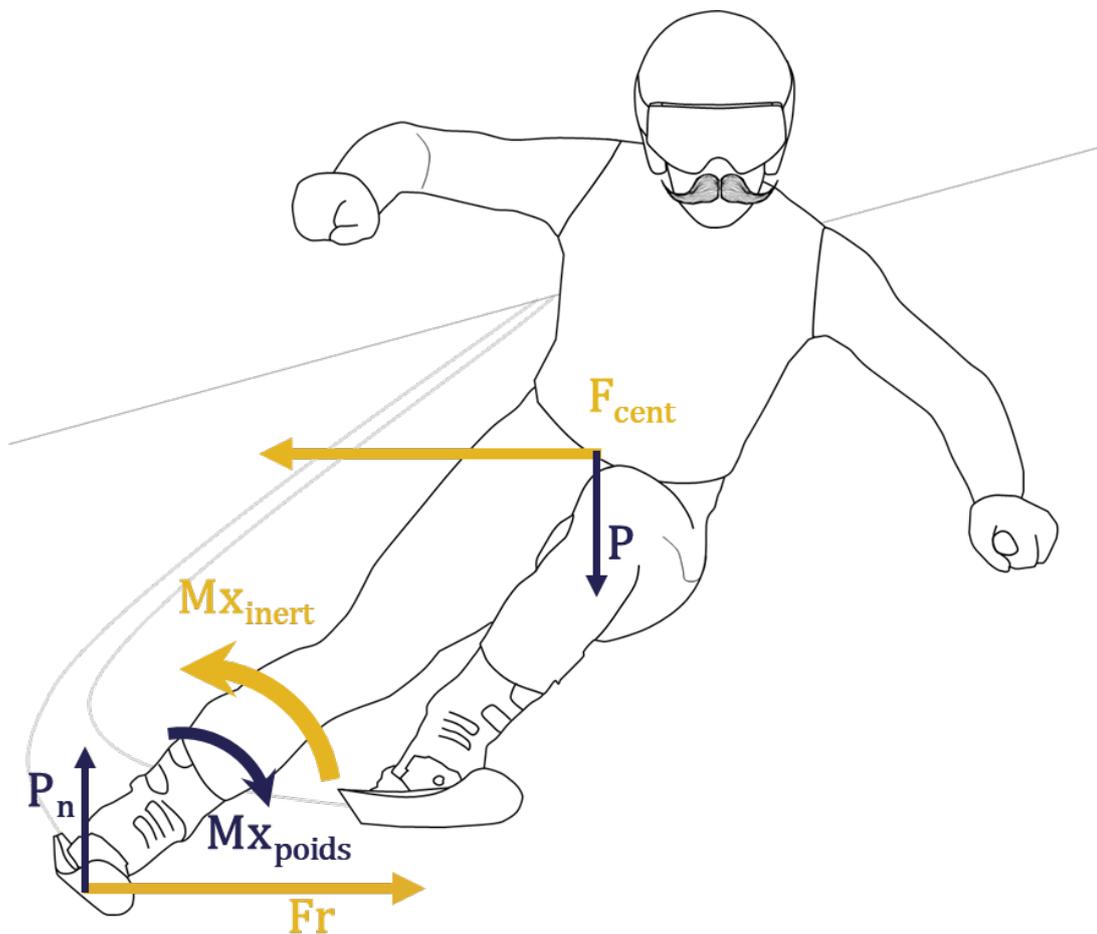


Figure 34 : Bilan des couples de force à l'origine des moments sur l'axe X au cours d'un virage en ski alpin. P représente le poids, et P_n la part verticale de la force de réaction normale. Fr représente les forces radiales, et F_{cent} la force centrifuge. $M_{x_{poids}}$ et $M_{x_{inert}}$ représente respectivement les moments en X induits par le poids et les forces inertielles liées à la rotation en virage.

toutefois la comparaison de l'évolution du signal difficile.

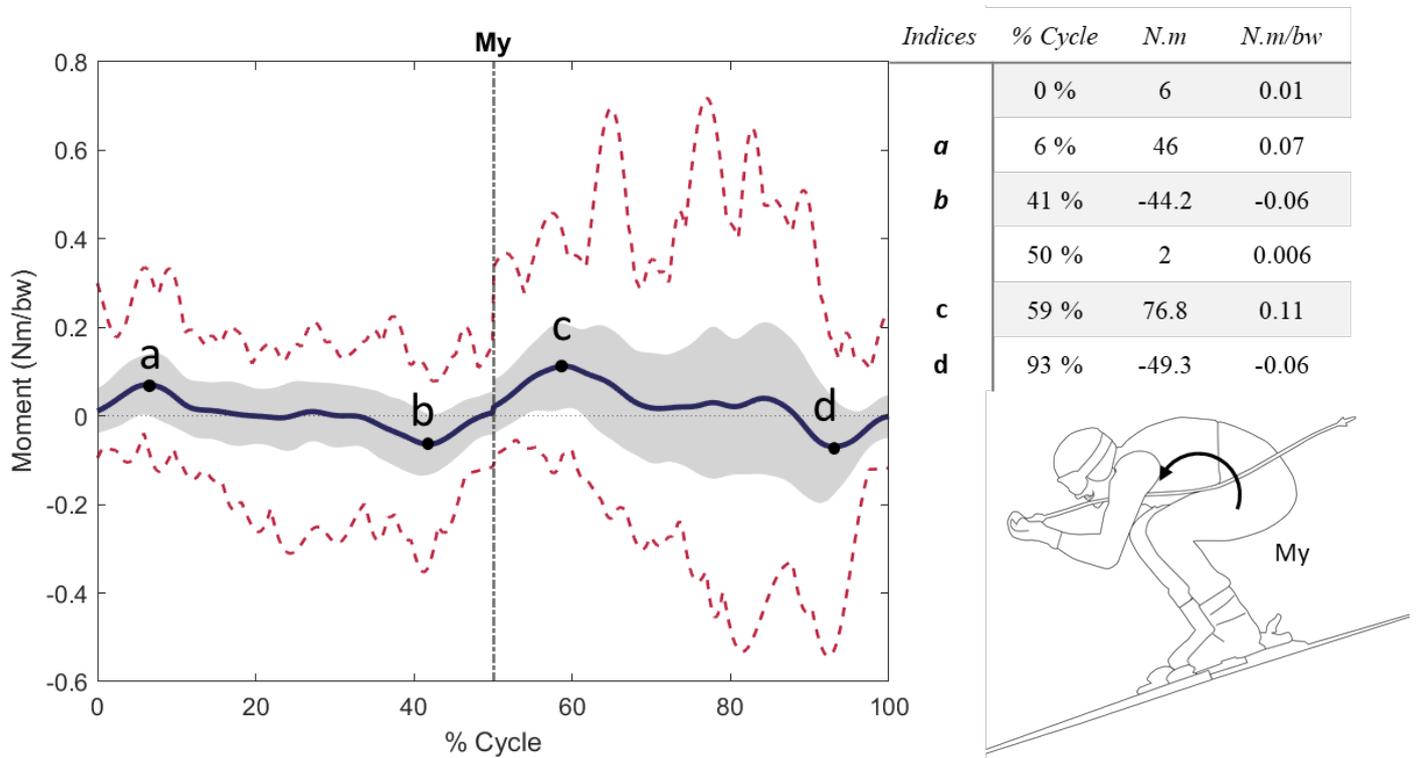


Figure 35 : Représentation graphique de l'évolution du moment en Y (exprimé en N.m normalisé au poids de corps) au cours d'un cycle en ski alpin. La ligne bleue correspond à l'intensité moyenne de l'échantillon. Les lignes pointillées rouges correspondent aux valeurs minimales et maximales parmi l'ensemble des courbes moyennes des skieurs. La surface grisée correspond à l'écart type entre les courbes moyennes de chaque skieur. Le tableau rapporte les valeurs de force en Newton et en Newton normalisé au poids de corps des points remarquables de la signature de force a à d.

5.1.6 MY :

Le moment sur l'axe My est le moment qui génère une rotation antéropostérieure dans le référentiel du skieur. Le moment est positif lorsque le skieur se penche vers l'avant et négatif lorsque le skieur se penche vers l'arrière. La courbe moyenne de la population varie entre -44 Nm et 79 Nm, soit -0.06 et 0.011 Nm/bw une fois normalisée au poids de corps. L'ordre de grandeur de My est plus important que celui de Mx et Mz. Les points remarquables de la signature de force sont mentionnés sur la Figure 35 par les lettres **a** à **d**. La forme générale de la courbe est différente de la signature de force typique observée sur d'autres axes. Sur l'ensemble du cycle My est relativement stable et proche de zéro à l'exception de deux phases de variation du moment My en début de virage (**a** et **c**) et deux phases en fin de virage (**b** et **d**). L'ensemble de ces phases seront appelées dans cette partie phases de variation. La courbe moyenne de la population est donc positive de 0% à 12% du cycle (autour du point **a**), et se stabilise proche de zéro jusqu'à 33%, elle devient ensuite négative jusqu'à 50% du cycle (autour du

point **b**). Ce schéma se reproduit sur le pied extérieur avec des valeurs plus élevées et des phases de variation plus longues. La phase positive s'étend de 50 à 68% du cycle et la négative de 68% à 100%. Notons enfin que la phase stable sur le pied extérieur est très légèrement supérieure à zéro avec une valeur moyenne de 0.02 Nm/bw. L'écart type montre une importante divergence entre les athlètes et une variabilité plus importante sur le pied extérieur qu'intérieur. On note sur cet axe une asymétrie d'intensité entre le pied intérieur et extérieur. Cependant le pattern d'évolution entre les skis intérieur et extérieur semble lui être symétrique.

Le moment sur l'axe Y est la conséquence conjointe d'un déplacement antéropostérieur du CG et de la force résultante appliquée au ski. Dès que la résultante des forces (dont le point d'application est le CG) n'est plus alignée avec le centre des chaussures, un moment sur l'axe Y apparaît. Ce moment de force augmente proportionnellement avec la force appliquée perpendiculairement au ski et l'avancée du CG. Les phases de variation **a** et **c**, correspondent grossièrement aux phases d'initiation et les phases de variation **b** et **d** aux phases de complétion du virage. Le moment positif à l'initiation du virage est la conséquence de l'application d'un moment vers l'avant par le skieur. Cet événement correspond aux actions d'orientation du skieur en direction de la ligne de pente et d'engagement du corps vers l'avant et l'intérieur du virage décrit par Muller *et al.* (1998). Cette action du skieur a pour but de créer une flexion de l'avant du ski sans nécessiter d'angle de prise de carre (Φ) ni de force radiale. Ainsi cette flexion de spatule permet l'apparition d'un effet de rotation du ski avant même la phase d'appui. Cet effet de rotation sera ensuite amplifié avec l'augmentation de l'angle Φ conduisant à la phase d'appui. Cette phase de projection est donc une mécanique clé de la phase d'initiation du virage. L'intensité du moment sur l'axe Y durant l'initiation est plus importante sur le ski extérieur que sur le ski intérieur, explicable par une part plus faible de F_z sur le pied intérieur. Le rôle du ski intérieur dans l'initiation du virage est non négligeable, mais reste plus faible que celui du ski extérieur. Les phases stables proches de zéro durant les phases d'appui indiquent que la projection perpendiculaire du CG est alignée au point d'application des forces durant cette phase. Enfin, à partir de l'analyse de la motricité réalisée dans la partie 1.1.1, et des connaissances techniques des entraîneurs de ski, il semble que les moments négatifs durant les phases de complétion soient attribuables à une bascule du skieur sur l'arrière. Cette bascule permet au skieur d'alléger l'avant du ski et ainsi de réduire sa déformation, permettant au skieur de sortir du virage. Durant la phase d'appui le skieur subit d'importantes forces radiales, auxquelles il doit résister. Ces forces ont tendance à induire un recul du bassin. Cette bascule vers l'arrière peut aussi être la conséquence d'un recul du bassin que le skieur n'a pu contrer musculairement. Elle sera donc associée à une contraction excentrique de la jambe extérieure. Ce moment vers l'arrière correspond à un appui des mollets sur le collier de la chaussure de ski. Cette action permet au skieur de créer un point d'appui dans le but de créer un moment vers l'avant pour le virage à venir.

Nos mesures convergent en terme d'intensité et d'évolution de signature avec des données rapportées par Federolf *et al.* (2005). Klous *et al.* (2014) rapportent une évolution du signal proche de nos mesures avec des valeurs positives durant le premier tiers du virage et négatives durant le dernier tiers du virage. Cependant une différence d'intensité de facteur x10 est encore présente entre nos signaux et les leurs. Meyer *et al.* rapportent des données de M_y de 0.07 Nm/bw sur le pied intérieur et 0.1 Nm/bw sur le pied extérieur. Ces intensités de moments sont proches de nos mesures. Cependant la cinétique de moment est très différente : ils rapportent une phase négative de faible intensité en début de virage de 0 à 15 % du virage (0.005 Nm/bw), puis des valeurs exclusivement positives suivant une forme typique de montée en force, plateau, baisse de force. Notons que le plateau de moment observé dans cet axe débute plus tard que le plateau de force typique d'une signature de force sur l'axe Z. La différence de d'évolution de M_y entre les deux études ne peut donc pas s'expliquer par la diaphonie (cross talk) entre les voies. D'après les intervalles de confiance présentés par Meyer *et al.* (2019), cette forme de signature de force n'est pas non plus, la conséquence d'un sujet divergeant influençant la signature de force moyenne. La différence de signature de moment en Y entre nos mesures et celles de cette étude pourrait provenir d'une population plus homogène au niveau moyen supérieur à l'échantillon que nous avons mesuré. Aux vues de la grande variabilité de nos mesures sur le pied extérieur et de l'écart entre la courbe moyenne et les courbes minimum et maximum, il est également possible que différentes stratégies apparaissent en fonction du profil ou du niveau du skieur. Notre population reste caractérisée par une signature de force cohérente avec les actions du skieur sur le terrain.

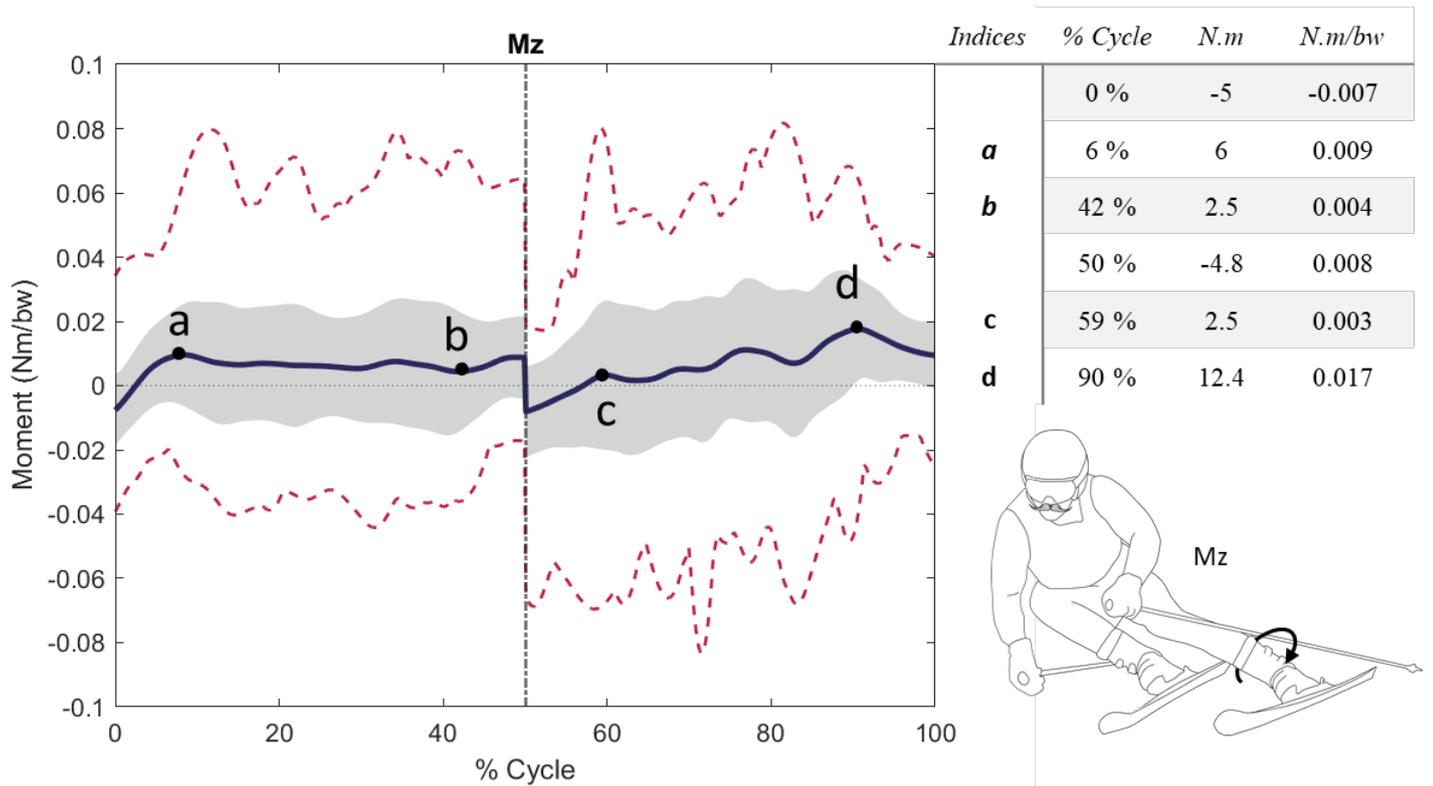


Figure 36 : Représentation graphique de l'évolution du moment en Z (exprimé en N.m normalisé au poids de corps) au cours d'un cycle en ski alpin. La ligne bleue correspond à l'intensité moyenne de l'échantillon. Les lignes pointillées rouges correspondent aux valeurs minimales et maximales parmi l'ensemble des courbes moyennes des skieurs. La surface grisée correspond à l'écart type entre les courbes moyennes de chaque skieur. Le tableau rapporte les valeurs de force en Newton et en Newton normalisé au poids de corps des points remarquables de la signature de force a à d.

5.1.7 MZ :

Le moment sur l'axe Mz est le moment qui génère une rotation latérale autour de l'axe longitudinal du skieur. Le moment est positif lorsque le skieur réalise une rotation de son corps vers l'intérieur du virage. La courbe moyenne de la population varie entre -4.8 Nm et 12.4 Nm, soit -0.007 et 0.017 Nm/bw une fois normalisée au poids de corps. L'ordre de grandeur de Mz est largement plus faible que les autres moments observés pendant un cycle. Les points remarquables de la signature de force sont mentionnés sur la Figure 36 par les lettres **a** à **d**. La forme générale de la courbe sur le pied intérieur est croissante entre le début du cycle et le point **a**, puis se stabilise jusqu'à 50% du cycle. Le référentiel de la force change au moment de l'allègement maximum des forces en Z (*i.e.* 50% du cycle). La valeur croît progressivement de 50% à 59% du cycle (point **d**) sur le pied extérieur, pour décroître légèrement jusqu'à la fin du cycle. Les valeurs moyennes et les variations sur l'axe Z sont très faibles. En revanche, la variabilité entre les sujets est importante au regard de l'amplitude des signaux. La faible amplitude des signaux la rend également plus sensible aux bruits de mesure dus entre autres aux micros-reliefs de la piste. Ainsi, aucune signature franche ou invariant marquant n'est visible sur les signaux de l'axe Mz. Quel que soit le pied, au début du virage le skieur applique un moment négatif

(ses épaules se tournent vers l'extérieur du virage à venir). Durant l'ensemble du cycle le moment est faiblement positif et stable. L'absence d'évènement sur la signature de moment sur l'axe Z rend difficile son interprétation au regard de la motricité du skieur. Les amplitudes des signaux sont de même ordre de grandeur que ceux mesurés dans des études précédentes par Meyer *et al.* (2019) et Federolf (2005). En revanche, elles sont de nouveau d'un ordre de grandeur 10 fois plus faible que les mesures présentées par Klous *et al.* La forme globale de la signature de force ne correspond pas aux signatures des autres études. Aux vues des très faibles amplitudes mesurées sur cet axe, la sensibilité aux bruits de mesure et perturbations dues aux microreliefs est élevée sur M_z . Ainsi, il est probable que les faibles échantillons de population des autres études soient insuffisants pour décrire avec précision la signature de force sur l'axe M_z . La population homogène d'un niveau coupe d'Europe de l'étude de Meyer *et al.* (2019) pourrait également présenter une signature de force différente de la signature globale de notre population hétérogène.

5.1.8 Analyse globale :

En premier lieu nous pouvons noter une cohérence globale entre les intensités des données que nous avons mesurées et les données présentées dans la littérature (Figure 37). La proximité entre l'intensité de nos données et celles de Meyer *et al.* (2019) consolide la validité de notre plateforme de force *in situ*. Néanmoins quelques exceptions demeurent entre nos données et celles de certaines études. Tout d'abord un ordre de grandeur de facteur 10 entre nos données et celles rapportées par Klous *et al.* (2014) est présent sur les moments de force dans les 3 axes. Les ordres de grandeur du reste de la littérature et de nos données expérimentales font consensus sur des valeurs plus faibles de moments. Dans l'article de Klous *et al.*, une erreur de traitement ou de figure (comme une normalisation à la constante gravitationnelle) peut expliquer ces différences.

D'importantes différences d'intensité de forces sont aussi à noter sur l'axe F_x . Cet axe est très peu étudié dans la littérature principalement pour des raisons métrologiques. La conception originale de notre capteur permet théoriquement d'évaluer avec justesse cette composante. A l'avenir, d'autres acquisitions avec un capteur adapté à la mesure de cette composante serait nécessaire afin de confirmer nos mesures. Cependant les mesures de force sur l'axe F_x sont globalement peu intéressantes pour comprendre les mécanismes sous-jacents de la performance car les intensités de force sur cet axe sont principalement des conséquences des autres axes. En l'absence d'appuis longitudinal en ski alpin, (propre aux sports de glisse) les actions du skieur dans cet axe n'ont que très peu de conséquences cinétiques. Dans la suite de ce travail de thèse nous porterons donc moins d'intérêt à la composante de la force longitudinale au ski.

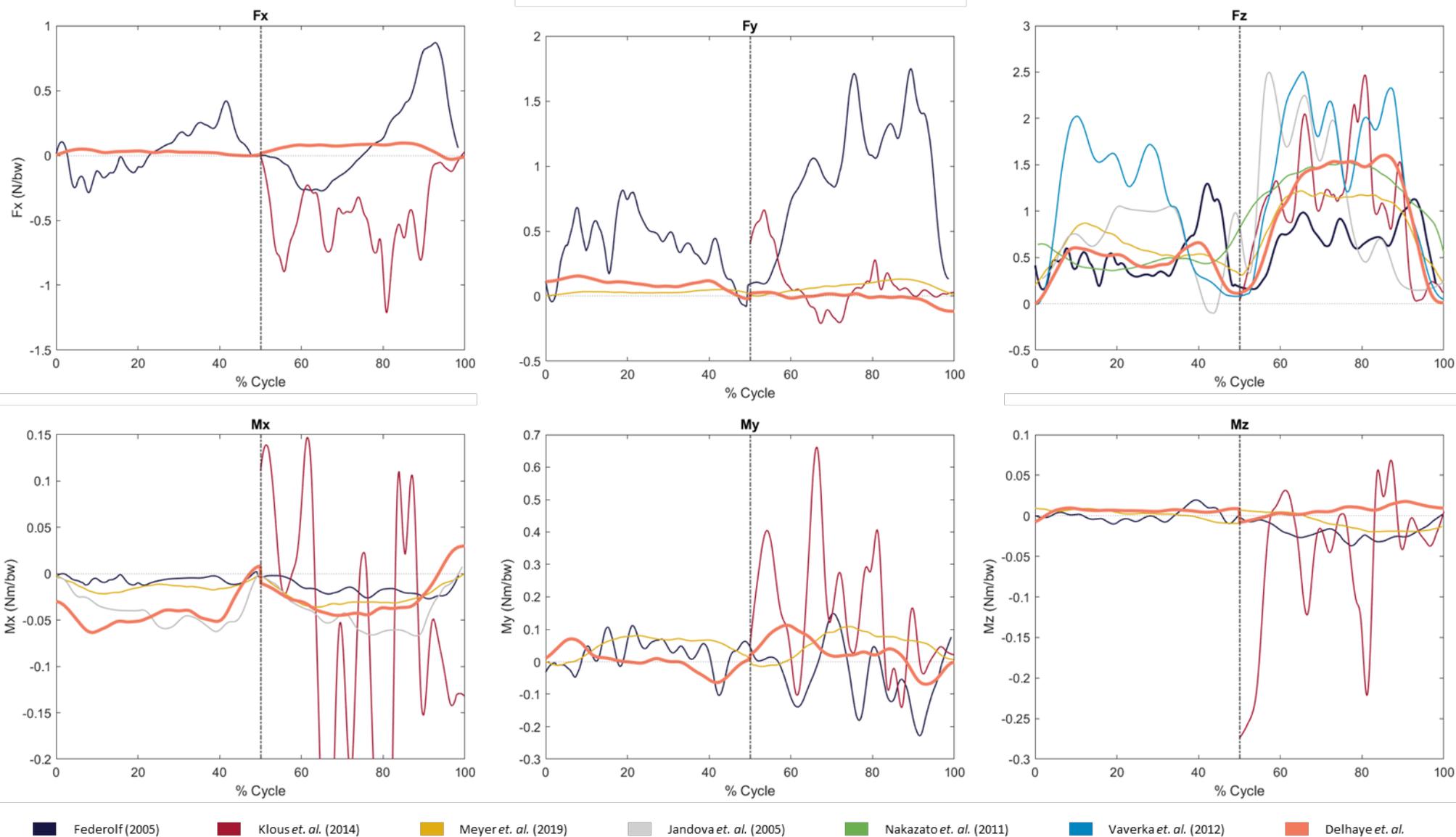


Figure 37 : Représentation graphique de l'évolution des intensités normalisées au poids de corps des forces et des moments dans les 3 axes normalisés au cours d'un virage. Chaque couleur correspond aux résultats présentés dans 6 différentes études, le trait orange le plus épais correspond aux signatures moyenne de notre population.

Pour terminer cette analyse globale de la cinétique en virage, il est important d'étudier les possibles relations entre les forces et les moments et entre ces 3 axes. A partir des données de force présentées et de l'analyse cinétique de l'activité réalisée dans la revue de littérature il semble que les mécanismes sous-jacents à l'évolution des signatures de F_y et M_x soient intimement liés. Pendant la phase de

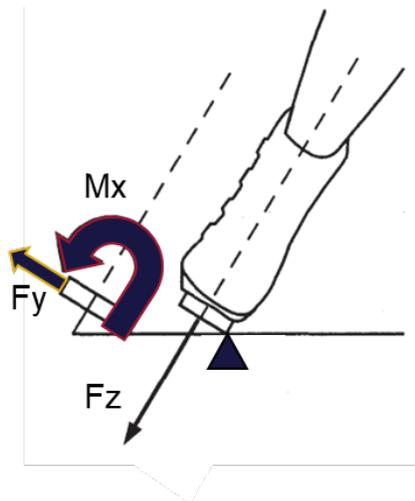


Figure 38 : Représentation schématique du levier de force à l'origine d'une partie du moment sur l'axe M_x . Issue de Lind (2004)

conduite, ces deux composantes de force et moment sont influencées par le niveau de charge et la force radiale. Les forces radiales propres à la trajectoire courbe du skieur génèrent une force sur l'axe Y dépendante de la cinématique du skieur. Du fait du levier généré par le décalage entre le centre du ski et la carre du ski, dès que le skieur subit une force centrifuge, celle-ci génère un moment autour de l'axe X (Figure 38). Les plateaux de force/moment durant la phase de conduite sont des marqueurs des conséquences cinématiques sur ces signatures de force. La relation entre ces deux signatures est surtout importante durant la phase de complétion du virage. On note sur ces deux signatures une inversion du signe de la force entre les phases de conduite et de complétion. Ces deux axes sont

latéralisés, le sens du référentiel changeant à chaque virage. Le changement de signe correspond donc à un changement latéral de l'application des forces et des moments durant la phase de complétion. Il est associé à la mise en action du skieur pour mettre fin au virage, mais aussi à une anticipation du virage à venir. Ce changement de signe semble correspondre temporellement aux changements de carres. Il est intéressant de noter que le changement de carre est associé à une modification de l'angle du collier de la chaussure, celui-ci effectue une rotation en direction de l'extérieur du virage actuel (ou l'intérieur du virage à venir). Dans le référentiel du virage, ce changement d'angle est la conséquence d'un moment sur l'axe X négatif (ou positif dans le virage à venir). Cependant, la période de complétion du virage est caractérisée par un moment positif. Durant cette phase le skieur arrête de résister à la force centrifuge. Celle-ci pousse le CG à l'extérieur du virage actuel, ce qui induit le changement de carre sans moment en X négatif. La bascule du collier (et par conséquent le changement de carre) semble donc être une conséquence inertielle du mouvement et non une action cinétique du skieur. Le moment négatif en fin de virage correspond donc aux mécanismes inertiels du virage suivant (Figure 34).

Les actions cinématiques sur l'axe M_z , semblent théoriquement intéressantes afin de comprendre les mécanismes sous-jacents du pivotement notamment durant la phase d'initiation. Ces mécanismes sont évoqués (théoriquement) dans de nombreux ouvrages fédéraux ou académiques. Plusieurs hypothèses proposent que l'action du haut du corps et de la ligne d'épaule dans la pente à l'initiation

favorisent par pivotement la rotation des skis et le virage. Ces hypothèses n'ont jamais été évaluées expérimentalement. D'après les mesures que nous avons réalisées, les amplitudes de moment sur l'axe Z sont extrêmement faibles. Ces résultats suggèrent que les moments de force dans cet axe ne jouent pas un rôle majeur dans le mécanisme de pivotement des skis. En conséquence de ces faibles amplitudes de moments, et des micros-reliefs de la neige, le ratio signal/bruit est très élevé sur cette composante. Dans la suite de ce travail de thèse nous porterons donc moins d'intérêt à la composante de moment longitudinal au skieur.

Enfin le dernier point intéressant de cette partie descriptive est la synchronicité entre les phases du virage décrites dans la littérature (Supej et al., 2015) et les points remarquables des signatures de force (Figure 27, Figure 28, Figure 29, Figure 32, Figure 35, Figure 36). Ce point renforce le lien entre les paramètres cinématiques observés dans la littérature et l'évolution des signatures de force. En effet les points remarquables détaillés précédemment apparaissent proches des instants estimés des changements cinématiques des phases de virage (Figure 39). Ces informations renforcent la cohérence des signaux au regard de l'activité et de la description analytique que l'on peut en faire.

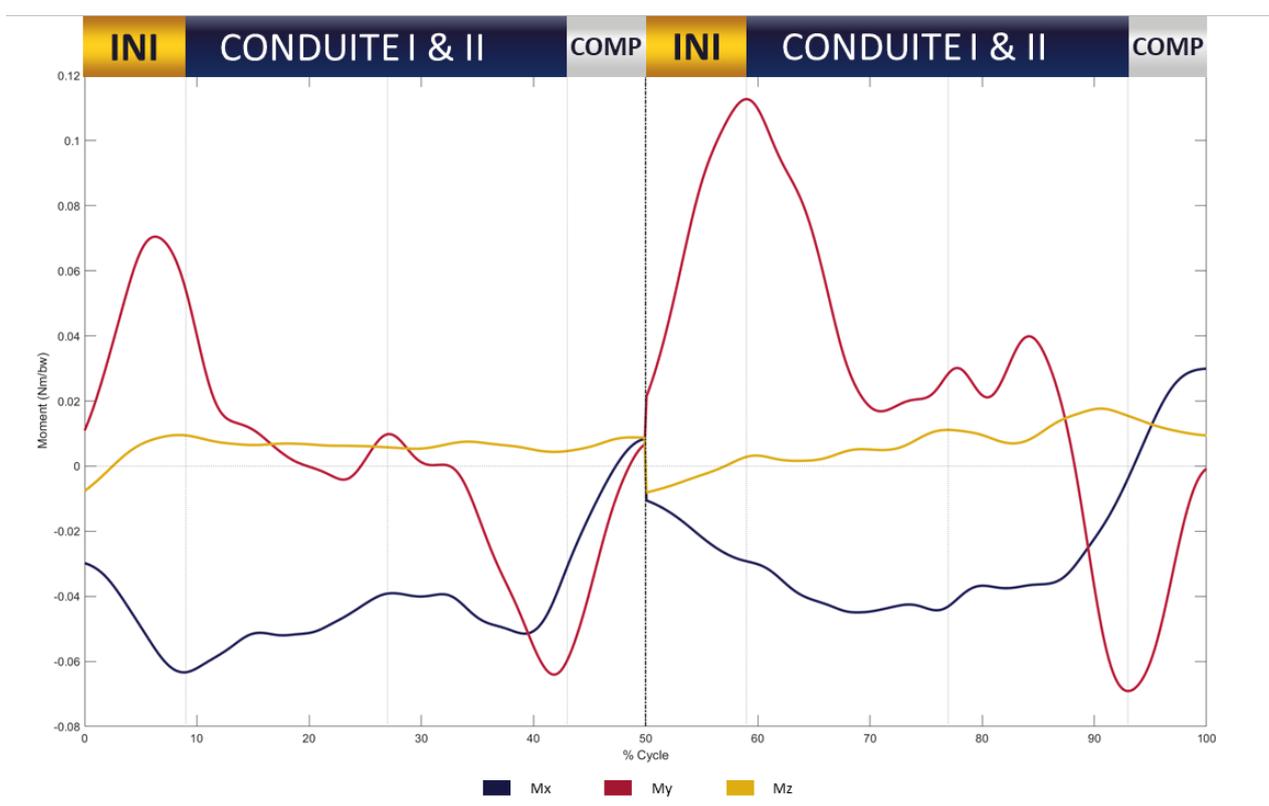
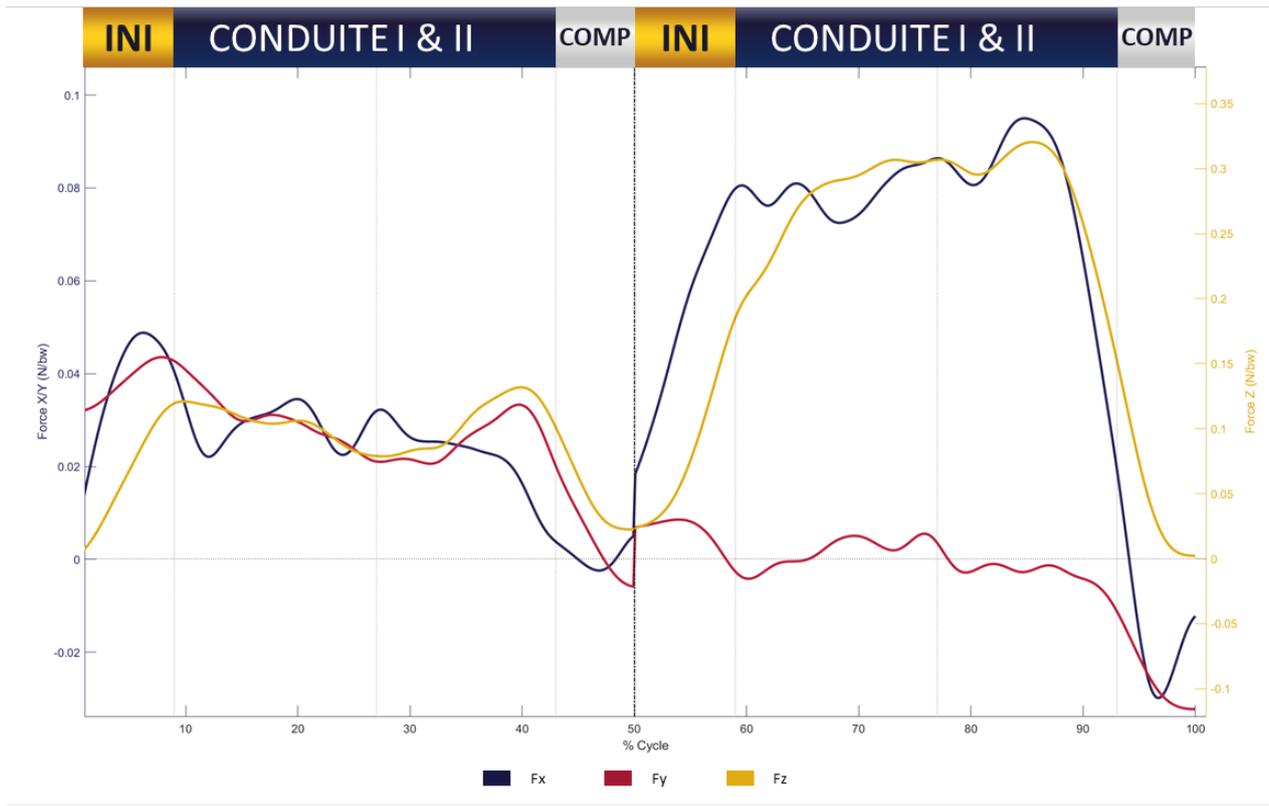


Figure 39 : Représentation des signatures de force (N/bw) et de moment (Nm/bw) au cours d'un cycle dans 3 dimensions, mises en relation avec la durée des différentes phases du virage décrites par Supej *et al.* 2015).

Ce constat nous incite à considérer également la cinématique de la force dans le virage au regard de ses différentes phases. Les critères analytiques des mécanismes cinétiques au cours du virage doivent être spécifiques à chaque phase de virage. En effet chaque phase est associée à une conduite motrice différente elle-même reliée à un objectif lié à l'activité.

- La phase d'initiation est caractérisée par la volonté du skieur d'infléchir sa trajectoire rectiligne pour débiter son virage. Pour cela il applique les mécanismes de flexion longitudinale du ski et d'inclinaison vers l'intérieur du virage pour créer une force radiale. Afin de réaliser ces objectifs les skieurs réalisent des actions motrices ayant différentes conséquences cinétiques : (i) un fort moment Y vers l'avant, (ii) un pic de charge latéral (F_y) et (iii) une forte montée en charge verticale (F_z).
- Durant la phase de conduite le skieur doit gérer sa trajectoire, son équilibre et sa vitesse, tout en conservant une forte flexion longitudinale de son ski. Cette phase se caractérise sur le plan cinétique par une phase de maintien uniforme de l'intensité de force et de moment sur tous les axes. La durée de cette phase de plateau est légèrement différente en fonction des axes mais s'étend globalement de 20 à 80% du virage (ou de 10% à 40% et 60% à 90% du cycle).
- Durant la phase de complétion le skieur doit réduire son rayon de virage et son angle ski-neige pour redresser sa trajectoire, changer de carre et anticiper son virage à venir. D'un point de vue cinétique la phase de complétion est caractérisée par des actions cinétiques latérales observables par l'inversion de signe de F_y , et M_x qui semblent être associée à un marqueur temporel du changement de carre.
- En toute fin de cycle on observe un changement de signe de F_x , une forte intensité M_y vers l'arrière et réduction importante de la F_z . Ces événements semblent eux, liés à l'allègement et à l'arrêt de la trajectoire courbe du skieur. Ils sont les marqueurs d'une quatrième phase de virage, la phase d'allègement (et de transition) entre les deux virages. Durant celle-ci, le skieur applique des forces (notamment sur l'axe Z) de très faibles amplitudes. Conformément au principe d'inertie de Newton, en l'absence de force le skieur ne peut influencer sa trajectoire. De ce fait durant cette phase, le skieur évolue en ligne droite entre les deux virages. Cette phase d'allègement de fin de cycle peut être associée à la phase d'allègement du début du cycle suivant.

D'après nos données, il semble que les événements latéraux apparaissent en avance par rapport aux événements verticaux. En fin de virage, la variation de F_y vers l'intérieur du virage (extérieur du virage suivant) est anticipée par rapport à l'allègement maximal de F_z . La phase de complétion du virage est donc associée à une anticipation latérale du virage à suivre. Cette anticipation est due à l'impossibilité du skieur d'effectuer ces actions durant la phase d'allègement (durant laquelle les forces de réaction du sol seront quasi-nulles).

5.2 Influence du niveau de performance sur les signatures de force :

5.2.1 Hypothèses de travail :

Il a été présenté précédemment que les signatures de force et de moment dans les 3 axes connaissent des invariants et la forme de ces signatures est globalement similaire pour l'ensemble de la population étudiée. Il est admis que les skieurs de très haut niveau ont des conduites motrices différentes des skieurs intermédiaires (Nakazato et al., 2011). La gestion de l'interaction de friction entre le ski et la neige est le seul outil du skieur pour évoluer sur la piste. Ainsi nous pouvons donc nous attendre à des modifications d'amplitude ou de timing de signature dues à des différences de niveau entre les skieurs. Le deuxième objectif de travail est de quantifier l'influence du niveau de performance sur la signature de force dans un cycle de ski alpin. A partir des informations détaillées dans l'introduction, du bilan des forces et de la description des signatures de force réalisée précédemment, nous pouvons émettre plusieurs hypothèses sur l'interaction entre les signatures de force et le niveau de performance. Malgré les limites inhérentes à cette méthode de mesure (partie 1.2.1), la quantification macroscopique de la performance sera réalisée à partir du temps de course des skieurs.

- a) Plus les skieurs sont performants plus leur vitesse de passage en courbe est élevée (Supej et al., 2011; Spörri et al., 2012b). Par conséquent à trajectoire similaire ces skieurs vont subir des forces radiales plus importantes durant la phase de conduite. Nous pouvons faire l'hypothèse que l'intensité des plateaux des signatures de F_x , F_z et M_x sera négativement corrélée au temps de course. Avec des plateaux de force plus élevés (observés dans la littérature partie 2.4.3) et une durée de virage plus courte (liée aux vitesses de passage plus élevées), les pentes de montée et de relâchement de force seront plus importantes chez les skieurs de haut niveau. Nous pouvons donc émettre l'hypothèse que durant les périodes de montées en force et de relâchement de force les pentes de F_x , F_z et M_x seront négativement corrélées au temps de course.
- b) La phase d'initiation est caractérisée par la volonté du skieur d'infléchir sa trajectoire. Intrinsèquement les skieurs de haut niveau présentent des caractéristiques techniques très élevées. Du fait des vitesses de passage plus importantes, ils sont soumis une pression temporelle plus importante pour réaliser un changement de carre entre deux virages. Les actions de mise en torsion du ski et d'inclinaison vers l'intérieur du virage doivent être réalisées à plus haute vitesse avec moins de temps. Il semblerait donc que les forces et les moments nécessaires pour réaliser ces actions doivent être de plus grandes intensités. Nous pouvons donc émettre l'hypothèse que les intensités positives de M_y en début de virage et les valeurs négatives de M_y en fin de virage seront négativement corrélées au temps de course des

skieurs. De plus nous pouvons faire l'hypothèse que les intensités de force et de moment après inversion de signe sur F_y et M_x seront négativement corrélées au temps de course des skieurs.

- c) En conduite coupée la majorité des effets de pivotement est localisée sur le pied extérieur (partie 2.2.2.4). De nombreux exercices et conseils donnés par les moniteurs de ski et les coachs fédéraux visent à modifier la gestuelle du skieur (par angulation de bassin, empilement articulaire...) afin d'augmenter la part de la charge sur le pied extérieur. A partir de ce point il est possible de faire l'hypothèse que durant la phase de conduite, la part de F_z sur le pied extérieur (par rapport à la somme de F_z sur les deux pieds) sera négativement corrélée au temps de course.
- d) Il existe des différences de vitesse de passage et de pression temporelle entre les skieurs de différents niveaux. Tous les skieurs doivent réaliser les mêmes changements de direction imposés par le tracé. Le timing d'apparition des différentes phases de virage pourrait donc varier en fonction du niveau de performance du skieur. Les meilleurs skieurs sont caractérisés par des taux de montée en force (hors neige) plus importants (« *Rate of force development* », RFD). Il s'agit d'un déterminant de la performance dans les mouvements explosifs dont l'objectif est d'atteindre des hautes vitesses sous une pression temporelle élevée. (Maffioletti et al., 2016). A partir de ces informations, il est possible de faire l'hypothèse que les skieurs ayant le plus faible temps de course ont des temps relatifs de montée en charge et de relâchement de charge plus courts. Par conséquent au sein d'un cycle si les temps relatifs de montée et de relâchement de force sont plus courts la part des autres phases est de fait plus longue. Nous pouvons donc faire l'hypothèse que les temps relatifs d'allègement et de conduite pourraient être plus longs chez les skieurs de haut niveau.
- e) A partir de leurs connaissances théoriques et empiriques les entraîneurs recommandent aux skieurs de haut niveau un contraste important entre les phases de transition et de conduite. Les entraîneurs donnent comme consignes aux skieurs d'être stables et équilibrés dans la phase de conduite et de réduire leurs mouvements pendant cette phase. Par opposition ils demandent généralement aux skieurs d'être dynamiques et actifs dans la phase de transition ainsi que d'augmenter la phase d'allègement durant laquelle le skieur génère peu de friction ski-neige. Actuellement et depuis quelques années la motricité de certains des meilleurs skieurs de coupe du monde illustrent cette volonté. Il est donc attendu que cette conduite soit plus présente chez les skieurs de haut niveau. Nous pouvons donc faire l'hypothèse que durant la phase de conduite les skieurs de haut niveau de performance présentent moins de variabilité d'intensité au niveau du plateau sur les axes F_x , F_z et M_x . Nous avons observé dans la partie précédente une forme de plateau en U sur la signature de F_z . Nous pouvons faire

l'hypothèse que cette forme est moins marquée chez les skieurs de haut niveau avec des proéminences faibles en début et en fin de plateau. A partir de ce même constat, nous pouvons également faire l'hypothèse que les skieurs de haut niveau présentent un plateau de Fz pour lequel les valeurs de début et de fin de plateau sont équilibrées, par opposition au skieur de niveau plus modeste ayant une proéminence plus importante en début ou fin de plateau.

5.2.2 Méthodologie :

5.2.2.1 Méthodologie d'évaluation des interactions signature de force et performance :

Comme détaillé dans la partie précédente, la description des interactions entre signature de force et performance (relevant du deuxième objectif de travail) se compose de plusieurs hypothèses. L'évaluation de ces différentes hypothèses repose sur différents traitements du signal paramètres calculés et tests statistiques seront détaillés dans cette partie.

Pour commencer, une partie des hypothèses repose sur l'évaluation de la corrélation entre l'intensité de force ou de moment au cours du cycle et le temps de course des skieurs. Ces signaux d'évolution cinématique sont caractérisés par leur unique dimension (1D). La complexité des signaux présentés ci-dessus, associée aux bruits de mesures liés aux microreliefs de la neige rend impossible l'utilisation d'une méthode d'analyse *a priori*. De ce fait, de nombreuses études préfèrent l'utilisation d'une méthode Post-hoc (Nakazato et al., 2011; Federolf, 2012). Cette méthode est caractérisée par l'extraction de paramètres (*Feature extraction*) décrivant les différentes caractéristiques de la signature de force. Ces paramètres sont des scalaires (de dimension zéro - 0D) extraits *a posteriori* et utilisés comme marqueurs de la signature de force dans les tests statistiques. Cependant cette approche peut être discutable pour plusieurs raisons. Premièrement, un test statistique repose sur des modèles statistiques. A partir de ce modèle il est possible de calculer la probabilité que des données aléatoires produisent le résultat observé (caractérisé par la valeur p). Si une hypothèse *a priori* concerne des scalaires de dimension zéro (0D), alors un modèle statistique 0D est approprié. Cependant, si une hypothèse concerne des trajectoires 1D, alors l'utilisation d'un modèle statistique 1D est plus approprié. En effet ces modèles statistiques peuvent différer de façon significative (Pataky et al., 2015b). De plus lors d'un processus de Feature extraction, de multiples paramètres sont extraits de la signature de force. Ces paramètres peuvent être liés aux valeurs absolues de signal à un moment particulier ou être calculés à partir de l'ensemble ou d'une partie des valeurs des signaux comme la moyenne, la valeur minimale, maximale, des différences ou des rapports d'intensités entre différents instant ou axes... Il est également possible d'extraire des paramètres caractérisant les variations d'intensité basées sur la dérivée du signal, des valeurs liées au contenu fréquentiel ou

encore à l'entropie du signal. Les valeurs extraites de cette façon ne sont pas toujours reliées à des hypothèses de recherche *à priori* et peuvent être très nombreuses. Ce design d'analyse statistique pose le problème des tests multiples. En effet lors d'un test de corrélation avec le modèle statistique de 5%, si la valeur p dépasse 0.05 l'hypothèse nulle (H_0) est rejetée et la probabilité de la rejeter à tort est inférieure à 5%. En revanche si ce même test est répété plusieurs fois avec le même jeu de données, le risque de rejeter à tort augmente avec le nombre de tests réalisés. Pour se prémunir contre l'augmentation du risque, il est possible d'appliquer la correction de Bonferroni à la valeur seuil du test en divisant la valeur p par le nombre de tests réalisés. Nous tâcherons donc de limiter au maximum le nombre de test et de paramètres (obtenus par Feature extraction) reliés à une hypothèse de recherche afin de réduire le risque de faire une erreur de type I (consistant à rejeter l'hypothèse nulle alors qu'il n'y a pas d'effet).

Récemment, plusieurs méthodologies d'évaluation des signaux 1D ont émergées dans le champ scientifique de l'analyse biomécanique. Ces méthodes d'analyses directes des signaux 1D sans passer par la *Feature Extraction* réduisent les biais de tests multiples. Par exemple, sont apparues les méthodes de « *functional data analysis* » (FDA), et de « *Principal component analysis* » (PCA) basées sur la considération d'un signal continu comme une fonction mathématique (Ramsay and Silvermann, 1998). La méthode de « *statistical parametric mapping* » (SPM) permet également l'analyse de données de dimension 1D ou plus (Pataky et al., 2008). La méthode SPM est apparue à l'origine dans les années 1990 dans des articles de neuro-imagerie et d'électrophysiologie, pour apparaître dans le champ de la biomécanique dans les années 2010. La méthode SPM est devenue une suite complète de techniques et d'outils capables de gérer tous les aspects de l'analyse d'un continuum n-dimensionnel au cours du temps (caractéristiques de l'imagerie médicale). Ces outils permettent l'analyse d'un continuum univarié et multivarié, c'est-à-dire l'analyse d'un ou plusieurs signaux au cours d'une même ligne temporelle. L'analyse SPM permet également l'utilisation de la densité de probabilité paramétrique et non paramétrique, l'inférence classique et bayésienne et l'analyse multimodale (Friston et al., 2006). Le fonctionnement de la méthode SPM peut se résumer comme il suit : dans la situation de données 1D, l'analyse SPM calcule d'abord un continuum statistique de test 1D à partir d'un ensemble de continuums 1D mesurés expérimentalement constituant sa base de données. Elle correspond dans notre situation au continuum de l'ensemble des cycles de virages réalisés par l'ensemble des skieurs. Cette étape est équivalente au calcul du continuum de moyenne et d'écart type pour chaque cycle de virage, comme fréquemment réalisé dans la partie « *Analyse descriptive des signatures de force en 3D* ». L'analyse SPM effectue ensuite une inférence statistique à un taux d'erreur de type I de 0.05 en calculant la valeur statistique de test critique au-dessus de laquelle l'effet statistique est significatif. Si le continuum observé expérimentalement dépasse cette valeur

critique, l'hypothèse nulle est rejetée. La méthode statistique SPM simplifiée est bien détaillée dans l'article de Pataky et Todd de 2010. Les outils utilisés pour le traitement de données de ce travail de thèse sont issus de ces travaux. (Pataky, 2010, 2016), et ont déjà été appliquée dans l'analyse de la motricité en ski (Alhammoud, 2019).

Pour résumer, la méthode SPM afin de répondre aux hypothèses visant à corrélérer les intensités de force et de moment avec le temps de course (hypothèse *a*). De plus une analyse complémentaire sera réalisée sur la dérivée des signaux de force utilisés dans la base de données SPM. Cette analyse de la dérivée permettra d'évaluer les interactions entre les variations d'intensité et le temps de course (hypothèse *b*). Enfin pour les hypothèses ne portant pas directement sur les intensités ou les variations d'intensité, une analyse classique par corrélation sera réalisée sur les paramètres calculées à partir de la base de données. La méthodologie de calcul de ces paramètres (*feature Extraction*) sera décrite avec précision pour chacun d'entre eux dans la partie 5.2.2.3. La base de données est constituée de l'ensemble des signatures de force 3D au cours d'un cycle normalisé en pourcentage de cycle sur les 17 skieurs. L'ensemble des données brutes de chaque virage est normalisé par rapport au poids de corps du sujet. Elles sont ensuite filtrées avec un filtre Butterworth d'ordre 2, passe bas avec une fréquence de coupure à 2 Hz. Seule la signature de force sur l'axe z utilisée dans le calcul des paramètres de la signature de force (*feature extraction*) est filtrée à 12 Hz afin de conserver les variations liées au rataillage et aux microreliefs de la neige. Les données de chaque virage sont ensuite interpolées sur 300 points. Les deux virages sont ensuite concaténés pour créer un signal de cycle de 600 points comprenant un virage intérieur et un virage extérieur.

5.2.2.2 Méthodologie de détection des différentes phases de signal :

A partir de la description des signatures de force en 3D nous avons identifié dans la partie 5.1.8 la présence de phases cinétiques de virage. Ces phases sont globalement en adéquation avec les phases cinématique précédemment décrites dans la littérature. Cependant les bornes de découpage des phases décrites dans l'article de Supej *et al.* (2015) sont des moyennes réalisées sur l'ensemble de d'un échantillon étudié. Elles ne sont donc pas adaptées à la spécificité du virage étudié (lié au tracé ou à l'athlète). Afin d'analyser l'ensemble des signatures de force mesurées en fonction des différentes phases de virage, il semble nécessaire de déterminer les phases du virage à partir de ces mêmes données cinétiques. La signature de force sur l'axe Z est la signature la plus à même d'être utilisée pour découper les phases de virage pour plusieurs raisons :

- La signature de F_z est la signature la plus étudiée dans la littérature. Il est clairement établi que celle-ci suit une forme typique d'évolution au cours du virage précédemment observé et rapporté dans la littérature. Cette forme typique en créneau est caractérisée par une phase

d'allègement en début de virage, une montée en force, un plateau, un relâchement de force, et une phase d'allègement en fin de virage. Cette forme est également observable sur les signatures de force en F_x et M_x . Cette forme en créneau a également été précédemment observée sur d'autres paramètres de la motricité en ski alpin comme les angles articulaires (Kröll et al., 2015; Alhammoud et al., 2020) ou l'angle ski-neige (Federolf, 2005).

- Comme détaillé dans la partie 5.1.4, les timings d'apparition des événements remarquables sur la signature de force sur l'axe Z correspondent au découpage de phases proposé précédemment dans la littérature. Ces découpages sont basés sur la cinématique du skieur. La concordance entre les découpages et les temps d'apparition des points remarquables renforce le lien entre cinétique et cinématique en ski alpin. Ceci appuie la pertinence d'un découpage des phases de virage basé sur ces points cinétiques.
- La signature de force sur l'axe F_x est celle qui présente la plus grande amplitude de variation pendant le cycle. Ces grandes amplitudes permettent une identification plus facile des points remarquables et des différentes phases. Grace à ces amplitudes plus importantes par rapport aux autres axes, la forme globale de la signature de force en Z est moins influencée par les microreliefs et le rataillage (partie 5.1.1). Au contraire, il est possible que le skieur utilise les microreliefs et le rataillage du ski pour débiter et mettre fin à la phase de virage de manière plus brutale. De ce fait, les variations de signal issues de ces phénomènes seront conservées dans les données traitées pour le découpage des phases du virage. Quoi qu'il en soit, de part ces hautes variations d'intensité, et dans le but d'effectuer la détection des phases de virage, cette signature de force sur l'axe Z présente le meilleur ratio signal/bruit.
- Enfin la signature de force sur F_z est celle qui présente la plus grande stabilité en comparaison avec les autres signatures. A l'inverse des autres signatures, toutes les signatures F_z suivent globalement la forme en créneau. Cette spécificité permet la détection des phases sur l'ensemble des virages mesurés. Elle permet également de pouvoir augmenter la fréquence de coupure du filtre passe bas tout en conservant un pattern stable pour la détection des phases de virage.

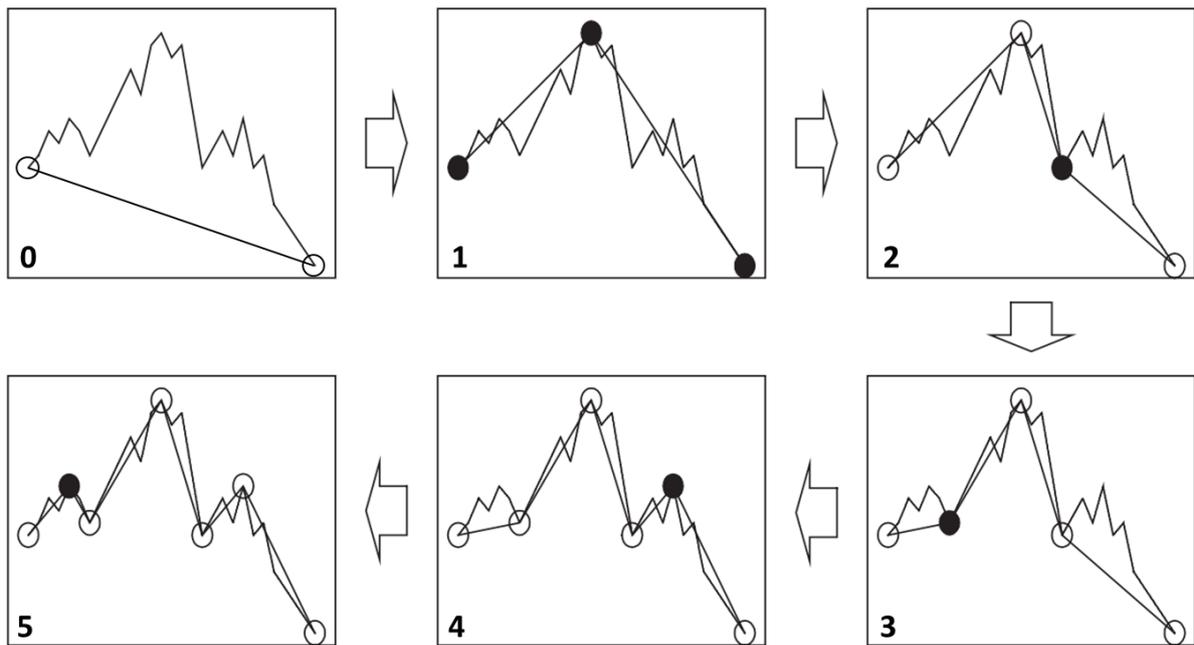


Figure 40 : Représentation de la détection de PIP au cours de 5 itérations

Dans le but d'avoir une répétabilité des mesures la plus fiable possible, il est nécessaire d'automatiser la détection des phases de virage. La détection *a priori* comme celle qui a été réalisée dans la partie 5.1 est donc exclue. La méthode choisie pour détecter les points remarquables est la méthode géométrique des *Perceptually Important Points* (PIP). Cette méthode est une méthode de simplification de signal basée sur une détection de points d'intérêts et l'identification de patterns typiques d'un signal (Chung et al., 2002; Fu et al., 2007). La détection est réalisée de manière géométrique et itérative (Figure 40).

Lors de la première itération, le signal est simplifié à son maximum et peut être résumé à une droite reliant le premier et le dernier point du signal (Figure 40.0). Pour la seconde itération le PIP déterminé précédemment est pris en compte pour la recherche qui se réalise sur deux sections distinctes (du point initial au point déterminé à la 1^{ère} itération, et de ce point au point final). Ainsi, à chaque itération la méthode permet de détecter un nouveau PIP sur plusieurs segments de recherche. Les étapes de calculs sont détaillées dans les équations suivantes (Équation 37 à Équation 38) et la Figure 41.

En premier lieu le calcul de la pente (s) entre le point initial et final d'un ou plusieurs segments de recherche (définis par les PIP déjà existants sur le signal) est réalisé (Équation 37). Ce calcul est réalisé entre les points $p_1 (x_1, y_1)$ et $p_2 (x_2, y_2)$ dans l'exemple de la Figure 41. Puis pour chaque point du signal (p_3), la distance verticale (VD) est calculée entre ce point et la droite (Équation 38).

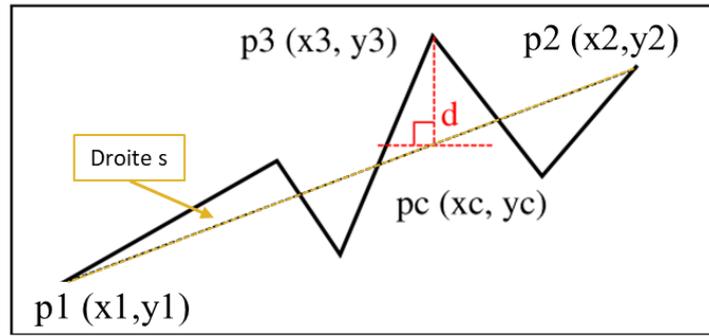


Figure 41 : Définition des points utilisés dans le calcul de PIP sur un segment spécifique. $p1(x1, y1)$ correspond au point initial sur le segment de recherche, $p2(x2, y2)$ correspond au point final du segment de recherche, $p3(x3, y3)$ correspond à un des points de signal sur le segment de recherche pour lequel la distance verticale (d) avec le point $pc(xc, yc)$ appartenant à la droite (s) est calculée (avec $xc = x3$).

L'intersection entre la droite verticale d'origine $p3(x3, y3)$ et la droite (s) est nommée $pc(xc, yc)$. Notons que dans ce calcul xc et $x3$ sont égaux. Cette distance verticale est calculée pour tous les points du signal. Le point ayant la distance verticale la plus importante est considéré comme le nouveau PIP. A la prochaine itération, deux droites de pente (s) seront calculées. La première entre le point $p1$ et $p3$, la seconde entre le point $p3$ et $p2$. Les distances verticales sont toujours calculées entre le signal et l'une des droites s .

Équation 37 $Pente(p1, p2) = s = \frac{y2 - y1}{x2 - x1}$

Équation 38 $VD(p3, pc) = |yc - y3| = \left| \left(y1 + (y2 - y1) \frac{xc - x1}{x2 - x1} \right) - y3 \right|$

La signature de force sur laquelle se base la détection est un signal filtré avec un filtre Butterworth

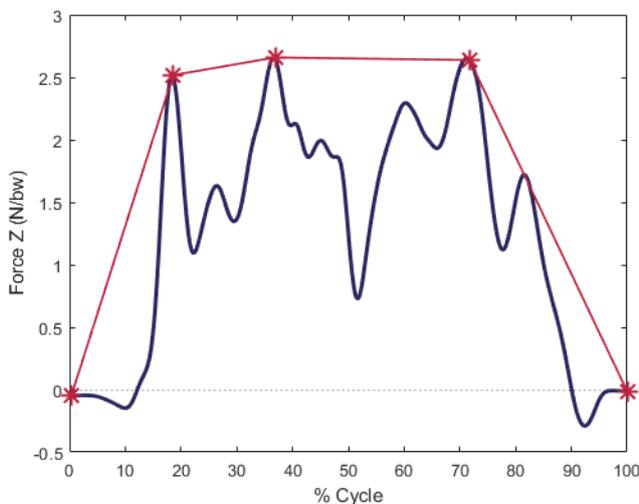


Figure 42 : Exemple de détection des événements de début et de fin de plateau sur Fz grâce à la méthode PIP.

d'ordre 2, passe bas, avec une fréquence de coupure à 12 Hz. La méthodologie de détection de PIP a été adaptée à la détection des phases de virage en ski à partir des signatures de force en Fz . La première étape concerne la recherche des bornes de la phase de plateau. Cette recherche ne s'applique plus sur les valeurs absolues (Équation 38), mais sur les valeurs positives. De ce fait seuls les points situés au-dessus des droites s peuvent être sélectionnés comme PIP. Dans le but de détecter le début et la fin du plateau, la méthodologie est

réalisée avec 3 itérations. (Figure 42). La détection de 3 PIPs à partir du signal brut est un choix méthodologique permettant la mise en évidence du début et de la fin du plateau. La recherche d'uniquement deux PIPs est insuffisante pour déterminer les bornes du plateau. En effet, le plateau est fréquemment caractérisé par une valeur intermédiaire supérieure aux valeurs des bornes du

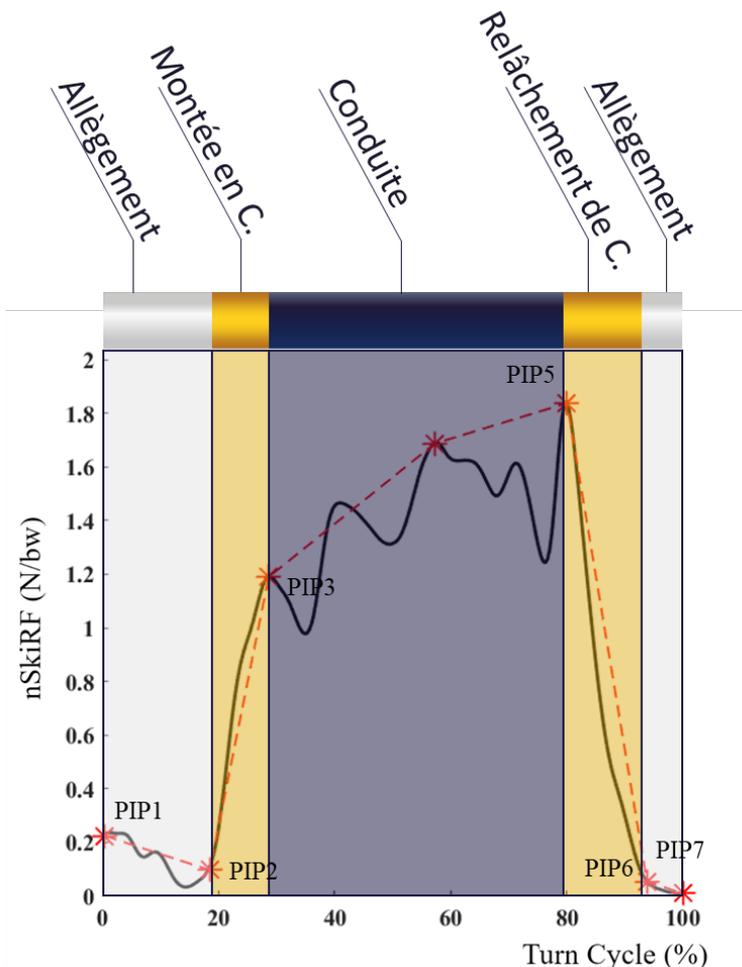


Figure 43 : Exemple de détection des événements bornant les différentes phases du virage sur F_z grâce à la méthode PIP.

plateau. Lorsque cette valeur intermédiaire est présente, elle est la valeur maximale du signal et sera donc détectée en premier par la méthodologie PIP. Ainsi cette valeur sera marquée à tort comme une borne du plateau. Lors d'une détection de plateau basée sur 3 PIPs les deux bornes seront toujours détectées. Le PIP situé chronologiquement au milieu du plateau (intercalé entre les deux bornes du plateau) ne sera pas retenu dans la suite de l'analyse, son intérêt étant purement méthodologique. La détection des points de début de montée en charge et de fin de montée en charge est également réalisée en utilisant la méthodologie PIP. Pour la période de montée en charge, le calcul de distance verticale est réalisé entre chaque point de

signal entre le premier point du cycle et le début de plateau. Séparément ce calcul est réalisé entre la fin de plateau et le dernier point du cycle pour détecter la phase de fin de relâchement. La recherche du point le plus éloigné est réalisée en ne considérant que les valeurs négatives (à l'inverse de la phase de détection du plateau). Il est possible de considérer que l'allègement n'est pas réel si le skieur applique encore une force conséquente sur le ski extérieur. De fait, les points dont la valeur de force en Z sont supérieurs à une fois la masse du skieur ne sont pas pris en compte dans la recherche. Les valeurs en abscisse des points PIP1, PIP2, PIP3, PIP5, PIP6, PIP7 sont considérées respectivement comme les bornes des phases d'allègement pré-virage, de montée en charge, de plateau, de relâchement de force, et d'allègement post-plateau (Figure 43). Ces valeurs sont calculées pour

chacun des virages de chacun des sujets. La détections des phases cinétiques du virage basé sur la méthode PIP sont présentés dans la Figure 44 pour plusieurs virages. L'utilisation de cette méthode comporte plusieurs avantages. Tout d'abord cette méthode géométrique est simple à mettre en place et les résultats obtenus sont facilement compréhensibles. Par opposition à certaines autres méthodes « boîte noire » comme le *Dynamic Time Wrapping*, ou le *Machine Learning*, la méthodologie utilisée ici reste palpable. Elle ne génère pas de point et n'altère pas le signal évalué. En effet, les points obtenus sont des points réels du signal sans modification temporelle ou d'amplitude. Cette méthode ne nécessite pas une grande quantité de données contrairement à du *Machine Learning*. Enfin elle ne nécessite pas l'utilisation de seuils arbitraires. En effet une autre méthode aurait pu être utilisée afin de détecter les phases du virage : l'analyse de la dérivée du signal. La phase de prise de carre pourrait être caractérisée par des fortes valeurs positives de la dérivée, la phase de relâchement par de fortes valeurs négatives, et le plateau et la phase d'allègement par des phases durant lesquelles la dérivée est nulle. Cependant notre signal s'y prête mal compte tenu de la présence des pics de force induits par les microreliefs et le rataillage. Ces pics sont caractérisés par de fortes variations du signal et donc de hautes valeurs positives et négatives de la dérivée. Afin d'éliminer ces pics un filtrage passe bas à basse fréquence (*i.e.* 4 Hz) est possible. Mais il induit une modification des données qui altère le pattern en créneau typique de la signature de force F_z , rendant la détection précise des phases impossible (Figure 26 et Figure 44).

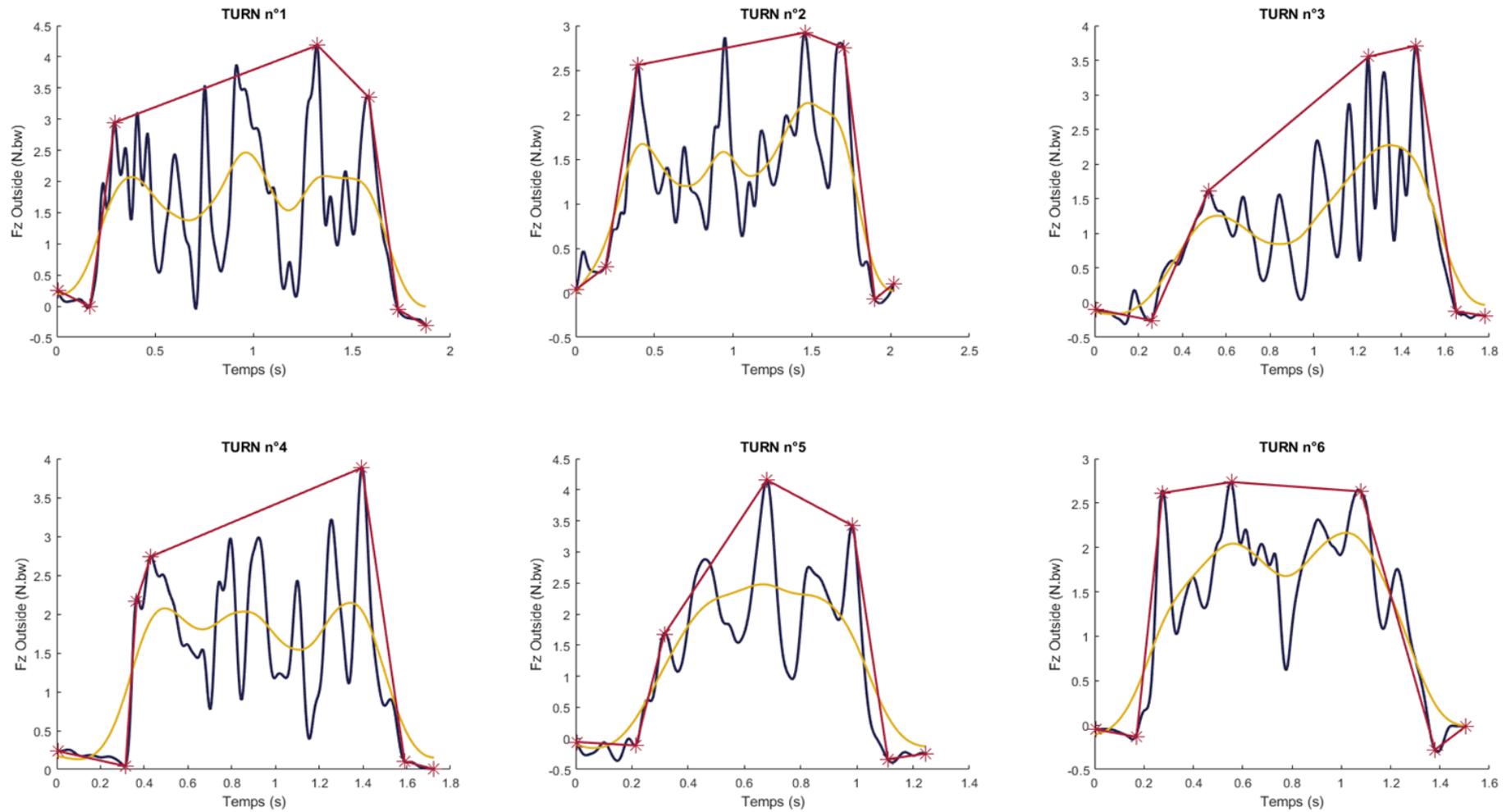


Figure 44 : Evolution de la courbe de F_z du pied extérieur dans 6 virages d'un sujet filtrée avec un Butterworth passe bas avec une fréquence de coupure à 12Hz (bleu) et à 4Hz (jaune) et mise en évidence des PIP (rouge) déterminées à partir du signal filtré à 12Hz.

5.2.2.3 Calcul des paramètres descriptifs de la signature de force (Feature extraction) :

Dans le but de répondre aux hypothèses c), d), et e), les paramètres seront calculés à partir de la base de données détaillée dans la partie 5.2.2.1 et de la méthodologie de découpage des phases détaillée dans la partie 5.2.2.2. Les données utilisées pour répondre à ces hypothèses sont donc filtrées en utilisant un filtre Butterworth d'ordre 2, passe bas, avec une fréquence de coupure dépendante de l'axe étudié à 12 Hz sur Fz et 4 Hz sur les autres axes.

Premièrement, nous évaluerons l'hypothèse (c) selon laquelle durant la phase de conduite la part de Fz sur le pied extérieur par rapport à la somme de Fz sur les deux pieds est négativement corrélée au temps de course. Pour cela, le ratio ($R_{in/out}$) de force interne sur externe est calculé durant la phase de conduite de virage (Équation 39).

$$\text{Équation 39} \quad R_{in/out} = \frac{MFzC_{out}}{MFzC_{out} + MFzC_{in}}$$

$MFzC_{out}$ et $MFzC_{in}$ correspondent respectivement à la force moyenne sur l'axe Z sur le ski extérieur et intérieur entre PIP3 et PIP5. $R_{in/out}$ est calculé sur les 7 cycles de chacun des sujets. Une moyenne de $R_{in/out}$ est ensuite déterminée pour chacun des sujets et corrélée avec le temps de course.

Deuxièmement, nous évaluerons l'hypothèse (d) selon laquelle les skieurs ayant le plus faible temps de course ont des temps relatifs de montée en charge et de relâchement de charge plus courts, et des temps relatifs d'allègement et de conduite plus longs que les skieurs de plus faible niveau. Pour cela une corrélation sera réalisée entre le temps de course et le temps relatif d'apparition des évènements remarquables. Les temps d'apparition seront notés t_{PIP2} , t_{PIP3} , t_{PIP5} et t_{PIP6} et exprimés en pourcentage de cycle. La durée des différentes phases sera calculée par la suite : le temps d'allègement pré virage ($tA1$), post virage ($tA2$) et total sur le cycle (tAT) ; le temps de conduite (tC), le temps de montée en charge (tMC), et le temps de relâchement de charge (tRC). Ces calculs sont détaillés dans les équations suivantes (Équation 40 à Équation 45). Tous ces indices sont calculés pour les 7 cycles de chacun des sujets. Une moyenne de chacun des indices est ensuite calculée pour chaque sujet et corrélée au temps de course.

$$\text{Équation 40} \quad tA1 = t_{PIP2}$$

$$\text{Équation 41} \quad tA2 = 100 - t_{PIP6}$$

$$\text{Équation 42} \quad tAT = tA1 + tA2$$

$$\text{Équation 43} \quad tC = t_{PIP5} - t_{PIP3}$$

$$\text{Équation 44} \quad tMC = t_{PIP3} - t_{PIP2}$$

$$\text{Équation 45} \quad tRC = t_{PIP6} - t_{PIP5}$$

Troisièmement, nous évaluerons l'hypothèse (e), selon laquelle les skieurs de haut niveau ont un comportement cinétique stable et équilibré durant la phase de conduite au moyen de plusieurs

paramètres. Premièrement l'écart moyen du signal durant la phase de conduite par rapport à la moyenne durant cette phase. Ce calcul d'écart type sera réalisé sur les plateaux de Fx, Fz et Mx. Les indices seront notés respectivement : SDFxC, SDFzC et SDMxC.

Puis, le niveau de proéminence des pics de Fz de début et de fin de conduite par rapport à la moyenne du plateau visualisable par forme en U durant le plateau et calculé respectivement par les indices de proéminence de début de plateau (ProPIP3) et de fin de plateau (ProPIP5) (Équation 46 à Équation 49). Dans ces calculs FzPIP3 et FzPIP5 correspondent respectivement aux valeurs d'intensité de Fz au début et à la fin du plateau et MFzC à la moyenne de Fz durant la phase de conduite (entre PIP3 et PIP5).

$$\text{Équation 46} \quad \text{ProPIP3out} = \text{FzPIP3out} - \text{MFzCout}$$

$$\text{Équation 47} \quad \text{ProPIP3in} = \text{FzPIP3in} - \text{MFzCin}$$

$$\text{Équation 48} \quad \text{ProPIP5out} = \text{FzPIP5out} - \text{MFzCout}$$

$$\text{Équation 49} \quad \text{ProPIP5in} = \text{FzPIP5in} - \text{MFzCin}$$

Enfin nous calculerons la prévalence du skieur à favoriser des Fz importantes au début ou à la fin du temps d'appuis ($\Delta\text{PIP}Cout$) (Équation 50).

$$\text{Équation 50} \quad \Delta\text{PIP}Cout = \text{PIP5out} - \text{PIP3out}$$

Ces indices sont calculés pour les 7 cycles de chaque sujet. Une moyenne de chacun des indices par sujet est ensuite réalisée pour être corrélée avec le temps de course.

Afin d'évaluer la corrélation entre le temps de course et ces paramètres, des régressions linéaires sont réalisées sur les données moyennes de chacun des athlètes calculées à partir de l'ensemble des cycles de cet athlète. L'ensemble de ces régressions linéaires sont réalisées sur Matlab grâce à la fonction `fitlm`. Cette fonction détermine grâce à la méthode des moindres carrés le modèle de régression linéaire du set de données. La réponse de la fonction comprend la formule du modèle, les coefficients estimés et les statistiques récapitulatives du modèle. Enfin à partir du nombre d'observations, du nombre de degrés de liberté du modèle, et du coefficient de détermination (r^2) il est possible de déterminer la probabilité statistique (valeur p) que les résultats soient liés au hasard. Les points uniques de chaque cycle de virage des sujets peuvent être donnés dans les figures à titre indicatif afin de décrire la dispersion autour de la moyenne du sujet. Cette dispersion est descriptive de la variabilité intra sujet.

5.2.3 Résultats :

5.2.3.1 Résultats SPM :

Afin de répondre aux hypothèses a) et b) les résultats des tests SPM seront présentés de la Figure 45 à la Figure 49 pour les 5 axes étudiés. Chacune des figures représente l'évolution moyenne de la signature de force (a) et de la dérivée de la signature (b) au cours d'un cycle de virage (comme présenté dans la partie 5.1) Le résultat du test $SPM\{t\}$ est présenté au-dessous des signatures de force et de leurs dérivées. Lorsque la valeur de $SPM\{t\}$ dépasse les seuils en pointillé rouge, les valeurs de signal des différents skieurs sont significativement corrélées au temps de course. Lorsque $SPM\{t\}$ dépasse le seuil positif, les données sont positivement corrélées au temps de course (ces situations sont représentées par des bandes jaunes). Dans ces situations, l'augmentation de la force ou du moment durant cette période est associée à une augmentation du temps de course (*i.e.* associée à un plus faible niveau de performance). A l'inverse lorsque $SPM\{t\}$ dépasse le seuil négatif, les données de force sont négativement corrélées au temps de course (ces situations sont représentées par des bandes bleues). Sur le graphique de $SPM\{t\}$, une étiquette indique le niveau de quantification statistique du test de régression (p-value). Nous détaillerons à la suite de chaque figure, les bornes de signal et de dérivée du signal significativement corrélées au temps de course des skieurs.

5.2.3.1.1 FX :

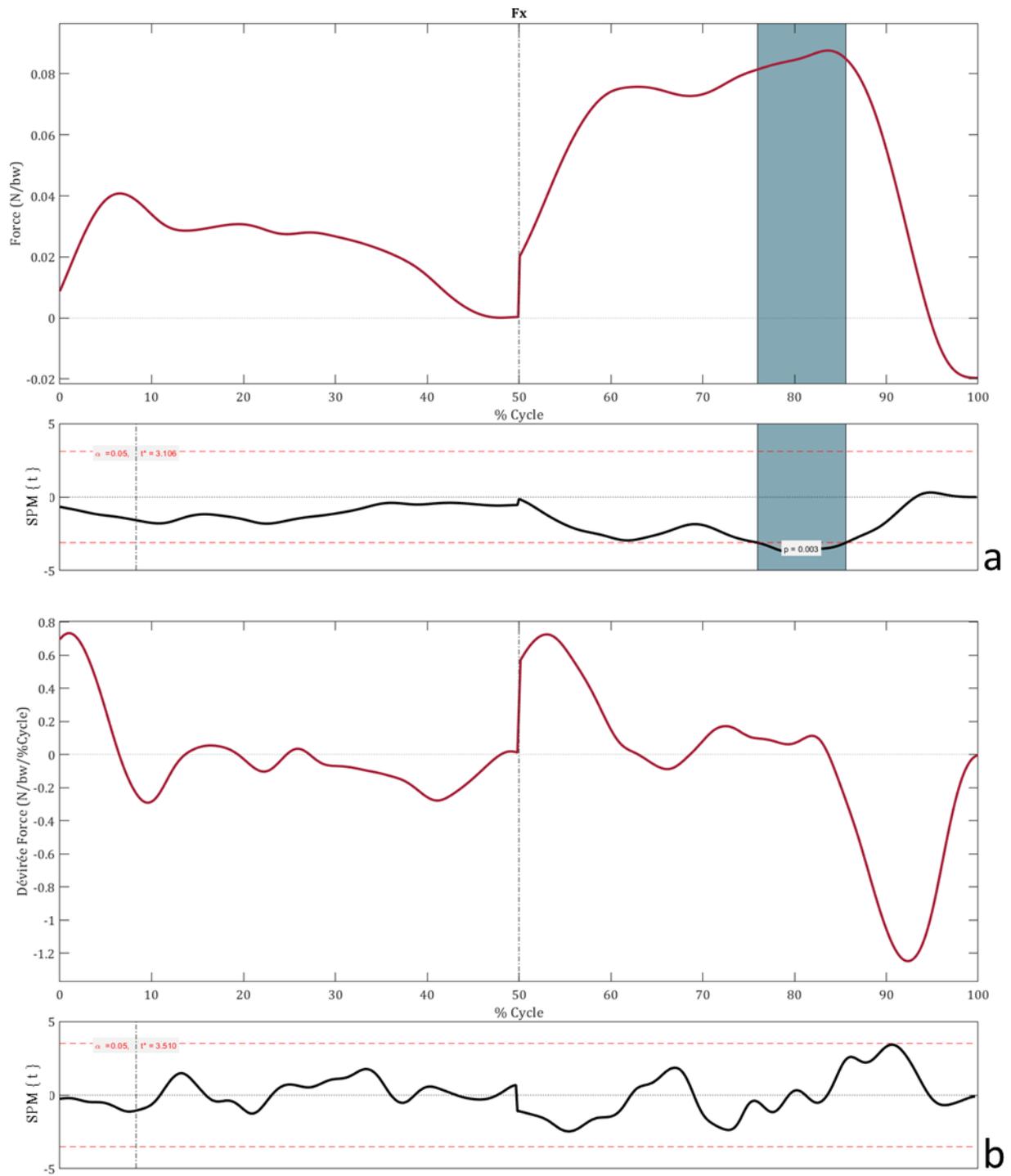


Figure 45 : Evolution moyenne (de tous les skieurs dans tous les virages) de la signature de Fx (a) et de sa dérivée (b) au cours d'un cycle de virage. Le résultat du test de corrélation SPM{t} est présenté au-dessous des signatures de force et de leurs dérivées. Lorsque celui-ci passe sous le seuil négatif (pointillés rouges) la corrélation avec le temps de course est négative (bandes bleues), au-dessus du seuil positif la corrélation est positive (bandes jaunes)

Les valeurs de force en X (Figure 45) sont significativement corrélées négativement ($p=0.009$) aux valeurs de temps de course entre 76.0% et 85.6% du cycle. Les meilleurs skieurs présentent des intensités de F_x plus importantes sur ces périodes. Aucune corrélation significative n'apparaît sur la dérivée de la signature de force en F_x . Cependant, nous pouvons noter que $SPM\{t\}$ est très proche du seuil (3.35 pour un seuil à 3.51) à 90.5% du cycle et proche au début de la période de décroissance de force entre 85% et 90% du cycle. Ceci peut indiquer une tendance selon laquelle les skieurs de haut niveau ont des vitesses de décroissance de force durant cette période plus importante.

5.2.3.1.2 FY :

Les valeurs de force en Y (Figure 46) sont significativement corrélées ($p=0.033$) aux valeurs de temps de course entre 90.4% et 95.1% du cycle. Les skieurs de haut niveau ont donc des intensités de F_y plus faibles (plus fortement négatives aux vues du signal) durant la phase de relâchement de force. Nous pouvons noter que $SPM\{t\}$ est très proche du seuil (2.7 pour un seuil à 3.0) à 79.1% du cycle. Il est également proche du seuil durant l'ensemble de la fin de la période du plateau entre 70% et 79% du cycle pouvant indiquer une tendance selon laquelle les skieurs de haut niveau ont des intensités de force en Y plus faibles durant la fin de plateau. Aucune corrélation significative n'apparaît sur la dérivée de la signature de force en F_y . La corrélation observée sur les signaux (Figure 46.a) n'est pas associée à une corrélation (ou une tendance) sur la dérivée du signal (Figure 46.b).

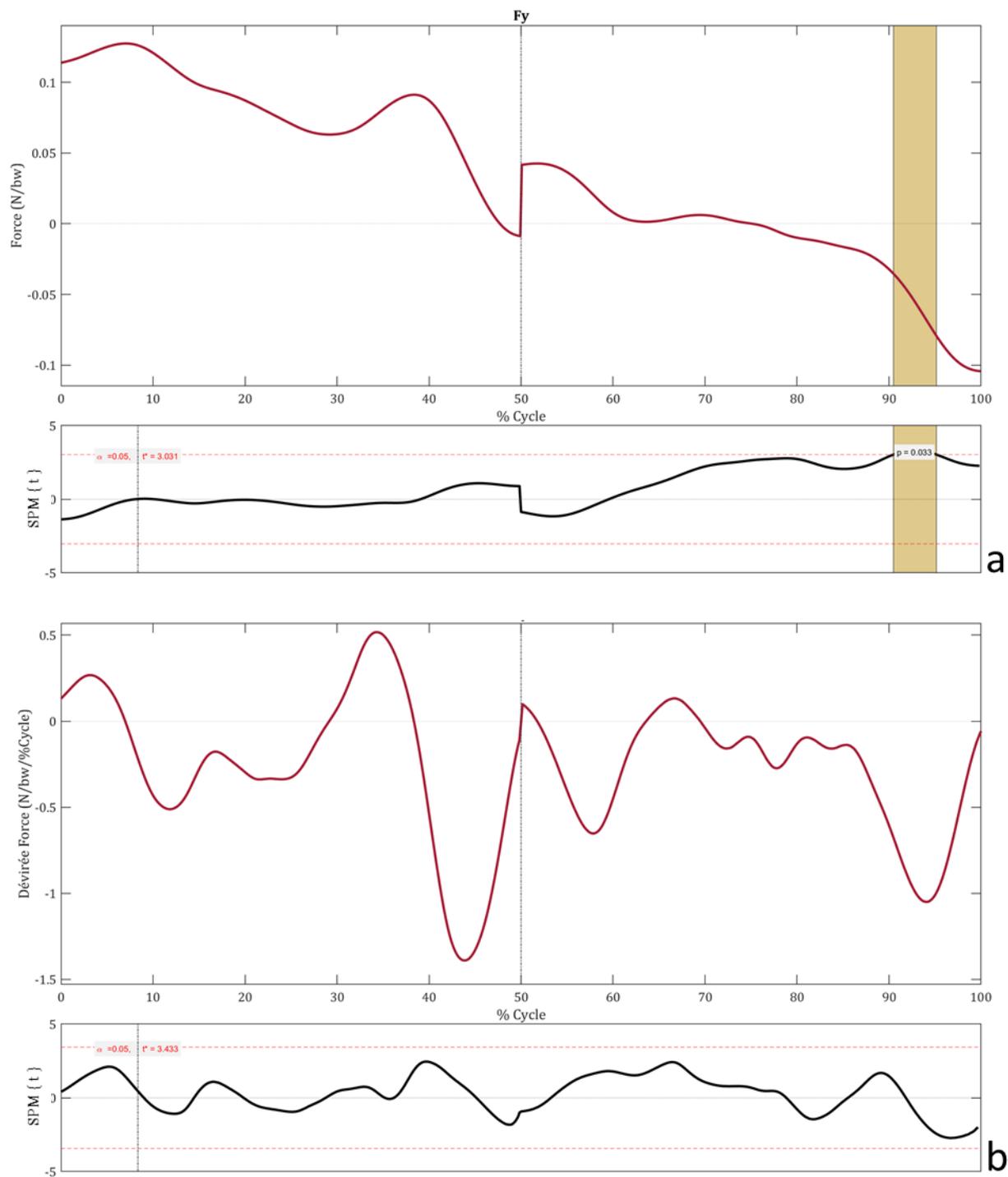


Figure 46 : Evolution moyenne de la signature de F_y (a) et de sa dérivée (b) au cours d'un cycle de virage. Le résultat du test de corrélation SPM{t} est présenté au-dessous des signatures de force et de leurs dérivées. Lorsque celui-ci passe sous le seuil négatif (pointillés rouges) la corrélation avec le temps de course est négative (bandes bleues), au-dessus du seuil positif la corrélation est positive (bandes jaunes)

5.2.3.1.3 Fz :

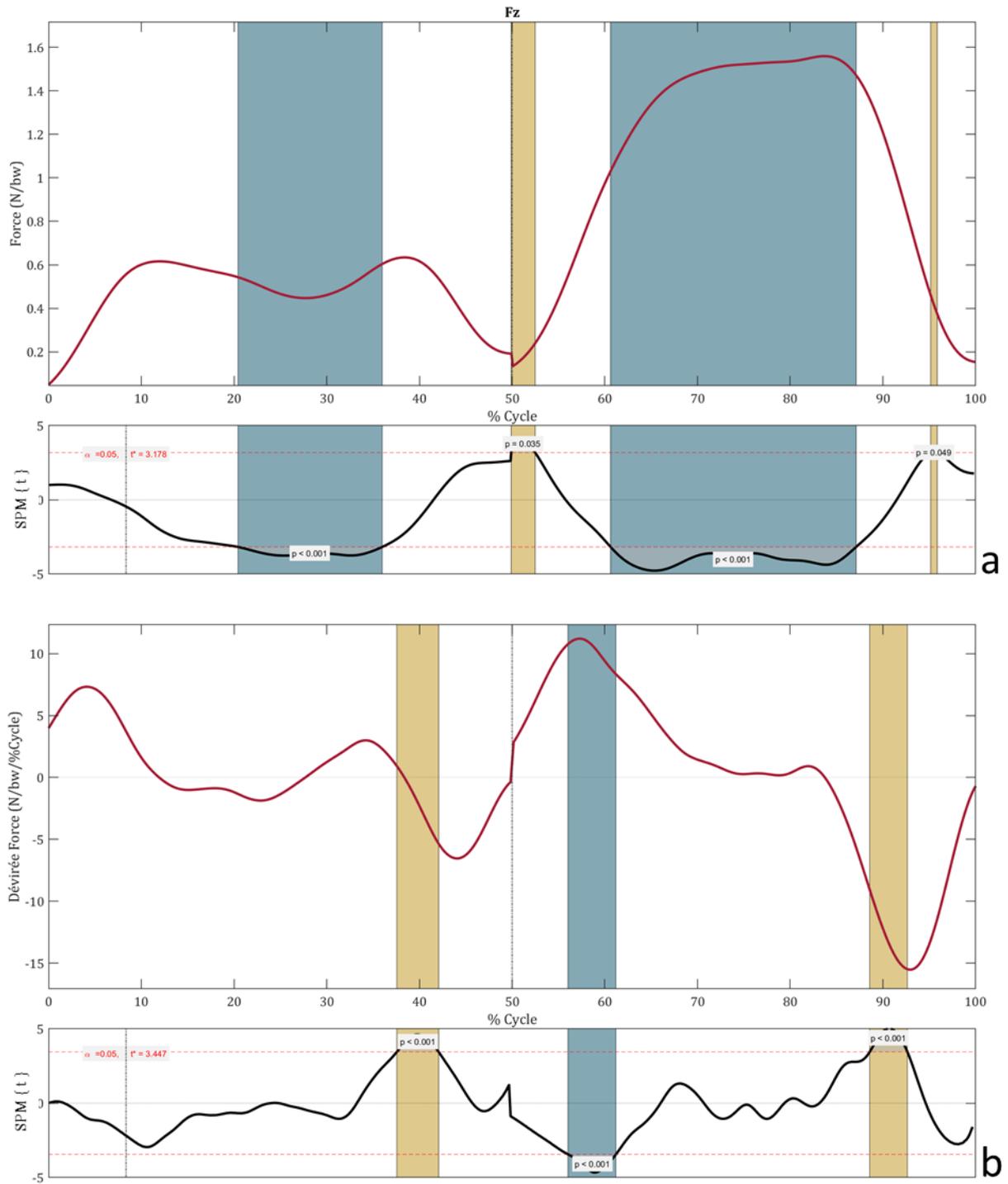


Figure 47 : Evolution moyenne de la signature de F_z (a) et de sa dérivée (b) au cours d'un cycle de virage. Le résultat du test de corrélation SPM{t} est présenté au-dessous des signatures de force et de leurs dérivées. Lorsque celui-ci passe sous le seuil négatif (pointillés rouges) la corrélation avec le temps de course est négative (bandes bleues), au-dessus du seuil positif la corrélation est positive (bandes jaunes)

Les valeurs de force en Z (Figure 47) sont significativement corrélées aux valeurs de temps de course sur plusieurs périodes (Figure 47.a). En suivant la chronologie du virage (en % de cycle), elles sont positivement corrélées de 20.4% à 36.0% ($p < 0.001$). Elles sont négativement corrélées de 50.0% à 52.5% ($p = 0.035$). Elles sont positivement corrélées de 60.6% à 87.1% ($p < 0.001$) et négativement corrélées de 95.1% à 95.8% ($p = 0.049$). Les valeurs de $SPM\{t\}$ sont également proches du seuil de 45% à 50% du cycle. Contrairement aux forces sur les axes X et Y, les valeurs de la dérivée de force sur l'axe Z sont aussi significativement corrélées au temps de course (Figure 47.b). Les valeurs de dérivée sont positivement corrélées au temps de course sur les périodes de relâchement de force sur le pied intérieur et extérieur de 37.6% à 42.0% et de 88.6% à 92.6% du temps de cycle. Les skieurs de meilleur niveau sont donc caractérisés par des pentes de relâchement de charge plus importantes et ce principalement durant la première partie du relâchement. La dérivée de force sur l'axe Z est également positivement corrélée ($p < 0.001$) au temps de course entre 56.0% et 61.2% du temps de cycle. Les skieurs de meilleur niveau présentent des pentes de montée en charge plus importantes que les autres. On notera que les valeurs de $SPM\{t\}$ sont proches du seuil durant la phase de montée en charge sur le pied extérieur (-2.9 pour un seuil à -3.4) entre 9% et 11% du cycle. Globalement les meilleurs skieurs maximisent la force Z appliquée durant le plateau et la minimisent durant la phase d'allègement. Ils présentent aussi des pentes de montée en charge et de relâchement de charge plus raides que les skieurs de moindre niveau. Les intensités de F_z , significativement plus faibles en fin de phase de relâchement sur le pied extérieur, sont vraisemblablement entraînées par les pentes plus importantes chez les meilleurs skieurs.

5.2.3.1.4 MX :

Les valeurs de moment en X (Figure 48) sont significativement corrélées aux valeurs de temps de course uniquement entre 89.7% et 98.1% du temps de cycle ($p=0.009$) (Figure 48.a). La corrélation est positive durant cette période ce qui signifie que les skieurs avec le meilleur temps de course sont ceux qui présentent des valeurs de moment plus élevées. Les valeurs de dérivée du moment sur l'axe X sont significativement corrélées au temps de course sur des périodes quasi similaires, entre 96.2% et 98.2% du temps de course (Figure 48.b). Cette période correspond à la fin de la période de changement de signe, notamment à la période de transition entre le changement de signe de M_x et les valeurs stables présentes en toute fin de cycle. Ce résultat signifie donc que les skieurs de haut niveau présentent une rupture plus abrupte entre ces deux phases en comparaison avec les autres skieurs qui ont une transition plus progressive. Durant la même phase du virage, sur le pied intérieur, les valeurs de $SPM\{t\}$ se rapprochent également du seuil, ce qui conforte la cohérence de ce résultat. Pendant la période de changement de signe, les valeurs de $SPM\{t\}$ sont également très proches du seuil négatif (-3.42 pour un seuil à -3.43) sur le pied intérieur à 39.2% du cycle. Cette tendance signifie que les meilleurs skieurs présentent une pente de moment en X durant le changement de signe plus importante que les autres skieurs.

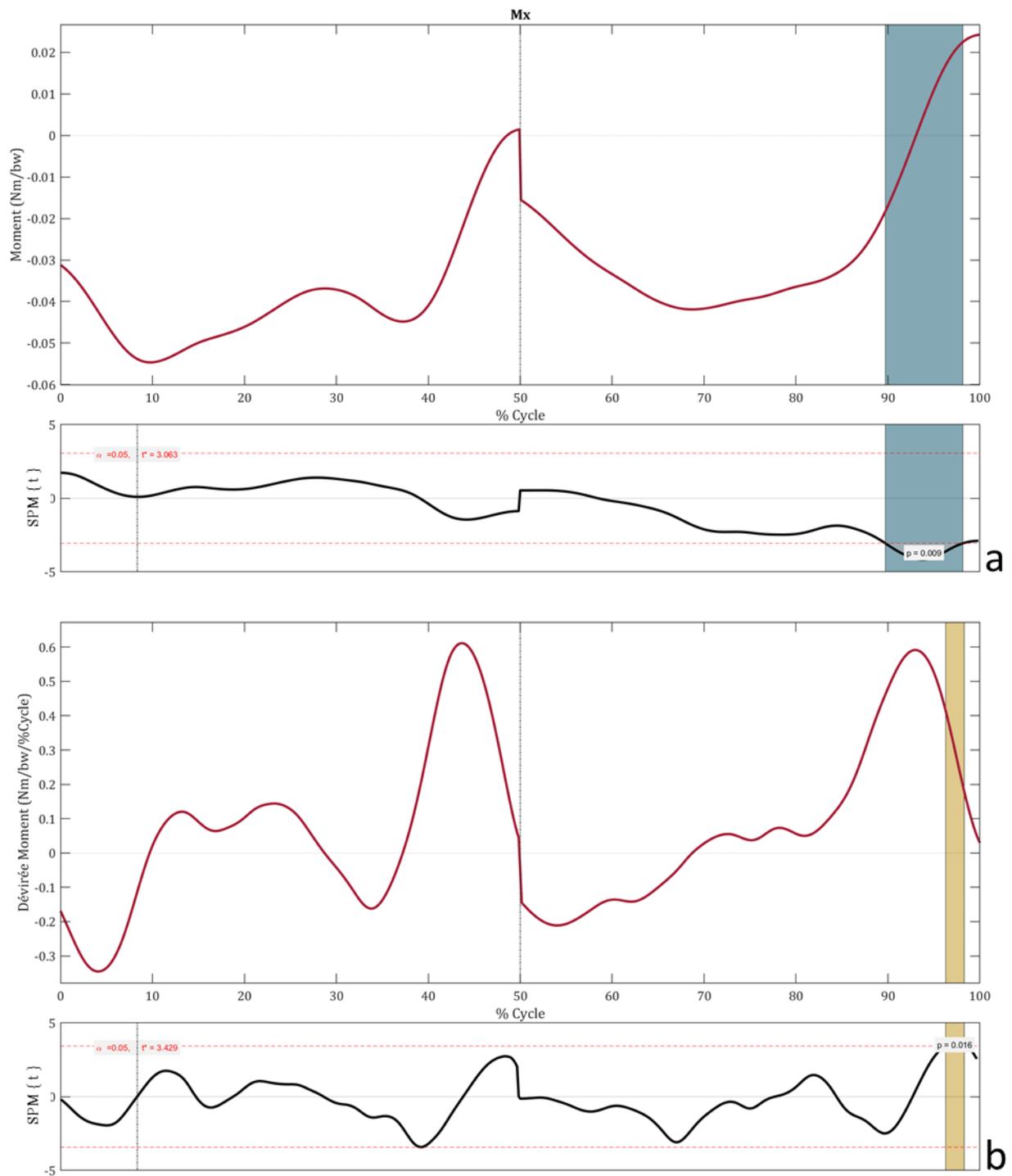


Figure 48 : Evolution moyenne de la signature de Mx (a) et de sa dérivée (b) au cours d'un cycle de virage. Le résultat du test de corrélation SPM{t} est présenté au-dessous des signatures de force et de leurs dérivées. Lorsque celui-ci passe sous le seuil négatif (pointillés rouges) la corrélation avec le temps de course est négative (bandes bleues), au-dessus du seuil positif la corrélation est positive (bandes jaunes)

5.2.3.1.5 MY :

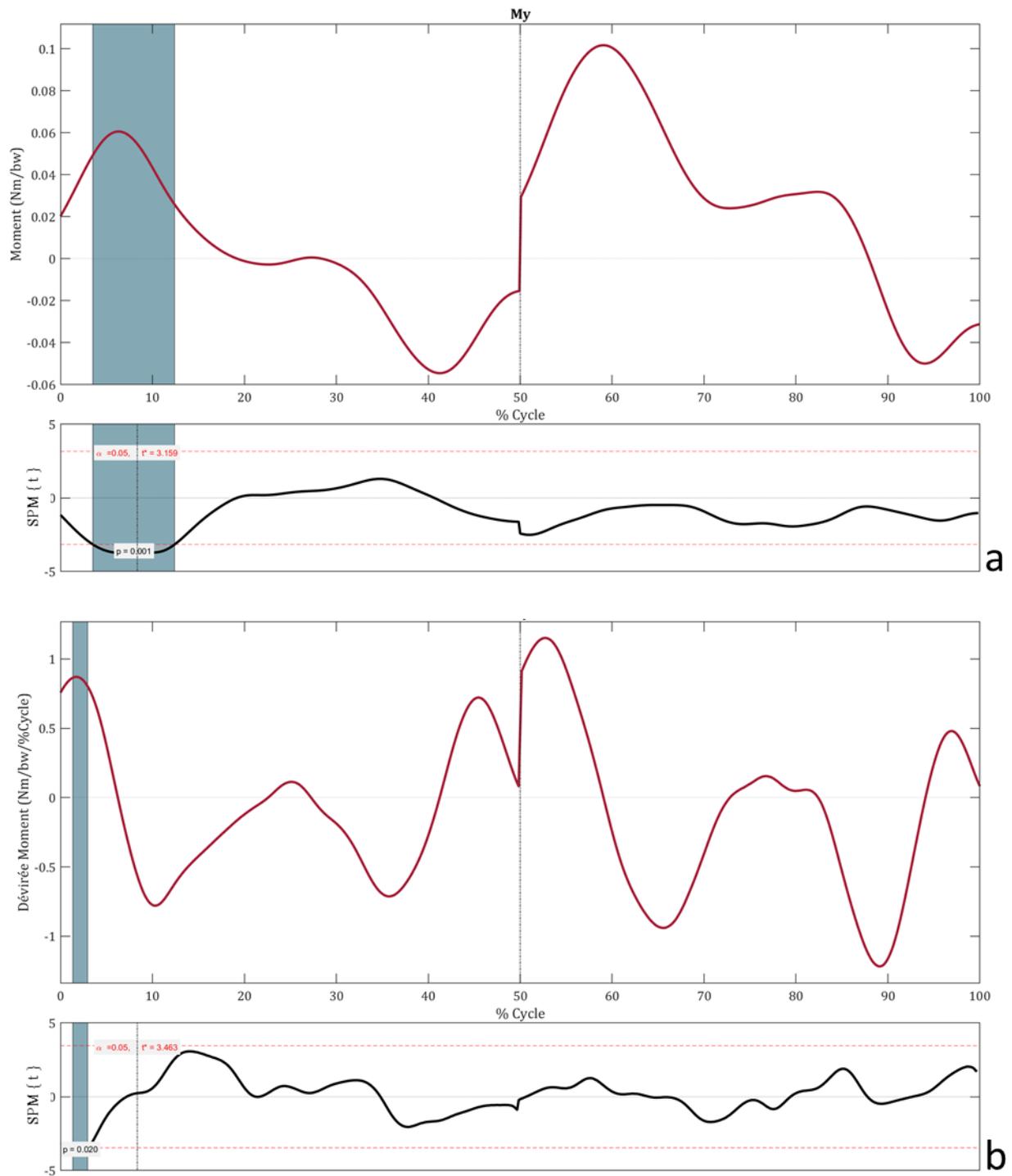


Figure 49 : Evolution moyenne de la signature de My (a) et de sa dérivée (b) au cours d'un cycle de virage. Le résultat du test de corrélation SPM{t} est présenté au-dessous des signatures de force et de leurs dérivées. Lorsque celui-ci passe sous le seuil négatif (pointillés rouges) la corrélation avec le temps de course est négative (bandes bleues), au-dessus du seuil positif la corrélation est positive (bandes jaunes)

Les valeurs de moment en Y (Figure 49) sont significativement corrélées aux valeurs de temps de course au début du cycle entre 3.5% et 12.4% du temps de cycle ($p=0.001$) (Figure 49.a). Ce résultat

signifie que les skieurs ayant les temps de course les plus courts présentent des moments vers l'avant plus importants durant cette période. Aucune autre période ne présente de valeur de $SPM\{t\}$ proche du seuil sur les données de moment en Y. Les valeurs de dérivée de moment en Y sont également significatives en début de cycle (Figure 49.b). En effet, les données de dérivée du signal de moment en Y de 1.3% à 2.9% sont significativement et négativement corrélées au temps de course. Cette période correspond au pic de dérivée du moment vers l'avant sur le pied intérieur. Ce résultat signifie que les skieurs de haut niveau ont des pentes maximales de moment Y vers l'avant sur le pied intérieur plus importantes que les autres skieurs.

5.2.3.2 Feature Extraction :

Les hypothèses c), d) et e) cherchent à évaluer les interactions entre le niveau de performance et différentes caractéristiques de la signature de force. Les valeurs absolues ont déjà été évaluées dans la partie 5.2.4. Cette partie se concentrera sur les résultats des corrélations entre le temps de course des skieurs et les paramètres de la signature de force détaillés dans la partie 5.2.2.3.

Evaluons, dans un premier temps l'hypothèse (c) selon laquelle durant la phase de conduite la part de Fz sur le pied extérieur par rapport à la somme de Fz sur les deux pieds est négativement corrélée au temps de course. La Figure 50 représente le ratio de force entre le pied intérieur et extérieur ($R_{in/out}$) sur la phase de conduite en fonction du temps de course. Les valeurs varient entre un ratio de 0.61 à 0.87. Pour rappel un ratio de 1 signifie que 100% du poids de corps est réparti sur le ski extérieur. La régression linéaire entre ces deux paramètres n'est pas statistiquement significative ($r=0.07$, $p=0.8$).

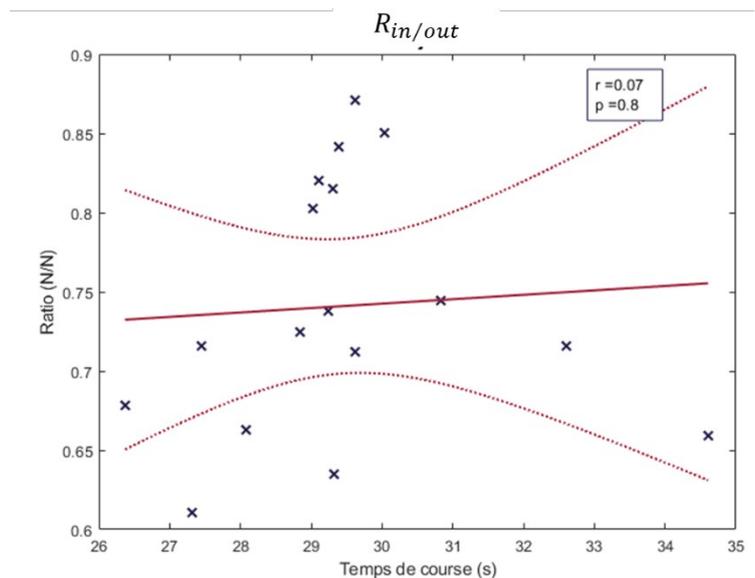


Figure 50 : Résultats de la corrélation linéaire du ratio de force entre le pied intérieur et extérieur ($R_{in/out}$) avec le temps de course. Chaque croix correspond à la valeur moyenne d'un sujet, la ligne rouge à la droite de régression et les lignes en pointillé à l'intervalle de confiance 0.95.

Cependant la relation entre $R_{in/out}$ et le temps de course suit une relation polynomiale d'ordre 2. La Figure 52.a représente la régression polynomiale (méthode des moindres carrés), la Figure 52.b représente la relation entre les valeurs du modèle polynomiale et les valeurs expérimentales. Cette relation est statistiquement significative ($r=0.59$, $p=0.01$). La valeur de r^2 étant cependant assez faible ($r^2=0.36$), ce résultat significatif doit donc plus être considéré comme explicatif de la relation plutôt que comme prédictif du comportement.

$R_{in/out}$

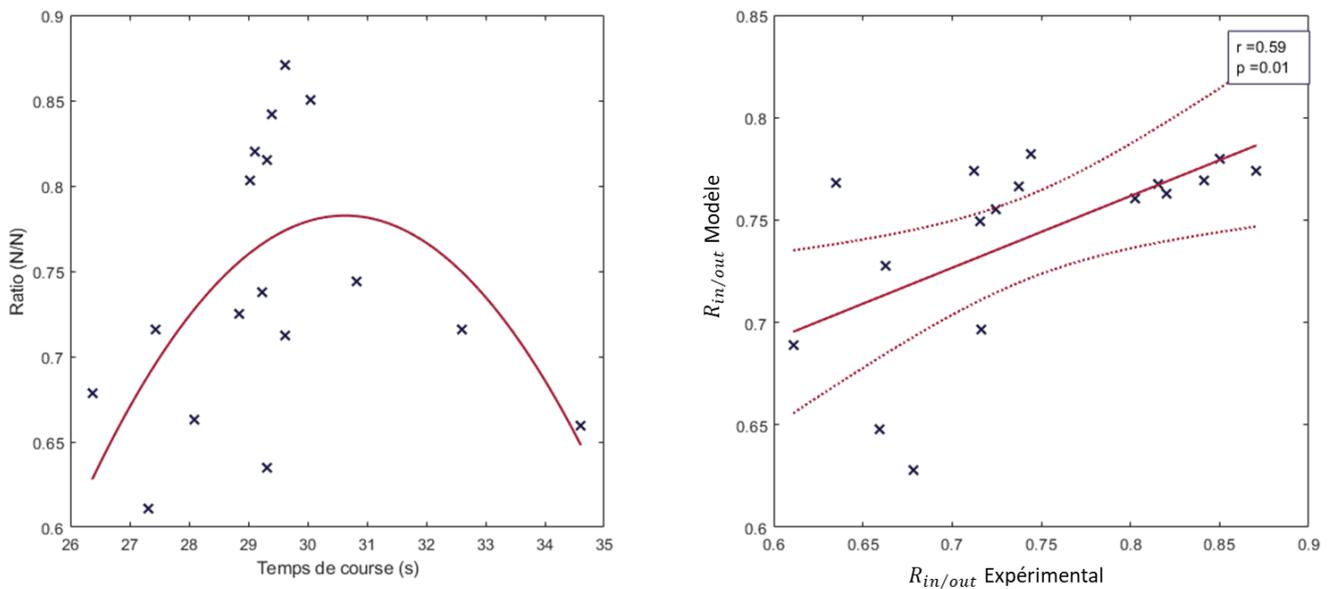


Figure 52 : a) Résultats de la corrélation polynomiale d'ordre 2 de $R_{in/out}$ avec le temps de course, chaque croix correspond à un sujet, la courbe rouge (a) à la courbe de régression polynomiale. b) Résultats de la corrélation linéaire entre les données $R_{in/out}$ expérimentales et les valeurs issues du modèle polynomiale d'ordre 2. Chaque croix correspond à la valeur moyenne d'un sujet, la ligne rouge à la droite de régression et les lignes en pointillé à l'intervalle de confiance 0.95

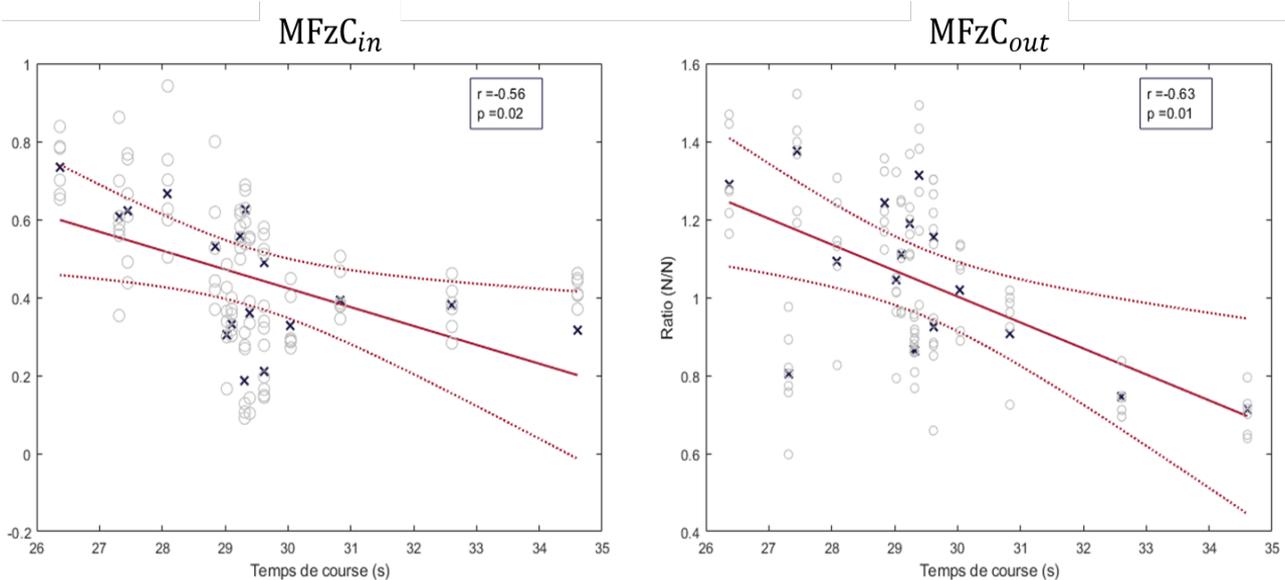


Figure 51 : Résultats de la corrélation linéaire de $MFzC_{in}$ (a) et $MFzC_{out}$ (b) avec le temps de course, chaque croix correspond à la valeur moyenne d'un sujet. Chaque cercle correspond à la valeur individuelle d'un virage, la ligne rouge à la droite de régression et les lignes en pointillé à l'intervalle de confiance 0.95

La Figure 51.a et la Figure 51.b représentent les régressions entre la force moyenne spécifiquement durant le plateau sur le pied intérieur ($MFzC_{in}$) et extérieur ($MFzC_{out}$) avec le temps de course. L'interaction entre le temps de course et la force moyenne sur le pied extérieur et intérieur durant la phase de conduite est statistiquement significative (respectivement $r=-0.63$, $p=0.01$ et $r=-0.56$, $p=0.02$).

Nous avons défini l'hypothèse (d) selon laquelle les skieurs ayant le plus faible temps de course ont des temps relatifs de montée en charge et de relâchement de charge plus courts, et des temps relatifs d'allègement et de conduite plus longs que les skieurs de moindre niveau. La Figure 53 représente les régressions linéaires entre le temps de course et les différents évènements temporels liés aux signatures de force sur le pied extérieur. Les Figure 53.a à Figure 53.f représentent respectivement : la durée d'allègement pré-conduite ($tA1$) et post-conduite ($tA2$) et le temps d'allègement totale (tAt), ainsi que la durée de la phase de conduite (tC), celle de montée en charge (tMC) et de relâchement de charge (tRC). Seule la durée $tA1$ est significativement corrélée au temps de course des skieurs. Cette corrélation négative signifie que les skieurs aux temps de course les plus faibles allongent leurs périodes d'allègement pré-virage. Chez ces skieurs la montée en charge a lieu de manière plus tardive par rapport à l'allègement maximal des deux pieds. Ce résultat est explicatif de la tendance de corrélation ($p=0.08$) observée sur l'allègement totale puisque $tA1$ constitue une part majoritaire du temps total d'allègement d'environ 60%. Une légère tendance ($p=0.17$) semble montrer que les skieurs de haut niveau présentent des durées de montée en charge plus courtes. Enfin il est intéressant de noter la forte variabilité inter-sujets pour les skieurs intermédiaires.

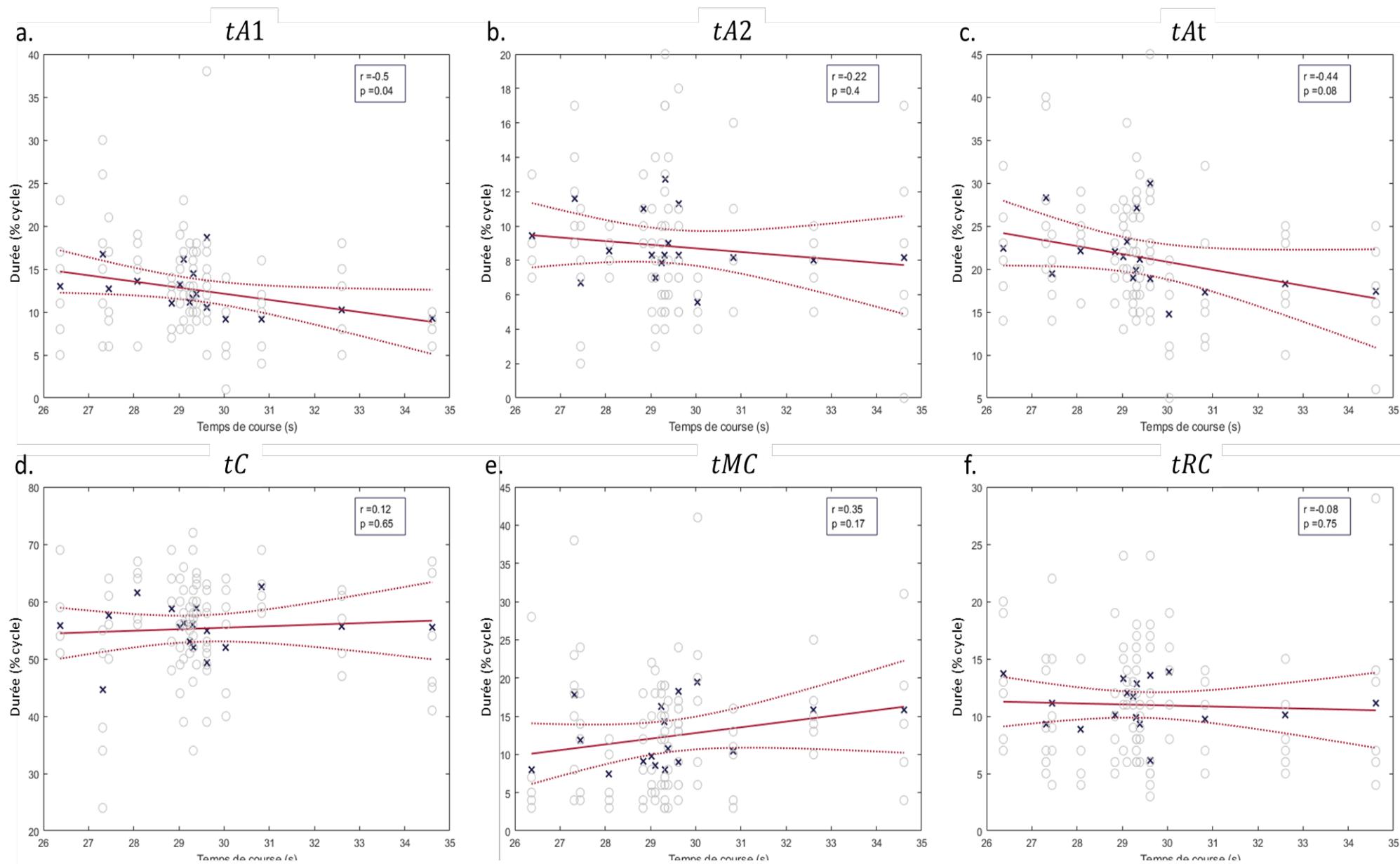


Figure 53 : Résultats de la corrélation linéaire du temps : d'allègement pré-conduite $tA1$ (a), d'allègement post-conduite $tA2$ (b), d'allègement total tAt (c), de conduite tC (d), de montée en charge tMC (e), et de relâchement de charge tRC (f) avec le temps de course. Chaque croix correspond à la valeur moyenne d'un sujet, chaque cercle correspond à la valeur individuelle d'un virage, la ligne rouge à la droite de régression et les lignes en pointillé à l'intervalle de confiance 0.95

Dans le but d'évaluer l'hypothèse e) selon laquelle les skieurs de haut niveau ont un comportement cinétique stable et équilibré dans la phase de conduite, 8 paramètres ont été calculés (partie 5.2.2.3). Les résultats des corrélations linéaires relatives à cette hypothèse e) sont rassemblés dans le Tableau 4. Seule la corrélation entre la proéminence du PIP3 sur le pied extérieur est négativement corrélée au temps de course : les skieurs ayant les temps de course les plus faibles présentent une plus grande différence entre la valeur de PIP3 (intensité de Fz en début de plateau) et la moyenne de force durant

le plateau. Une tendance du même ordre se dégage pour le PIP5 (intensité de Fz en fin de plateau) toujours sur le pied extérieur ($p=0.06$). Une grande variabilité de ce paramètre entre les skieurs est à noter pour les skieurs de niveau intermédiaire entre 28 et 30 secondes de temps de course (Figure 54). Cette importante dispersion à ce niveau de performance peut être un facteur explicatif de cette absence de corrélation.

Tableau 4

Indices	<i>r</i>	<i>p</i>
<i>SDFxC</i>	-0.34	0.18
<i>SDFzC</i>	-0.24	0.36
<i>SDMxC</i>	-0.31	0.22
<i>ProPIP3out</i>	-0.51	0.04
<i>ProPIP3in</i>	-0.1	0.72
<i>ProPIP5out</i>	-0.47	0.06
<i>ProPIP5in</i>	-0.28	0.28
Δ IPCCout	0.06	0.81

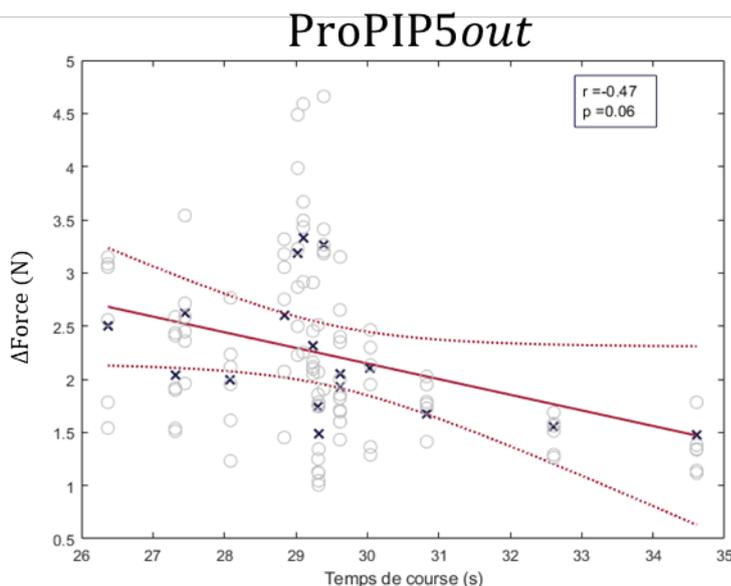


Figure 54 : Résultats de la corrélation linéaire de *ProPIP5out* avec le temps de course. Chaque croix correspond à la valeur moyenne d'un sujet, la ligne rouge à la droite de régression et les lignes en pointillés à l'intervalle de confiance 0.95

5.2.4 Analyse globale :

Premièrement, les résultats SPM présentés dans la partie 5.2.3.1 mettent en avant plusieurs informations remarquables :

- a) Le temps de course est significativement corrélé aux valeurs d'intensités de F_x de 76.0% à 85.6% et de F_z de 60.6% à 87.1%, *i.e.* globalement durant le plateau caractéristique de la phase de conduite. Ce résultat corrobore l'hypothèse a). Comme détaillée précédemment cette relation peut être attribuée à des vitesses de passage plus élevées induisant des forces radiales plus importantes. Ces intensités de F_z plus importantes sont permises grâce aux plus grandes capacités musculaires présentes chez les athlètes de haut niveau (Turnbull et al., 2009; Hydren et al., 2013). Les skieurs de haut niveau sont donc dans une situation durant laquelle des vitesses de passage plus importantes induisent des forces radiales plus importantes. Leurs capacités à supporter des forces radiales plus importantes induisent une moindre déperdition d'énergie cinétique et donc une vitesse d'entrée plus importante dans le virage suivant. Cependant, contrairement à notre hypothèse de départ, le moment sur l'axe X durant le plateau du pied extérieur n'est pas corrélé au temps de course. Théoriquement les forces radiales plus importantes chez les skieurs de haut niveau devraient être associées à des intensités de M_x plus importantes. Cette absence de corrélation peut être liée à un rapport signal/bruit plus important sur M_x que sur les autres axes (Figure 26 – Partie 5.1.1) rendant son interprétation plus délicate.

Il est intéressant de noter que sur F_x et F_z , les phases de début et de fin de plateau sont plus fortement corrélées au temps de course que la partie médiane du plateau. Ce résultat est en accord avec la corrélation entre le niveau de performance et $ProPIP3_{out}$ et $ProPIP5_{out}$ (Tableau 4). Ce résultat pourrait être lié aux forces radiales plus importantes pour ces skieurs dues à leurs vitesses de passage plus élevées associées à la forme en W du rayon au cours du virage. C'est dire que le rayon du virage est plus court en tout début et toute fin de plateau qu'au milieu de celui-ci (Figure 6). Il peut aussi être la conséquence des poussées et des réceptions bordant les phases d'allègement plus marquées chez les skieurs de haut niveau. Nous détaillerons les résultats relatifs au ski intérieur dans le détail de l'hypothèse e).

Les intensités de la dérivée de F_z sur le pied extérieur sont corrélées au temps de course des skieurs : plus les skieurs sont performants, plus les phases de montée et de relâchement du plateau sur le ski extérieur sont raides. On retrouve également cette tendance sur le pied intérieur (sans significativité dans la phase de montée en charge). Ainsi, même sur un cycle normalisé temporellement, les skieurs ayant les meilleures performances présentent des

pentés (en N/bw/%Cycle) plus raides. Le taux de montée en force (« *Rate of force development* », RFD) est un déterminant de la performance dans les mouvements explosifs dont l'objectif est d'atteindre des hautes vitesses sous une pression temporelle élevée. (Maffiuletti et al., 2016). Le RFD (mesuré hors-neige), est corrélé au niveau de performance des skieurs (Cross et al., 2020) ce qui constitue un point explicatif de ce résultat. La pratique du ski alpin n'implique pas de vitesses angulaires élevées de genoux ou du bassin. Cependant, elle requiert des contractions musculaires maximums en réponse aux contraintes d'inertielles externes. Au regard de nos résultats, il est plausible que cette capacité des skieurs de haut niveau à réduire le délai nécessaire à l'atteinte de la force maximum (*i.e.* soit le plateau de force durant la phase de conduite) ai un rôle clé dans la performance en GS.

Enfin, durant les périodes d'allègement entre les plateaux, la force sur l'axe est positivement corrélée au temps de course. Ce résultat traduit l'allègement plus important chez les skieurs de haut niveau. Les skieurs de haut niveau présentent donc trois caractéristiques spécifiques sur leurs signatures de force en Z : 1) des intensités moyennes de plateau plus importantes ainsi que des prééminences de force plus importantes en début et fin de plateau, 2) des pentes de montée et relâchement de carres plus importantes, et 3) un allègement plus important entre les virages. Ces trois caractéristiques laissent penser que les skieurs de haut niveau sont caractérisés par des allègements par impulsion plus marqués. Comme détaillé dans la partie 1.1.1 et 5.1.4, et à la manière d'un *squat-jump*, durant une transition par impulsion, le skieur produit une action musculaire pour mettre fin au virage et créer l'allègement. Celui-ci a pour conséquence une brève augmentation de force précédant l'allègement. La phase d'allègement peut être considérée comme une phase de vol durant laquelle la force est quasi-nulle. Au début de la phase de conduite, s'ajoute à la valeur de force du plateau la force d'inertie du skieur à la « réception » de la phase d'allègement. D'après nos résultats, il semble que cette motricité soit plus présente chez les skieurs de haut niveau.

D'après l'ensemble de ces informations, il est possible de trancher le débat dans la littérature entre les points défendus par Nakazato et Supej. Conformément aux résultats décrits par Nakazato *et al.* (2011), l'augmentation de la performance est associée à des niveaux de F_z plus importants durant la phase de plateau sur le pied extérieur. Ce résultat peut être complété par plusieurs de nos observations : le niveau de force sur l'axe X durant la fin de la phase de plateau sur le pied extérieur est aussi corrélé à la performance du skieur. La capacité du skieur à générer des valeurs de F_x et F_z en début et fin de plateau est la caractéristique la plus corrélée au temps de course des skieurs. Enfin, les taux de montée en charge et de relâchement de

charge de F_z sont plus raides chez les skieurs de haut niveau. A l'exception du moment sur l'axe X, l'ensemble de nos résultats corroborent l'hypothèse a).

- b) Les intensités positives de M_y en début de virage sur le pied intérieur sont corrélées au temps de course. Les skieurs les plus performants semblent maximiser la charge vers l'avant sur le pied intérieur lors de la phase de prise de carre. Ce comportement permet de cintrer le ski intérieur afin de déclencher les mécanismes de pivotement du ski. Il est possible que chez les meilleurs skieurs, le ski intérieur soit plus utilisé dans les mécanismes d'initiation et de conduite de virage. Nous détaillerons ce point dans l'hypothèse c). En revanche contrairement à notre hypothèse, les meilleurs skieurs n'appliquent pas de moment vers l'avant ou vers l'arrière plus intense que les autres skieurs sur le pied extérieur. Cette absence de résultat peut être liée à l'importante variabilité inter-sujet pour le même niveau de performance. A niveau égal, plusieurs stratégies de signature de force de M_y semblent se dégager.

Les intensités de force et de moment après inversion de signe sur F_y et M_x sont négativement corrélées au temps de course des skieurs, confirmant une partie de notre hypothèse b). Les intensités de ces deux signatures de force sont simultanément corrélées au temps de course à partir de 90% du cycle jusqu'à 95% pour F_y et 98% du cycle pour M_x . F_y est une des forces générant un potentiel moment sur l'axe X. Comme détaillé dans la partie 5.1.6, le changement de signe en fin de virage correspond au changement de carre du skieur. Nous noterons l'absence de corrélation de la dérivée des signatures sur cette période et l'absence de corrélation sur la partie finale du signal (lorsque celui-ci est stabilisé). Ces points laissent penser que cette différence est liée à un écart temporel significatif entre les skieurs (Honert and Pataky, 2021). A partir de ce constat, nous pouvons conclure que les skieurs de haut niveau réalisent le changement de carre plus tôt que les autres skieurs. Ce décalage de temporalité est lié à une pression temporelle plus importante liée à des vitesses de passage plus élevées. Afin d'avoir le temps nécessaire pour réaliser les actions de changements de virages, les skieurs les plus rapides doivent anticiper ces actions et le temps nécessaire à leur réalisation. Précédemment, nous avons observé que les skieurs de haut niveau sont caractérisés par des allègements par impulsion plus marqués. Lors d'un allègement, le skieur n'est quasiment plus en contact avec la neige, ses actions cinétiques n'impliquent que de faibles réactions du support et il ne peut influencer que de manière minime sa trajectoire ou son équilibre. Il est donc possible que les skieurs de haut niveau doivent réaliser par anticipation les actions de changement de carre avant la phase d'allègement, par rapport aux autres skieurs.

c) La régression linéaire entre le temps de course et le ratio $R_{in/out}$ n'est pas statistiquement significative. Ce résultat infirme notre hypothèse c) selon laquelle les skieurs les plus expérimentés sont caractérisés par une plus grande répartition des forces normales sur le pied extérieur. Cependant, comme détaillé dans la Figure 52, les skieurs de niveau intermédiaire sont ceux qui présentent la part de force sur le ski extérieur la plus importante. De part cette caractéristique, la répartition de $R_{in/out}$ en fonction du temps de course suit une relation polynomiale d'ordre 2. Cette répartition peut être expliquée par plusieurs hypothèses. Augmenter $R_{in/out}$ induit un gain de performance jusqu'à un certain point. En effet comme détaillé dans la partie 2.2.2.4, maximiser la force sur le ski extérieur induit une plus grande déformation longitudinale de celui-ci, ce qui permet de réaliser des virages coupés générant très peu de friction ski/neige. Pour une raison d'équilibre, une augmentation de $R_{in/out}$ est techniquement difficile à réaliser. Les skieurs de plus faible niveau technique conservent une répartition équilibrée entre les deux skis. En comparaison, les skieurs réalisant de meilleurs temps de course augmentent $R_{in/out}$ en raison de meilleures capacités techniques. Cependant, à partir d'un certain niveau de performance, il semble que la force radiale subie durant la phase de conduite devienne trop importante pour être supportée par le ski extérieur seul. Plusieurs facteurs limitants induisent la « saturation » de la force normale sur le ski extérieur. Le premier est la force maximale du membre inférieur. Celle-ci est corrélée linéairement avec le niveau de performance des skieurs (Cross et al., 2020). Nous noterons d'ailleurs une corrélation entre la force moyenne appliquée sur le ski extérieur et le temps de course (Figure 51). Les forces radiales augmentent quant à elles de manière quadratique avec la vitesse. Les skieurs de haut niveau, peuvent donc modifier la répartition des forces dans le but de réduire les contraintes musculaires sur la jambe extérieure et ainsi d'augmenter leur vitesse barrière. Ce changement de répartition entraîne une diminution relative des effets de pivotement liés à une moindre déformation longitudinale du ski extérieur. L'augmentation du moment M_y sur le pied intérieur chez les skieurs de haut niveau peut être une adaptation de ces athlètes pour compenser cette perte d'effet de pivotement.

Le déchargement du ski extérieur au profit du ski intérieur chez les athlètes de haut niveau peut aussi être lié à une limite d'adhérence à l'interaction ski-neige. La force de résistance latérale (qui empêche le skieur de déraper) diminue avec la profondeur de pénétration du ski dans la neige et avec l'angle de prise de carre. A profondeur de pénétration identique, plus les skieurs augmentent leur angle de prise de carre, plus la résistance de la neige est faible (Federolf, 2005; Federolf et al., 2010c). Or, les skieurs de très haut niveau ont des angles de prise de carre plus importants que les autres skieurs (Müller et al., 1998). Ils sont aussi

caractérisés par une plus grande extension du genou extérieur durant l'appui (Pozzo et al., 2004, 2010). Ces caractéristiques ont pour conséquences de décharger les forces verticales (dans le plan de la piste) sur le ski extérieur et donc de réduire les forces d'interactions latérales ski-neige. Toutes ces caractéristiques cinématiques impliquent que les skieurs de meilleur niveau sont plus exposés au décrochage du ski extérieur. Le plus faible $R_{in/out}$ chez les skieurs de haut niveau peut être la conséquence d'une adaptation du skieur pour réduire les forces horizontales appliquées sur le ski extérieur afin d'éviter ce décrochage.

- d) L'hypothèse selon laquelle les skieurs ayant le plus faible temps de course ont des temps relatifs de montée en charge et de relâchement de charge plus courts et des temps relatifs d'allègement et de conduite plus longs que les skieurs de plus faible niveau n'est pas corroborée par nos résultats. En effet, seule la durée $tA1$ est significativement corrélée au temps de course des skieurs. Cette corrélation négative signifie que les skieurs aux temps de course les plus courts allongent leurs périodes d'allègement pré-virage. Cependant, la haute variabilité chez les skieurs de niveau intermédiaire pourrait laisser penser que plusieurs stratégies cohabitent dans la répartition des temps entre les phases de conduite et d'allègement. Nous faisons l'hypothèse que les caractéristiques temporelles de la signature de force en z sont dépendantes des trajectoires choisies par le skieur et non pas du niveau du skieur. Ce point sera abordé dans la partie 5.3.2.
- e) Enfin nous avons émis l'hypothèse que le comportement des skieurs de haut niveau était caractérisé par des phases de conduite très stables et des phases de transition entre les virages très dynamiques. Plusieurs sous-hypothèses autour de ce comportement ont été détaillées précédemment :

Les variabilités d'intensité au cours du plateau sur les axes F_x , F_z et M_x ne sont pas significativement corrélées au temps de course des skieurs. Le ΔPIP_{Cout} n'est également pas corrélé au temps de course des skieurs. En revanche, les niveaux de proéminence de PIP3 et PIP5 sur le pied extérieur sont liés aux temps de course des skieurs. Ce résultat peut induire un biais dans le calcul des variabilités d'intensité de force sur les plateaux de F_x , F_z et M_x . Les skieurs de haut niveau semblent donc avoir un plateau avec une forme en U plus marquée sur le pied extérieur. Ce résultat peut être complété par ceux détaillés dans l'hypothèse a) rapportant des niveaux de F_z plus importants durant le plateau et moins importants durant l'allègement. Un autre résultat de cette hypothèse a) rapporte des pentes de montée et de relâchement de charge plus raides chez les skieurs de haut niveau. L'ensemble de ces résultats confirme l'hypothèse que les skieurs de haut niveau ont un contraste important entre leurs phases de conduite et d'allègement. Ce contraste est observable sur les intensités de force

entre les phases mais pas sur leur variabilité. L'hypothèse d'une prédominance des skieurs de meilleur niveau à utiliser un allègement par impulsion est corroborée par les corrélations de *ProPIP3out* et de *ProPIP5out*.

La prédominance de cette conduite peut être expliquée du fait de leur vitesse de passage plus élevée. Les skieurs de haut niveau ont une pression temporelle plus importante pour réaliser leurs actions de transition entre deux phases d'appui. Cette conduite n'est permise que chez ces skieurs grâce à de meilleures capacités musculaires (Force maximum et RFD) et techniques (équilibre et coordination). La poussée en fin de virage peut être améliorée grâce à la libération de l'énergie élastique stockée dans le ski (par déformation longitudinale) durant la phase de conduite. Cette libération d'énergie nécessite des capacités techniques avancées. Grâce à cet allègement par impulsion, le skieur réduit ses forces de friction ski-neige durant la phase d'allègement (Equation X – Partie 2.2.2.1).

Pour conclure, le niveau de performance des skieurs a une influence sur leur signature de force avec des effets variables en fonction des axes mesurés et des phases du virage. Pour résumer, les résultats observés montrent que plusieurs paramètres sont linéairement corrélés au temps de course : 1) En conséquence de forces radiales plus importantes, la signature en F_z est caractérisée par une forme en créneau plus marquée. Cette forme se définit par des valeurs de plateau plus hautes, d'allègement plus faibles, de pentes de montée et de relâchement de force plus raides. 2) Ces deux derniers résultats associés à des proéminences de F_z plus marquées et une anticipation des marqueurs cinématiques de changement de carre semblent indiquer que les skieurs de haut niveau sont caractérisés par des phases d'allègement plus marquées et privilégient des transitions par impulsion. 3) Enfin, la répartition de F_z sur le pied extérieur augmente avec le niveau des skieurs jusqu'à un certain point à partir duquel la jambe extérieure ne peut plus supporter les contraintes musculaires et/ou l'interaction ski-neige est trop faible pour supporter les contraintes cinétiques induites par les caractéristiques cinématiques du virage.

5.3 Influence des singularités cinématiques sur les signatures de force :

5.3.1 Singularité des virages :

5.3.1.1 Définition des profils de virage et hypothèses :

Comme détaillée dans la partie 2.4.2, la trajectoire du CG du skieur influence directement les caractéristiques cinétiques mesurées à l'interface chaussure-fixation. En plus des différences de niveau intrinsèques aux skieurs, il existe au cours de la descente mesurée une variabilité inter-virage importante. Cette variabilité a pour origine les différences de pente et de distance horizontale et verticale, entre les portes. Cette variabilité se cumule à la variabilité de vitesse de passage liée au niveau du skieur et/ou à leur approche stratégique du virage. Celui-ci peut choisir de sacrifier par exemple sa vitesse dans un virage afin d'améliorer sa position d'entrée dans le virage suivant. De plus, le positionnement et les caractéristiques du virage dans le tracé vont également déterminer si le skieur se situe au-dessus ou au-dessous de sa vitesse barrière pour ledit virage. Le skieur peut être ou non en recherche de vitesse dans ce virage, ce qui modifiera sa motricité. L'ensemble de ces paramètres (tracé, morphologie de piste, positionnement dans la course et vitesse barrière) définissent des profils singuliers de virage (partie 1.3). A partir de ces informations, nous émettons l'hypothèse que la singularité du profil de virage influe sur certains marqueurs de la signature de force.

La segmentation des virages en différentes sections s'appuie sur une analyse subjective collective du tracé. A partir de l'analyse des coachs présents sur l'expérimentation, du traceur fédéral, des expérimentateurs, et du ressenti des athlètes, les différents cycles ont pu être classifiés dans trois profils de virage. Le positionnement de ces virages sur la course est détaillé dans la Figure 55 et les caractéristiques morphométriques et cinématiques des virages, des cycles et des sections sont détaillés respectivement dans le Tableau 5. Les informations sur les caractéristiques de déplacement longitudinal, horizontal, et vertical du tracé de pente et l'angle porte à porte sont calculés géométriquement à partir des positions relatives des portes entre elles et par rapport aux jalons de traçage.

- Le profil de virage « sous-vitesse » (*Under Speed* - US) regroupe les cycles de virage où le skieur est en-dessous de sa vitesse barrière. Dans ce profil de virage le skieur cherche à gagner de la vitesse durant l'ensemble du cycle, dans le but d'atteindre sa vitesse barrière. Ce qui conduit généralement à un gain de vitesse entre l'entrée et la sortie du cycle (ici : $+1.86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Ce profil de virage se retrouve à plusieurs zones de notre tracé ; au départ (cycle 1), à la transition entre le mur et le plat (cycle 4), et après le plat (cycle 7). Notons que la « banane » du virage n°3 est caractéristique d'un virage en sous-vitesse. Le très grand rayon de ce virage permet au skieur de gagner beaucoup de vitesse. Il appartient cependant au cycle n°2 qui est catégorisé en sur-

vitesse car le skieur entre dans le virage n°4 (pied extérieur mesuré) largement au-dessus de sa vitesse barrière. Il a été privilégié de classer ce cycle en sur-vitesse afin d'observer l'influence de la section sur la signature de force du pied extérieur qui semble plus sensible aux variations cinématiques (Nakazato et al., 2011) ou au niveau de performance (partie 5.2).

- Le profil de virage « sur-vitesse » (*Over Speed - OS*), regroupe les cycles de virage où le skieur entre dans le virage au-dessus ou à sa vitesse barrière. Durant ces virages, le skieur réalise son virage en maintenant sa vitesse ou en la diminuant le moins possible afin de ne pas perdre de temps. Cependant, en étant au niveau ou au-dessus de sa vitesse barrière, les skieurs dans cette situation n'ont pas d'intérêt à gagner de la vitesse. La vitesse gagnée est excédante (elle dépasse ce qui peut être supporté par le skieur) pour le virage à venir. Cette vitesse doit alors être dissipée avant le prochain virage. Les virages en sur-vitesse sont généralement situés dans des parties assez pentues de la course (ici : 23.7°). Si de l'énergie cinétique est dissipée durant le virage, il est facile pour le skieur de la regagner dans la ligne droite à suivre (Federolf, 2012). L'objectif des skieurs durant ces virages est de maintenir une vitesse la plus proche de la vitesse barrière durant une grande partie du virage sans la dépasser (ce qui entraînerait une faute grave ou une chute). Sur notre tracé, les deux cycles après « la banane » (cycles 2 et 3) sont caractéristiques de ce profil. En effet, la banane en virage n° 3, consiste en une grande traversée longitudinale durant laquelle le skieur augmente grandement sa vitesse (voir Tableau 5). Le skieur arrive dans le virage n°4 (d'un rayon normal) à une vitesse bien supérieure à sa vitesse barrière. Le cycle à suivre (cycle n°3) est situé dans la partie la plus raide du tracé. Le skieur dont la vitesse est déjà proche de la vitesse barrière, cherche à la maintenir à ce niveau.
- Le profil de virage « plat » (P), regroupe les cycles de virage où le skieur est situé sur une zone plate du tracé (cycles 5 et 6). Ce profil est caractérisé par une faible pente (ici : 18.9°) dans laquelle il est difficile pour le skieur de transformer son énergie potentielle en énergie cinétique. Le regain de vitesse étant très faible durant cette partie, l'objectif dans ces virages est de limiter au maximum la diminution de vitesse durant l'ensemble du cycle. Notons que par sa pente, le virage n°9 est plus caractéristique de la section Sous-Vitesse. Cependant le cycle n°5 (virages 9 et 10) est catégorisé dans le profil plat car le virage n°10 (pied extérieur) est très caractéristique de ce profil. Comme détaillé précédemment, nous privilégierons cette classification pour observer les variations de signature de force sur le pied extérieur.

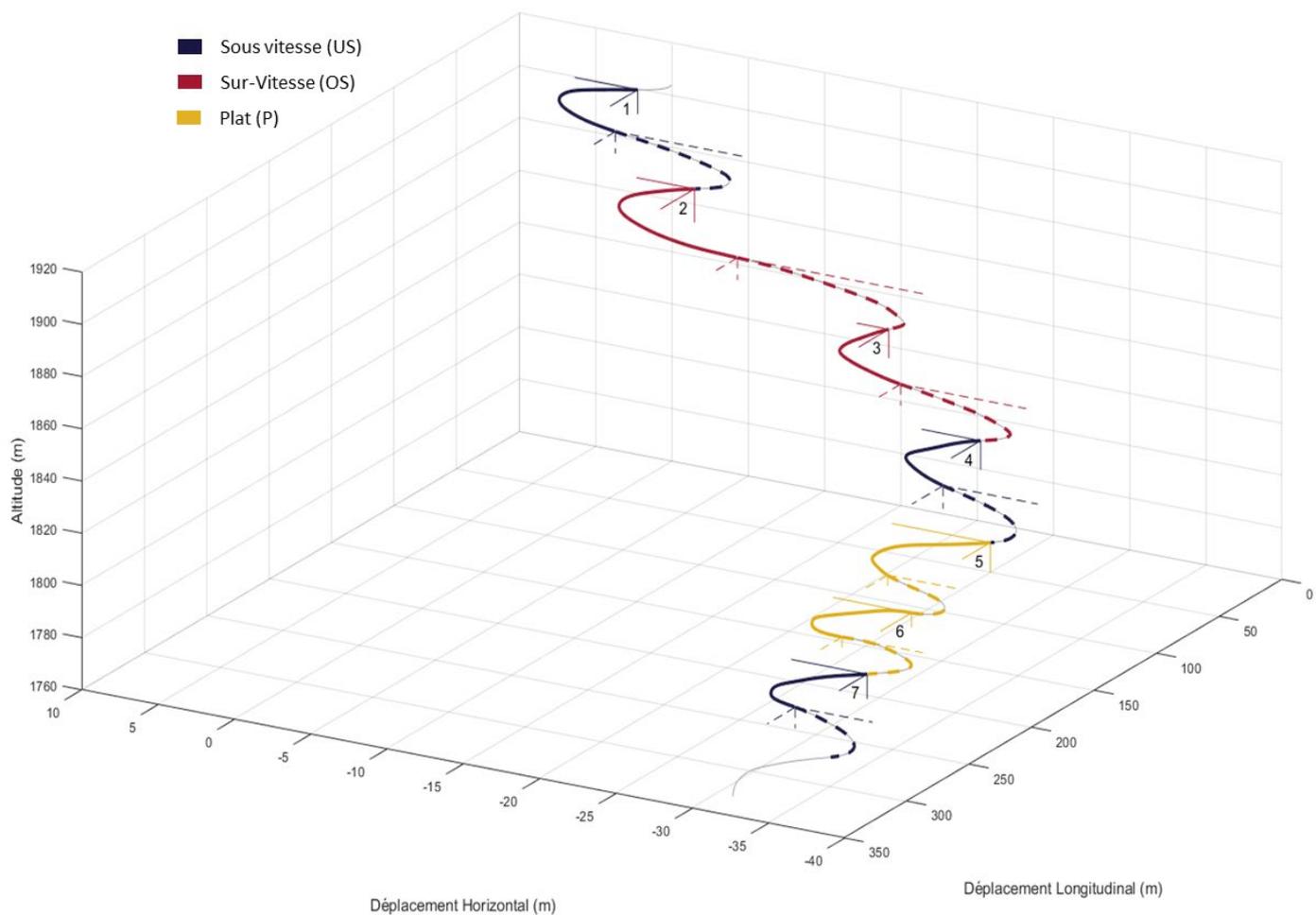


Figure 55 : Position en 3D (altitude, positions longitudinale et latérale) du CG du skieur au cours de l'ensemble des cycles mesurés du tracé. Les traits pleins correspondent aux virages durant lesquels le pied étudié est à l'intérieur du virage et les traits en pointillés lorsque qu'il se situe à l'extérieur. Les cycles de descente sont catégorisés dans les profils sous-vitesse (bleu), sur vitesse (rouge) ou plat (jaune).

Tableau 5

Virage	Depla. X (m)	Depla. Y (m)	Depla. Z (m)	Vitesse (m.s ⁻¹)	Vitesse entrée (m.s ⁻¹)	Vitesse sortie (m.s ⁻¹)	Temps virage (s)	Rayon Min (m)	T%SL (%)	Profil	Pied étudié
1	22.2	4.1	-9.3	14.4	13.7	15.6	1.70	13.31	27.2	US	Int
2	20.1	-8.5	-8.4	14.0	15.6	14.6	1.59	10.15	31.4	US	Ext
3	27.3	3.8	-12.9	16.1	14.7	18.1	1.98	9.97	29.0	OS	Int
4	20.3	-12.2	-8.5	15.9	18.0	15.5	1.61	13.96	11.0	OS	Ext
5	24.1	2.1	-11.0	15.7	15.7	15.5	1.60	14.07	41.5	OS	Int
6	19.8	-8.2	3.04	15.2	15.5	15.9	1.45	10.62	30.8	OS	Ext
7	23.5	3.9	3.32	16.5	16.1	18.4	1.44	12.77	48.5	US	Int
8	24.9	-6.2	2.85	18.6	18.6	17.3	1.44	17.39	46.1	US	Ext
9	22.6	6.5	-11.6	16.7	17.3	17.1	1.48	13.07	17.1	P	Int
10	18.8	-4.7	-5.6	17.2	17.2	16.0	1.21	12.51	18.3	P	Ext
11	24.9	5.1	-5.5	16.6	15.9	19.1	1.64	9.49	21.3	P	Int
12	16.9	-5.3	-6.0	15.6	19.0	13.8	1.38	10.62	7.6	P	Ext
13	22.6	5.0	-9.5	14.8	13.8	15.8	1.58	12.58	40.0	US	Int
14	22.3	-5.1	-8.1	16.2	15.8	17.3	1.41	23.48	31.6	US	Ext

Cycle	Depla. X (m)	Depla. Y (m)	Depla. Z (m)	Vitesse (m.s ⁻¹)	Variation vitesse (m.s ⁻¹)	Pente (°)	Temps cycle (s)	Rayon Min (m)	T%SL (%)	Profil
1	21.16	6.33	-8.86	14.20	0.92	22.7	3.28	11.7	0.29	US
2	23.80	6.17	-10.69	16.00	0.80	24.0	3.59	12.0	0.20	OS
3	21.98	7.98	-9.58	15.41	0.22	23.4	3.04	12.3	0.36	OS
4	24.23	7.13	-9.99	17.53	1.21	22.4	2.87	15.1	0.47	US
5	20.67	5.16	-8.60	16.98	-1.25	21.9	2.69	12.8	0.18	P
6	20.89	6.04	-5.73	16.07	-2.14	15.9	3.02	10.1	0.14	P
7	22.46	5.03	-8.79	15.47	3.44	21.4	2.98	18.0	0.36	US

Profil	Depla. X (m)	Depla. Y (m)	Depla. Z (m)	Vitesse (m.s ⁻¹)	Variation vitesse (m.s ⁻¹)	Pente (°)	Temps cycle (s)	Rayon Min (m)	T%SL (%)
Sous Vitesse (US)	22.61	6.17	-9.21	15.73	1.86	22.17	3.04	14.95	0.37
Sur Vitesse (OS)	22.89	7.07	-10.14	15.71	0.51	23.72	3.32	12.16	0.28
Plat (P)	20.78	5.60	-7.16	16.52	-1.69	18.94	2.85	11.42	0.16

Plusieurs hypothèses se construisent à partir de la littérature détaillée dans les parties 1 et 2, de l'interprétation des signaux mesurés précédemment dans les parties 5.1 et 5.2, ainsi que des conduites générales tenues par les entraîneurs et les professionnels du ski compétitif.

- D'un point de vue stratégique, il semble logique de maximiser la conduite coupée dans les virages de profil sous-vitesse et plat. En effet, cette conduite permet de réduire les dissipations d'énergie cinétique. Ainsi, les marqueurs de cette conduite devraient être observés dans les zones où le skieur cherche à maintenir ou à gagner de la vitesse. a) Les marqueurs attendus dans les zones de sous-vitesse et plat sont : un plateau de F_z plus élevé durant la phase de conduite, des pentes de montée et de relâchement de F_z plus élevés et un moment M_y vers l'avant plus important à l'initiation du virage.
- Lorsque les skieurs arrivent en sur-vitesse dans un virage, ils doivent dissiper leur vitesse excédante par friction. Nous émettons donc l'hypothèse que les virages en sur-vitesse sont caractérisés par les marqueurs d'une entrée en dérive. L'entrée en dérive est une technique de ski alpin qui consiste à dérapier dans la phase d'initiation du virage (Partie 1.1.1). Durant ce dérapage, le CG du skieur ne s'infléchit que très peu et persiste dans le prolongement de la ligne droite précédente. Cette méthode permet de retarder le moment de la prise de carres, et de dissiper une partie de l'énergie par dérapage tout en ouvrant sa trajectoire vers la porte à suivre. b) Nous nous attendons à observer un allègement pré conduite plus long, une montée en force plus longue et des niveaux de F_z plus importants en fin de plateau qu'en début de plateau. Nous nous attendons également à observer un moment M_y vers l'avant plus faible en début de virage.
- Tout comme dans les virages en profil sous-vitesse, les virages dans les sections plates devraient être caractérisés par une conduite coupée prépondérante. A la différence des sections en sous-vitesse, les virages ayant un profil plat sont caractérisés par une impossibilité de regagner de la vitesse à partir de l'énergie potentielle. Dans ces situations, les coachs conseillent de privilégier une stratégie de trajectoire en S. c) Nous nous attendons à observer les marqueurs de cette stratégie avec un plateau de F_z long, des rayons de courbe plus importants et une distance en ligne droite entre les phases de conduites plus faible.

5.3.1.2 Méthodologie :

La base de données utilisée se compose des signatures de force sur l'axe Fz et My de chaque sujet pour chaque virage. Comme pour les résultats présentés précédemment, les virages sont découpés en utilisant l'allègement maximum de la somme des deux pieds. Les signatures de force du pied gauche sont normalisées temporellement pour chaque virage. Ces virages normalisés sont concaténés en cycle constitués du virage où le pied gauche est à l'intérieur sur les cinquante premiers pourcents du cycle et à l'extérieur pour les cinquante derniers. Comme dans les parties précédentes, les signatures de force sont filtrées par un filtre Butterworth passe bas, d'ordre 2 et de fréquence de coupure à 4 Hz. Chacun des cycles est catégorisé dans un profil de virage (sous-vitesse, sur-vitesse, plat) comme présenté dans le Tableau 5. Une analyse individuelle comparative de force et de moment sur les cycles normalisés en fonction du profil de virage est réalisée par SPM-1D (Todd Pataky, 2019, M.0.4.7) sur Matlab (R2019b, *The Mathworks Inc* – Natick – États-Unis). Nous avons pour cela réalisé une ANOVA SPM{F} à 1 facteur (profil de virage) et 3 modalités (sous-vitesse, sur-vitesse, plat). La boîte à outils SPM basée sur le « modèle linéaire général » permet d'effectuer des tests d'inférences statistiques incluant l'ANOVA (Pataky, 2010). Les tests post-hoc SPM{t} sont réalisés pour chaque effet simple relevé par l'ANOVA (Pataky et al., 2015a) avec un seuil d'inférence fixé à 0.05. Afin d'évaluer l'effet du secteur sur la pente de la signature, une nouvelle ANOVA SPM{F} à 1 facteur est réalisée sur la dérivée du signal en utilisant les mêmes modalités (sous-vitesse, sur-vitesse, plat).

Dans la partie 5.2, nous avons identifié sur les signatures de force les périodes durant lesquelles les intensités sont positivement ou négativement corrélées au niveau de performance des skieurs. D'après notre hypothèse, les profils de virage influencent la signature de force des skieurs. En ce sens, il est probable que les périodes durant lesquelles l'intensité des signatures de force est corrélée au niveau de performance soient spécifiques au profil de virage étudié. Pour cela, nous réaliserons sur la même base de données et pour chacune des sections (sous-vitesse, sur-vitesse, plat) une analyse de régression SPM 1D identique à celle réalisée dans la partie 5.2. Du fait du nombre moindre de virage analysés, la puissance statistique de cette corrélation est plus faible. Nous avons ainsi décidé de réaliser cette analyse uniquement sur Fz car le rapport signal/bruit y est le plus faible.

5.3.1.3 Résultats :

La Figure 56 représente respectivement les résultats de l'ANOVA sur Fz (a), la dérivée de Fz (b), My (c) et la dérivée de My (d).

La Figure 57, représente les résultats des tests post-hoc sur Fz, avec respectivement : Figure 57.a les résultats des tests d'inférences représentant les zones significatives et le sens de significativité, les Figure 57.b à Figure 57.d les représentations graphiques des signatures de force moyennes (pour tous les sujets et tous les virages du profil) en Fz. Sur ces représentations, les zones grisées correspondent aux périodes où les post-hoc sont significatifs. Suivant le même schéma la Figure 58 présente les données pour les signatures de force de la dérivée de Fz. Les Figure 59 et Figure 60 présentent les résultats des post-hoc respectivement pour My et la dérivée de My.

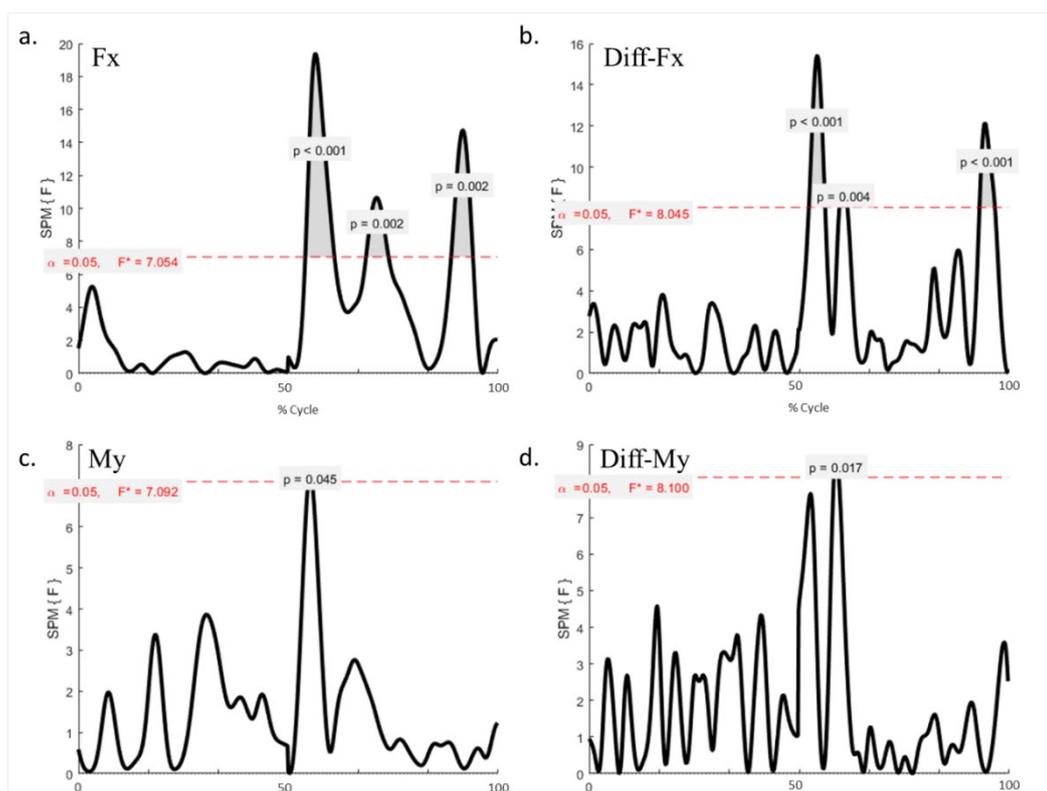
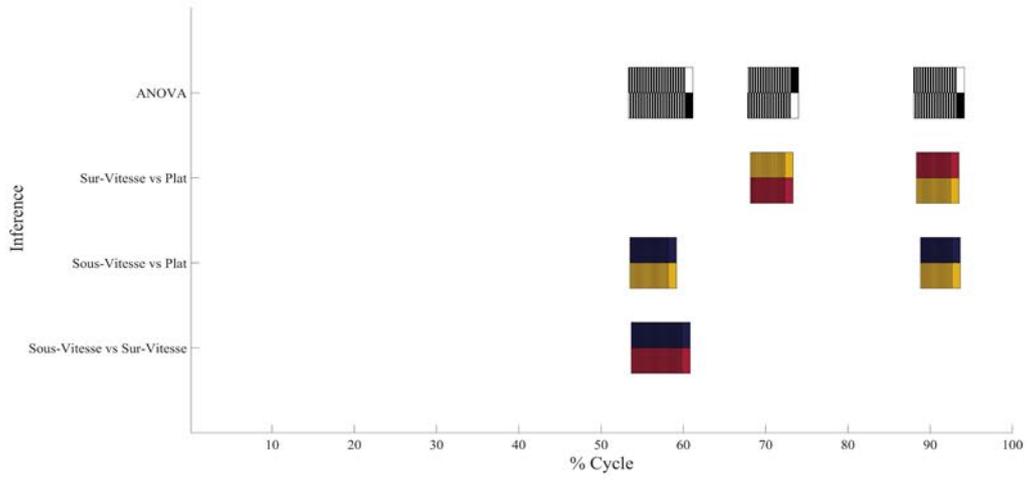
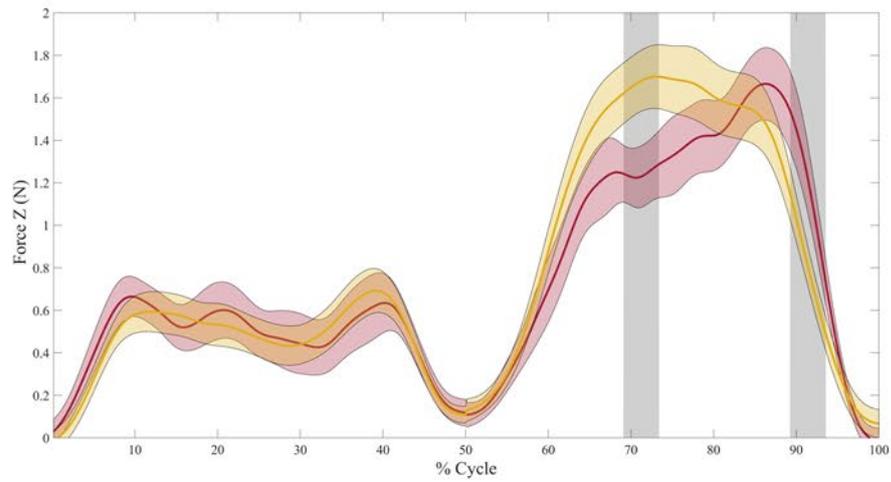


Figure 56 : Représentation des résultats des tests post hoc ANOVA(SPM) de Fz (a), la dérivée de Fz (b), My (c) et la dérivée de My (d)

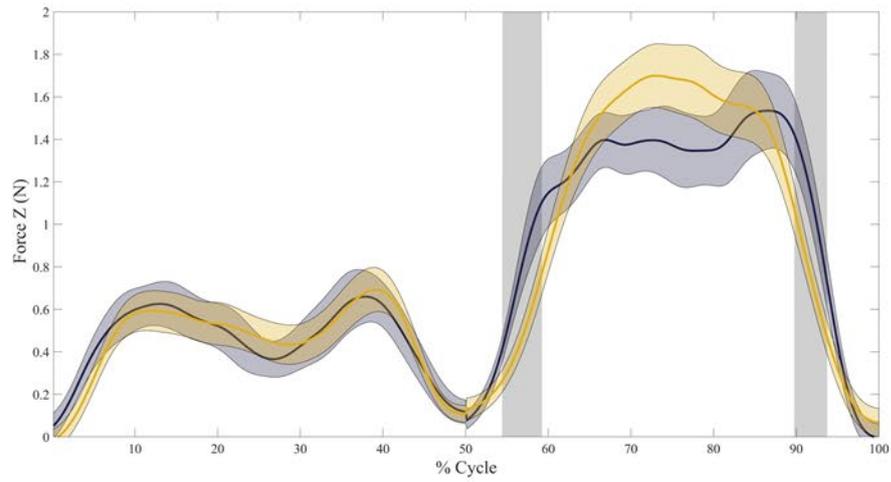
Figure 57 : (a) Représentation graphique des résultats de l'ANOVA (SPM-1D) des signatures de force moyenne en Fz entre les cycles de profils sous-vitesse (bleu), sur vitesse (rouge) ou plat (jaune). (b-c-d) Représentation graphique des post-hoc de l'ANOVA, les traits correspondent aux courbes moyennes de Fz dans les différents profils de virages, les zones grisées correspondent aux périodes où les post-hoc sont significatifs



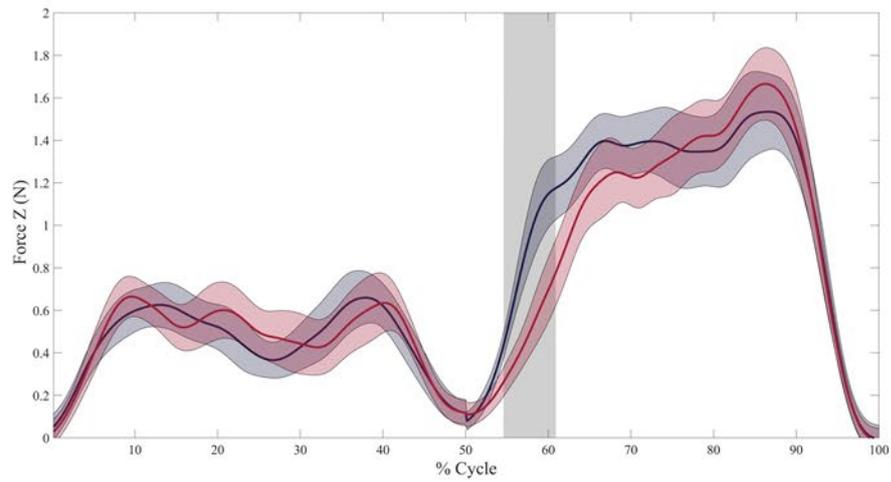
a.



b.

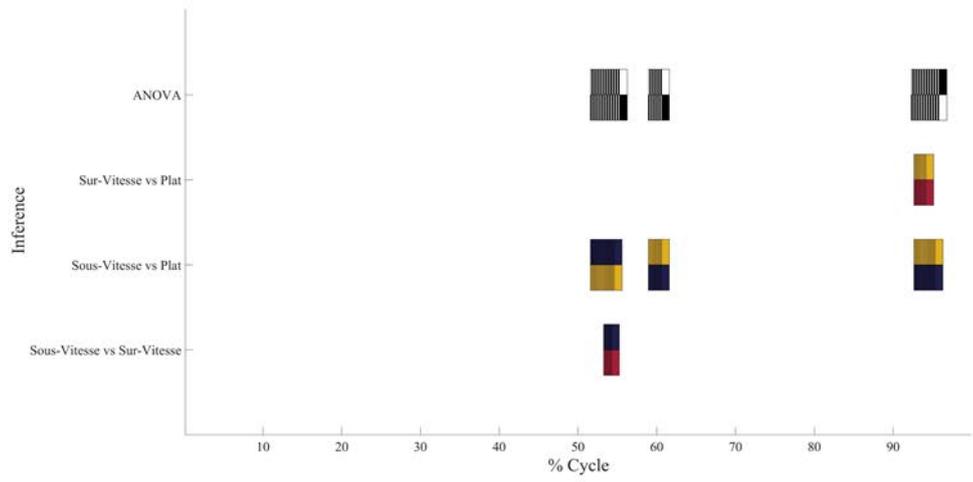


c.

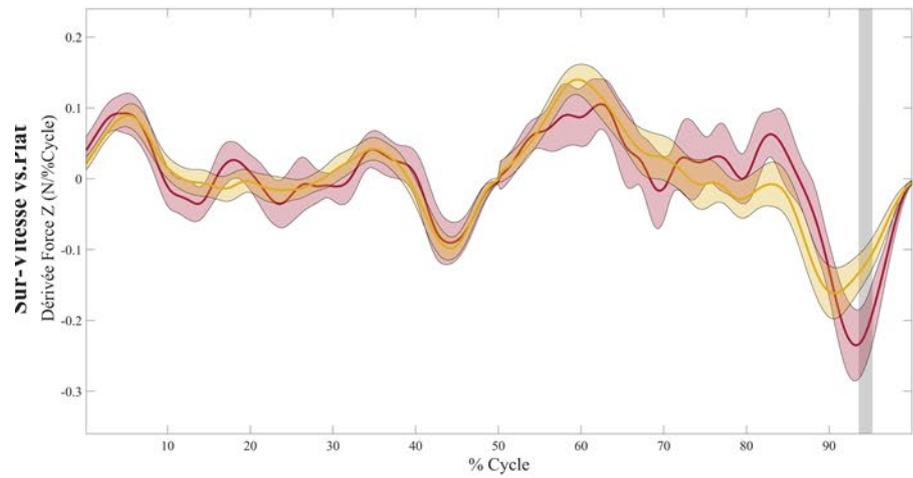


d.

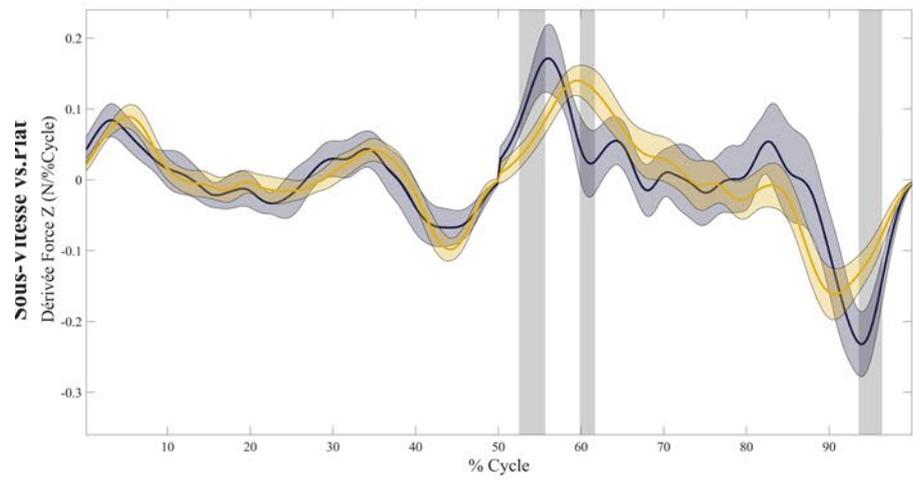
Figure 58 : (a) Représentation graphique des résultats de l'ANOVA (SPM-1D) des signatures de force moyenne de diff-Fz entre les cycles de profils sous-vitesse (bleu), sur vitesse (rouge) ou plat (jaune). (b-c-d) Représentation graphique des post-hoc de l'ANOVA, les traits correspondent aux courbes moyennes de diff-Fz dans les différents profils de virages, les zones grisées correspondent aux périodes où les post-hoc sont significatifs



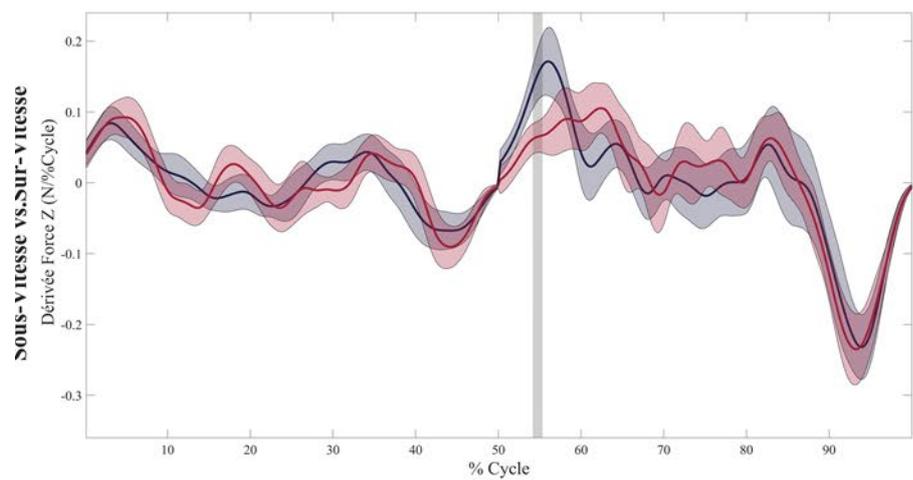
a.



b.

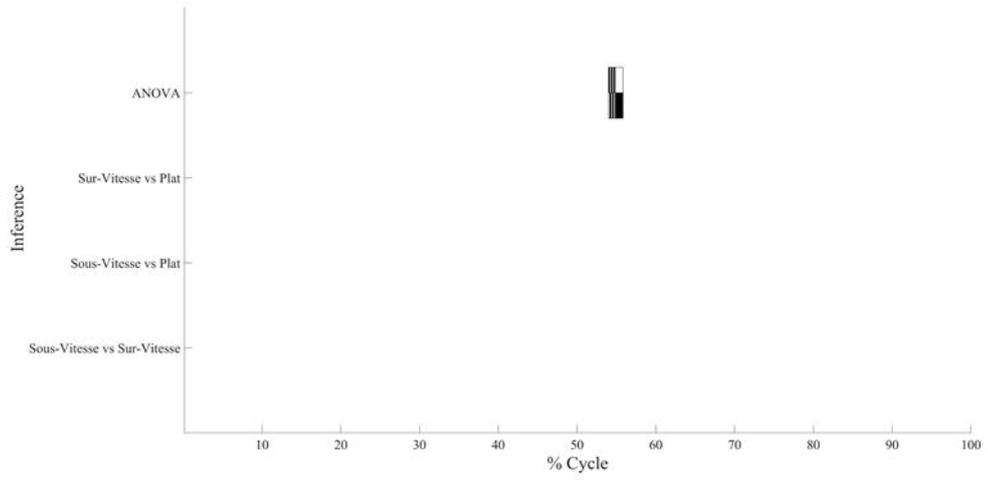


c.

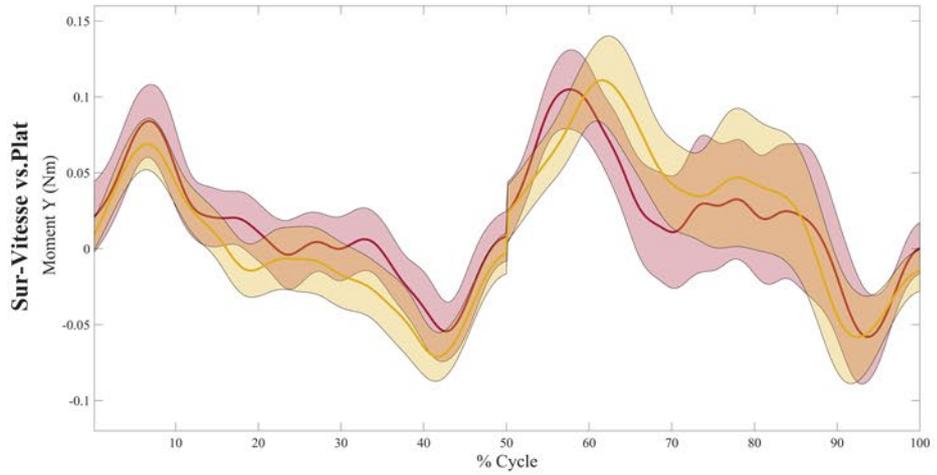


d.

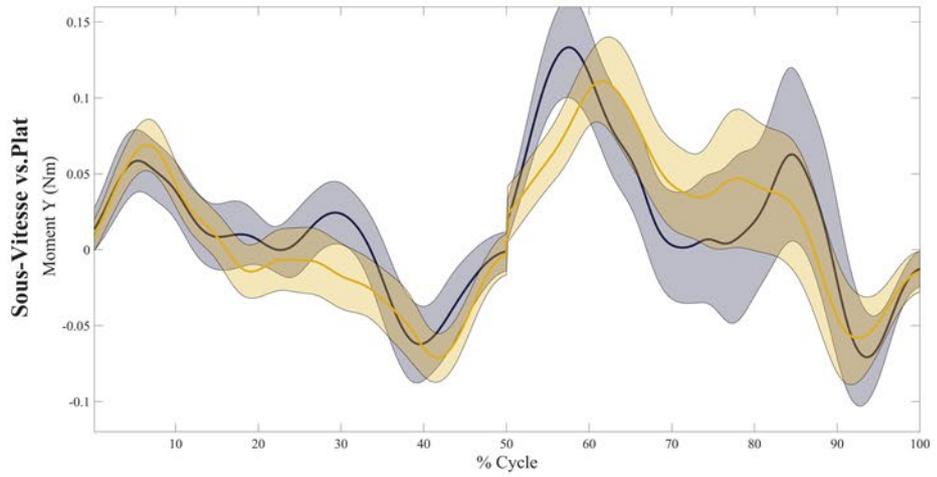
Figure 59 : (a) Représentation graphique des résultats de l'ANOVA (SPM-1D) des signatures de force moyenne de My entre les cycles de profils sous-vitesse (bleu), sur vitesse (rouge) ou plat (jaune). (b-c-d) Représentation graphique des post-hoc de l'ANOVA, les traits correspondant aux courbes moyennes de My dans les différents profils de virages, les zones grisées correspondent aux périodes où les post-hoc sont significatifs.



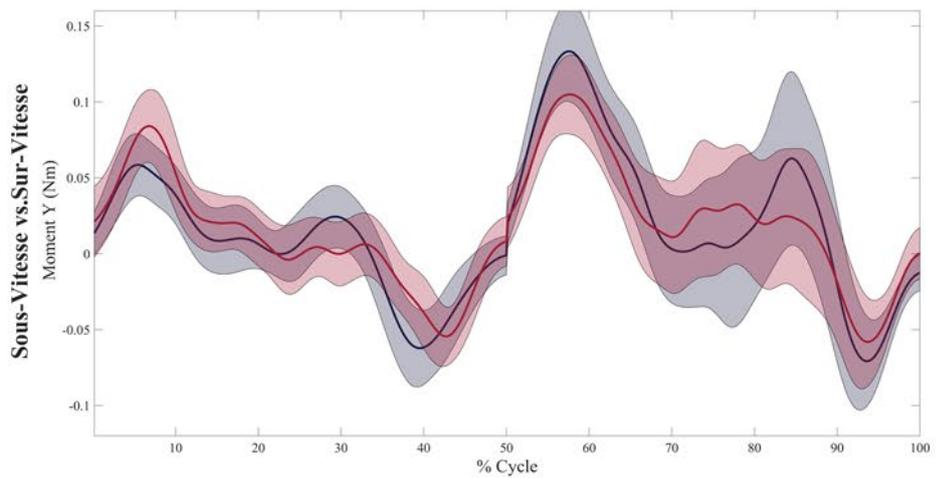
a.



b.

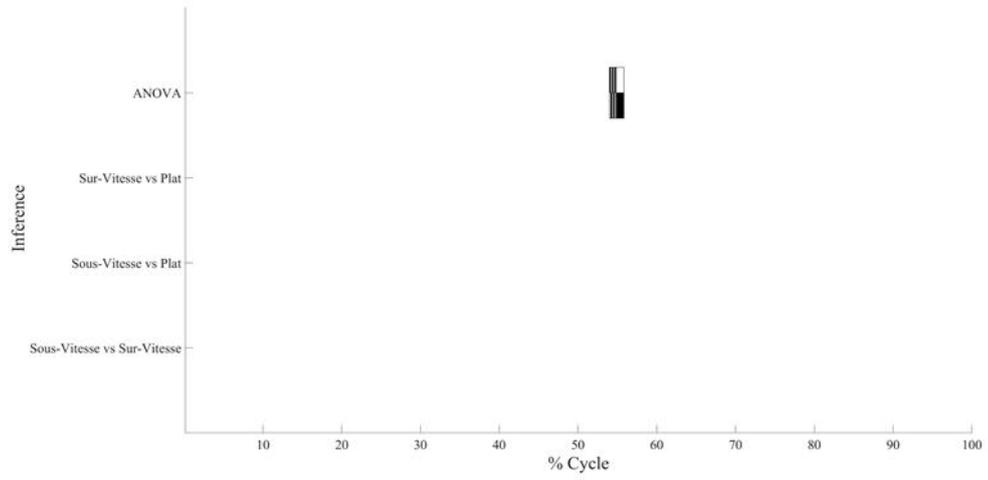


c.

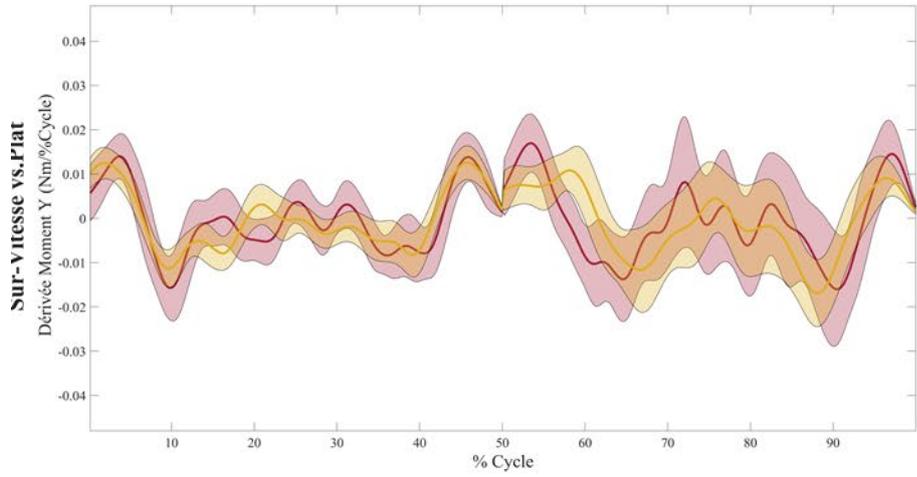


d.

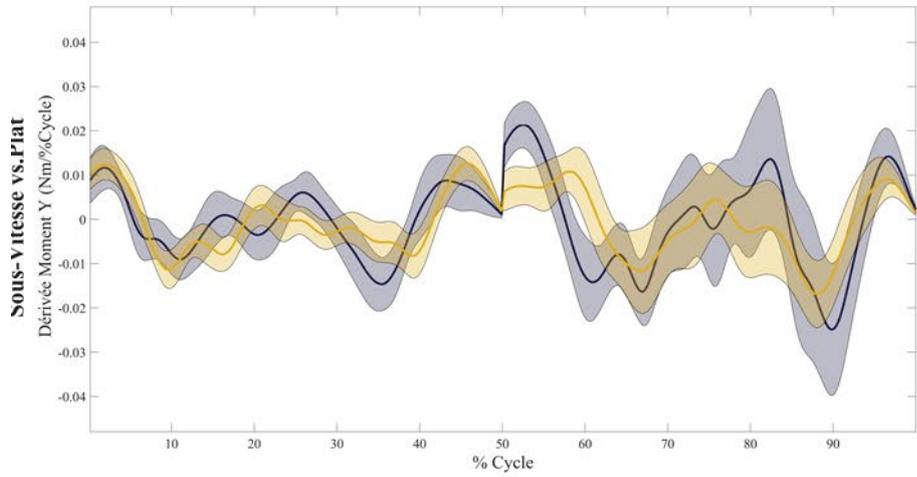
Figure 60 : (a) Représentation graphique des résultats de l'ANOVA (SPM-1D) des signatures de force moyenne de diff-My entre les cycles de profils sous-vitesse (bleu), sur vitesse (rouge) ou plat (jaune). (b-c-d) Représentation graphique des post-hoc de l'ANOVA, les traits correspondent aux courbes moyennes de diff-My dans les différents profils de virages, les zones grisées correspondent aux périodes où les post-hoc sont significatifs



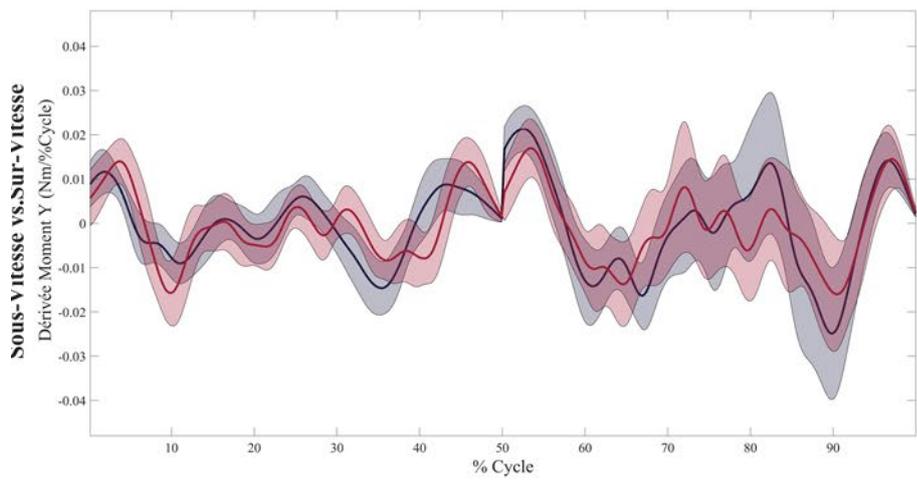
a.



b.



c.



d.

Les *post-hocs* des signatures de force en Fz mettent en avant plusieurs résultats significatifs :

- Entre 68.8 et 73.2% du cycle (soit durant la première partie du plateau sur le pied extérieur), l'intensité dans les sections plates est plus importante que dans les sections en survitesse.
- Durant le relâchement de force du pied extérieur, les intensités sur les profils plat sont plus faibles que sur les profils en sur-vitesse et en sous-vitesse (respectivement entre 89.0% et 93.5% du cycle et entre 89.6 et 93.6% du cycle).
- Durant la montée en charge sur le pied extérieur, les intensités dans les virages en sous-vitesse sont plus importantes que dans les sections en plat et en sur vitesse (respectivement entre 54.2 et 59.1% et entre 54.3% et 60.7% du cycle).

Les *post-hocs* des signatures de force en Fz mettent en avant plusieurs résultats significatifs :

- Durant le relâchement de force sur le pied extérieur, la pente de relâchement dans les sections en sur-vitesse et sous-vitesse est plus raide que dans les sections en plat (respectivement entre 94.4 et 96.1 % et entre 94.1 et 97.8%).
- Durant la phase de montée en force sur le pied extérieur, la pente de montée de force est plus raide dans les virages en section sous-vitesse que dans les virages en plat ou en sur-vitesse (respectivement entre 52.1% et 55.8 % et entre 53.2 à 55.5%).
- Entre 59.9% et 62.0% du cycle la pente de montée en charge est plus importante dans les virages de profil plat que dans ceux en sous-vitesse.

Sur l'axe My, l'ANOVA révèle des différences de 54.7 à 55.6 % du cycle et de 58.2 à 59.4% sur la dérivée de My. Aucun des *post-hoc* ne révèle de différence significative entre les profils de virage sur les signatures ou la dérivée des signatures en My. Il est possible que des différences d'intensité et de temps d'apparition du pic de moment Y vers l'avant puissent exister sur des profils de virage plus marqués. Les tendances observables sur nos données révèlent que le pic de My vers l'avant est plus tardif dans les virages à plat. Il semble également que ce pic vers l'avant ait une tendance à être d'intensité plus importante dans les profils de virage en sous-vitesse par rapport aux deux autres profils.

5.3.1.4 Interactions entre la singularité des virages et les marqueurs de la performance de la signature de force :

Les résultats de la corrélation entre la signature de force F_z et le temps de course pour les virages de profils sous-vitesse, sur-vitesse et plat sont rassemblés de la Figure 61 à la Figure 63. Chacune d'entre elles détaille la signature moyenne de l'ensemble de la population pour un profil de virage spécifique. Le résultat du test SPM{t} est présenté au-dessous des signatures de force et de leurs dérivées. Lorsque la valeur de SPM{t} dépasse les seuils en pointillés rouges, les intensités de force sont significativement corrélées au temps de course. Lorsque SPM{t} dépasse le seuil positif, les données sont positivement corrélées au temps de course (ces situations sont représentées par des bandes jaunes). Dans ces situations, l'augmentation de la force ou du moment durant cette période est associée à une augmentation du temps de course (*i.e.* associée à un plus faible niveau de performance). A l'inverse, lorsque SPM{t} dépasse le seuil négatif, les données de force sont négativement corrélées au temps de course (ces situations sont représentées par des bandes bleues). Sur le graphique de SPM{t}, une étiquette indique le niveau de quantification statistique du test de régression (p-value). Nous détaillerons à la suite de chaque figure, les bornes de signal et de dérivée du signal significativement corrélées au temps de course des skieurs. Les figures de dérivée ne seront pas présentées mais les zones de significativité seront détaillées pour chacun des profils de virage.

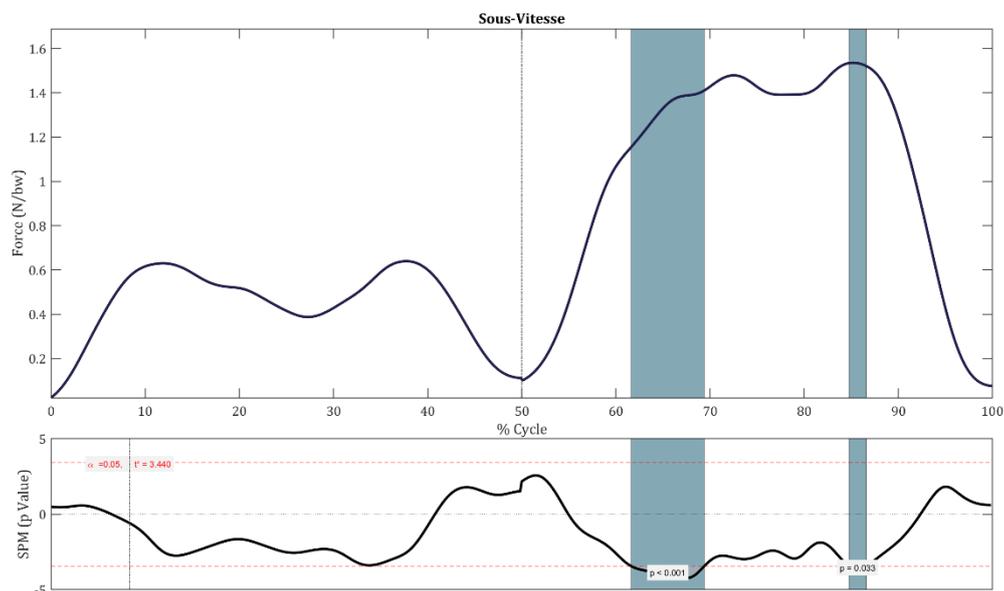


Figure 61 : Evolution moyenne de la signature de F_z au cours des cycles de virage de profil en sous-vitesse. Le résultat du test de corrélation SPM{t} est présenté au-dessous de la signature de force. Lorsque celui-ci passe sous le seuil négatif (pointillés rouges) la corrélation avec le temps de course est négative (bandes bleues), au-dessus du seuil positif la corrélation est positive (bandes jaunes).

Dans les virages de profil sous-vitesse, l'intensité de Fz est négativement corrélée au temps de course (les skieurs aux temps de course les plus faibles présentent des valeurs plus importantes) de 61.6 à 69.3% et de 84.7 à 87.5 % du temps de cycle. Une forte tendance à une corrélation négative est également observée de 32.4 à 35.4% du temps de cycle. La dérivée de Fz (Diff-Fz) est positivement corrélée au temps de course de 38.9 à 41.0% du temps de cycle. Notons que durant cette période, diff-Fz est négative donc les skieurs avec la plus forte décroissance sont ceux qui réalisent les temps de course les plus courts.

Dans les virages de profil sur-vitesse, l'intensité de Fz est négativement corrélée au temps de course uniquement de 80.7 à 85.3 % du temps de cycle. Une tendance de corrélation positive sur la dérivée est observée de 90.6 à 91.9% du temps de cycle. Notons que durant cette période, diff-Fz est négative donc les skieurs avec la plus forte décroissance sont ceux qui réalisent les temps de course les plus courts.

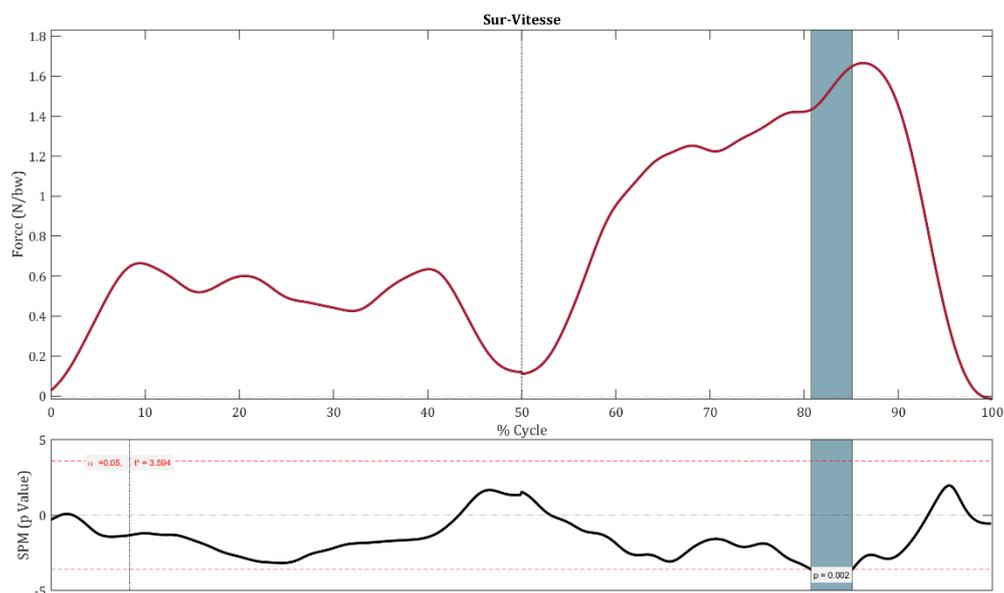


Figure 62 : Evolution moyenne de la signature de Fz au cours des cycles de virage de profil en sur-vitesse. Le résultat du test de corrélation SPM {t} est présenté au-dessous de la signature de force. Lorsque celui-ci passe sous le seuil négatif (pointillés rouges) la corrélation avec le temps de course est négative (bandes bleues), au-dessus du seuil positif la corrélation est positive (bandes jaunes).

Dans les virages de profil plat, l'intensité de Fz est négativement corrélée au temps de course de 64.0 à 69.0% et de 70.8% à 79.6 % du temps de cycle. La période entre 69.0% et 70.8% du temps de cycle présente une forte tendance à la corrélation significative. Aucune corrélation ou tendance de corrélation n'est observée sur la dérivée du signal de Fz sur les virages de profil plat.

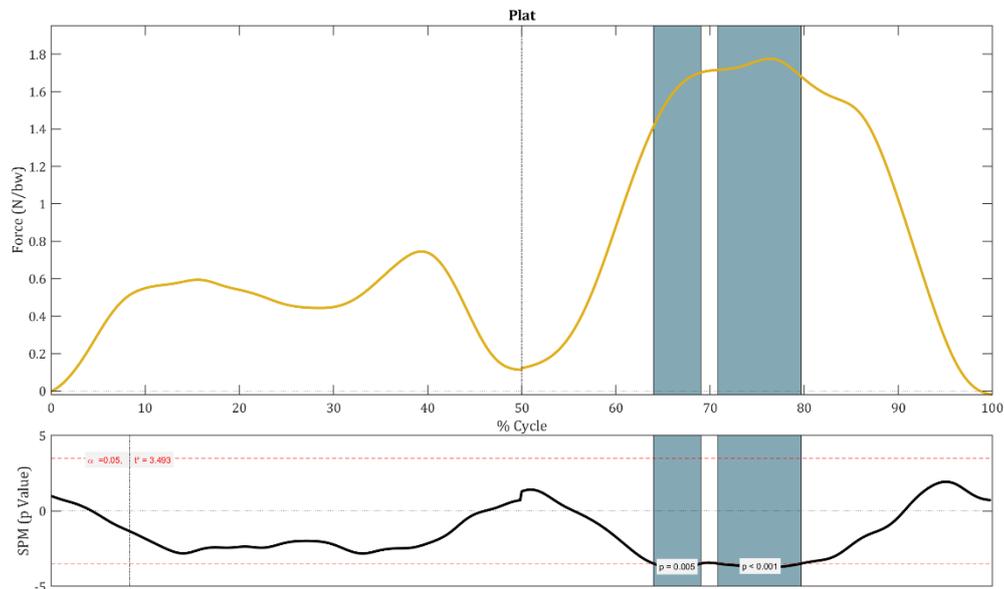


Figure 63 : Evolution moyenne de la signature de Fz au cours des cycles de virage de profils plat. Le résultat du test de corrélation SPM {t} est présenté au-dessous de la signature de force. Lorsque celui-ci passe sous le seuil négatif (pointillés rouges) la corrélation avec le temps de course est négative (bandes bleues), au-dessus du seuil positif la corrélation est positive (bandes jaunes).

5.3.1.5 Discussion et analyse :

Les virages dans un profil de sous-vitesse sont principalement caractérisées par des plateaux de force plus longs et des pentes de montée et de relâchement de force plus importantes ainsi que par une prise de carre rapide et anticipée par rapport au profil plat. Le temps d'apparition du pic de moment My vers l'avant a également tendance à être anticipé par rapport aux virages de profil plat. Cette prise de carre soudaine est caractéristique d'une conduite coupée (Müller and Schwameder, 2003). Dans ce profil de virage, le plateau durant la phase de conduite occupe une part plus importante du cycle que dans les autres virages. De plus, au sein de ce profil en sous-vitesse, les rayons minimums du CG des skieurs sont supérieurs à ceux des virages en profil plat alors que les angles de portes sont identiques (Tableau 5). Des phases de conduites plus longues associées à des rayons de virage plus importants sont des marqueurs d'une stratégie en S. Ces résultats corroborent notre hypothèse a) selon laquelle

dans les sections en sous-vitesse, le skieur favorise l'utilisation de la conduite coupée. Cependant, nous nous attendions à observer un plateau de F_z plus élevé durant la phase de conduite typique d'une conduite coupée. Cette absence de résultat en ce sens peut être expliquée par des vitesses de passage en dessous de la vitesse barrière. Dans les virages de profil sur-vitesse, les vitesses plus élevées au regard de la vitesse barrière induisent des forces radiales plus élevées en deuxième partie de la phase de conduite. Au contraire dans les cycles de profil sous-vitesse, le skieur n'a pas la vitesse suffisante pour subir les forces radiales de hautes intensités à la limite de ses capacités musculaires et de l'interaction ski-neige. D'après nos résultats, la conduite coupée en recherche de vitesse est donc plus marquée par des plateaux de conduite longs que par des plateaux de forte intensité.

Dans les virages dans un profil en sur-vitesse, la montée en force de F_z est plus progressive et la première partie du plateau de force est largement inférieure à sa deuxième partie. Cette progressivité dans l'application de la force en sur-vitesse semble liée à des processus d'initiation de virage moins marqués. Ce point est conforté par des intensités de M_y plus faibles observées sur ces profils de virage durant cette partie (tendance). Ces résultats corroborent notre hypothèse b) selon laquelle les virages en sur-vitesse sont caractérisés par un comportement d'entrée en dérive. En effet, lorsque le skieur effectue une entrée en dérive, il n'infléchit pas sa trajectoire durant la phase de dérapage en entrée de courbe. Ce comportement a pour conséquence de ne pas créer de force radiale en début de virage, ce qui limite les forces normales sur le pied extérieur comme observé sur nos données. Une fois passée la porte, les skieurs mettent un terme à la dérive et utilisent une conduite coupée classique. Ce comportement explique que la signature de force dans les profils en sur-vitesse soit proche des signatures dans les profils en sous-vitesse durant la deuxième partie du virage. La prééminence visible en fin de virage sur les virages en sur-vitesse et en sous-vitesse peut être le marqueur d'un allègement par impulsion où le skieur pousse sur ses skis pour créer une extension des membres inférieurs et s'alléger (Brierley and Bartlett, 1991). Comme nous l'avons vu précédemment, l'intensité de ce phénomène est corrélée au niveau de performance des sujets.

Par rapport aux autres profils, les virages dans les sections plates sont caractérisés par des plateaux plus courts (en durée relative et absolue), tardifs et de plus hautes intensités de F_z . La tendance à une apparition plus tardive du pic de M_y vers l'avant conforte ce résultat. Cette conduite semble typique d'une stratégie en Z. La stratégie en Z est normalement caractérisée par une plus grande dissipation d'énergie durant la phase de conduite et un gain d'énergie cinétique pendant les phases de ligne droite. Pourtant, les phases de ligne droite des profils plats ne permettent pas de regagner de vitesse. Ce choix stratégique des athlètes ne corrobore pas notre hypothèse c) basée sur les consignes des entraîneurs selon laquelle une stratégie en S serait favorisée dans ces situations. Le choix de la stratégie en Z est corroboré par les données cinématiques (Tableau 5) dans les virages de profil plat.

Les skieurs ont des rayons de virages minimums plus courts que dans les virages de profil sur-vitesse alors que l'angle de la piste entre ces deux profils est le même. Ce constat confirme que dans les profils plats, les skieurs privilégient des virages plus compacts. Il est possible qu'ils soient largement en dessous de leur vitesse barrière. Cette vitesse leur permet de réaliser des virages à des rayons courts tout en conservant une conduite coupée (caractérisée par une faible dissipation d'énergie). Réduire le temps de la phase de conduite permet aux skieurs de réduire le temps durant lequel ils appliquent d'importantes forces radiales qui sont associées à des forces de friction ski-neige importantes (Partie 2.2.2). Enfin, les pentes de montée et de descente en charge dans les virages de profil plat sont très progressives et le plateau de force ne présente pas de forme en U. Ces faibles pentes semblent indiquer un plus fort enclin des skieurs à utiliser un allègement par avalement durant les phases de plat (Partie 5.2.4).

L'absence de significativité des post-hocs sur l'axe M_y et sa dérivée peut être liée à une variabilité importante des stratégies d'application M_y au sein même d'un profil de virage. Enfin, l'absence d'effet de profil de virage sur la signature du pied intérieur peut être expliquée par nos choix de classification des cycles en profil de virage. En effet, pour les cycles comprenant un virage de chaque profil, le choix du profil est défini pour que les observations sur le pied extérieur correspondent au profil de cycle. Ce point implique de fait, que certains virages intérieurs sont mal catégorisés, expliquant potentiellement une absence d'effet des profils de virage sur le ski intérieur.

Les interactions entre la singularité des virages et les marqueurs de la performance de la signature de force présentent des zones de corrélation plus faibles que celles observées dans la partie 5.2.3. Ces plus faibles zones sont imputables à un signal moins filtré dans la partie 5.3 que 5.2 (fréquence de coupure à 2 Hz dans la partie 5.2 contre 4 Hz dans la partie 5.3). Le choix méthodologique de la détermination des fréquences de coupures a été réalisé dans le but d'observer les modifications macroscopiques et globales de la signature de force en fonction du niveau de performance dans la partie 5.2. La fréquence de coupure plus élevée pour cette analyse par section a été choisie afin d'observer les variations plus spécifiques de la signature de force au regard des différents profils de virage. Le contenu fréquentiel plus important dans la section 5.3 implique de possibles déphasages notamment lors de l'allègement ne mettant pas en avant de corrélation positive durant cette période. Les plus faibles périodes de significativité peuvent aussi être dues à la taille de l'échantillon qui est plus faible, réduisant de fait la puissance statistique de la régression. Globalement, ces analyses mettent toujours en avant que les skieurs de haut niveau subissent des intensités de force plus importantes durant la phase de conduite. On notera cependant des différences entre les profils de virage sur la répartition des temps forts au cours du plateau. Ainsi, les meilleurs skieurs appliquent des forces plus importantes en fin de plateau sur les sections en sur-vitesse, en début de plateau sur les sections plates

et en début et en fin de plateau (marquant une forme en U importante) sur les sections en sous-vitesse. Ces modalités de temps forts semblent être les marqueurs d'une exacerbation des conduites typiques propres à chaque section chez les athlètes de haut niveau. Les implications de ces résultats seront détaillées plus en profondeur lors de la discussion générale de ce travail de thèse.

En conclusion, nous avons déterminé trois profils de virage à partir des différentes situations de course rencontrées par les skieurs. En fonction des profils, les objectifs des skieurs sont soit de s'approcher de la vitesse barrière (sous-vitesse), soit de maintenir cette vitesse barrière (sur-vitesse) soit de maintenir une vitesse la plus élevée possible sans possibilité d'en regagner (plat). A partir de ces trois profils, nos résultats indiquent que la signature de forces en F_z est significativement influencée par les objectifs des skieurs. On notera que les caractéristiques (temporelles et d'intensité) du pic de moment Y vers l'avant ont aussi tendance à être influencées par le profil de virage. Le profil de virage induit trois principales modifications sur la signature de force F_z qui sont : la durée du plateau, les pentes de montée et de relâchement de charge, et l'équilibre entre les intensités en début et fin de conduite. Ces variations sont associées à différentes stratégies de trajectoire. Ainsi au cours d'une course, les skieurs modulent leurs signatures de force et de moment en fonction de leurs objectifs de virage. Il semble que cette capacité de modulation soit de plus en plus marquée chez les skieurs avec l'augmentation de leur niveau de performance.

5.3.2 Singularité des athlètes et stratégie préférée par les athlètes :

5.3.2.1 Interactions entre stratégie et performance :

Comme décrit dans la partie précédente, les profils de virage induisent une variabilité dans le choix de la stratégie de ligne par le skieur. Les stratégies de trajectoire pouvant être utilisées par les skieurs sont détaillées dans la partie 1.2.3. Les informations à notre disposition dans la littérature semblent indiquer que pour un tracé similaire des différences de stratégies existent entre les skieurs (Spörri et al., 2012b). Ces différences de stratégies peuvent être dues aux variabilités entre les athlètes dans leurs caractéristiques d'entrée dans le virage (vitesse, position sur la piste, orientation des skis, équilibre ...). Cependant, les athlètes privilégiant une stratégie dans un virage ont tendance à aussi privilégier cette stratégie sur l'ensemble de la course et entre plusieurs passages dans le même tracé (Federolf, 2012). Cette prévalence des athlètes à l'utilisation d'une stratégie plutôt qu'une autre n'a jamais été évaluée directement. L'analyse de la ligne droite entre deux virages est un marqueur intéressant pour caractériser la stratégie utilisée. En effet la transition en ligne droite entre deux virages est la phase principale où les skieurs peuvent gagner de la vitesse dans une course, ouvrir leur trajectoire ou réduire la distance parcourue (Hébert-Losier et al., 2014). L'augmentation de la vitesse

en passant plus de temps en ligne droite, induisant des phases de virage plus brusques, est caractéristique de la stratégie en Z. Inversement, dans la stratégie en S, la vitesse peut être conservée pendant tout le virage en effectuant de longs virages courbes séparés par une courte ligne droite. L'interaction entre la stratégie de trajectoire utilisée ou ses caractéristiques et le niveau de performance a déjà été évaluée dans la littérature mais reste floue (Partie 1.2.3 - Federolf et al., 2008; Supej, 2008; Supej et al., 2011; Spörri et al., 2018a). Un article basé sur nos données expérimentales et publié vise à évaluer les spécificités cinétiques et cinématiques associées à la stratégie de ligne et à explorer les interactions de la stratégie choisie avec les performances du skieur et la dissipation d'énergie (Delhaye et al., 2020- Annexe 3).

Dans cet article, le temps de changement de carre a été calculé à partir du signal de force comme la période d'application de la force la plus faible sur le ski extérieur (de PIP7 à PIP1). À partir des données de position, les virages ont été séparés en phase tournante et en phase de ligne droite (rayon du CG inférieur et supérieur à 30 m, respectivement). La durée et la distance parcourue en ligne droite, l'amplitude de variation de vitesse et le changement d'énergie mécanique spécifique ont été calculés pour chaque virage et moyennés pour chaque skieur. La distance parcourue en ligne droite a été utilisée comme marqueur pour caractériser la stratégie de trajectoire dans le spectre entre la stratégie Z (longue ligne droite) et S (courte ligne droite). Les interactions entre la longueur de la ligne droite et les caractéristiques présumées des stratégies en S ou en Z présentées dans la partie 1.2.3 ont ainsi été déterminées.

La distance parcourue en ligne droite est positivement corrélée à l'amplitude de la vitesse sur une ligne droite ($r = 0.672$, $p = 0.003$) et au temps relatif et absolu passé en ligne droite ($r = 0.967$, $p < 0.001$). Cependant, la longueur de la trajectoire en ligne droite n'est pas corrélée à la diminution de la vitesse dans le virage suivant ($r = -0.418$, $p = 0.390$) ou au temps sans application de force sur le ski extérieur ($r = 0.195$, $p = 0.453$). Les athlètes les plus performants effectuent des virages entiers (phases de ligne droite et tournante) au cours desquels ils dissipent moins de $\Delta e_{mech}/v_{in}$ ($r = -0.620$, $p = 0.008$) (Figure 64-b). Cette corrélation est également significative sur la phase tournante du virage (Figure 64-c).

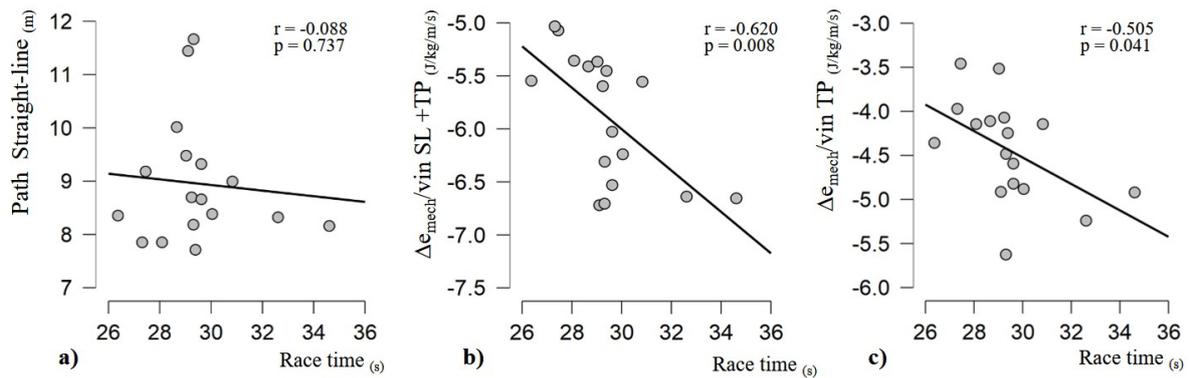


Figure 64 : Résultats des corrélations linéaires entre le temps de course (« Race time » en s) et la distance en ligne droite (a), l'énergie mécanique spécifique normalisée à la vitesse d'entrée dissipée sur l'ensemble du virage en ligne droite et en phase tournante (b) et l'énergie mécanique spécifique normalisée à la vitesse d'entrée dissipée sur la phase tournante du virage (c). Issue de Delhay 2020.

Les principales questions de cette étude concernent le lien entre le niveau de performance et la stratégie de trajectoire. Premièrement, la distance parcourue en ligne droite n'est pas corrélée avec le $\Delta e_{mech}/v_{in}$ sur l'ensemble du cycle (Figure 64-a). De plus, la distance parcourue en ligne droite et le temps de course ne sont pas corrélés. Les résultats indiquent que l'utilisation prédominante d'une stratégie n'est pas nécessairement liée à la performance globale sur la course. L'absence de résultats significatifs est principalement due à la grande variabilité de la stratégie utilisée par les skieurs de niveau intermédiaire de notre échantillon. Parmi les skieurs de niveau très proche (c.-à-d. Classés 5e à 13e avec un temps de course compris entre 28 et 30 s), il existe une variation substantielle de la distance parcourue en ligne droite. Par exemple, dans ce groupe, deux skieurs ont parcouru en moyenne une distance en ligne droite supérieure à 11 m, tandis que d'autres ont parcouru moins de 8 m. Le choix de la stratégie utilisée pourrait être déterminé par divers profils anthropométriques (Haymes and Dickinson, 1980), physiologiques (White and Johnson, 1991) et techniques (Raschner et al., 1995; Müller et al., 2017). Cependant, ces interactions n'ont pas été récemment évaluées sur des skieurs adultes. La dispersion significative des stratégies de trajectoire pour un même niveau de performance met en évidence que des approches radicalement différentes peuvent aboutir à des caractéristiques de dissipation d'énergie ou de performance similaires. Enfin, il semblerait que les meilleurs skieurs possèdent des caractéristiques physiques et techniques qui leur permettent de réduire la dissipation d'énergie quelles que soient les stratégies de trajectoire adoptées.

5.3.2.2 Lien entre stratégie et dispersion des marqueurs de signature de force :

La partie 5.3.2.1 décrit une grande dispersion des stratégies utilisées au sein du groupe homogène ayant réalisé un temps de course entre 28 et 30 secondes. Dans la partie 5.2.3.2 détaillant les résultats du *feature extraction*, les résidus des corrélations avec le temps de course mettent en avant une

grande dispersion dans les caractéristiques des signatures de force pour ces athlètes. Afin de quantifier la dispersion des résidus, nous avons calculé l'écart type normalisé des résidus (s). L'indice s correspond à la racine de la variance des résidus des skieurs entre 28 et 30 secondes normalisée à la moyenne du critère sur cette période. Cet indice est présenté dans le Tableau 6. On notera une variance importante sur les données temporelles du tA1 et de tMC, et sur la prééminence de Fz sur le pied extérieur en début et fin de plateau. L'objectif de cette partie est d'évaluer l'hypothèse selon laquelle la dispersion dans les corrélations entre performance et marqueurs de *feature extraction* peut être en partie expliquée par les différences de stratégies de trajectoire entre les skieurs. Afin d'évaluer si les résidus des corrélations linéaires présentés dans la partie 5.2 sont expliqués par la stratégie des athlètes nous utiliserons la méthode statistique de régression linéaire hiérarchique. Avant cela, la normalité de chaque paramètre a été testée en utilisant le test de Shapiro-Wilk, sauf le temps de parcours qui s'approche d'une distribution plate attendue. L'analyse de régression linéaire hiérarchique a été effectuée pour déterminer si le paramètre de stratégie de trajectoire permet d'améliorer la prédiction de performance fournie par les marqueurs de la signature de force. Contrairement à la partie 5.2.3.2, les marqueurs utilisés sont les valeurs moyennes par sujet. La stratégie de ligne est quantifiée indépendamment via le marqueur de la stratégie déterminé dans l'article (Annexe 3) qui est la durée en ligne droite relative à la durée totale du virage ($t\%SL$). Puisque notre hypothèse est que $t\%SL$ est explicatif des résidus entre les marqueurs de la trajectoire et le temps de course, le temps de course a été forcé dans la régression. $t\%SL$ est ajouté dans l'équation dans un second temps pour évaluer son influence sur la prédiction du temps de course. La significativité p du modèle est indiquée dans le Tableau 6. Elle est basée sur le coefficient de régression r^2 . Lorsque que le modèle est significatif, le signe du coefficient de pente non standardisé est également présenté dans le Tableau 6. Toutes les analyses statistiques ont été effectuées sur JASP (Version 0.13.1 - Amsterdam - Pays-Bas) avec un niveau alpha fixé à $p = 0.05$.

D'après les résultats des tests statistiques, l'allongement temporel relatif de la ligne droite (t%SL) est une variable explicative des résidus de la corrélation entre le temps d'allègement pré-appui et le temps de course. Les skieurs ayant les résidus les plus importants sont ceux qui présentent un temps t%SL plus élevé. La significativité du marqueur tAT peut être expliquée par sa méthode de calcul. En effet, il est composé de la somme de tA1 et tA2. De ce fait, les valeurs des résidus de tAT sont également positivement expliquées par t%SL. Pour répondre à notre hypothèse, une partie des résidus des corrélations entre ces marqueurs de la signature de force et la performance peut être expliquée par les choix de trajectoire des athlètes. Ce résultat atteste que globalement, les skieurs avec les meilleurs niveaux de performance allongent leur temps d'allègement pré-conduite si celui-ci est pondéré par la

Tableau 6 :

Marqueurs	S (%)	Temps Course (r ²)	Coeff	Temps de course + t%SL (r ²)	Coeff
Ratio Plateau FZ	10	0.008			
tA1	21	0.020	+	0.398**	+
tA2	18	0.005			
tAT	17	0.017	+	0.390*	+
tC	4	0.045			
tMC	24	0.014			
tRC	14	0.220			
MFzCout	25	0.387**	-		
SD FzC Out	16	0.433**	-		
ProPIP3 Out	34	0.143			
ProPIP5 Out	22	0.321*	-		
SD FxC Out	10	0.008			
SD MxC Out	36	0.085			

stratégie adoptée par les skieurs. Ce résultat semble nous indiquer qu'à stratégie égale, les skieurs de meilleur niveau de performance présentent des temps d'allègement relatifs plus longs. L'origine de ces temps d'allègement relatifs plus longs pourrait être liée à une limite basse du temps d'allègement absolu. Ainsi, les skieurs de haut niveau ayant des temps de virage plus courts ne pourraient pas raccourcir davantage le temps absolu d'allègement. Pour réduire le temps total de cycle (et ainsi gagner en performance), ces skieurs

doivent alors réduire leur temps absolu de conduite au cours du virage.

On notera que pour les autres marqueurs les résidus ne semblent pas être expliqués par les stratégies de lignes. Certaines caractéristiques des signatures de force comme la durée du temps de conduite, la variabilité du plateau sur les axes Fx ou Mx ou ProPIP3 sont propres à un athlète. Elles présentent des variabilités intra-sujet supérieures aux variabilités inter-sujet. Nonobstant, ces caractéristiques ne sont pas corrélées au niveau de performance du skieur associé à la stratégie qu'il utilise. De ce fait, certains marqueurs de la signature individuelle des skieurs sont liés à la coordination motrice des athlètes indépendamment des facteurs cinématiques de performance ou de stratégie évalués dans cette étude.

5.3.2.3 Lien entre stratégie et signature de force :

5.3.2.3.1 Contexte et hypothèses :

Comme vu précédemment, le groupe de skieur entre 28 et 30 secondes de temps de course représente un groupe de niveau homogène avec une grande variabilité stratégique. Cette variabilité stratégique explique une partie des résidus des corrélations avec le temps de course. Cependant, cette variabilité notable dans la gestion de l'énergie cinétique et dans les trajectoires des skieurs pourrait aussi avoir une influence importante sur leurs signatures globales. En effet, comme détaillé dans la partie 2.4.2, il existe une relation directe entre la trajectoire du skieur et les caractéristiques de sa signature de force. Les informations présentées dans la littérature sont insuffisantes pour déterminer les mécanismes sous-jacents à ces interactions (Nakazato et al., 2011). La description des stratégies réalisées dans la partie 1.2.3 décrit la stratégie en S comme caractérisée par de longues phases de conduite coupée. La conduite coupée peut être caractérisée par un plateau de F_z long et stable, des phases de prise et de relâchement de carres en F_z courtes et de pentes importantes, ainsi qu'un plateau aux intensités équilibrées entre le début et la fin de la phase de conduite. L'ensemble de ces caractéristiques de signature de force sont similaires à celles observées dans les sections en sous-vitesse.

A partir de ces informations, nous pouvons émettre l'hypothèse que les skieurs présentant une stratégie majoritairement en S sur l'ensemble du tracé ont une signature de force en F_z avec des caractéristiques proches de la signature de l'ensemble de la population dans les parties en sous-vitesse. Nous pouvons compléter cette hypothèse en estimant qu'à l'inverse, les skieurs privilégiant une stratégie en Z sur l'ensemble du tracé ont une signature de force aux caractéristiques proches de celle observée dans les sections en sur-vitesse.

A partir des informations recueillies dans ces travaux de thèse, nous pouvons donc faire des hypothèses quant aux différences entre ces stratégies sur les autres axes. La stratégie en Z induit des changements de direction plus brutaux. Chez les skieurs privilégiant cette stratégie, l'inversion de M_x en fin de virage devrait donc être plus brusque, caractérisée par des valeurs positives en fin de virage plus importantes et des pentes de variation plus élevées. La conduite coupée typique d'une stratégie en S nécessite à l'initiation de la conduite, des actions de déformation longitudinale du ski plus marquées. Nous pouvons nous attendre à observer des valeurs de M_y en début de phase de conduite plus importantes chez ces skieurs ainsi que des pentes plus importantes autour du pic de M_y vers l'avant.

5.3.2.3.2 Méthodologie :

Afin de déterminer les différences de signature de force entre les deux stratégies, un T-test two-way SPM{F} avec pour modalité la stratégie utilisée (stratégie en S, stratégie en Z) est réalisé sur les signatures de force et la dérivée de la signature de force normalisée temporellement. Cette dérivée est exprimée en N/ms ou en Nm/ms. Afin de déterminer les stratégies des skieurs, un clustering a été réalisé selon la méthode de partitionnement en k-moyennes (*k-means clustering*). Les valeurs d'entrée du clustering sont déterminées à partir des résultats des corrélations entre stratégies et marqueurs cinématiques réalisés dans l'article en Annexe 3. La part de temps ($t\%SL$), la distance et l'amplitude de vitesse ($\Delta SpeedSL$) en ligne droite avant le virage sont définies comme les marqueurs d'entrée pour le partitionnement. Les résultats du partitionnement sont détaillés dans la Figure 65. Le clustering est réalisé sur l'ensemble des skieurs. Dans un second temps, afin d'éviter l'influence du niveau de performance sur les signatures de force détaillée dans la partie 5.2 seuls les athlètes de niveau homogène dont le temps de course est situé entre 28 et 30 secondes sont conservés (marqués avec un diamant sur la Figure 65). Les groupes favorisant une stratégie en S et en Z sont respectivement composés de 4 skieurs et de 3 skieurs. Les caractéristiques morphométriques et le temps de course, sont homogènes entre ces deux groupes (pour les groupes S et Z respectivement : 85.7 ± 1 kg et 89.0 ± 17 kg ; 177.25 ± 6.5 cm et 179 ± 7.5 cm ; 29.31 ± 0.06 s et 29.12 ± 0.47 s de temps de course).

Les signatures de force sont celles de la base de données utilisées dans l'ensemble de ce travail de thèse. Le processus du traitement du signal est celui présenté dans la partie protocole. Exceptée la sélection des athlètes basée sur leurs temps de course, la base de données est identique avec celles des parties 5.1, 5.2 ou 5.3.1

Comme pour la partie 5.3.1.3, les données sont présentées sous forme de graphique présentant la signature moyenne des deux populations sur l'ensemble des cycles mesurés. Le seuil de significativité choisi est de 0.05. L'ensemble des tests statistiques et des figures présentés ont été réalisés sur Matlab (R2019b, *The Mathworks Inc* – Natick – États-Unis) avec la Toolbox SPM (Todd Pataky, 2019, M.0.4.7).

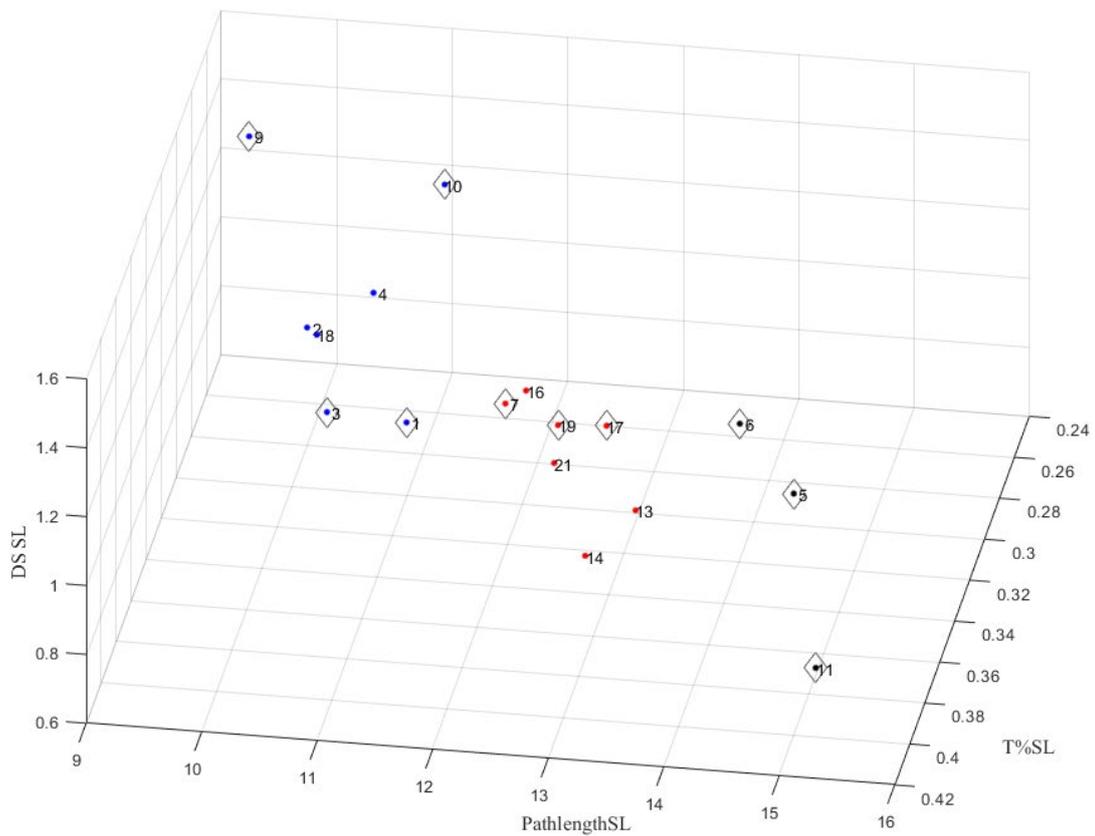


Figure 65 : Représentation graphique du clustering 3D des profils de stratégie de ligne des skieurs en fonction de la distance parcourue en ligne droite (PathlengthSL), du temps relatif passé en ligne droite (t%SL) et de la vitesse gagnée durant la ligne droite (DS SL). Les skieurs favorisant la stratégie de ligne en Z sont représentés en noir, les skieurs intermédiaires en rouge, et les skieurs favorisant la stratégie de ligne en S en bleu. Les skieurs marqués d'un diamant sont les skieurs dont le temps de course est compris entre 28 et 30s.

5.3.2.3.3 Résultats :

Les résultats de l'ANOVA sont présentés dans les Figure 66 à Figure 69. Chaque figure est composée de deux représentations graphiques. La première présente l'évolution de la signature de force (en N/bw ou en Nm/bw) dans l'axe étudié en fonction de l'évolution de temps de cycle (en % de cycle). La seconde représentation détaille l'évolution de la dérivée temporelle du signal (Diff ; en N/bw/ms ou en Nm/bw/ms) en temps de cycle. Sur l'ensemble des graphiques, les signatures de force appartenant aux skieurs du groupe S sont représentées en orange. Celles des skieurs du groupe Z sont représentées en bleu foncé. Le trait central représente la moyenne des signatures de force du groupe. La surface colorée autour du trait représente les intervalles de confiance à 95%. Les zones grisées correspondent aux périodes où la $SPM\{t\}$ est supérieur à la valeur critique de significativité.

L'ANOVA ne présente qu'assez peu de résultats significatifs. Les seules zones où un écart significatif est détecté entre les deux stratégies sont : sur Fz autour de PIP3 entre 61.9 à 64.7% du cycle, sur Diff-Fz entre 18.8 à 20.6% du cycle, sur Mx entre 49.9 à 52.2% du cycle et sur Diff-My entre 91.7 à 92.6% du cycle.

Certaines tendances sont observées entre les signatures sans être au-dessus du seuil de significativité. C'est le cas sur : Fy de 32 à 50% du cycle, Diff-Fy de 88% à 93% du cycle, Diff-Mx entre 50 et 54% du cycle et entre 88 et 94% du cycle et My entre 5 et 12% du cycle et entre 59 et 66% du cycle.

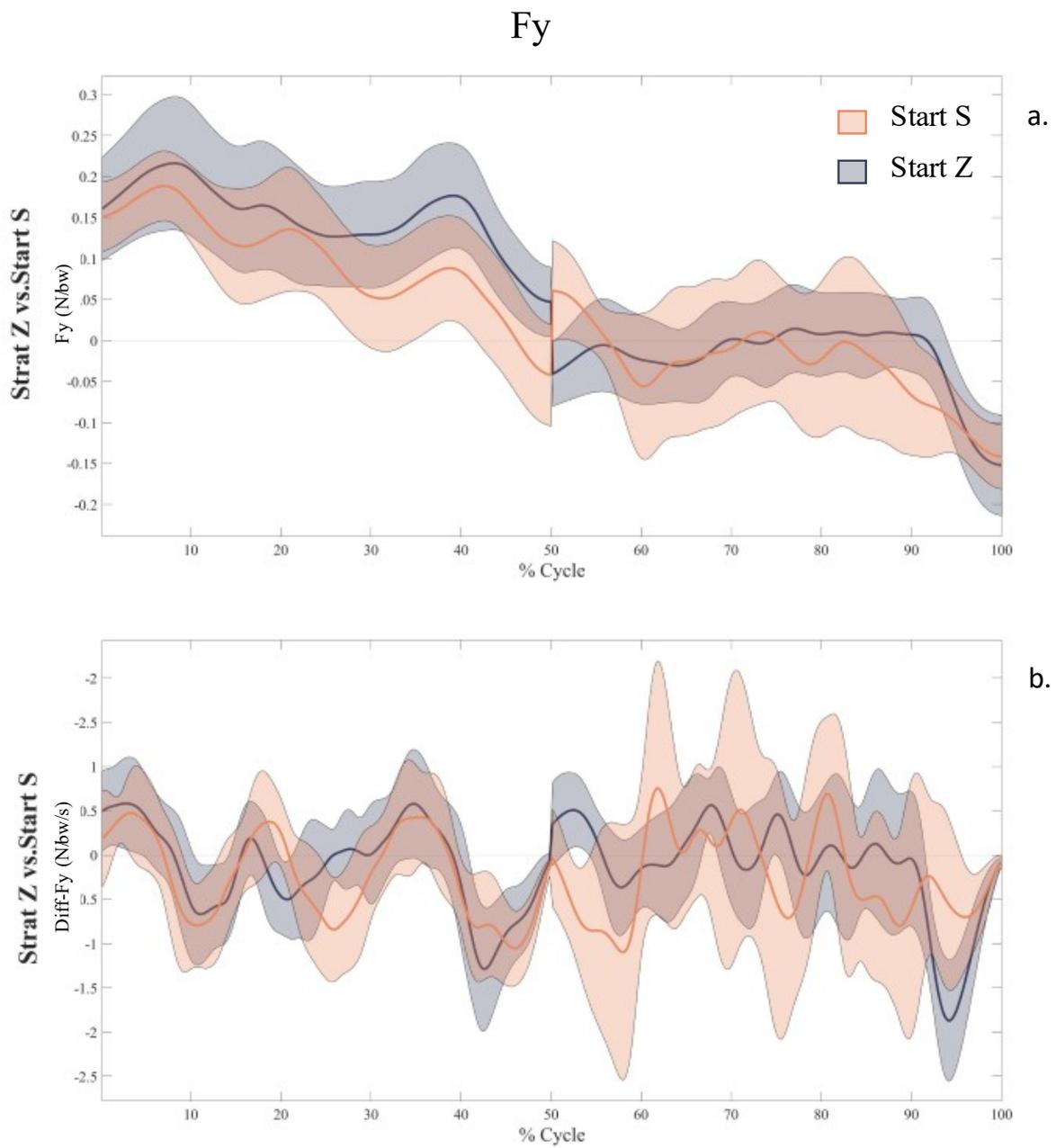


Figure 66 : Représentation graphique des résultats du T-test (SPM-1D), pour Fy et diff-Fy entre les skieurs de niveau homogène favorisant une stratégie de ligne en S (orange) et en Z (bleu).

Fz

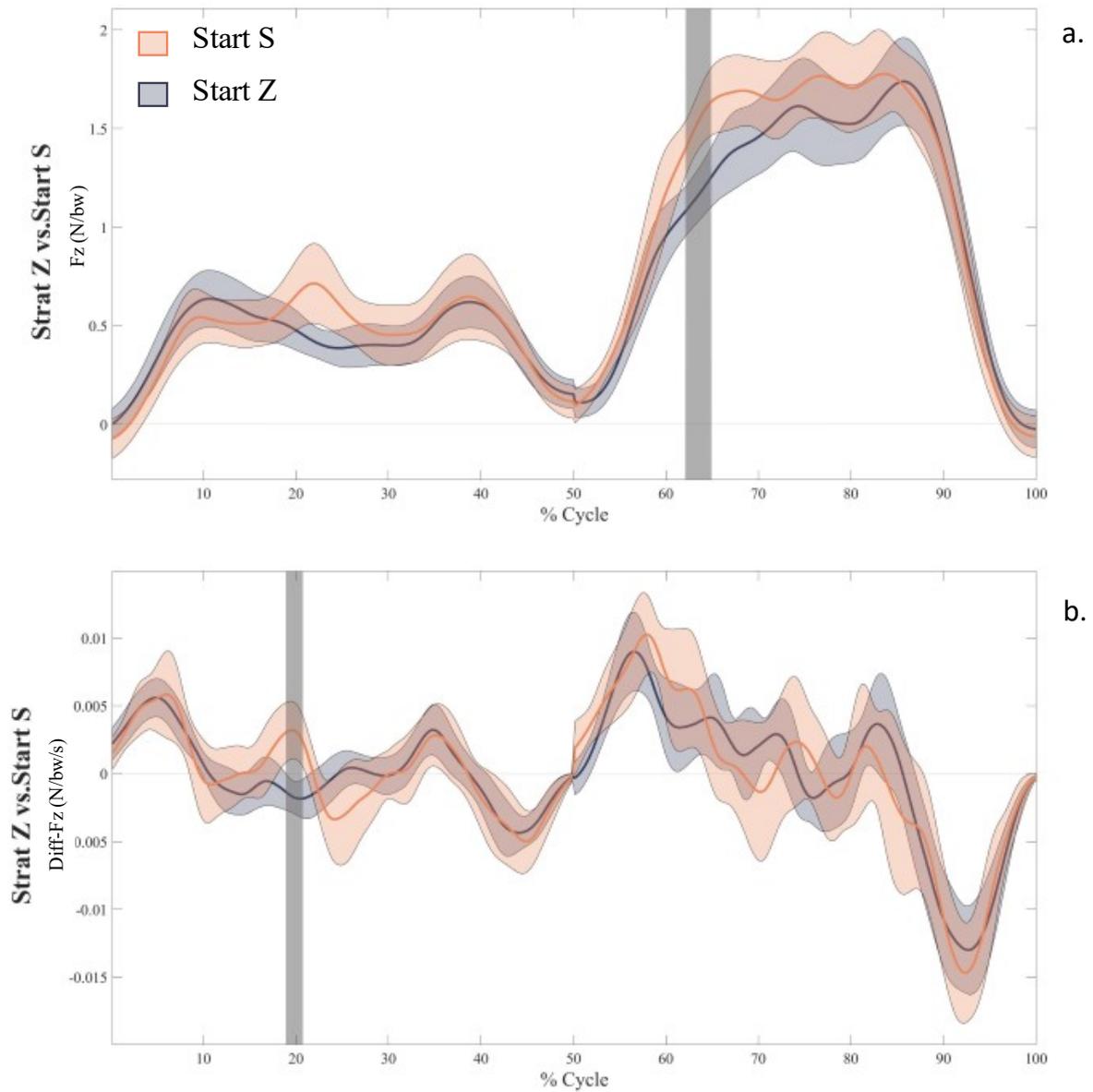


Figure 67 : Représentation graphique des résultats du T-test (SPM-1D), pour Fz et diff-Fz entre les skieurs de niveau homogène favorisant une stratégie de ligne en S (orange) et en Z (bleu). Les zones de significativité sont représentées par des bandes grisées.

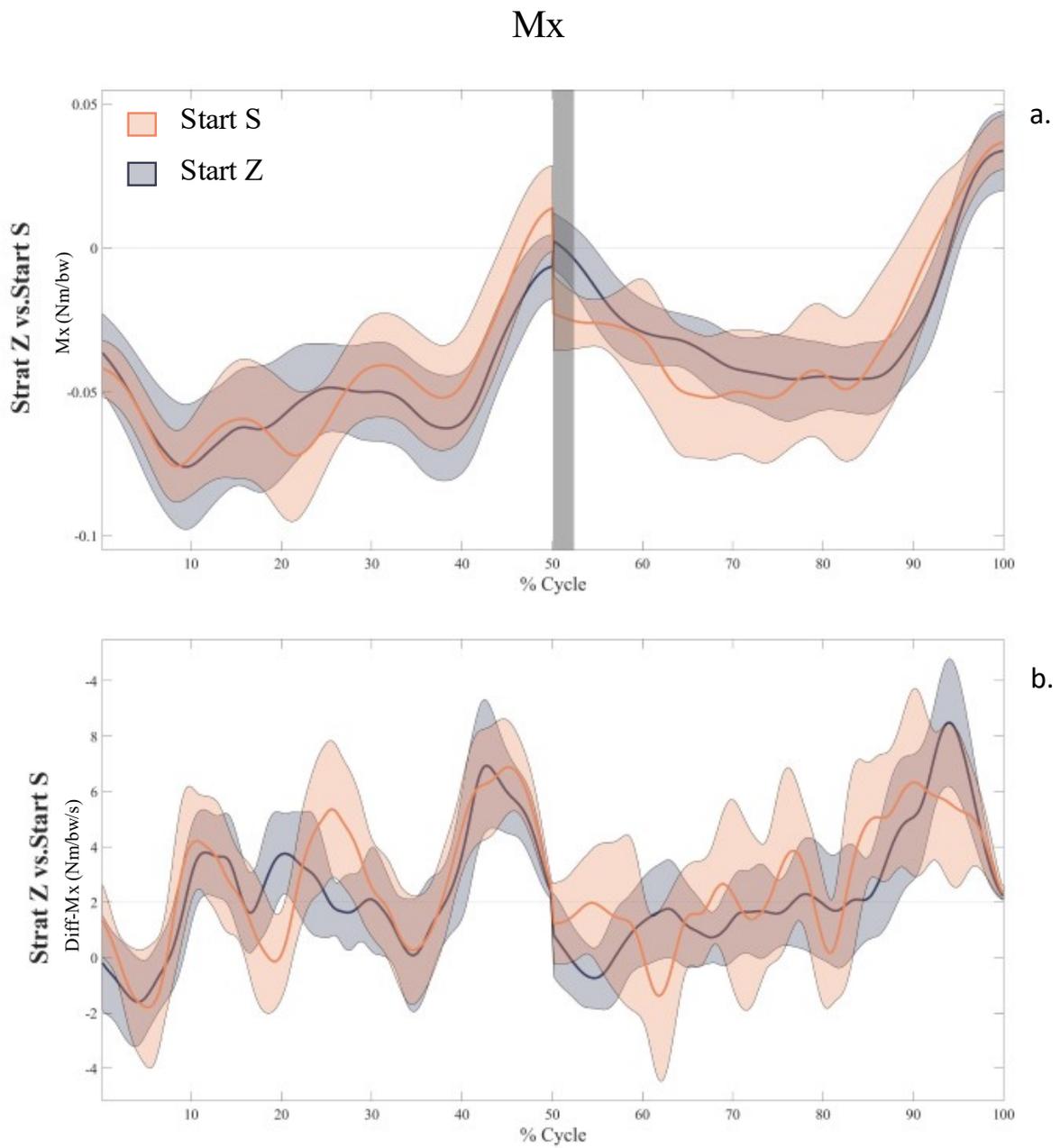


Figure 68 : Représentation graphique des résultats du T-test (SPM-1D), pour Mx et diff-Mx entre les skieurs de niveau homogène favorisant une stratégie de ligne en S (orange) et en Z (bleu). Les zones de significativité sont représentées par des bandes grises.

My

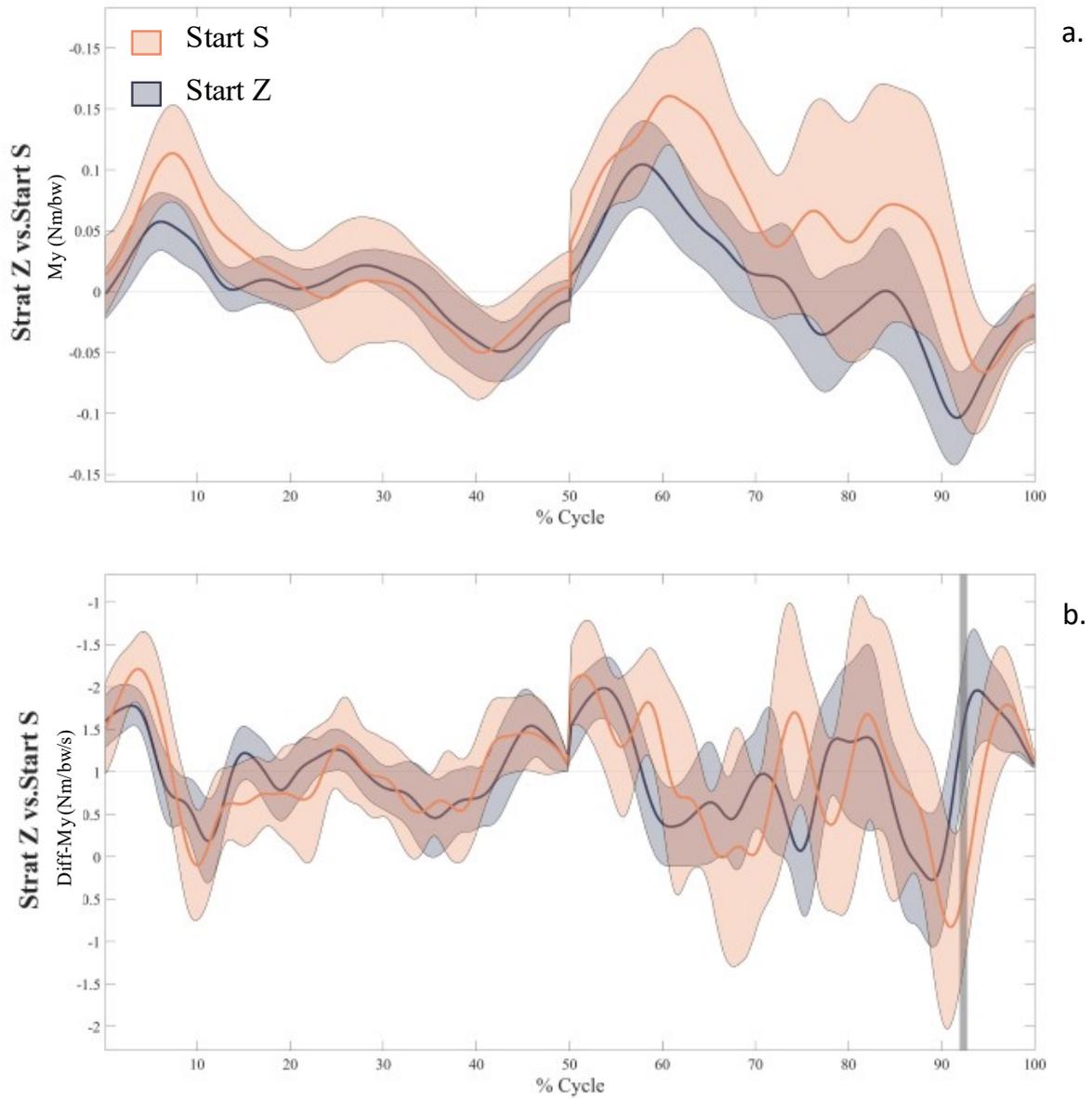


Figure 69 : Représentation graphique des résultats du T-test (SPM-1D), pour My et diff-My entre les skieurs de niveau homogène favorisant une stratégie de ligne en S (orange) et en Z (bleu).

5.3.2.3.4 Discussion :

Grâce à de larges amplitudes la rendant moins sensible aux bruits et un pattern directement associé à la motricité du skieur (partie 5.1.4), la signature de force en F_z permet d'observer le plus de différences entre les stratégies de virage. Les différences observées sur l'axe Z démontrent une prise de carre plus progressive des skieurs privilégiant la stratégie en Z (Figure 67). Cette caractéristique a déjà été observée pour l'ensemble de la population dans les virages en sur-vitesse. Précédemment, nous avons attribué ce comportement à une entrée en dérive durant laquelle le skieur dérape dans la première partie du virage. Durant cette période, les skis ne sont plus alignés avec le déplacement du CG du skieur et celui-ci dissipe beaucoup d'énergie cinétique. Ce comportement permet au skieur d'ouvrir sa trajectoire et de pouvoir débiter plus tardivement la phase de conduite. Une des spécificités d'une entrée en dérive est qu'au début de la phase de conduite, les skis sont déjà orientés vers le virage à suivre. Ce point réduit la nécessité de mettre en place les mécanismes d'initiation du virage suivant. D'un point de vue cinématique, ces virages sont caractérisés par une longue ligne droite et donc assimilés à une stratégie en Z. La prise de carre progressive chez les skieurs privilégiant cette stratégie en Z peut être associée (d'après nos interprétations dans la partie 5.3.2) à une entrée en dérive et à des mécanismes similaires à ceux observés dans les profils de virage en sur-vitesse. Même si aucune différence significative n'est observée, le moment Y vers l'avant à l'initiation du virage est en moyenne plus précoce (57% du cycle) et moins fort (0.10Nm) chez les skieurs privilégiant une trajectoire en Z par rapport aux skieurs privilégiant une stratégie en S (61% du cycle et 0.16Nm). Sur l'axe F_z , le plateau de force débute à 74% du cycle pour les skieurs privilégiant la stratégie en Z et 65% du cycle pour la stratégie en S. Les cinétiques des deux courbes se séparent à partir 57% du cycle. D'après notre interprétation, les skieurs utilisant la stratégie en Z appliquent un moment vers l'avant d'amplitude moyenne à 57% du cycle afin de débiter la conduite dérapée de l'entrée en dérive. Au contraire, la stratégie en S nécessite un moment vers l'avant de plus forte amplitude et plus tardif à l'initiation du virage dont le pic coïncide avec le début de la phase de conduite.

Ce résultat confirme notre hypothèse selon laquelle la signature de force des skieurs privilégiant une stratégie en Z est proche de la signature de force dans les profils de virage en sur-vitesse, notamment avec un comportement relatif à une entrée en dérive. Tout comme les profils de virage en sur-vitesse, la stratégie en Z implique des hauts contrastes d'énergie dissipée au cours du cycle. Ces virages se caractérisent par une phase de ligne droite où le skieur transforme beaucoup d'énergie potentielle en énergie cinétique et une phase de virage où le skieur dissipe beaucoup d'énergie cinétique par friction (Federolf, 2012). Nos observations tendent également à valider notre hypothèse selon laquelle les skieurs suivant une trajectoire en S expriment des valeurs de M_y en début de phase de conduite plus

importantes. Des valeurs plus tardives sont également observées (sans significativité). En revanche, aucune tendance n'émerge quant aux pentes plus importantes autour du pic de My vers l'avant.

Les skieurs privilégiant la stratégie en Z semblent également présenter une forme en U plus marquée du plateau sur le pied intérieur. Cette différence est conjointe à un pic de force en milieu de plateau (22% du cycle) sur les skieurs utilisant la stratégie en S. Sur le pied extérieur, on note un pic au timing similaire (77% du cycle). Il est possible que les skieurs privilégiant la trajectoire en S (caractérisée par la maximisation de la conduite coupée) génèrent une triple poussée durant l'appui, en début milieu et fin de phase de conduite. Ce pic peut aussi être associé au passage de la porte. Une analyse approfondie, notamment des événements temporels liés au passage de la porte au regard de la signature de force chez les skieurs utilisant cette stratégie nous permettrait d'évaluer ces hypothèses.

Contrairement à notre hypothèse, la trajectoire en Z n'influence pas l'intensité des valeurs positives de Mx en fin de virage. En revanche, une tendance montre que la variation de changement de signe en fin de virage est plus brusque et plus tardive chez ces skieurs. Ce point peut être interprété comme la conséquence d'une phase de complétion plus dynamique des skieurs utilisant la trajectoire en Z et d'un changement de carre plus tardif. Nous noterons aussi une différence significative entre les intensités de Mx entre les deux stratégies au milieu du cycle. Cette période significative succède au changement de référentiel du moment en X. Les skieurs suivant la stratégie en S appliquent un moment poussant le collier vers l'intérieur de la chaussure plus important entre 49.9 à 52.2% du cycle. On peut considérer que cette poussée débute dans le virage précédant (où le pied observé est le pied intérieur). Cette poussée de milieu de cycle est plus importante dans la stratégie en S. Pour résumer, on observe une poussée de milieu de cycle plus forte en intensité dans la stratégie en S et une poussée de fin de cycle plus brutale et tardive dans la stratégie en Z. Nous avons attribué précédemment le changement de signe de Mx en fin de virage (qu'il soit en milieu ou fin de cycle) aux actions de changement de carre et aux mécanismes de bascule du CG d'un côté à l'autre des skis. Une des interprétations que nous pouvons faire de ces résultats est que dans une stratégie en Z les mécanismes de changement de carre sont principalement liés à une poussée brutale et tardive sur le pied extérieur. Au contraire dans une stratégie en S, le changement de carre a lieu de manière plus équilibrée entre les skis intérieur et extérieur.

Il est important de garder en tête que les résultats présentés dans cette partie ne se basent que sur un très faible échantillon de population. Seuls sept cycles ont été analysés pour les sept sujets répartis en deux groupes. Les conditions de neige ont été vérifiées pour réduire au maximum la variabilité entre les sujets. Cependant, comme décrit dans l'introduction initiale, la variabilité des conditions de neige est inhérente à la pratique du ski alpin, qu'il soit pratiqué dans un objectif scientifique ou compétitif. Les résultats présentés dans la partie 5.3.2.3 sont donc à considérer comme des informations

exploratoires à l'évaluation des comportements en ski alpin. Ils ne peuvent être interprétés comme un comportement général des signatures de force au regard de la stratégie de trajectoire. Une étude complémentaire avec plus de sujets devra être réalisée afin d'évaluer ces interactions avec davantage de justesse et corroborer ou invalider les résultats présentés ci-dessus.

6 Discussion générale et perspectives :

Les résultats relatifs aux trois objectifs de travail ont été débattus séparément dans la partie 5. Nous ne reviendrons pas dans la discussion générale sur l'interprétation spécifique de chacun des résultats. Cette partie a pour objectif de décrire et de discuter de l'interrelation des résultats, puis des objectifs de travail entre eux. Nous discuterons aussi pour chacun des objectifs de thèse des applications pratiques et des perspectives scientifiques tout en détaillant les limites aux résultats observés.

Le **premier objectif de travail** était de mesurer les forces et les moments en 3D au cours d'un cycle typique en ski alpin et d'analyser ces évolutions au regard des différentes phases de virage. L'ensemble de cette description a permis de compléter la littérature scientifique avec des données récentes sur un échantillon de skieurs de niveau varié dans une situation de course en GS. Malgré des différences importantes avec certains articles de la littérature, autant sur la forme des signatures que sur leurs amplitudes nous sommes confiants quant à la validité de nos données et ce grâce à plusieurs arguments. Le nombre de sujets évalués est un des plus importants de la littérature scientifique contemporaine en science du ski. En effet, avec 17 skieurs de niveau varié réalisant un tracé de GS de type compétitif de 14 virages nous sommes proches de l'échantillon ayant rassemblé le plus de sujets pour une évaluation cinétique des caractéristiques de force (Nakazato et al., 2011). Nous avons pu déterminer des invariants de la signature de force typique en ski alpin sur les trois axes.

L'axe F_z est caractérisé par de grandes amplitudes de variation liées à la composante verticale du poids et aux forces radiales infléchissant la trajectoire du CG en direction du centre du virage. Ces grandes amplitudes participent à l'émergence de signatures de force stables suivant un pattern en créneau facilement identifiable. Cette forte stabilité de pattern associée à des amplitudes importantes, permet à ces signaux d'être moins sensibles aux bruits liés aux vibrations et aux microreliefs de la neige. Parmi l'ensemble des signatures de force mesurées sur notre échantillon, la signature sur l'axe F_z est celle qui implique le plus de différences significatives qu'elles soient liées au niveau de performance ou aux caractéristiques cinématiques du skieur. Dans la littérature, seuls quelques indices de la force sur l'axe Z étaient extraits des signaux pour comprendre ces interactions avec d'autres paramètres. L'analyse de la signature en F_z était généralement réduite à un calcul de force maximale ou moyenne durant l'appui (Jandova and Vaverka, 2008; Vaverka and Vodickova, 2010; Nakazato et al., 2011) ou durant des phases de l'appui découpées *a priori* (Falda-Buscaiot et al., 2017). L'apport de la méthode SPM permet de comparer des signatures de force sur l'ensemble du cycle ainsi que leurs dérivées, dans le but d'évaluer leurs interactions avec des paramètres de l'activité. Nos données mettent en avant deux zones souvent négligées dans les précédentes analyses. En effet, l'étude de la montée et du relâchement de carre selon leurs critères d'intensité, de pente et de temporalité notamment sur les

axes F_z et M_y , apportent des informations pertinentes sur le schéma moteur des skieurs en fonction de leur niveau ou de leurs trajectoires. De plus, l'inversion de signe de F_y et M_x en fin de cycle semble également être un indice discriminant entre les skieurs et les situations. Ainsi, même si F_z est l'axe qui concentre le plus d'attention, il est important de noter que les signatures sur les autres axes notamment F_y , M_x et M_y révèlent des différences importantes de comportement entre les skieurs et les virages. Cependant, la stabilité de ces marqueurs est plus faible que ceux extraits de F_z . Leurs interactions globales avec la performance ou avec le profil de virage sont plus difficiles à déterminer. L'analyse de ces interactions nécessite, de fait, des volumes de mesure importants dans l'objectif de diluer statistiquement les bruits de mesure liés aux microreliefs de la neige. Enfin, nos données et résultats mettent en évidence la faible importance de F_x et M_z dans l'analyse de la signature de force. Ces deux axes présentent des intérêts moindres pour des raisons différentes. La signature en F_x pourrait être associée à un témoin de la friction entre le ski et la neige. Cet axe est donc grandement influencé par les conditions nivologiques durant l'expérimentation (Colbeck, 1994; Supej et al., 2013; Mössner et al., 2014). De plus, le design expérimental de notre plateforme de force implique une modification du signal en F_x induit par la flexion longitudinale du ski. Même si la méthode de calibration vise à minimiser son influence celle-ci est non-nulle et limite de fait l'interprétation des signaux sur cet axe. Comme détaillée précédemment, cette caractéristique est commune aux autres expérimentations de mesures cinétiques de la force en ski alpin et cet axe est très peu détaillé dans la littérature (Meyer et al., 2019). Le faible intérêt de la signature de force M_z réside dans son faible rapport signal sur bruit. La faible amplitude de son signal vient de l'absence de force de réaction importante pour s'opposer à ces mouvements, alors qu'un bruit important provient des vibrations aléatoires liées aux microreliefs et au rataillage entre le ski et la neige (Spörri et al., 2017).

Le **deuxième objectif de travail** était de quantifier l'influence du niveau de performance sur la signature de force au cours de cycles de ski alpin. Il consistait également à évaluer les sous-hypothèses spécifiques décrites dans la partie *Analyse descriptive des signatures de force 3D* (partie 3.1). Au regard de la faible quantité d'informations dans la littérature scientifique, la définition de marqueurs reposant sur la description des signatures de force réalisée dans la partie 5.1 était nécessaire. Plusieurs de ces marqueurs des signatures de force ont été évalués comme sensibles au niveau de performance. Ces marqueurs peuvent être définis à partir de l'analyse SPM des signatures et des dérivées des signatures. Ils apportent donc des informations quant à l'influence du niveau de performance sur l'intensité et les pentes des signatures de force. Nous avons également mis en évidence l'influence d'autres marqueurs des signatures de force basés sur des rapports d'intensité entre les deux pieds ou entre différents instants de l'appui. Notre expérimentation propose une analyse globale de ces marqueurs au regard du niveau de performance. L'ensemble des résultats est détaillé dans la partie 5.2.4. Il est possible

d'extraire de ces résultats plusieurs informations globales sur cette interaction ayant des conséquences directes sur la motricité du skieur. Avec l'augmentation du niveau de performance, les niveaux de forces subies sur F_z sont plus importants durant le plateau et sont associés à des pentes de montée et de relâchement de force plus abruptes. Il est intéressant de mettre ces résultats en relation avec ceux obtenus par M. Cross dans ses travaux de thèse et son article associé (Cross et al., 2020) qui révèlent l'existence de capacités de forces spécifiques aux besoins des disciplines de ski et des niveaux de performance. Notons que les résultats présentés dans cet article ne se concentrent que sur une population de haut niveau qui représente la partie haute du spectre étudié dans notre travail de thèse. Le protocole expérimental consistait à réaliser des tests dynamiques et isométriques afin de quantifier le profil musculaire (force-vitesse ; F_0 et V_0) des skieurs des équipes de France de ski A, B et C dans les disciplines technique (TECH) et de vitesse (SPEED). Les athlètes affichaient une prépondérance de base pour la production de force dynamique à basse vitesse. En comparaison à une cohorte d'athlètes en athlétisme (Jiménez-Reyes et al., 2014), les skieurs produisent un F_0 considérablement plus élevé en termes absolus et relatifs tout en produisant une P_{max} plus faible probablement causée par une diminution de la puissance à des vitesses plus élevées. De manière générale la force maximale isométrique (F_{max}) et les vitesses maximale et moyenne de montée en charge (RFD_{max} et RFD_{avg}) sont comparables aux valeurs rapportées dans la littérature. Toutes les mesures sauf une (RFD_{max} normalisée au poids de corps pour SPEED), étaient de modérément à très fortement corrélées à la performance (définies par les classements FIS dans leurs disciplines) dans les deux disciplines (Figure 70).

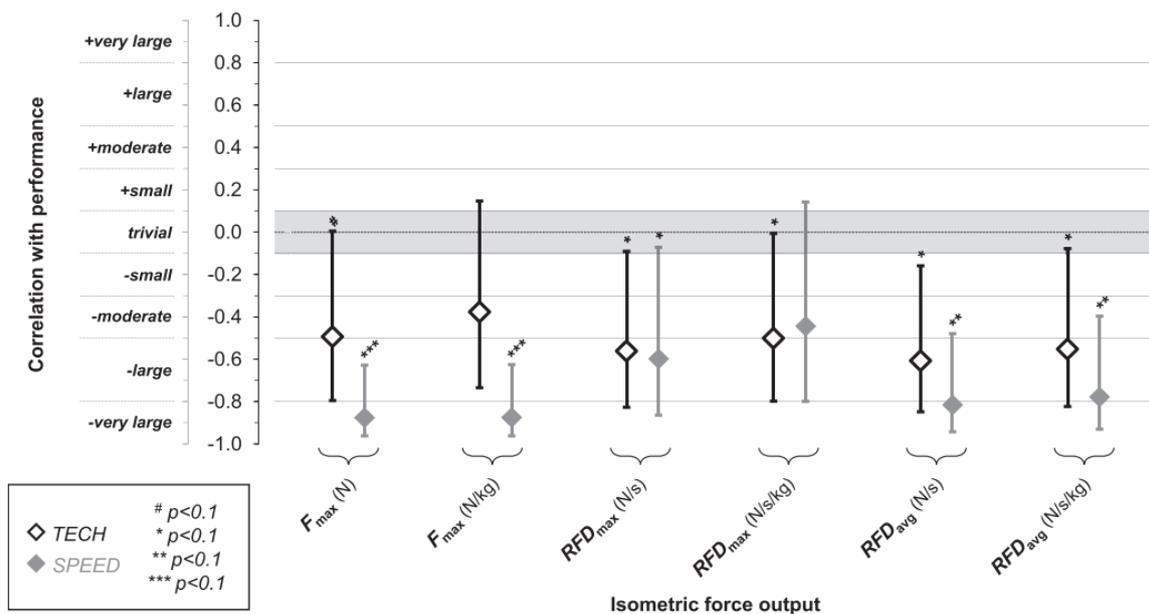


Figure 70 : Représentation des corrélations entre les variables de force isométrique et les performances. Les données correspondent à la corrélation de Pearson moyenne (losange), avec les barres d'erreur représentant les intervalles de confiance à 95%. Skieurs TECH (noir) et SPEED (gris). Les variables évaluées sont : la F_{max} , la force isométrique maximale ; la RFD_{max} , (taux maximum de développement de la force), et la RFD_{avg} , (taux moyen de développement de la force). Issue de Cross (2020).

Ainsi, les caractéristiques musculaires caractérisant le niveau des athlètes correspondent aux différences d'application de signatures de force observées dans nos données. Le besoin d'appliquer de la force brusquement, observé sur nos mesures lors de la prise de carre est relié aux capacités de RFD_{max} et RFD_{avg} . Les skieurs de haut niveau qui maximisent ces capacités sont également ceux qui présentent, sur neige, les plus fortes intensités de montée en charge au début de la phase de conduite. De la même manière, les hauts niveaux de F_z subis durant la phase de conduite par les meilleurs skieurs nécessitent des capacités supérieures de force maximale isométrique. Ces capacités ont été observées chez ces skieurs, comme rapporté dans l'article de Cross et al. (2020). Les disciplines techniques, sont caractérisées par des virages plus courts et une variabilité de situation de course plus importante que les disciplines de vitesse. Elles requièrent donc, de fait, des habilités techniques plus importantes, et d'après l'auteur, peuvent compenser en partie un déficit de caractéristique musculaire. On y retrouve également une plus grande variabilité de morphotypes de skieurs et de profils stratégiques de trajectoire. Les auteurs supposent que les différences observées dans leur étude s'expliquent en partie par les exigences chroniques uniques du ski alpin - et plus spécifiquement des disciplines - sur les athlètes. Plus largement, ces résultats associés à ceux détaillés dans cette thèse, pourraient soutenir des associations plus directes entre les qualités physiques spécifiques et la performance en ski alpin. L'application effective de la force dans toutes les disciplines du ski est liée à la fois à la capacité

physique et à la capacité technique de l'appliquer. L'amélioration des capacités de production de force spécifique est un moyen d'améliorer la performance à la condition que le skieur ait le niveau technique pour la mettre en application. Dans le cas inverse, l'amélioration de la capacité athlétique spécifique pourrait permettre aux athlètes de travailler à un pourcentage relatif inférieur à leur maximum, de devenir plus efficaces sur le plan métabolique et de moins subir les conséquences d'une activité de ski soutenue (Turnbull et al., 2009). Une autre possibilité est qu'un athlète, avec des capacités de force accrues, puisse produire des forces supplémentaires lorsque nécessaire (rataillage, erreurs, sauts, virages clés...), afin d'éviter les erreurs et gagner par la suite un temps précieux. Dans tous les cas, la relation est probablement plus compliquée que détaillé ici. Des recherches plus poussées devraient examiner et clarifier l'association entre les capacités physiques spécifiques et la production de force sur la neige.

En plus des pentes de prise et de relâchement de carre plus élevées détaillées ci-dessus, nos résultats mettent en avant des proéminences de F_z plus marquées et une anticipation des marqueurs cinématiques de changement de carre chez les skieurs de haut niveau. Nous avons associé ces marqueurs à une prédilection des skieurs de haut niveau à l'utilisation d'un allègement plus marqué et d'une transition par avalement. Comme vu précédemment, les capacités de RFD ont un rôle important à jouer dans les transitions par impulsion. D'importantes caractéristiques techniques semblent également nécessaires à la réalisation de ces transitions. Pendant les phases d'allègement plus longues et plus marquées, le skieur réduit ses interactions ski-neige. Cette réduction induit certes une diminution des frictions ski-neige pendant cette période mais réduit également les possibilités pour le skieur de modifier sa trajectoire, sa vitesse ou son équilibre.

Les résultats des études sur les modifications angulaires du genou et du bassin en GS (Alhammoud et al., 2020) détaillés dans la partie 1.1.1 rapportent une contraction concentrique en fin de cycle uniquement sur le pied intérieur et excentrique sur le pied extérieur. La proéminence de F_z marquée sur la jambe intérieure peut donc être considérée comme l'origine musculaire de l'allègement entre deux virages. Cependant, ce sont les niveaux de proéminence de PIP3 et PIP5 sur la jambe extérieure qui sont corrélés au niveau de performance. Nous pouvons interpréter la corrélation entre performance et proéminence de PIP5 sur le pied extérieur comme une tendance des skieurs de haut niveau à favoriser la libération de l'énergie élastique stockée dans le ski et la chaussure au cours du virage. L'utilisation de libération d'énergie pour propulser le skieur en fin de virage dans le suivant permet une économie d'activation musculaire par les athlètes. Elle nécessite en revanche des capacités techniques et physiques élevées du skieur pour être réalisée au bon moment tout en conservant son équilibre. Il semble donc logique que ce comportement soit de plus en plus observé avec l'augmentation du niveau de performance des skieurs car il implique des qualités techniques plus

spécifiques. Les skis utilisés dans cette expérimentation sont des skis de compétition adaptés à un niveau élevé de type course FIS (compétitions organisées permettant à de jeunes athlètes d'accumuler les points FIS). Le niveau de performance requis pour exploiter l'intégralité du potentiel élastique des skis est certainement supérieur au niveau de nos sujets les plus faibles. *A contrario*, les skis utilisés sont moins performants que ceux utilisés habituellement par les meilleurs athlètes de notre étude. Ainsi, la prédominance des skieurs de meilleur niveau à utiliser l'énergie stockée dans le matériel peut être attribuée à leurs capacités techniques et physiques. En effet, la quantité d'énergie élastique stockée dans un système est dépendante du produit, de sa raideur et de sa déformation. Comme vu précédemment, le moment Y vers l'avant à l'initiation du virage et les forces radiales dans les phases de conduite sont les outils principaux du skieur pour déformer son ski. Avec un complexe ski/chaussure de plus faible raideur, l'intensité des actions du skieur pour les fléchir à l'initiation sera plus faible. Ainsi durant la phase de conduite, une flexion équivalente à celle d'un ski plus raide peut être atteinte à des vitesses plus faibles. Cependant, un ski à la raideur trop faible ne permettra pas de transmettre l'intégralité des forces radiales à la neige réduisant de fait le seuil de forces de friction latérales maximum et avec elles les vitesses de passage maximum des skieurs en conduite coupée (Lind and Sanders, 2004). De plus, un ski avec une raideur plus faible stockera moins d'énergie sous forme élastique pour la restituer au skieur en fin de virage, impliquant une plus faible disposition à utiliser une transition par impulsion. A l'inverse, un ski très raide pourra stocker beaucoup d'énergie mécanique, mais nécessitera des forces radiales très élevées pour générer la déformation déclenchant la conduite coupée. Il est donc nécessaire d'ajuster au mieux le niveau de raideur du ski au skieur et aux forces radiales qu'il sera capable d'appliquer et de supporter pour déformer les skis. Cette réflexion entraîne la question suivante : Les marqueurs d'une transition par impulsion, observés sur la signature de force chez les meilleurs skieurs, seraient-ils toujours corrélés au niveau de performance si le niveau de raideur des skis était proportionnel au niveau des skieurs ? Plus la raideur des skis utilisés est importante plus ils nécessitent un niveau physique et technique important pour être skiés (LeMaster, 2009; Zorko et al., 2015; Reid et al., 2020). Ainsi le choix de skis plus raides encore (type WC), aurait pu permettre de générer des différences cinétiques et cinématiques entre les skieurs encore plus importantes. Mais l'utilisation de skis de coupe du monde, aurait entraîné l'absence de conduite coupée chez une grande partie des skieurs dans l'impossibilité de déformer les skis longitudinalement (Scott et al., 2007; Yoneyama et al., 2008, 2010) impliquant une comparaison biaisée entre les skieurs n'utilisant pas la même motricité. A l'inverse l'utilisation d'un ski adapté aux skieurs de plus faible niveau n'aurait pas permis aux skieurs de haut niveau d'atteindre les intensités de force élevées qu'eux seuls sont capables de supporter. Ce dilemme du choix des skis a donc une influence directe sur les résultats observés. Ainsi, le choix de skis d'un niveau de performance intermédiaires, pourrait être l'origine de certains résultats observés. La répartition de F_z sur le pied extérieur augmente avec le

niveau des skieurs jusqu'à un certain niveau. Ce niveau critique est celui où la raideur du ski est trop faible pour transmettre les contraintes cinétiques induites par les caractéristiques cinématiques du virage à la neige. Les skieurs de niveau intermédiaire sont ceux qui présentent la part de force sur le ski extérieur la plus importante. Ce résultat pourrait être expliqué par l'hypothèse selon laquelle les skis utilisés sont optimaux pour leur niveau. D'autres hypothèses peuvent expliquer ce résultat, notamment la saturation de la force qui doit être supportée musculairement sur le ski extérieur à partir d'un certain niveau de performance. La force normale sur le pied extérieur est corrélée au niveau de performance (Figure 47). Cependant, il semble que cette force sature à 1.5 N/bw sur la jambe extérieure. Cette valeur s'approche du maximum physique des athlètes de haut niveau. Il n'y a pas dans la littérature de données pertinentes sur la force maximale isométrique sur la jambe extérieure chez les skieurs. A partir des articles récents sur les skieurs de haut niveau, la force maximale sur les deux membres inférieurs est d'environ 3.6 à 3.9 N/bw (Cross et al., 2020). Ces données semblent être en accord avec les données précédemment mesurées sur d'autres échantillons de skieurs professionnels. La force bilatérale est inférieure d'environ 8% à la somme de force de chaque jambe (Škarabot et al., 2016), ce qui nous permet de faire une approximation de la force maximale isométrique sur une jambe des skieurs de haut niveau à 1.65 N/bw. Cette valeur théorique de force maximale sur un ski est supérieure à celle approchée par les skieurs sur la neige. Cependant, en prenant en compte la répétition des contractions au cours des virages et les contraintes supplémentaires liées à l'application de la force en ski, l'hypothèse de répartition des forces entre les deux skis dues à la saturation de la force supportée par la jambe extérieure est plausible.

En conclusion de ce deuxième objectif de travail, nous pouvons affirmer que la signature de force en 3D est influencée par le niveau de performance des athlètes. L'intensité, la temporalité des événements, les pentes d'évolution et les formes des signatures sont des marqueurs de la motricité des skieurs. Ils peuvent être rattachés à des comportements moteurs plus ou moins adoptés par les skieurs en fonction de leur niveau. De ce fait, la forme de la signature de force (indépendamment de son intensité) semble liée à des comportements moteurs spécifiques à des niveaux d'athlètes. La variabilité des comportements intra- et inter skieurs dans leur motricité n'a pas été quantifiée dans l'analyse de nos données. Les interprétations réalisées dans ce travail de thèse se basent donc sur des conduites globales estimées. Ainsi, une analyse qualitative des signaux en fonction d'événements spécifiques apparus lors du virage (dérive, rataillage, faute d'intérieur, transition par avalement ou impulsion) pourrait compléter la description des signatures réalisée précédemment. En ce sens, un design expérimental basé sur des consignes de conduites motrices pourrait également permettre une meilleure compréhension des signaux et confirmer les interprétations que nous avons établies entre les marqueurs de la signature de force et le comportement du skieur.

Les résultats présentés dans la partie 5.3 autour du **troisième objectif de travail** révèlent pour la première fois les effets des singularités cinématiques sur les signatures de force. La classification des virages en profils, basée sur les situations de course et leurs objectifs respectifs, est une méthode innovante dans l'analyse des comportements des skieurs. La plus grande majorité des études biomécaniques analysant le ski alpin ne se sont focalisées que sur les profils de virage où le skieur avait atteint sa vitesse barrière et cherchait à la maintenir (virages que nous avons classifiés dans les profils sur-vitesse). Ces études proposent des designs expérimentaux où les virages étudiés sont précédés de plusieurs virages de prise de vitesse par le skieur (Lesnik and Zvan, 2007; Supej et al., 2011; Gilgien et al., 2016; Spörri et al., 2018a). Dans notre expérimentation, seuls les tous premiers virages contenant encore du pas de patineurs ont été exclus. Le tracé varié permet de recréer à plusieurs occasions des situations où le skieur est en recherche de vitesse. Cette méthode a permis de mettre en avant les différences importantes de signature de force sur F_z entre les différents profils de virage. On observe alors des variations notables de la durée du plateau, des pentes de montée et de relâchement de charge, et d'équilibre entre les intensités en début et fin de conduite entre les profils de virage. Certains marqueurs comme l'augmentation de la force F_z durant le plateau sont toujours corrélés au niveau de performance, quel que soit le profil de l'athlète ou du virage. Les résultats présentés dans le Tableau 6, nous indiquent d'ailleurs que les marqueurs de la signature de force extraient par *Feature Extraction* sont peu sensibles au profil stratégique des skieurs. Cependant, une partie de nos résultats souligne l'importance du tracé et de l'objectif du skieur dans sa motricité. Ceci implique l'intégration de ce point dans les futures interprétations des signatures de force ou plus globalement de l'analyse biomécanique de l'activité. En effet, nous avons caractérisé dans la partie 5.2 la pente de montée en charge et la valeur de $PIP3out$ comme des marqueurs de la performance du skieur. Cependant, dans les situations de sur-vitesse (les plus étudiées dans la littérature) les entrées en dérive réduisent l'importance du début de la phase de conduite au profit de la fin de celle-ci. Les marqueurs précédemment cités deviennent secondaires dans la performance du skieur dans ces virages en sur-vitesse. La prise en compte du profil de virage permet de modifier l'interprétation faite de certains paramètres calculés dans ce travail de thèse. Ainsi, l'absence de corrélation de $\Delta PIP3out$ (différence de F_z entre le début et la fin du plateau) s'explique par la nécessité pour les athlètes de faire varier ce paramètre en fonction des profils de virage. Les sections en sous-vitesse sont caractérisées par un $\Delta PIP3out$ proche de zéro. Au contraire, les virages de profils plats ou en sur-vitesse sont eux caractérisés respectivement par des $\Delta PIP3out$ fortement positifs et négatifs. Enfin dans les virages de profil sous-vitesse, les intensités de F_z à la fois en début et en fin de plateau sont corrélées au temps de course. Nous avons précédemment considéré cette forme en U des plateaux de signature de force comme un marqueur de l'utilisation de transition par impulsion. Cette conduite motrice est corrélée avec le niveau de performance et aussi exacerbée par les meilleurs skieurs dans les sections de sous-

vitesse (partie 5.3.1). Ainsi l'analyse comparée entre des athlètes, du matériel ou des conduites motrices doit être interprétée en prenant en compte la situation de course spécifique dans laquelle elle est évaluée. Les marqueurs d'analyse sélectionnés doivent être déterminés de manière cohérente avec les objectifs du skieur dans la section de piste étudiée. Ces points entraînent une adaptation méthodologique pour les prochaines études visant à découper les différentes sections de la course au regard des objectifs moteurs du skieur afin de réaliser une analyse spécifique. La spécificité des profils de virage (définie par le tracé et la vitesse relative du skieur par rapport à sa vitesse barrière) est généralement bien intégrée par les acteurs du milieu fédéral dans les entraînements. Nous incitons cependant les skieurs et les entraîneurs à adapter les consignes d'entraînement afin de contraster les conduites motrices au regard des caractéristiques du virage.

Les informations relatives aux spécificités des skieurs détaillées dans la partie 5.3.2 sont issues d'une base de données trop faible pour en tirer des conclusions générales. Ces résultats peuvent cependant nous apporter des informations visant à explorer plus en détails les spécificités des athlètes et des choix de trajectoire. Il en émerge la mise en évidence de différents profils d'athlètes favorisant des typologies de trajectoire opposées qui cohabitent au sein d'un même niveau de performance. Il est pour le moment impossible de déterminer si ces profils d'athlètes émergent en conséquence de caractéristiques musculaires et techniques intrinsèques ou en réponse à des contraintes environnementales telles que la nivologie ou le matériel. Les informations recueillies sur le faible échantillon d'athlètes étudié mettent en évidence des similarités entre la signature de force moyenne des skieurs privilégiant la trajectoire en Z et la signature de force moyenne de l'ensemble des skieurs dans les sections en sur-vitesse. La trajectoire en Z est caractérisée par un important gain de vitesse entre les phases de conduite (Federolf, 2012). De fait, la typologie de virage en Z implique l'apparition plus fréquente de vitesses de déplacement supérieures à la vitesse barrière chez les skieurs la favorisant. Cela induit pour ces skieurs de devoir plus souvent réaliser des virages en sur-vitesse appliquant ainsi les conduites motrices typiques de celle-ci. Ces skieurs vont donc plus souvent privilégier des entrées en dérive pour réaliser leurs virages. Durant une entrée en dérive, le skieur dérape en ligne droite durant la première partie du virage. De ce fait, la trajectoire en Z de son centre de gravité est renforcée par cette motricité. Ce point remet en question l'existence réelle de la trajectoire en Z. Pour reprendre notre définition primaire : la stratégie de ligne en Z repose sur la maximisation du transfert d'énergie potentielle en énergie cinétique pendant la phase de ligne droite, suivie d'une trajectoire la plus proche possible de la ligne de pente pendant la partie tournante du virage. Les skieurs prolongent au maximum la phase de ligne droite en retardant l'initiation de la partie tournante permettant un gain de vitesse important entre les virages. Cette stratégie est aussi caractérisée par des virages plus serrés demandant de meilleures capacités techniques pour conserver

une conduite coupée. Une autre caractéristique de la stratégie en Z est une distance parcourue plus courte et des rayons de courbure plus courts que la stratégie en S (Hébert-Losier et al., 2014). D'après cette définition, la stratégie de trajectoire en Z n'intègre pas l'entrée en dérive. Pourtant, l'entrée en dérive produit des trajectoires de centre de gravité en Z. Une partie des virages que nous avons considérés comme suivant une trajectoire en Z sont, dans les faits, la conséquence d'une entrée en dérive. Il est donc difficile d'affirmer quelle part des trajectoires en Z observées est typique de la stratégie de ligne en Z et quelle part d'une entrée en dérive ?

L'ensemble des résultats décrits et discutés dans ce travail de thèse sont issus d'une seule base de données obtenues sur une période d'expérimentation unique. Ce point est en partie dû à la difficulté actuelle en science du ski d'obtenir des données expérimentales. L'expérimentation sur neige nécessite des outils de mesure spécifiques soumis à des contraintes environnementales extrêmes liées au froid et à l'humidité inhérentes à l'environnement alpin. Ces outils sont également soumis à des niveaux de chocs et de vibrations importants liés à l'activité d'autant plus dans un tracé compétitif. L'expérimentation sur neige ne peut être réalisée que durant des périodes spécifiques de l'année, réduisant les périodes potentielles de mesure. Elle nécessite une coordination logistique importante afin de sécuriser et fermer au public un secteur de mesure sur un domaine skiable ouvert. L'accès aux athlètes doit aussi coïncider avec leur calendrier rempli par les compétitions hivernales. Les contraintes météorologiques complexifient aussi la planification. Enfin, une « pandémie mondiale » n'a pas facilité les possibilités de réaliser des expérimentations complémentaires à celle présentée ici. Le fait que ce travail de thèse repose sur une expérimentation unique induit plusieurs limites méthodologiques. Comme nous l'avons détaillé dans la partie 1.2.1, le premier du classement est le skieur plus performant dans sa condition de course que les autres dans les leurs. Cette caractéristique des compétitions de ski alpin semble déjà en contradiction avec la méthode scientifique visant à comparer toutes choses égales par ailleurs. Les choix méthodologiques présentés dans le protocole ont été réalisés afin de réduire au maximum les biais non quantifiables tout en visant la mesure d'un large échantillon de population. La résolution de certains biais présents dans notre protocole (discutés plus en détail dans la suite du document), sont soit impossibles à mettre concrètement en place durant une expérimentation, soit génèreraient d'autres biais non quantifiables.

Le biais le plus important entre les athlètes réside dans la variation des conditions météorologiques et nivologiques au cours des 5 semaines d'expérimentations. Afin de limiter au maximum les conséquences de ces variations sur nos données, nous avons reporté toutes les journées d'expérimentation où la visibilité était dégradée. Les journées d'expérimentation ont également été reportées si la nuit qui précédait l'expérimentation n'était pas suffisamment froide pour regeler la

neige. Enfin, durant la fin de la période d'expérimentation, la température au lever du soleil était moins froide et le réchauffement de la piste arrivait également plus rapidement. Les expérimentations se sont alors concentrées en début de matinée afin de conserver des températures plutôt faibles (inférieures à 8°C). Sur ces périodes, pour éviter le ramollissement trop important de la neige, celle-ci était salée afin de la durcir. Ces précautions n'évitent pas des différences de conditions nivologiques entre les skieurs mais visent à réduire au maximum l'amplitude de ces différences. Les plus mauvaises conditions de neige ont été rencontrées en fin de période d'expérimentation. Cependant, l'ordre de passage des skieurs au cours de la période d'expérimentation est décorrélié du niveau de performance globale ($r=0.07$, $p=0.78$) ou de la stratégie ($r=0.15$, $p=0.552$ avec $t\%SL$). La répartition du niveau de performance des skieurs au regard des conditions de neige n'a pas influencée, d'après nous, les résultats globaux de ce travail de thèse.

L'autre source principale de biais est l'utilisation d'un matériel unique pour l'ensemble des expérimentations. Ce choix permet de faciliter la logistique sur le terrain et de normaliser un paramètre influençant la motricité. Mais, comme nous avons pu le discuter dans cette partie, le niveau de performance du matériel n'est pas optimal pour l'ensemble de la population et semble mieux convenir aux skieurs intermédiaires de notre échantillon. Les skis et les chaussures choisis respectaient les normes en vigueur en compétition FIS au moment de l'expérimentation. Aucun des skieurs n'utilisait le modèle de ski choisi dans sa pratique personnelle de l'activité. Ainsi l'utilisation de ce matériel pour les expérimentations implique une adaptation de tous les skieurs aux skis et aux chaussures. Pour faciliter celle-ci, nous avons proposé aux athlètes plusieurs descentes de familiarisation. Cette période avait pour objectif d'améliorer l'adaptation des skieurs aux outils de mesure mais aussi au complexe ski/chaussure/fixation d'expérimentation. Le temps d'adaptation de 2 à 4 descentes était relativement faible pour que le skieur acquiert une maîtrise parfaite des skis. L'augmentation de la durée de familiarisation du capteur n'était pas envisageable. En effet, elle aurait eu pour conséquence d'augmenter le temps d'expérimentation par sujet et donc d'augmenter les variations nivologiques entre les athlètes et de réduire la taille de la population étudiée. Enfin, les capteurs étant des modèles uniques nécessitant un perçage spécifique des skis, augmenter la durée de familiarisation à plusieurs jours aurait empêché la mesure sur d'autres sujets.

Les interactions entre la motricité en ski et le matériel sont peu détaillées dans la littérature scientifique. Certains articles rapportent des effets sur la motricité globale de la raideur de la chaussure (Noé et al., 2018), ou de la largueur au patin (Zorko et al., 2015). D'autres articles démontrent que la géométrie des skis (largueur en spatule et au patin ou longueur) influence le comportement énergétique des skieurs en descente (Gilgien et al., 2016; Spörri et al., 2016). Enfin, le side-radius des skis influence la signature de force sur le pied extérieur. Plus le radius est élevé, moins l'intensité de F_z

durant la phase de plateau est élevée diminuant la perception « d'agressivité du ski » par le skieur. Cependant, ces études se concentrent sur des skis de géométrie différentes, et aucune étude ne s'attarde sur l'influence de la construction interne du ski (à géométrie égale) sur la motricité, la cinétique ou la cinématique du skieur. Cependant, même si elles sont difficilement quantifiables, ces différences existent, sont connues (empiriquement) dans le milieu du ski et quantifiées de façon plus objective par les marques (Berger et al., 2018). Les matériaux utilisés et leurs raideurs, les épaisseurs de couches, les assemblages, les colles utilisées ou la préparation des carres influencent la motricité du skieur. Le nombre important de paramètres et leurs interactions rendent difficiles la quantification de ces interactions, et leur simple évaluation nécessite du temps et parfois la destruction du produit pour l'analyser. De ce fait, nous avons choisi d'imposer aux athlètes les skis et les chaussures utilisés dans l'expérimentation. Le choix du ski dans la gamme de Salomon pour l'expérimentation s'est porté vers un ski « le plus neutre possible », afin de limiter au maximum la prédominance d'une stratégie de ligne sur l'autre. Nous sommes conscients que cette différence entre le ski d'expérimentation et le ski habituellement utilisé par l'athlète peut générer une modification de la motricité habituelle du skieur. Cependant, ce choix méthodologique permet d'attribuer les variations de trajectoire aux skieurs uniquement et retire un facteur de variation de l'interprétation. Les importantes variations de stratégie dans le groupe de population homogène compris entre 28 et 30 secondes de temps de course attestent que plusieurs profils stratégiques peuvent émerger avec la même paire de skis. Ces différences auraient pu être amplifiées en utilisant des skis favorisant l'une ou l'autre des stratégies.

Nonobstant, nous ne pouvons exclure le fait que les biais liés à la nivologie, au faible temps de familiarisation ou à l'utilisation d'un matériel dont le skieur n'a pas l'habitude altèrent les mesures réalisées. Ainsi notre définition de la performance basée sur le temps de course englobe également la capacité d'adaptation de l'athlète aux matériels de ski et de mesure. D'après nous, la capacité d'un athlète à adapter sa motricité à des contraintes environnementales peut entrer facilement dans la définition de la performance à ski. Quelles que soient les variations dans les conditions expérimentales, les actions cinétiques et cinématiques réalisées par le skieur pendant la descente ont conduit à un temps de course que nous considérons comme le critère de performance. Ce critère est donc cohérent avec les actions réelles du skieur pendant la descente et non pas à une estimation *a priori* de son niveau.

L'interprétation des résultats présentés dans ce travail de thèse doit être globale et ne pas dépasser les hypothèses de travail que nous avons évaluées. Ainsi, les points de différenciation des signatures de force ou de la cinématique en fonction de la performance abordés ici doivent être considérés au regard du spectre total de l'échantillon. Rappelons que les meilleurs skieurs de l'échantillon sont des athlètes professionnels participant au circuit de coupe du monde et que de l'autre côté du spectre se

trouvent des skieurs amateurs, ne skiant dans un tracé que très occasionnellement. Les marqueurs de la signature de force liés à la performance permettent de comprendre des mécanismes globaux de celle-ci. Ils ne peuvent pas être appliqués directement à la caractérisation d'athlètes de très haut niveau ou donner des indications de coaching à haut niveau. L'objectif de ce travail de thèse est de comprendre les mécanismes globaux du virage en ski alpin entre des athlètes de niveaux très différents.

Enfin, les résultats de ce travail de thèse ouvrent des perspectives d'application dans le développement et la personnalisation du matériel de ski au niveau de performance et aux singularités cinématiques étudiées. Cette personnalisation des skis et des chaussures au profil stratégique de l'athlète ainsi que la considération des contraintes des différentes sections de virage pourraient avoir des conséquences dans le développement du matériel de ski de compétition. Ces questions relatives à l'évaluation du matériel, la compréhension des mécanismes sous-jacents (liant le matériel à la motricité en ski) et l'optimisation du matériel au skieur constituent une partie des problématiques explorées avec Salomon SAS au cours de ce travail de thèse. Les méthodes, les résultats et les applications liés à ces problématiques sont confidentielles et ne seront pas détaillés dans ce manuscrit de thèse.

7 Bibliographie :

- Adelsberger, R., Aufdenblatten, S., Gilgien, M., and Tröster, G. (2014). On bending characteristics of skis in use. *Procedia Eng.* 72, 362–367. doi:10.1016/j.proeng.2014.06.063.
- Alhammoud, M. (2019). Contribution à l'analyse de l'activité neuromusculaire des skieurs alpins d'élite lors de tests isocinétiques et en conditions réelles d'entraînement.
- Alhammoud, M., Hansen, C., Meyer, F., Hautier, C., and Morel, B. (2020). On-Field Ski Kinematic According to Leg and Discipline in Elite Alpine Skiers. *Front. Sport. Act. Living* 2. doi:10.3389/fspor.2020.00056.
- Bacharach, D. W., and Beltz, N. M. (2019). Bridging the Gap Between Science and Practice. in *Science and Skiing VIII*, eds. M. Karczewska-Lindinger, A. Hakkarainen, V. Linnamo, and S. Lindinger (Meyer & Meyer Sport Ltd), 20–28. doi:10.1037/032555.
- Barelle, C., Ruby, A., and Tavernier, M. (2004). Experimental model of the aerodynamic drag coefficient in alpine skiing. *J. Appl. Biomech.* 20, 167–176. doi:10.1123/jab.20.2.167.
- Berger, E., Schindelwig, K., Hasler, M., Nachbauer, W., Csapo, R., and Hofer, P. (2018). On the measurement of ski boot viscoelasticity. *J. Sci. Med. Sport.* doi:10.1016/j.jsams.2018.11.009.
- Boffi, G., Gilgien, M., and Wieser, A. (2016). Validation of GNSS-Based High-Precision Velocity Estimation for Outdoor Sports. *Int. Fed. Surv. FIG Work. Week.*
- Brierley, H., and Bartlett, R. M. (1991). A three-dimensional video analysis of the kinematic differences between experienced and novice skiers performing two types of parallel ski turn. in *Journal of Sports Sciences*, 395. doi:10.1080/02640419108729899.
- Brodie, M. A. D. (2009). Development of fusion motion capture for optimisation of performance in alpine ski racing: a thesis presented in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Science at Massey University, Wellington, New Zealand. doi:10.1007/s00702-010-0518-0.
- Brodie, M., Walmsley, A., and Page, W. (2007). Fusion integration: COM trajectory from a force platform. *J. Appl. Biomech.* 23, 309–314. doi:10.1123/jab.23.4.309.
- Brodie, M., Walmsley, A., and Page, W. (2008). Fusion motion capture: A prototype system using inertial measurement units and GPS for the biomechanical analysis of ski racing. *Sport. Technol.* 1, 17–28. doi:10.1080/19346182.2008.9648447.
- Caron, F., Duflos, E., Pomorski, D., and Vanheeghe, P. (2006). GPS/IMU data fusion using multisensor Kalman filtering: Introduction of contextual aspects. *Inf. Fusion* 7, 221–230. doi:10.1016/j.inffus.2004.07.002.
- Chung, F. L., Fu, T. C., Luk, R., and Ng, V. (2002). Evolutionary time series segmentation for stock data mining. in *Proceedings - IEEE International Conference on Data Mining, ICDM (Maebashi City - Japan)*, 83–90. doi:10.1109/icdm.2002.1183889.
- Colbeck, S. C. (1994). A review of the friction of snow skis. *J. Sports Sci.* 12, 285–295. doi:10.1080/02640419408732174.

- Cross, M., Delhayé, C., Bowen, M., Coulmy, N., Morin, J.-B., Hintzy, F., et al. (2019). Magnitude and relationship between force output and performance in giant slalom. in *Science and Skiing VIII*, eds. M. Karczewska-Lindinger, A. Hakkarainen, V. Linnamo, and S. Lindinger (Meyer & Meyer Sport Ltd), 80–87.
- Cross, M. R. (2020). Production de force des skieurs alpins : évaluation sur et hors neige et relation avec la performance.
- Cross, M. R., Delhayé, C., Morin, J. B., Bowen, M., Coulmy, N., Hintzy, F., et al. (2021). Force output in giant-slalom skiing: A practical model of force application effectiveness. *PLoS One* 16, 1–22. doi:10.1371/journal.pone.0244698.
- Cross, M. R., Rivière, J. R., Coulmy, N., Morin, J. B., and Samozino, P. (2020). Lower limb force-production capacities in alpine skiing disciplines. *Scand. J. Med. Sci. Sport.*, 1–13. doi:10.1111/sms.13897.
- Delhayé, C., Cross, M., Bowen, M., Samozino, P., and Hintzy, F. (2019). Kinetic and kinematic turn switch detection in giant slalom. in *Science and Skiing VIII*, eds. M. Karczewska-Lindinger, A. Hakkarainen, V. Linnamo, and S. Lindinger (Meyer & Meyer Sport Ltd), 73–79.
- Delhayé, C., Cross, M. R., Bowen, M., Samozino, P., and Hintzy, F. (2020). Influence of Line Strategy Between Two Turns on Performance in Giant Slalom. *Front. Sport. Act. Living* 2, 1–8. doi:10.3389/fspor.2020.589257.
- Drenk, V. (1994). Photogrammetric evaluation procedures for pannable and tiltable cameras of variable focal length. in *12 International Symposium on Biomechanics in Sports* (Budapest), 27–30.
- Erdmann, W., and Aschenbrenner, P. (2008). Biomechanics of tactics of running a course in four alpine skiing disciplines: First course geometry results. *Hum. Mov.* 9, 124–127. doi:10.2478/v10038-008-0016-5.
- Erdmann, W. S., Giovanis, V., Aschenbrenner, P., Kiriakis, V., and Suchanowski, A. (2017). Methods for acquiring data on terrain geomorphology, course geometry and kinematics of competitors' runs in alpine skiing: A historical review. *Acta Bioeng. Biomech.* 19, 69–79. doi:10.5277/ABB-00451-2015-04.
- Falda-Buscaiot, T. (2017). Analyse biomécanique en ski alpin: conception et validation d'un nouveau capteur d'efforts à l'interface skieur-environnement.
- Falda-Buscaiot, T., Hintzy, F., Rougier, P., Coulmy, N., and Lacouture, P. (2016). Development of a new 6-components force sensor design for biomechanical research in alpine skiing. in *Science and Skiing VII*, eds. E. Müller, J. Kröll, S. Lindinger, J. Pfusterschmied, J. Spörri, and T. Stöggel (Meyer & Meyer Sport Ltd), 348–356.
- Falda-Buscaiot, T., Hintzy, F., Rougier, P., Lacouture, P., and 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. doi:10.1371/journal.pone.0176975.
- Fasel, B., and Gilgien, M. (2017). IMU and GNSS-based Turn Switch Detection in Alpine Ski Racing. in *Science and Skiing VII*, eds. E. Müller, J. Kröll, S. Lindinger, J. Pfusterschmied, J. Spörri, and T. Stöggel (Meyer & Meyer Sport Ltd), 86–92.

- Fasel, B., Lehot, C., Spörri, J., Müller, E., and Aminian, K. (2016a). Body vibration and its transmission in alpine ski racing. *XIV Int. Symp. 3D Anal. Hum. Mov.*
- Fasel, B., Spörri, J., Gilgien, M., Boffi, G., Chardonens, J., Müller, E., et al. (2016b). Three-Dimensional Body and Centre of Mass Kinematics in Alpine Ski Racing Using Differential GNSS and Inertial Sensors. *Remote Sens.* 8, 671.
- Fasel, B., Spörri, J., Schütz, P., Lorenzetti, S., and Aminian, K. (2017). An inertial sensor-based method for estimating the athlete's relative joint center positions and center of mass kinematics in alpine ski racing. *Front. Physiol.* 8. doi:10.3389/fphys.2017.00850.
- Federolf, P. A. (2005). Finite Element Simulation of a Carving Snow Ski. doi:10.3929/ethz-a-010782581.
- Federolf, P. A. (2012). Quantifying instantaneous performance in alpine ski racing. *J. Sports Sci.* 30, 1063–1068. doi:10.1080/02640414.2012.690073.
- Federolf, P., JeanRichard, F., Fauve, M., Lüthi, A., Rhyner, H. U., and Dual, J. (2006). Deformation of snow during a carved ski turn. *Cold Reg. Sci. Technol.* 46, 69–77. doi:10.1016/j.coldregions.2006.06.006.
- Federolf, P., Lüthi, A., Roos, M., and Dual, J. (2010a). Parameter study using a finite element simulation of a carving Alpine ski to investigate the turn radius and its dependence on edging angle, load, and snow properties. *Sport. Eng.* 12, 135–141. doi:10.1007/s12283-010-0039-y.
- Federolf, P., Rauscher, E., Schwameder, H., Lüthi, A., Müller, E., Scheiber, P., et al. (2010b). Impact of skier actions on the gliding times in alpine skiing. *Scand. J. Med. Sci. Sport.* 18, 790–797. doi:10.1111/j.1600-0838.2007.00745.x.
- Federolf, P., Roos, M., Lüthi, A., and Dual, J. (2010c). Finite element simulation of the ski-snow interaction of an alpine ski in a carved turn. *Sport. Eng.* 12, 123–133. doi:10.1007/s12283-010-0038-z.
- Federolf, P., von Tscherner, V., Haeufle, D. F. B., Gimpl, M., and Müller, E. (2008). Vibration Exposure in Alpine Skiing and Consequences for Muscle Activation Levels. in *Science and Skiing IV*, eds. S. Lindinger, T. Stöggl, and E. Müller (Meyer & Meyer Sport Ltd), 19–25.
- Franchi, M. V., Ellenberger, L., Javet, M., Bruhin, B., Romann, M., Frey, W. O., et al. (2019). Maximal eccentric hamstrings strength in competitive alpine skiers: Cross-sectional observations from youth to elite level. *Front. Physiol.* 10. doi:10.3389/fphys.2019.00088.
- Friston, K. J., Rotshtein, P., Geng, J. J., Sterzer, P., and Henson, R. N. (2006). A critique of functional localisers. *Neuroimage* 30, 1077–1087. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.08.012.
- Fu, T. chung, Chung, F. I., Luk, R., and Ng, C. m. (2007). Stock time series pattern matching: Template-based vs. rule-based approaches. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 20, 347–364. doi:10.1016/j.engappai.2006.07.003.
- Gilgien, M., Crivelli, P., Spörri, J., Kröll, J., and Müller, E. (2015a). Characterization of course and terrain and their effect on skier speed in World Cup alpine ski racing. *PLoS One* 10. doi:10.1371/journal.pone.0118119.
- Gilgien, M., Spörri, J., Chardonens, J., Kröll, J., Limpach, P., and Müller, E. (2015b). Determination

of the centre of mass kinematics in alpine skiing using differential global navigation satellite systems. *J. Sports Sci.* 33, 960–969. doi:10.1080/02640414.2014.977934.

Gilgien, M., Spörri, J., Chardonens, J., Kröll, J., and Müller, E. (2013). Determination of external forces in alpine skiing using a differential global navigation satellite system. *Sensors* 13, 9821–9835. doi:10.3390/s130809821.

Gilgien, M., Spörri, J., Kröll, J., and Müller, E. (2016). Effect of ski geometry and standing height on kinetic energy: Equipment designed to reduce risk of severe traumatic injuries in alpine downhill ski racing. *Br. J. Sports Med.* 50, 8–13. doi:10.1136/bjsports-2015-095465.

Gilgien, M., Spörri, J., Limpach, P., Geiger, A., and Müller, E. (2014). The effect of different global navigation satellite system methods on positioning accuracy in elite alpine skiing. *Sensors* 14, 18433–18453. doi:10.3390/s141018433.

Gløersen, Ø., Kocbach, J., and Gilgien, M. (2018). Tracking performance in endurance racing sports: Evaluation of the accuracy offered by three commercial GNSS receivers aimed at the sports market. *Front. Physiol.* 9, 1–18. doi:10.3389/fphys.2018.01425.

Haymes, E. M., and Dickinson, A. L. (1980). Characteristics of elite male and female ski racers. *Med. Sci. Sports Exerc.* 12, 153–158. doi:10.1249/00005768-198023000-00005.

Hébert-Losier, K., Supej, M., and Holmberg, H. C. (2014). Biomechanical factors influencing the performance of elite alpine ski racers. *Sport. Med.* 44, 519–533. doi:10.1007/s40279-013-0132-z.

Hintermeister, R., O'Connor, D., Dillman, C., Suplizio, C., Lange, G., and Steadman, R. (2006). Muscle activity in slalom and giant slalom skiing. *Med. Sci. Sports Exerc.* 27, 315–322. doi:10.1249/00005768-199503000-00005.

Hirano, Y. (2006). Quickest descent line during alpine skiing racing. *Sport. Eng.* 6, 221–228.

Honert, E. C., and Pataky, T. C. (2021). Journal Pre-proofs Timing of gait events affects whole trajectory analyses: A statistical parametric mapping sensitivity analysis of lower limb biomechanics. *J. Biomech.* 119, 110329. doi:10.1016/j.jbiomech.2021.110329.

Hull, M. L., and Mode, C. D. (1975). Pulse code modulation telemetry in ski injury research II. *Biotelemetry* 2, 276–296.

Hull, M. L., and Mote, C. D. (1980). A Microcomputer Controlled Snow Ski Binfing System II. *J. Biomech.* 13, 481–491. doi:10.1016/0021-9290(80)90341-3.

Hydren, J. R., Volek, J. S., Maresh, C. M., Comstock, B. A., and Kraemer, W. J. (2013). Review of strength and conditioning for alpine ski racing. *Strength Cond. J.* 35, 10–28. doi:10.1519/SSC.0b013e31828238be.

Jandova, S., Lufinka, A., and Zubek, T. (2005). The dynamographic method application for alpine skiing. *Hum. Mov.* 6, 19–23.

Jandova, S., and Vaverka, F. (2008). Ground Reaction Forces Measurement Based on Strain Gauges in Alpine Skiing. *Impact Technol. Sport II*. doi:10.1201/9781439828427.ch119.

Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., Cuadrado-Peñañiel, V., Conceição, F., González-Badillo, J. J., and

- Morin, J. B. (2014). Effect of countermovement on power–force–velocity profile. *Eur. J. Appl. Physiol.* 114, 2281–2288. doi:10.1007/s00421-014-2947-1.
- Keränen, T., Ihalainen, S., Hynynen, E., and Salo, T. (2010). FIS-ranking and carving turn force production profile. in *Science and Skiing V*, ed. T. S. & J. P. E. Müller, S. Lindinger (St. Christoph am Arlberg).
- Kiefmann, A., Krinninger, M., Lindemann, U., Senner, V., and Spitzenpfeil, P. (2006). A New Six Component Dynamometer for Measuring Ground Reaction Forces in Alpine Skiing. *Eng. Sport* 6, 87–92. doi:10.1007/978-0-387-46051-2_16.
- Klous, M., Müller, E., and Schwameder, H. (2014). Three-Dimensional Lower Extremity Joint Loading in a Carved Ski and Snowboard Turn: A Pilot Study. *Comput. Math. Methods Med.* 2014, 1–13. doi:10.1155/2014/340272.
- Kröll, J., Spörri, J., Gilgien, M., Schwameder, H., and Müller, E. (2016). 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.* 50, 20–25. doi:10.1136/bjsports-2015-095433.
- Kröll, J., Spörri Jörg, Kandler, C., Fasel, B., Müller, E., and Schwameder, H. (2015). Kinetic and kinematic comparison of alpine ski racing disciplines as a base for specific conditioning regimes. in *33rd International Conference on Biomechanics in Sports*, 1401–1404.
- Lamontagne, M. (2001). Plantar Pressure Distribution and Forces Measured During Slalom and. in *Biomechanics Symposia 2001* (San Francisco), 211–214.
- LeMaster, R. (2009). *Ultimate Skiing.* , ed. H. Kinetics.
- Lesnik, B., and Zvan, M. (2007). the Best Slalom Competitors Kinematic analyses of tracks and velocities. *Kinesiology* 39, 40–48.
- Lieu, D. K., and Mote, C. D. (1980). An electronic ski binding design with biofeedback. *J. Mech. Des.* 102, 677–682. doi:10.1115/1.3254805.
- Lieu, D. K., and Mote, C. D. (1985). Mechanics of the Turning Snow Ski. in *Skiing Trauma And Safety: Fifth International Symposium* (100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International), 117-117–24. doi:10.1520/STP46631S.
- Lind, D., and Sanders, S. P. (2004). *Physics of Skiing - Skiing at triple point*. Second edi. Springer Science doi:978-1-4419-1834-5.
- Lüthi, A., Federolf, P., Fauve, M., Oberhofer, K., Rhyner, H., Amman, W., et al. (2004). Determination of Forces in Carving Using Three Independent Methods. in *Science and Skiing III* (Aspen USA: Meyer & Meyer Sport Ltd), 96–106.
- MacGregor, D., Hull, M. L., and Dorius, L. K. (1985). A Microcomputer Controlled Snow Ski Binfiging System I. *J. Biomech.* 18, 255–265.
- Maffiuletti, N. A., Aagaard, P., Blazevich, A. J., Folland, J., Tillin, N., and Duchateau, J. (2016). Rate of force development: physiological and methodological considerations. *Eur. J. Appl. Physiol.* 116, 1091–1116. doi:10.1007/s00421-016-3346-6.

- Maxwell, S. M., and Hull, M. L. (1989). Measurement of strength and loading variables on the knee during alpine skiing. *J. Biomech.* 22. doi:10.1016/0021-9290(89)90012-2.
- Meyer, F. (2012). Biomechanical analysis of alpine skiers performing giant slalom turns.
- Meyer, F., Prenleloup, A., and Schorderet, A. (2019). Development of a New Embedded Dynamometer for the Measurement of Forces and Torques at the Ski-Binding Interface. *Sensors* 19, 1–11.
- Mössner, M., Heinrich, D., Schindelwig, K., Kaps, P., Schretter, H., and Nachbauer, W. (2014). Modeling the ski-snow contact in skiing turns using a hypoplastic vs an elastic force-penetration relation. *Scand. J. Med. Sci. Sport.* 24, 577–585. doi:10.1111/sms.12035.
- Mote, C. D. (1987). The Forces of Skiing and Their Implication to Injury. *Int. J. Sport Biomech.* 3, 309–325. doi:10.1123/ijsb.3.4.309.
- Müller, E., Bartlett, R., Raschner, C., Schwameder, H., Benko-Bernwick, U., and Lindinger, S. (1998). Comparisons of the ski turn techniques of experienced and intermediate skiers. *J. Sports Sci.* 16, 545–559. doi:10.1080/026404198366515.
- Müller, E., and Schwameder, H. (2003). Biomechanical aspects of new techniques in alpine skiing and ski-jumping. *J. Sports Sci.* 21, 679–692. doi:10.1080/0264041031000140284.
- Müller, L., Hildebrandt, C., Müller, E., Fink, C., and Raschner, C. (2017). Long-Term athletic development in youth alpine ski racing: The effect of physical fitness, ski racing technique, anthropometrics and biological maturity status on injuries. *Front. Physiol.* 8, 1–11. doi:10.3389/fphys.2017.00656.
- Nakazato, K., Scheiber, P., and Müller, E. (2011). A comparison of ground reaction forces determined by portable force-plate and pressure-insole systems in alpine skiing. *J. Sport. Sci. Med.* 10, 754–762. doi:10.1007/s12283-013-0119-x.
- Newton, I. (1687). *Philosophiae naturalis principia mathematica.* doi:10.5479/sil.52126.39088015628399.
- Noé, F., García-Massó, X., Delaygue, P., Melon, A., and Paillard, T. (2018). The influence of wearing ski-boots with different rigidity characteristics on postural control. *Sport. Biomech.* 3141, 1–11. doi:10.1080/14763141.2018.1452973.
- Pataky, T. C. (2010). Generalized n-dimensional biomechanical field analysis using statistical parametric mapping. *J. Biomech.* 43, 1976–1982. doi:10.1016/j.jbiomech.2010.03.008.
- Pataky, T. C. (2016). rft1d: Smooth one-dimensional random field upcrossing probabilities in Python. *J. Stat. Softw.* 71. doi:10.18637/jss.v071.i07.
- Pataky, T. C., Caravaggi, P., Savage, R., Parker, D., Goulermas, J. Y., Sellers, W. I., et al. (2008). New insights into the plantar pressure correlates of walking speed using pedobarographic statistical parametric mapping (pSPM). *J. Biomech.* 41, 1987–1994. doi:10.1016/j.jbiomech.2008.03.034.
- Pataky, T. C., Vanrenterghem, J., and Robinson, M. A. (2015a). Two-way ANOVA for scalar trajectories, with experimental evidence of non-phasic interactions. *J. Biomech.* 48, 186–189. doi:10.1016/j.jbiomech.2014.10.013.

- Pataky, T. C., Vanrenterghem, J., and Robinson, M. A. (2015b). Zero- vs. one-dimensional, parametric vs. non-parametric, and confidence interval vs. hypothesis testing procedures in one-dimensional biomechanical trajectory analysis. *J. Biomech.* 48, 1277–1285. doi:10.1016/j.jbiomech.2015.02.051.
- Pozzo, R., Canclini, A., Baroni, G., Benedetti, D., and D’Ottavio, S. (2010). 3D Kinematic and Kinetics Analysis of Slalom in Elite Skiers At the Bormio World Cup Ski Finals in 2008. in *Science and Skiing V*, eds. E. Müller, S. Lindinger, and T. Stöggl. (St. Christoph am Arlberg: Meyer & Meyer Sport Ltd), 355–363.
- Pozzo, R., Canclini, A., Cotelli, C., and Baroni, G. (2004). 3D-kinematics and kinetic analysis of G-Slalom in elite skiers at Val Badia World Cup race in 2002. in *Science and Skiing III*, eds. E. Müller, D. Bacharach, R. Klika, and S. Lindinger (Meyer & Meyer Sport Ltd), 125–135.
- Pratt, V. (1987). Direct least-squares fitting of algebraic surfaces. in *14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1987* (New York, New York, USA: ACM Press), 145–152. doi:10.1145/37401.37420.
- Quinn, T. P., and Mote, C. D. (1992). Prediction of the loading along the leg during snow skiing. *ASTM Spec. Tech. Publ.* 25, 128–149.
- Ramsay, J. O., and Silvermann, B. W. (1998). Functional Data Analysis. Springer Series in Statistics. *Biometrical J.* 40, 56–56. doi:10.1002/(SICI)1521-4036(199804)40:1<56::AID-BIMJ56>3.0.CO;2-.
- Raschner, C., Müller, E., Schwameder, H., Haid, C., and Männel, D. (1995). “Zum Einfluss anthropometrischer Merkmale auf die Wettkampfleistung im Slalom bei jugendlichen Skirennläufern [The influence of anthropometric characteristics on the performance in slalom in adolescent ski racers],” in *Sportliche Leistung und Training [Sports performance and training]*, 341–346.
- Reid, R. C. (2010). A kinematic and kinetic study of alpine skiing technique in slalom. doi:10.1016/S0925-8388(03)00235-4.
- Reid, R. C., Haugen, P., Gilgien, M., Kipp, R. W., and Smith, G. A. (2020). Alpine Ski Motion Characteristics in Slalom. *Front. Sport. Act. Living* 2, 1–11. doi:10.3389/fspor.2020.00025.
- Reilly, D. T., and Burstein, A. H. (1975). The elastic and ultimate properties of compact bone tissue. *J. Biomech.* 8. doi:10.1016/0021-9290(75)90075-5.
- Roetenberg, D., Luinge, H., and Slycke, P. (2009). Xsens MVN: full 6DOF human motion tracking using miniature inertial sensors. *Xsens Motion Technol. BV, ...*, 1–7. Available at: http://www.xsens.com/images/stories/PDF/MVN_white_paper.pdf.
- Roetenberg, D., Luinge, H., and Slycke, P. (2013). Xsens MVN: full 6DOF human motion tracking using miniature inertial sensors. *Xsens Motion Technol. BV, ...*, 1–7. Available at: http://www.xsens.com/images/stories/PDF/MVN_white_paper.pdf.
- Sahashi, T., and Ichino, S. (2001). Carving-turn and edging angle of skis. *Sport. Eng.* 4, 135–145. doi:10.1046/j.1460-2687.2001.00079.x.
- Saito, A., Doki, H., Kondo, A., and Hirose, K. (2015). An attempt for developing the measurement system of reaction force from snow surface for private ski boots by compact force sensors. *Procedia Eng.* 112, 326–331. doi:10.1016/j.proeng.2015.07.257.

- Schaff, P., Senner, V., and Kaiser, F. (1996). Pressure distribution measurements for the alpine skier - from the biomechanical high tech measurement to its application as swingbeep feedback system. in *Science and Skiing*, eds. E. Kornexl, E. Muller, C. Raschner, and H. Schwameder (Meyer & Meyer Sport Ltd), 159–172.
- Schiestl, M., Kaps, P., Mossner, M., and Nachbauer, W. (2006). Calculation of friction and reaction forces during an alpine world cup downhill race. *Eng. Sport* 1, 269–274. doi:10.1007/978-0-387-46050-5_48.
- Scott, N., Yoneyama, T., Kagawa, H., and Osada, K. (2007). Measurement of ski snow-pressure profiles. *Sport. Eng.* 10, 145–156. doi:10.1007/bf02844186.
- Škarabot, J., Cronin, N., Strojnik, V., and Avela, J. (2016). Bilateral deficit in maximal force production. *Eur. J. Appl. Physiol.* 116, 2057–2084. doi:10.1007/s00421-016-3458-z.
- Spörri, J., Kröll, J., Fasel, B., Aminian, K., and 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. doi:10.3389/fphys.2017.00522.
- Spörri, J., Kröll, J., Fasel, B., Aminian, K., and Müller, E. (2018a). Standing Height as a Prevention Measure for Overuse Injuries of the Back in Alpine Ski Racing: A Kinematic and Kinetic Study of Giant Slalom. *Orthop. J. Sport. Med.* 6, 1–7. doi:10.1177/2325967117747843.
- Spörri, J., Kröll, J., Gilgien, M., and Müller, E. (2016). Sidecut radius and the mechanics of turning-equipment designed to reduce risk of severe traumatic knee injuries in alpine giant slalom ski racing. *Br. J. Sports Med.* 50, 14–19. doi:10.1136/bjsports-2015-095737.
- Spörri, J., Kröll, J., Schiefermüller, C., Müller, E., and Schwameder, H. (2012a). Course setting and selected biomechanical variables related to injury risk in alpine ski racing: an explorative case study. *Br. J. Sports Med.* 46, 1072–1077. doi:10.1136/bjsports-2012-091425.
- Spörri, J., Kröll, J., Schwameder, H., and Müller, E. (2012b). Turn Characteristics of a Top World Class Athlete in Giant Slalom: A Case Study Assessing Current Performance Prediction Concepts. *Int. J. Sports Sci. Coach.* 7, 647–659. doi:10.1260/1747-9541.7.4.647.
- Spörri, J., Kröll, J., Schwameder, H., and Müller, E. (2018b). The role of path length- and speed-related factors for the enhancement of section performance in alpine giant slalom. *Eur. J. Sport Sci.* 18, 911–919. doi:10.1080/17461391.2018.1453870.
- Stricker, G., Scheiber, P., Lindenhofer, E., and Müller, E. (2010). Determination of forces in alpine skiing and snowboarding: Validation of a mobile data acquisition system. *Eur. J. Sport Sci.* 10, 31–41. doi:10.1080/17461390903108141.
- Supej, M. (2008). Differential specific mechanical energy as a quality parameter in racing alpine skiing. *J. Appl. Biomech.* 24, 121–129. doi:10.1123/jab.24.2.121.
- Supej, M. (2013). Vibration in recreational alpine skiing, a pilot study. in *31st International Conference on Biomechanics in Sports*.
- Supej, M., and Cernigoj, M. (2006). Relations between different technical and tactical approaches and overall time at Men's world cup giant slalom races. *Kinesiol. Slov.* 12, 59–68.
- Supej, M., Hébert-Losier, K., and Holmberg, H. C. (2015). Impact of the steepness of the slope on

- the biomechanics of world cup slalom skiers. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 10, 361–368. doi:10.1123/ijsp.2014-0200.
- Supej, M., and Holmberg, H.-C. (2019). Recent Kinematic and Kinetic Advances in Olympic Alpine Skiing: Pyeongchang and Beyond. *Front. Physiol.* 10, 1–7. doi:10.3389/fphys.2019.00111.
- Supej, M., and Holmberg, H. C. (2010). How gate setup and turn radii influence energy dissipation in slalom ski racing. *J. Appl. Biomech.* 26, 454–464. doi:10.1123/jab.26.4.454.
- Supej, M., Kipp, R., and Holmberg, H. C. (2011). Mechanical parameters as predictors of performance in alpine World Cup slalom racing. *Scand. J. Med. Sci. Sport.* 21, 72–81. doi:10.1111/j.1600-0838.2010.01159.x.
- Supej, M., Kugovnik, O., and Nemec, B. (2002). New Advances in Racing Slalom. *Kinesiol. Slov.* 8, 25–29.
- Supej, M., and Nemec, B. (2003). Kinematic Determination of the beginning of a ski turn. *Kinesiol. Slov.* 9, 11–17.
- Supej, M., and Ogrin, J. (2019). Transmissibility of whole-body vibrations and injury risk in alpine skiing. *J. Sci. Med. Sport.* doi:10.1016/j.jsams.2019.02.005.
- Supej, M., Sætran, L., Oggiano, L., Ettema, G., Šarabon, N., Nemec, B., et al. (2013). Aerodynamic drag is not the major determinant of performance during giant slalom skiing at the elite level. *Scand. J. Med. Sci. Sport.* 23, 38–47. doi:10.1111/sms.12007.
- Supej, M., Spörri, J., and Holmberg, H.-C. (2020). Methodological and Practical Considerations Associated With Assessment of Alpine Skiing Performance Using Global Navigation Satellite Systems. *Front. Sport. Act. Living* 1. doi:10.3389/fspor.2019.00074.
- Turnbull, J. R., Kilding, A. E., and Keogh, J. W. L. (2009). Physiology of alpine skiing. *Scand. J. Med. Sci. Sport.* 19, 146–155. doi:10.1111/j.1600-0838.2009.00901.x.
- Vaverka, F., and Vodickova, S. (2010). Laterality of the lower limbs and carving turns. *Biol. Sport* 27, 129–134. doi:10.5604/20831862.913080.
- Vaverka, F., Vodickova, S., and Elfmark, M. (2012). Kinetic analysis of ski turns based on measured ground reaction forces. *J. Appl. Biomech.* 28, 41–47. doi:10.1123/jab.28.1.41.
- Vogt, M., and Hoppeler, H. H. (2014). Eccentric exercise: Mechanisms and effects when used as training regime or training adjunct. *J. Appl. Physiol.* 116, 1446–1454. doi:10.1152/jappphysiol.00146.2013.
- White, A. T., and Johnson, S. C. (1991). Physiological comparison of international, national and regional alpine skiers. *Int. J. Sports Med.* 12, 374–378. doi:10.1055/s-2007-1024697.
- Yoneyama, T. (2018). Variable side-cut ski for a carved turn. *Sport. Eng.* 21, 277–282. doi:10.1007/s12283-018-0267-0.
- Yoneyama, T., Kitade, M., and Osada, K. (2010). Investigation on the ski-snow interaction in a carved turn based on the actual measurement. *Procedia Eng.* 2, 2901–2906. doi:10.1016/j.proeng.2010.04.085.

Yoneyama, T., Scott, N., Kagawa, H., and Osada, K. (2008). Ski deflection measurement during skiing and estimation of ski direction and edge angle. *Sport. Eng.* 11, 3–13. doi:10.1007/s12283-008-0001-4.

Zorko, M., Nemec, B., Babič, J., Lešnik, B., and Supej, M. (2015). The waist width of skis influences the kinematics of the knee joint in alpine skiing. *J. Sport. Sci. Med.* 14, 606–619.

8 Annexes :

Annexe 1 – Cahier des charges initial lors du développement de la plateforme de force.

Annexe 2 - Delhayé, C., Cross, M., Bowen, M., Samozino, P., and Hintzy, F. (2019). “Kinetic and kinematic turn switch detection in giant slalom,” in *Science and Skiing VIII*, eds. M. Karczewska-Lindinger, A. Hakkarainen, V. Linnamo, and S. Lindinger (Meyer & Meyer Sport Ltd), 73–79.

Annexe 3 - Delhayé, C., Cross, M. R., Bowen, M., Samozino, P., and Hintzy, F. (2020). Influence of Line Strategy Between Two Turns on Performance in Giant Slalom. *Front. Sport. Act. Living* 2, 1–8. doi:10.3389/fspor.2020.589257.

Annexe 4 - Cross, M. R. (2020). Production de force des skieurs alpins : évaluation sur et hors neige et relation avec la performance. – Pages 121-145 : Etude d’évaluation de la précision du système Mac-Lloyd utilisé et de l’approche méthodologique associée.

Annexe 5 - Cross, M., Delhayé, C., Bowen, M., Coulmy, N., Morin, J.-B., Hintzy, F., et al. (2019). “Magnitude and relationship between force output and performance in giant slalom,” in *Science and Skiing VIII*, eds. M. Karczewska-Lindinger, A. Hakkarainen, V. Linnamo, and S. Lindinger (Meyer & Meyer Sport Ltd), 80–87.

Annexe 6 - Cross, M. R., Delhayé, C., Morin, J. B., Bowen, M., Coulmy, N., Hintzy, F., et al. (2021). Force output in giant-slalom skiing: A practical model of force application effectiveness. *PLoS One* 16, 1–22. doi:10.1371/journal.pone.0244698.

Annexe 1 – Cahier des charges initial lors du développement de la plateforme de force.

Intitulé de l'équipement :

Capteur embarqué de mesures des forces et des moments en 3D pour des équipements de ski alpin

Description :

Le présent capteur devra être capable de mesure les trois forces et les trois moments de force. Celui-ci devra s'intégrer à l'équipement actuel (ski, fixation, chaussure) sans lui être invasif

Demandeur :

Laboratoire de Physiologie de l'Exercice (LPE), association Sporaltec

Date de mise en application : Juillet 2014

Date de mise en service souhaitée : 1er trimestre 2015

Budget : à définir

Rédigé par :

Thomas Falda, ingénieur de recherche Sporaltec, doctorant laboratoire LPE

Validé par :

Dr Frédérique Hintzy, LPE ; Pr Patrick Lacouture, Robioss ; Dr Nicolas Coulmy, FFS ; Salomon.

Pour le bureau d'étude, validé par :

Sommaire

1 INTRODUCTION.....	3
2 GENERALITE.....	4
2.1 ENONCE DU BESOIN.....	4
2.2 CARACTERISTIQUES DE L'EQUIPEMENT DU SKIEUR ALPIN.....	4
2.2.1 LES SKIS ALPINS.....	5
2.2.2 LES FIXATIONS DE SKI ALPIN.....	6
2.2.3 LES CHAUSSURES DE SKI ALPIN.....	6
2.2.4 L'ENSEMBLE SKI-FIXATION- CHAUSSURE.....	9
3 CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL.....	11
4 CAHIER DES CHARGES TECHNIQUE.....	11
4.1 SPECIFICATIONS DU CAPTEUR.....	11
4.2 AUTRES CONSIDERATIONS.....	12
4.3 REFERENCES NORMATIVES :.....	13
4.4 SPECIFICATIONS DES CONDITIONS DE REALISATION DES ESSAIS.....	13
4.5 CARACTERISTIQUES DES SUJETS.....	13
4.6 ENVIRONNEMENT D'UTILISATION.....	13
4.7 ENREGISTREMENT.....	13
5 BENCHMARK TECHNIQUE.....	14
5.1 IDENTIFICATION DES POINTS SENSIBLES.....	17
6 SOLUTIONS TECHNIQUE PRESENTIES.....	17
7 EXIGENCES GENERALES.....	18
8 REFERENCES.....	18

1 INTRODUCTION

Le présent cahier des charges décrit les spécifications techniques du capteur de force à développer. Cette demande entre dans le cadre plus général d'un projet de recherche mené conjointement entre l'université de Savoie, l'université de Poitiers, et coordonné par l'association Sporaltec (cluster des entreprises du sport de la région Rhône Alpes).

Le but de ce projet de recherche porte sur l'analyse biomécanique des sports de glisse sur neige, et plus particulièrement le ski alpin. Les trois dimensions, auxquelles nous allons faire référence dans le reste du dossier, sont représentées dans la figure 1 ci-dessous.

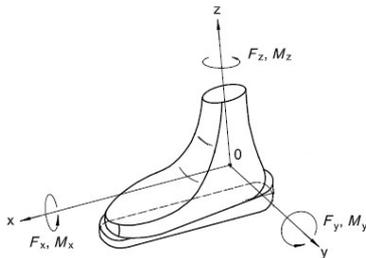


Fig. 1. Illustration des forces et moments de forces appliqués par le skieur sur le ski, et les axes utilisés dans les spécifications techniques du présent cahier des charges. L'axe X est l'axe antéro-postérieur, positif dans la direction antérieure ; l'axe Y est l'axe médio-latéral, positif dans la direction médiale ; l'axe Z est l'axe vertical, positif vers le haut (d'après norme ISO 9462).

La solution au présent cahier des charges pouvant nécessiter plusieurs capteurs, le terme générique de « système de mesure » sera employé, et désignera l'ensemble de la solution technique qui répond au présent cahier des charges.

Le projet de recherche a été découpé en trois lots de travail :

- instrumentation de l'équipement, (cahier des charges machine, le présent cahier des charges)
- intégration électronique (alimentation, stockage des données, synchronisation), cahier de charges B)
- interface utilisateur (solution logicielle).

Le présent cahier des charges (cahier A) ne traite que du premier lot de travail : instrumentation de l'équipement.

2 GENERALITE

2.1 Enoncé du besoin

Le but est de mesurer, sous chacun des deux pieds, le torseur résultant (force et moment) des actions générées à l'interaction ski/chaussure. Les forces et moments de forces seront mesurés selon les 3 axes X, Y et Z (cf. figure 1). La position du point d'application de la force résultante (aussi appelé centre de pression) devra également pouvoir être connue dans le référentiel du capteur (selon les axes X et Y). Le système de mesure, une fois mis au point, servira pour des applications de recherche industrielles et universitaires.

2.2 Caractéristiques de l'équipement du skieur alpin

Actuellement sur le marché, on distingue une conception particulièrement diversifiée pour l'ensemble ski-fixation-chaussure. Plus précisément, cette diversité concerne à la fois les caractéristiques géométriques et dimensionnelles du produit, mais également les caractéristiques mécaniques des différentes pièces, telle que la rigidité des matériaux utilisés. Cette diversité s'explique au regard des différents public (sexe, âge, niveau d'expertise du pratiquant...) et des modalités de pratique (compétition, piste, hors-piste...) auquel ces équipements se destinent.

La solution technique en réponse au présent cahier des charges pourra intervenir à différents niveaux de l'interface ski/fixation/chaussure/pied.

L'ensemble de ces pièces répondent à une fonction précise. Elles sont présentées dans la figure 2 ci-dessous et détaillées dans la suite du document.



Fig. 2. L'ensemble des pièces qui composent l'interface ski/fixation/chaussure : le ski + la fixation de ski (A), la coque de la chaussure (B), la semelle intercalaire (C), les cales de surélévation avant (D) et arrière (D').

2.2.1 Les skis alpins

En fonction de leur utilisation (i.e. piste, hors-piste...), du niveau d'expertise des skieurs (débutant, confirmé, coureur...), les dimensions d'un ski alpin peuvent varier grandement.

Ils sont plus épais en leur centre (i.e. le patin, là où la majorité des forces se transmettent, longueur D sur la Fig. 3 ci-dessous) qu'en leur extrémité (spatule et talon). Les skis sont toujours plus étroits au patin (B) qu'en talon (A) et spatule (C). Leur longueur (E) correspond en général à la taille du skieur.

Les skis alpins conçus spécifiquement pour la compétition (ou, dans une moindre mesure, la piste) présentent en général une plaque rigide sur laquelle viennent se visser les fixations. En compétition, la hauteur totale entre la neige et la partie des fixations en contact avec les chaussures est normée et limitée à 50mm (FIS). La plupart des skis de compétition sont conçus pour respecter cette norme sans marge (plaque comprise). Pour des pratiques davantage orientées hors-piste, en revanche, les fixations viennent se visser en général directement dans le ski, dans le noyau en bois.

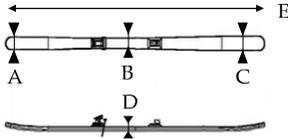


Fig. 3. Des skis alpins vus de dessus (haut), et de côté (bas). La longueur A (largeur du ski au talon) varie de 90 à 130mm ; la longueur B (largeur du ski au patin), varie de 63 à 120mm ; la longueur C (largeur du ski en spatule) varie de 100 à 150mm ; la longueur D (épaisseur du ski au niveau du patin) est d'environ 20mm ; enfin la longueur E (longueur du ski) varie de 150 à 210 cm pour des skis adultes.

Le principe d'un ski alpin est de pouvoir se déformer au cours des virages (Fig. 4), alors que la chaussure de ski représente l'élément rigide. On estime que cette déflexion du ski est au maximum de l'ordre de 3 cm au cours d'un virage (cf distance A, Fig. 4) (Yoneyama, 2010). Ainsi, cette caractéristique ne devra pas être perturbée par le système de mesure et sera à prendre en compte dans sa définition.

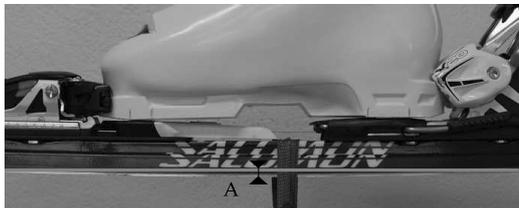


Fig. 4. L'ensemble ski/fixation/chaussure, fléchi tel lors de son utilisation. On distingue bien la chaussure qui est l'élément rigide de l'ensemble, est le ski qui se déforme dessous.

2.2.2 Les fixations de ski alpin

En général, les fixations de ski alpin (Fig. 5), sont toutes basées sur le même principe : l'avant de la fixation (la butée) déclenche sous l'action d'un moment de force orienté selon l'axe Mz, dans les deux sens. L'arrière de la fixation (la talonnière) se déclenche sous l'action d'un moment de force positif exercé selon l'axe My (voir fig. 1. Pour les axes). La résistance au déclenchement de la butée et la talonnière sont réglables au moyen d'un tournevis. Pour des skieurs adultes, le moment Mz est en général compris entre 40 et 70N.m ; le moment My est lui compris entre 160 et 300N.m. Ces valeurs sont à régler en fonction de la masse et la taille du skieur, son niveau d'expertise technique, ainsi que la longueur de ses chaussures (voir Fig. 7). Ces valeurs sont définies par la norme ISO 11088.

Cependant, la solution technique et mécanique qui permet d'aboutir au respect de cette norme n'est, elle, pas normée. Ainsi, les fixations de skis alpins peuvent sensiblement varier, en termes de design ainsi qu'en termes de caractéristiques géométriques. Il existe aujourd'hui quatre principales marques sur le marché de fixation de ski alpin.

Une fois développé, le système de mesure devra respecter cette norme.

Les zones en contact avec la chaussure de ski (cf. Fig. 11 et 13.) sont en polyoxyméthylène ou en polyamide à haute limite élastique.



Fig. 5. Une fixation de ski alpin, avec la butée avant (à gauche), et la talonnière (à droite). La figure présentant un ski de compétition, on remarque que les fixations se insèrent sous des plaques, qui sont elles-mêmes fixées sur le ski.

2.2.3 Les chaussures de ski alpin

Une chaussure de ski alpin se compose de trois principaux éléments : la coque (partie basse qui enveloppe le pied et la cheville (fig. 6.), le collier (partie haute qui est fixée par-dessus la coque et qui enveloppe la jambe), et le chausson (partie textile, relativement souple, qui est insérée dans la coque et le collier, et qui enveloppe l'ensemble du pied, cheville et jambe). Ces deux dernières parties ne sont pas représentées dans le présent document.

La coque et le collier de la chaussure sont réalisés en Polyuréthane haute densité par injection. Le module de Young correspondant est compris entre 170 et 260 MPa.

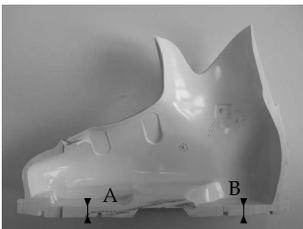


Fig. 6. Une coque de chaussure de ski alpin, coupée selon l'axe antéro-postérieur. L'épaisseur de la coque à l'avant pied et au talon (distances A et B) est de 12mm.

La taille de développement d'une chaussure de ski alpin utilisée par tous les fabricants est la taille 26,5, ce qui correspond à un petit 42. La longueur de la coque de la chaussure correspondante varie entre 304 et 308mm en fonction des modèles et des marques. C'est la taille pour laquelle le capteur sera prioritairement développé. Cette longueur est toujours inscrite sur le bas de la coque de la chaussure (Fig. 7. ci-dessous).



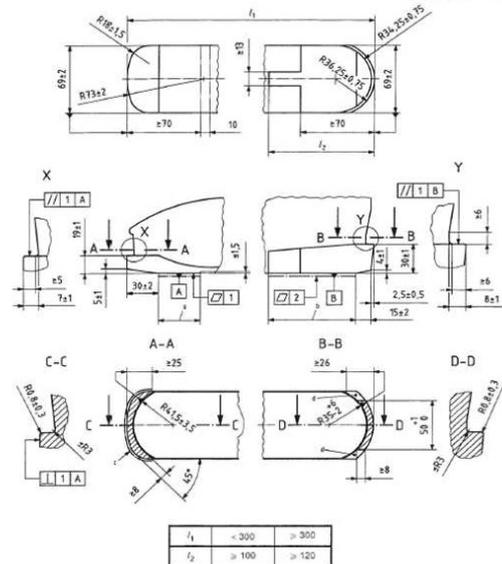
Fig. 7. Les dimensions d'une chaussure de ski alpin indiquée sur sa coque (longueur en mm et en mondopoints).

Toutefois, le capteur devra s'adapter pour des chaussures de ski alpin allant de la pointure 24,5 à la pointure 27,5, soit de la pointure 38 à la pointure 44. Les coques des chaussures de ski alpin qui correspondent à ces pointures mesurent de 283mm à 318mm.

Au contraire des autres équipements cités ci-dessus, les chaussures de ski alpin ont une conception relativement similaire d'un modèle à l'autre. En effet, il existe la norme ISO 5355 qui spécifie les dimensions de la partie basse de la coque des chaussures (Fig. 8. ci-dessous). Cette norme assure ainsi l'interopérabilité des chaussures, c'est-à-dire que l'on peut changer de ski en gardant la même paire de chaussures de ski alpin, et inversement. Et ceci sans altérer les exigences de sécurité des fixations de ski alpin. C'est donc un élément central du présent cahier des charges.

La norme ISO 5355 spécifie également la dureté des matériaux en contact avec la fixation de ski (pour assurer un coefficient de frottement stable). Ce coefficient de frottement dynamique entre la chaussure et la fixation doit avoir une valeur maximale de 0,10.

Les chaussures de ski alpin occupent un rôle important dans la performance ainsi que le confort des skieurs. Quelques adaptations à cet équipement sont possibles (dureté, angle latéral, angle de flexion, élargissement de la coque, etc...). Toutefois, elles ne concernent jamais la partie inférieure de la chaussure, en contact avec les fixations, puisqu'elles se doivent de respecter les normes ISO 11088 (fixation), et ISO 5355 (chaussure).



NOTE Les zones grisées, de même que les zones repérées par la lettre f_i , sont les surfaces pour lesquelles la tolérance de planéité et les dimensions (19 ± 1 mm et (30 ± 1) mm s'appliquent.

f_i Zone de glissement/surface d'appui avant.
 f_j Surface d'appui arrière (voir 3.6).

Fig. 8. Dimensions des parties avant (à gauche) et arrière (à droite) du bas de la coque d'une chaussure de ski alpin, telles que définies dans la norme ISO 5355. Les dimensions sont en mm.

En compétition, des cales de surélévation sont parfois utilisées. Elles viennent se visser sous la chaussure (Fig. 9). Elles servent à surélever la chaussure de ski de manière à éviter de commettre des fautes d'intérieur (chute consécutive à un contact entre le côté de la chaussure de ski et la neige). Il existe différentes versions de ces cales, disponibles dans des épaisseurs allant de 1 à 5mm. Quand de telles cales sont utilisées, la partie supérieure du rebord des chaussures (partie qui s'insère dans les fixations) est usinée de manière à ce que la chaussure puisse toujours s'insérer dans la fixation (réduction de la hauteur correspondant à l'épaisseur ajoutée par les cales).

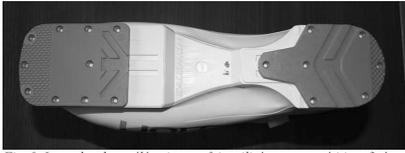


Fig. 9. Les cales de surélévation parfois utilisées en compétition, fixées sous une chaussure de ski.

A l'intérieur des coques des chaussures, des semelles intercalaires sont placées sous le pied (fig. 10). Le pied (par l'intermédiaire du chaousson), vient se placer par-dessus. L'ensemble de ces éléments présentés conjointement sont illustrés dans la figure 11 ci-dessous. Les caractéristiques géométriques de ces semelles intercalaires sont régies par les dimensions de la chaussure, de manière à ce que cette semelle vienne s'emboîter sans jeu à l'intérieur de la chaussure. Lorsque les cales de surélévation sont utilisées (Fig. 9.) les semelles intercalaires sont usinées afin d'en réduire l'épaisseur, de manière à respecter la norme régissant la hauteur de l'ensemble cales de surélévation + chaussure + semelle intercalaire. En compétition, cette norme est de 43mm. Comme on peut le constater sur la photo 10b ci-dessous, ces semelles intermédiaires présentent un angle, de sorte que le talon du pied soit plus haut que l'avant pied.

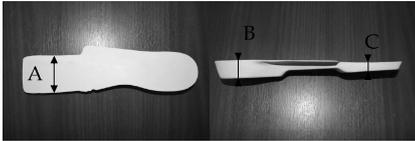


Fig. 10a et b. Une semelle intercalaire placée dans les chaussures de ski alpin, vue de dessus (a), et de côté (b) ; La largeur à l'avant-pied (distance A) est de 55mm. Les épaisseurs au talon (distance B) et à l'avant pied (distance C) sont respectivement de 24 et 12mm.

2.2.4 L'ensemble ski- fixation- chaussure

Pour l'ensemble des opérations qui nous intéressent, il est important de considérer non pas chacun des éléments présentés ci-dessus de manière isolée, mais bien de considérer l'interaction entre ces éléments. En effet le système de mesure développé devra impérativement respecter les fonctionnalités décrites, comme le respect des caractéristiques mécaniques du ski (la capacité du ski

à se déformer et à s'insérer dans le virage sous l'effet de la pression exercée par le skieur), ou bien encore le respect du fonctionnement des fixations de ski alpin (permettre le déchaussage des chaussures en cas de moments de force trop élevés, transmission des forces). La figure 11 ci-dessous présente cet ensemble ski/fixation/chaussure.

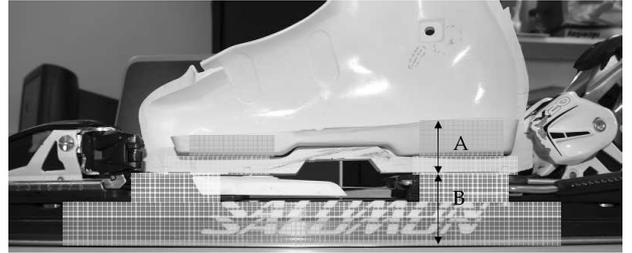


Fig. 11. Une chaussure de ski alpin insérée dans la fixation. On distingue l'ensemble ski/plaque/fixation, la coque de la chaussure, la semelle intercalaire, ainsi que les zones de contact entre chaussure et fixation (traits rouges). Les épaisseurs respectives des différents composants de cet ensemble sont représentées par le code couleur : ski (rouge) ; plaque (orange) ; jaune (fixation) ; coque des chaussures de ski (vert) ; et semelles intercalaires (bleu). La hauteur A est au maximum de 43mm, la hauteur B au maximum de 50mm (norme FIS). Les cales de surélévation (Fig. 9) ne sont pas représentées ici.

En général, les zones de contact entre la chaussure de ski alpin et la fixation de ski alpin sont assez réduites (voir fig. 12. et 13, zones colorées), et se résument en trois points :

- Une zone en contact avec la butée de la fixation, sous l'avant de la chaussure de ski, sur toute sa largeur et sur 1 à 2cm de longueur.
- Deux zones en contact avec la talonnière, placées latéralement et en arrière de la chaussure. En effet, la partie médiane est occupée par la pédale qui rétracte les stop-ski, et la transmission des forces ne passe donc pas par cette zone.

Les dimensions de ces trois zones sont précisées dans la Fig. 12 ci-dessous.



Fig. 12. Les zones de contact entre chaussure et fixation de ski alpin (zones hachurées et rouges), sous la chaussure. Les dimensions sont les suivantes : a : 20mm ; B : 69(±2) mm (voir Fig.5) ; C : 12 mm ; D : 40 mm.



Fig. 13. Les zones de contact entre chaussure et fixation de ski alpin (zones hachurées et rouges), sur la fixation.

3 CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL

Les principales fonctions que le système de mesure devra remplir sont hiérarchisées ci-dessous :

Fonctions principales :

- Fonction principale 1 (FP1) : Acquérir les forces et moments de force externes de réaction du ski sur la chaussure en 3 dimensions, ainsi que les coordonnées (x, y) du point d'application de la résultante des forces dans le référentiel capteur, et ceci pour les pieds droit et gauche.

Fonctions de contrainte :

- Fonction de contrainte 2 : Pouvoir être utilisé en variant l'équipement (ski, chaussure, fixation) : s'adapter au matériel existant sans lui être invasif
- FC 3 : Respecter le comportement mécanique propre de l'ensemble ski/fixation/chaussure (torsion, flexion des skis, déclenchement des fixations...).
- FC 4 : S'adapter aux skieurs, ne pas les gêner dans leurs mouvements ou perturber leurs sensations habituelles.
- FC 5 : Être robuste à l'environnement d'utilisation (impermeabilité, température, humidité, pression atmosphérique...).
- FC 6 : Être simple et rapide à utiliser, à mettre en marche et à désinstaller ; ne pas nécessiter de compétences particulières en instrumentation.

Ces caractéristiques sont traduites en valeur dans le paragraphe suivant.

4 CAHIER DES CHARGES TECHNIQUE

4.1 Spécifications du capteur

Le capteur devra respecter les spécifications techniques suivantes:

- Etendue de mesure (E.M.) :
 - Axe X : ±1000N
 - Axe Y : ±1000N
 - Axe Z : ±3000N
 - Axe Mx : ±200Nm
 - Axe My : ±500Nm
 - Axe Mz : ±200Nm
- Surcharge :
 - sans détérioration métrologique 150 % de l'E.M
 - sans destruction mécanique 200 % de l'E.M
- Tension d'alimentation nominale (stabilisée) ± 5 ou 10 Vcc ± 5 ou 10 Vcc
- Sensibilité nominale pour l'étendue de mesure 1,5 mV / V.
- Ecart de linéarité ≤ ± 0,1 % de l'E.M
- Erreur d'hystérésis ± 0,05 % de l'E.M
- Erreur de répétabilité ≤ ± 0,02 % de l'E.M
- Déséquilibre initial de zéro < 2 % de l'E.M
- Température d'utilisation -15°C à +20°C.
- Plage de compensation thermique standard +10°C à +30°C.
- Dérive thermique du zéro dans la plage compensée ≤ ± 0,1 % de l'E.M / 10° C.
- Dérive thermique de la sensibilité dans la plage compensée ≤ ± 0,1 % / 10° C
- Degré de protection IP 57
- Résistance d'isolement ≥ 1000 MΩ / 50 Vcc
- Sortie électrique par conducteur binder 4 broches
- Longueur du câble 2m
- Masse additionnelle maximale (par pied) 500g
- Surélévation maximale due au système de mesure 2cm
- Amplificateur Sortie en ± 5 ou 10Volts en fonction de la carte d'acquisition

4.2 Autres considérations

- Un dossier technique devra être fourni et comportera, outre les documents prévus dans la réglementation (schéma, mode d'emploi, etc...), les informations concernant l'utilisation, la maintenance de l'équipement, le tout en français et/ou en anglais.
- Si l'équipement nécessite un étalonnage, celui-ci doit être livré étalonné et accompagné des certificats d'étalonnages.
- Un devis devra être établi sur la base de la conception et la fabrication d'un exemplaire du système de mesure (deux pieds).
- Le devis devra également faire apparaître le coût supplémentaire engendré par la fabrication d'un deuxième exemplaire du système de mesure.
- Le capteur devra également pouvoir être synchronisé avec une centrale inertielle par chaussure, de manière à pouvoir recalculer l'orientation du repère (origine et direction des axes XYZ), ainsi que la position relative d'une chaussure par rapport à l'autre.

4.3 Références normatives :

En raison de l'environnement sévère dans lequel le capteur sera amené à être utilisé (neige, humidité, etc...), il devra respecter la norme **IP57** (définie par la norme IEC 60529).

Le capteur devra être en conformité avec la norme **ISO 5355** qui spécifie les caractéristiques principales de la géométrie des chaussures de ski alpin (et notamment la partie basse, zone de contact chaussure/fixation, voir Fig. 8).

Le système de mesure devra également être en conformité avec la norme **ISO 9462** qui spécifie les caractéristiques principales des fixations de ski.

Ainsi, le système pourra provoquer des modifications de la géométrie de l'ensemble chaussure/fixation, mais ces modifications ne doivent pas modifier le comportement de la fixation de ski, et rester en accord avec la norme ISO 9462.

4.4 Spécifications des conditions de réalisation des essais

La durée d'un essai pourra varier de 30s à 2min. Le capteur devra être réalisé pour une paire de chaussures de ski, de manière à pouvoir mesurer les forces et moments de forces simultanément sous le pied droit et le pied gauche. Les différents produits qui seront testés seront des produits de série, respectant les différentes normes qui régissent leur développement et présentés plus haut. Le système de mesure pourra être utilisé pour tester des produits différents (skis, fixations, chaussures de ski). Les conditions de neige pourront varier (neige très dure, neige molle, humide, poudreuse...). Le système de mesure sera amené à être déplacé. Il pourra ainsi être transporté en voiture, en avion ou par bateau.

4.5 Caractéristiques des sujets participant

Des sujets humains (athlètes, testeurs, etc...) seront utilisés lors des essais. Leur masse totale (équipement inclus) pourra varier de 50kg à 100kg. Le niveau d'expertise des sujets, ainsi que leur âge ou leurs caractéristiques physiques pourront varier grandement.

4.6 Environnement d'utilisation

Le système de mesure sera utilisé lors d'essais en situation de pratique des sports de glisse sur neige. Il devra permettre de mesurer les caractéristiques mécaniques de la locomotion en ski alpin, et ce pour différentes modalités de pratique de l'activité (piste, hors-piste, compétition...). La température atmosphérique lors des essais pourra varier de -15°C à +20°C. Le taux d'humidité pourra aller jusqu'à 100%. L'altitude d'utilisation pourra varier de 1000 à 3500m, et la pression atmosphérique de 650 à 900 hPa.

4.7 Enregistrement

La conception de l'ensemble du projet rend l'obligation du système à être autonome en énergie. Le capteur sera alimenté par une batterie embarquée. Le stockage des données se fera également par du data logging embarqué, tel que sur la Fig. 12 ci-dessous. La tension du signal de mesure sera de ± 5 ou $\pm 10V$. Le boîtier d'acquisition sera préférentiellement placé au niveau des

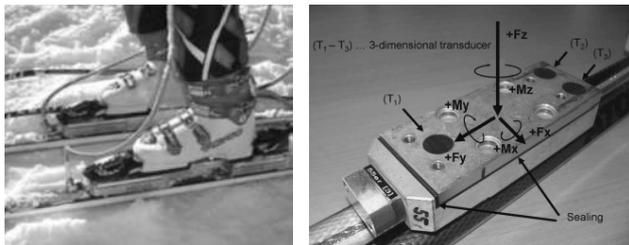


Fig. 15a et b. Une plateforme de force placée entre le ski et la fixation de ski (solution A), d'après Stricker et al. 2010. a) Vue d'ensemble du système dans son contexte ; b) zoom sur le système de mesure situé sous la fixation avant, composé de 3 capteurs 3 composantes (T1, T2 et T3).

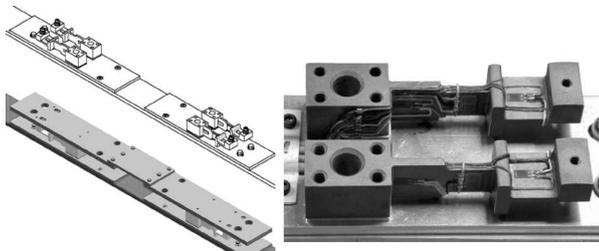


Fig. 16a et b. Une plateforme de force placée entre le ski et la fixation de ski (solution A), d'après Freddi et al. 2002. a) En haut les 4 capteurs, en bas le système complet prêt pour les calibrations ; b) zoom sur un ensemble de deux capteurs 3 axes situés sous une fixation.

chaussures, ou au niveau de la taille en fonction de la solution d'acquisition validée. La connectique sera de type binder 4 broches, et les câbles auront une longueur de 2m.



Fig.14. Un microdata logger s'occupant de l'alimentation et du stockage des données, ici de deux capteurs de force uni-axiaux. D'après Freeseense.

5 BENCHMARK TECHNIQUE

Une analyse de la littérature a fait état d'un manque d'outils de mesure disponibles, ainsi que de nombreuses améliorations qui pourraient être apportées aux systèmes actuellement développés. En effet, les systèmes existants présentent de trop nombreuses limitations concernant principalement l'ergonomie, la masse, ainsi que la hauteur (voir notamment Stricker et al. 2010). Ainsi la mesure des forces en ski alpin constitue actuellement un verrou technologique.

A ce jour, plusieurs solutions techniques ont déjà été développées par d'autres laboratoires et industriels à travers le monde, afin de mesurer les forces et moments de force de réaction du sol à l'interface skieur/équipement :

- Des plaques rigides fixées entre la fixation et le ski (solution A, Fig. 15 et 16).
- Des « interfaces » venant se chausser telle une chaussure dans les fixations du ski (solution B, Fig. 17), la chaussure venant se fixer par-dessus à l'aide de clapets. Cette solution repose sur le principe du respect de la norme ISO5355 par l'ensemble du système de mesure, afin qu'il puisse venir s'insérer dans la fixation.
- Des capteurs de force intégrés dans la coque de la chaussure (solution C, Fig. 18).
- Une semelle intercalaire instrumentée (solution D, Fig. 19).

Ces différentes solutions sont présentées dans les figures ci-dessous, puis leurs principales caractéristiques sont résumées dans le tableau 1 ci-après :



Fig. 17a et b. Une plateforme de force à insérer en tant qu'interface entre les chaussures et les fixations (solution B). a) D'après Meyer et al. 2011; b) d'après Kieffmann et al. 2006.

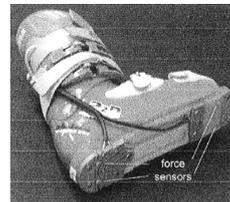


Fig. 18. Des capteurs de forces insérés dans la coque de la chaussure (Solution C). D'après Nemec, 1997. On distingue bien les 4 différents capteurs de force intégrés dans la coque de la chaussure.



Fig. 19. Une semelle intercalaire instrumentée (solution D). Elle permet de mesurer les moments My et Mx (d'après Petrone et al. 2010).

Référence	Fig.	Masse additionnelle (par pied)	Hauteur	Axes forces	Axes moments
Stricker, 2010	15a et b	1,8 kg	36 mm	3 axes	3 axes
Freddi, 2002	16a et b	Nsp	Nsp	3 axes	3 axes

Meyer, 2011	17a	Nsp	25 mm	Fy, Fz	3 axes
Kiefmann, 2006	17b	2 kg	40 mm	3 axes	3 axes
Nemec, 1997	18	Nsp	inchangée	Fz	Mx, My
Petrone, 2010	19	Nsp	inchangée	0	My, Mz

Tabl. 1. Tableau récapitulatif des différentes solutions rencontrées.

Il faut noter que pour contourner ces limites, des semelles de pression sont souvent utilisées. Elles s'insèrent dans le chausson, juste sous la chaussette. Elles permettent la mesure de la pression, de la force normale à leur surface et du centre de pression. Cependant, elles ne permettent pas une mesure de la force selon les trois axes (Kersting et al. 2011).

5.1 Identification des points sensibles

Les améliorations qui devront être apportées par rapport à l'existant peuvent être principalement résumées en trois axes :

- **Epaisseur** : En fonction des solutions présentées ci-dessus, l'épaisseur des capteurs actuels induit une surélévation du skieur de l'ordre de 3 à 4 cm. Bien qu'une certaine surépaisseur due au capteur soit inévitable, il faudra veiller à ce qu'elle soit la plus faible possible.
- **Masse** : La plupart des systèmes de mesure présentés ajoutent une masse supplémentaire de l'ordre de 2kg par pied. Là encore, bien qu'une certaine masse supplémentaire soit inévitable, il faudra veiller à ce qu'elle soit la plus faible possible.
- **Gestion des données** : L'ensemble des systèmes présentés utilisent un sac à dos et un lien filaire entre le système de mesure et ce sac à dos. Les progrès technologiques rendent possible une intégration au niveau de la chaussure de l'alimentation et de la gestion des données. Ceci implique donc une problématique de synchronisation entre les différents capteurs (pas de lien filaire entre les deux pieds).

Les deux premières améliorations sont directement à prendre en compte dans le présent cahier des charges. La troisième amélioration résulte d'un autre lot de travail, mais est à prendre en compte dans la réponse apportée au présent cahier des charges.

6 SOLUTIONS TECHNIQUE PRESENTIES

A la vue des spécificités de notre demande (cahier des charges fonctionnel, paragraphe 3), et des différentes solutions ayant déjà été développées (paragraphe 5), il a été décidé d'écarter les solutions A et D ci-dessus.

7 EXIGENCES GENERALES

- Le point le plus important sera de respecter la versatilité du système de mesure, i.e. sa capacité à s'adapter à différents équipements (possibilité de changer de skis, de chaussures, etc...).
- Si différentes solutions techniques sont apportées, la priorité sera donnée au système le plus compact possible, dans sa surépaisseur et sa masse additionnelle.
- Le système de mesure devra être simple à utiliser, et ne pas nécessiter de compétences particulières en instrumentation. Il ne devra ainsi pas nécessiter de procédure qui soit à la fois longues et complexes prioritairement à son utilisation.
- Le système de mesure pourra nécessiter un outillage, à condition que celui-ci soit léger et tienne dans un sac à dos.

8 REFERENCES

- Fédération Internationale de ski (FIS). 2013. Specifications for competition equipment and commercial markings. Edition 2013/2014.
- Freddi, A. Olmi, G. Crocchio, D. 2002. A new transducer for directly measuring the forces and moments which a skier transfers to the skis. Reports in applied measurement.
- International Electrotechnical Commission (IEC). 2013. IEC 60529: Degrees of protection provided by enclosures (IP Code), ed. 2.2.
- ISO11088. 2006. Assembly, adjustment and inspection of an alpine ski/binding/boot (S-B-B) system.
- ISO 9462. 2003. Alpine ski-bindings, safety requirements and test methods, International Standards.
- ISO 5355. 2005. Alpine ski-boots, requirements and test methods, International Standard.
- Kiefmann, A. Krinninger, M. Lindemann, U. Senner, V. Spitzenpfeil, P. 2006. A new six component dynamometer for measuring ground reaction forces in alpine skiing. In: Moritz, E.F., Haake, S. (eds.). The Engineering of Sport 6. Springer New York. p 87-92.
- Kersting, U.G. Kurpiers, N. Hild, E. Kiefmann, A. Senner, V. 2011. Comparison of a six degree-of-freedom force sensor and pressure insole measurements in selected skiing manoeuvres. *Clinical Biomechanics*, 26 (6), 680-680.
- Meyer, F. 2011. Biomechanical analysis of alpine skiers performing giant slalom turns. PhD Thesis. University of Lausanne, Switzerland.
- Nemec, B. 1997. A system for measuring ground reaction forces in alpine skiing. *Coaching and Sport Science Journal*, 2, 46-55

Petrone, N. Marcolin, G. et al. 2010. Analysis of the structural behavior of an innovative reinforced ski boot. *Procedia Engineering* 2 (2), 2599-2604.

Stricker, G. Scheiber, P. Lindenhofer, E. Müller, E. 2010. Determination of forces in alpine skiing and snowboarding: Validation of a mobile data acquisition system. *European Journal of Sport Science* 10 (1), 31-41.

Wimmer, M.A. Holzner, R. 1997. Constraint forces may influence the measurement of vertical ground reaction force during slalom skiing. In: Müller, E. Kornel, E. & Raschner, C. (ed) Science and Skiing. London: E & FN Spon. 208-215.

Yoneyama, T., M. Kitade, et al. (2010). "Investigation on the ski-snow interaction in a carved turn based on the actual measurement." *Procedia Engineering* 2(2): 2901-2906.

Annexe 2 - Delhayé, C., Cross, M., Bowen, M., Samozino, P., and Hintzy, F. (2019). "Kinetic and kinematic turn switch detection in giant slalom," in *Science and Skiing VIII*, eds. M. Karczewska-Lindinger, A. Hakkarainen, V. Linnamo, and S. Lindinger (Meyer & Meyer Sport Ltd), 73–79.

KINETIC AND KINEMATIC TURN SWITCH DETECTION IN GIANT SLALOM

Clément Delhaye¹, Matt Cross¹, Maximilien Bowen¹, Pierre Samozino¹, & Frédérique Hintzy¹

¹ Univ Savoie Mont Blanc, Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité, EA 7424, F-73000 Chambéry, France

Keywords: Alpine skiing, Biomechanics, Force-plates, GNSS, Turn switch

Introduction

Biomechanical analyses of alpine skiing performance typically separate data into turns to define the cyclic motor abilities of the athlete. Detecting the beginning and end of a turn is a challenging task for researchers and mainly depends on the definition chosen and the technologies used. When aiming to detect the moment of switching from one turn to another, there are two main approaches: 1) consider the end of a turn at the beginning of the proceeding one (Approach 1), in which a ski run is strictly an alternation of right and left turns separated by a turn switch (TS) event, and 2) a straight-line transition period is considered between two turns, which defines the alternation between straight and turn phases as separate. These two approaches can be implemented on both kinetic and kinematic data signals.

The current 'gold-standard' in kinematic measurement techniques (relevant to Approach 1) projects the skier's center of mass (COM) onto the snow surface and detects a TS when COM and ski trajectories cross paths (Supej and Nemeč 2003). This event corresponds to the switch of skier's direction of inclination. While accurate, this method requires a complex set up of 3D motion capture cameras and post processing. Consequently, analyses of more than a few turns are difficult. COM and ski trajectory can also be estimated using inertial measurement units (IMU) and Global Navigation Satellite Systems (GNSS) (Fasel et al. 2016); these sensors are accurate but similarly require complex data processing. A less computationally demanding method of detecting the TS is to use GNSS data to determine the inflexion point (Traj_{infl}) of the COM trajectory (Adelsberger et al. 2014). Notably, this method is comparable to the gold-standard (lag <30 ms; Fasel and Gilgien 2017) and can provide data over much greater course lengths. Finally, kinematic data can be used to detect TS events via Approach 2; namely, the COM trajectory straight and turn

phases can be separated when the turn radius of COM crosses 30m ($Tra_{j>30}$, $Tra_{j<30}$) (Spörri et al. 2012). These events correspond to the end or the beginning of substantial COM direction change, which can be subsequently linked to the beginning and the end of the turn phase.

While less common, TS events can be computed using kinetic data. The gold standard corresponding to Approach 1 defines TS as the minimum summated normal ground reaction force (nGRF) exhibited over a given turn cycle (F_{min} ; Nakazato, Scheiber, and Müller 2011). As such, the TS phase is associated with a period when force applied to the skis is close to zero (i.e. an unweighting between turns), which is surrounded by large force application on the relevant outside ski (Schaff, Senner, and Kaiser 1996). Further to the specific TS moment, these data can also define distinct events within the turn phase (e.g. turn initiation) (Nakazato, Scheiber, and Müller 2011), and detecting the beginning and end of the nGRF on the outside ski (relevant to Approach 2) could be an interesting new method to define the beginning and end of a turn. Indeed, the outside ski supports higher nGRF during turn than inside ski and is mostly involved in direction change of the skier. The beginning of the force application of the outside limb induces bending of the ski (Yoneyama et al. 2008) and could be directly linked trajectory changes.

There are several methods and approaches to segment a ski run into turns. Consequently, researchers or practitioners with access to multiple data streams lack guidance on which method or technology is optimal for a specific situation or aim. Furthermore, there is sparse information regarding the link between kinetic and kinematic events at turn initiation. The aim of this study is to explore time difference between cutting turns methods and evaluate if clear relationships exist between kinematic and kinetic definitions of the beginning and the end of a turn.

Methods:

13 mixed-level skiers (club to world cup competitors) performed a timed 16-gate giant slalom course. Gates were set by an International team coach with an average distance of 24 m and an offset of 8 m, on a $\sim 25^\circ$ inclined groom slope. All skiers were equipped with same model of ski and boots and were instructed to perform at comfortable race-pace. Boots were equipped with validated 3D force platforms (Falda-

Buscaiot et al. 2016) recording at 200 Hz which provided force and torque data between ski boots and bindings. A synchronized cervical mounted GNSS/IMU unit (MacLloyd, Paris, FRA) with factory fusion computations recorded 3D position, Doppler speed at approximately 10 Hz. Athletes performed 1-2 runs of the course, for a total of 220 turns analyzed (excluding skating steps).

The objectives of this study were to determine the difference between events from different methods (see Figure 1): two ‘end of turn’ events (per Approach 2), two ‘TS’ events (per Approach 1) and two ‘beginning of turn’ events (per Approach 2). This six turn switch events were detected from either kinetic (“**F**”) or kinematic (“**Traj**”) data.

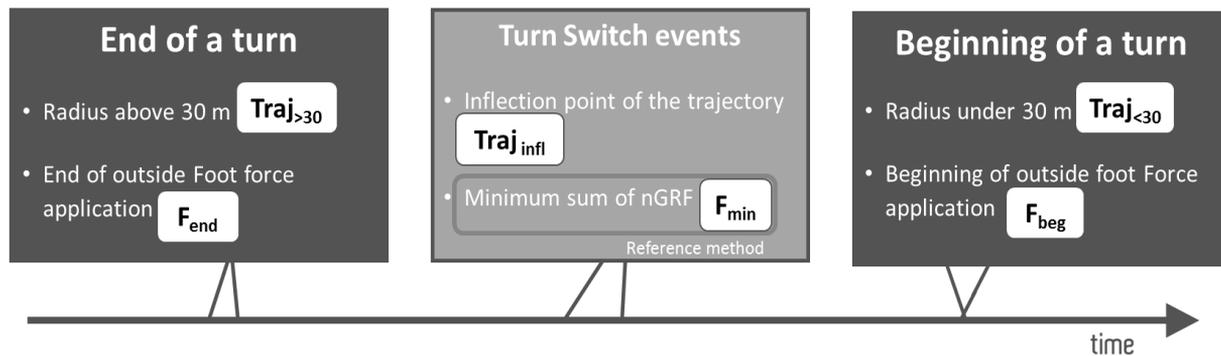


Figure 1: Overview of events; “**Traj**” for kinematic events and “**F**” for kinetic events, TS events are relevant to Approach 1, and ‘beginning’ and ‘end of turn’ to Approach 2.

The minimum sum of nGRF (2nd order low-pass filtered at 2 Hz) of two skis (F_{min}) was considered as the reference method. All the other events were expressed in time difference to F_{min} . Turn beginning and end were manually determined on the low-pass filtered signal (2nd order, 25 Hz) as the instant when force was applied or removed to the outside ski around the moment of F_{min} (± 250 ms; F_{beg} and F_{end} , respectively). The inflexion point was computed via triple derivation of the cervical trajectory (from GNSS data) as the sign change ($Traj_{infl}$). Finally in order to compute the beginning and the end of the straight line phase between two turns, the radius of the turn was calculated by fitting circles along the trajectory using Pratt method (Pratt 1987) on a 0.025 s window. The moment of COM trajectory passing above 30 m ($Traj_{>30}$) and under 30 m ($Traj_{<30}$), represented the beginning and end of a turn, respectively.

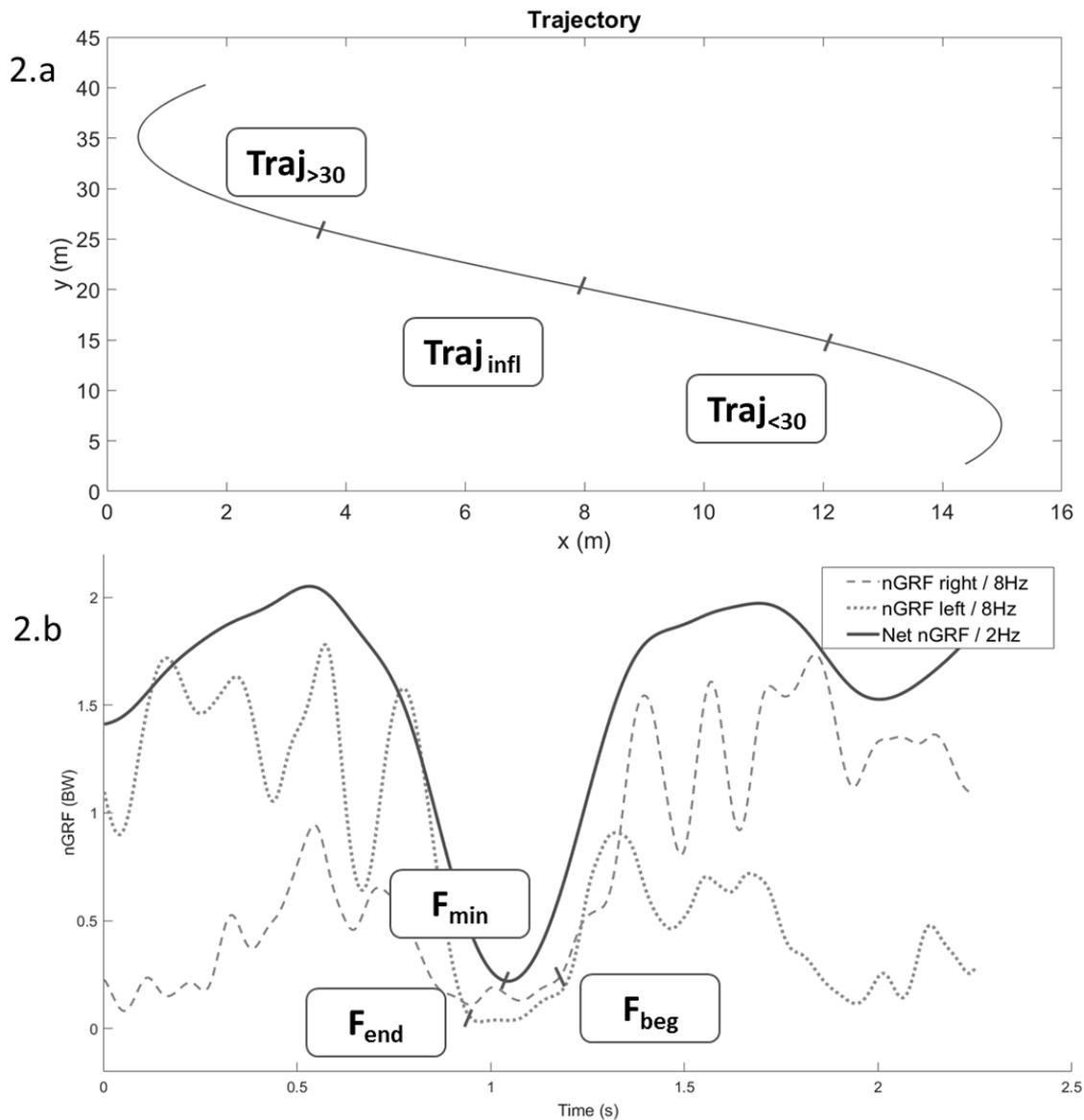


Figure 2: Illustration signals of skiers COM trajectory (2.a) and normal Ground Reaction Force (2.b) with right and left foot in dotted lines (low-pass 8 Hz cut-off filter) and sum of both feet in solid line (low-pass 2 Hz cut-off filter). Respective TS event are noted on both panels

All the kinematic and kinetic events are reported for one example turn on Figure 2.a and 2.b. A repeated measures ANOVA (1 factor, 6 modes) and Bonferroni Post-Hoc comparisons were performed, to test the effect of detection methods on the time of the different events, ($P < 0.05$).

Results

Time lag between the reference (F_{\min}) and the other methods are reported in Table 1. There were clear ($P < 0.001$) differences between all methods, except between $Traj_{\text{infl}}$ and F_{beg} which shown no statistical difference. The lag difference between these two events was 3.3 ms (± 12 ms). Assuming $Traj_{\text{infl}}$ and F_{beg} can be considered as a common event, the order of appearance during a turn was: $Traj_{<30}$ and $Traj_{\text{infl}}$ (and/or F_{beg}) always last and second-to-last, respectively. F_{end} is logically consistently before F_{\min} , and the order of $Traj_{>30}$ was variable (1st (68 %), 2nd (25 %) or 3rd (7 %)).

Table 1: Lag between methods

Method	Lag (ms)	Std Dev (ms)
$Traj_{>30}$ *	-190 \pm 173	
F_{end} *	-108 \pm 48	
F_{\min} *	0 \pm 0	
F_{beg}	157 \pm 91	
$Traj_{\text{infl}}$	160 \pm 92	
$Traj_{<30}$ *	458 \pm 108	

*: Statistical differences with all other methods ($p < 0.001$)

Discussion and conclusion

The major result of this study was that time per turn shifted depending on the turn cutting method used. Kinetic TS events (F_{\min}) were always detected earlier than kinematic TS events ($Traj_{\text{infl}}$). Based on this finding, during direction the change period trajectory appears a consequence of the skier's action. This statement must be considered when integrating the methods into research and practice.

From a practical position, this study clearly shows that the athlete's trajectory is a consequence of the manipulation of ground-reaction forces. While clearly logical, these findings serve to solidify the understanding of ski mechanics. Of interest to those progressing in the field of skiing biomechanics analysis, our results have important implications for analysis procedures. Namely, since the definition of the beginning and end of a ski turn (and underlying methodological design) provide clearly different results, the aim of the measurement will determine the technological and analytical approach implemented.

The reference kinetic method to cut turns (F_{\min}) does not occur concomitantly with kinematic events, so a turn cut with this method contains two trajectory direction changes. To cut turns including only one direction change we recommend using the beginning of force application on the external ski (F_{Beg}). While F_{beg} is presently found

using manual selection, programmatic automatization could aid in reducing potential processing bias. A lower individual error when compared to global error might indicate that the inter-athlete strategic and technical approaches explain some of the results observed.

Lag between $Traj_{<30}$ and $Traj_{infl}$ (~20 % of turn time) corresponds to the values previously reported between $Traj_{<30}$ and the kinematic gold standard (Spörri et al. 2012). Similarly, (Fasel and Gilgien 2017) showed that $Traj_{infl}$ is close to the kinematic gold standard. While in this study we only compared the difference in timing between the various methods, it seems clear that depending on the approach taken to separate a downhill run into distinct turns, different results might be observed in a variety of output variables (e.g. dissipation in mechanical energy) – particularly over short analysis windows. Since the body of research features a variety of turn switch methods, careful selection and rationale of the method selected would aid in the future comparison of research findings.

Future researchers are encouraged to perform a deeper analysis of vGRF pattern to better clarify these findings, and the relationship between technical strategy and observed lag. Clearly, force output is of interest, given the inferred importance to kinematic events and some factors of performance.

References

- Adelsberger R., Aufdenblatten S., Gilgien M., and Tröster G. 2014. "On Bending Characteristics of Skis in Use." *Procedia Engineering* 72 (10): 362–67.
- Falda-Buscaiot T., Hintzy F., Rougier P., Coulmy N., and Lacouture P. 2016. "Development of a New 6-Components Force Sensor Design for Biomechanical Research in Alpine Skiing." In *7th International Congress on Science and Skiing* (7).
- Fasel B., and Matthias G. 2017. "IMU and GNSS-Based Turn Switch Detection in Alpine Ski Racing." *Science and Skiing VII* 7 86–92.
- Fasel B., Spörri J., Gilgien M., Boffi G., Chardonens J., Müller E., and Aminian K. 2016. "Three-Dimensional Body and Centre of Mass Kinematics in Alpine Ski Racing Using Differential GNSS and Inertial Sensors." *Remote Sensing* 8 (8): 671.
- Nakazato K., Scheiber P., and Müller E. 2011. "A Comparison of Ground Reaction Forces Determined by Portable Force-Plate and Pressure-Insole Systems in Alpine Skiing." *Journal of Sports Science and Medicine* 10 (4): 754–62.

- Pratt V. 1987. "Direct Least-Squares Fitting of Algebraic Surfaces." In *Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques - SIGGRAPH '87*, 21:145–52.
- Schaff P., Senner V., and Kaiser F. 1996. "Pressure Distribution Measurements for the Alpine Skier - from the Biomechanical High Tech Measurement to Its Application as Swingbeep Feedback System." In *Science and Skiing (1)*, 159–72.
- Spörri J., Kröll J., Schwameder H., and Müller E. 2012. "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): 647–59.
- Supej M., and Nemeč B. 2003. "Kinematic Determination of the Beginning of a Ski Turn." *Kinesiologia Slovenica* 9 (1): 11–17.
- Yoneyama T., Scott N., Kagawa H, and Osada K. 2008. "Ski Deflection Measurement during Skiing and Estimation of Ski Direction and Edge Angle." *Sports Engineering* 11 (1): 3–13.

Annexe 3 - Delhayé, C., Cross, M. R., Bowen, M., Samozino, P., and Hintzy, F. (2020). Influence of Line Strategy Between Two Turns on Performance in Giant Slalom. *Front. Sport. Act. Living* 2, 1–8. doi:10.3389/fspor.2020.589257.



Influence of Line Strategy Between Two Turns on Performance in Giant Slalom

Clément Delhaye^{1*}, Matthew R. Cross^{1,2}, Maximilien Bowen¹, Pierre Samozino¹ and Frédérique Hintzy¹

¹ Univ. Savoie Mont Blanc, Inter-University Laboratory of Human Movement Biology, Chambéry, France, ² Département Scientifique et Sportif, Fédération Française de Ski, Annecy, France

OPEN ACCESS

Edited by:

Gregoire P. Millet,
University of Lausanne, Switzerland

Reviewed by:

Ryota Sakurai,
Tokyo Metropolitan Institute of
Gerontology, Japan
James Borrelli,
University of Maryland, Baltimore,
United States

*Correspondence:

Clément Delhaye
clement.delhaye@univ-smb.fr

Specialty section:

This article was submitted to
Biomechanics and Control of Human
Movement,
a section of the journal
Frontiers in Sports and Active Living

Received: 30 July 2020

Accepted: 19 October 2020

Published: 25 November 2020

Citation:

Delhaye C, Cross MR, Bowen M,
Samozino P and Hintzy F (2020)
Influence of Line Strategy Between
Two Turns on Performance in Giant
Slalom.
Front. Sports Act. Living 2:589257.
doi: 10.3389/fspor.2020.589257

In alpine ski racing, different line choices can drastically affect turn or sectional performance. The straight-line transition between two turns is the main phase where skiers can gain speed in a race, open their trajectory, or reduce their path length. Between two turns, a skier can foster speed increase by spending more time in a straight line, inducing sharper turning phases (Z strategy). Inversely, speed can be conserved during the entire turn cycle by performing long curved turns separated by a short straight line (S strategy). This research aimed to evaluate the kinetic and kinematic specificities associated with the line strategy and to explore interactions of selected strategy with skier performance and energy dissipation. A mixed-level population of male alpine skiers ($n = 17$) skied a timed giant-slalom course while equipped with specialized force plates and a positional device collecting synchronized normal ground reaction force and position-time data, respectively. Time of edge switch was computed from the force signal as the period with the lowest force application on the outside ski. From positional data, turn cycles were separated into turning and straight-line phases (radius below and above 30 m, respectively). Time length, path length in the straight line, speed amplitude, and change in specific mechanical energy were computed for each turn and averaged for each skier. The path length during straight line was used to continuously characterize the line strategy within the spectrum between the Z (long straight line) and S (short straight line) strategy. Path length in the straight line was correlated with the amplitude of speed over a straight line ($r = 0.672$, $p = 0.003$) and relative and absolute time spent in the straight line ($r = 0.967$, $p < 0.001$). However, path length in straight line was not correlated with decrease of speed in the following turn ($r = -0.418$, $p = 0.390$) or time without force application on the outside ski ($r = 0.195$, $p = 0.453$). While higher-performing athletes on the course performed turns during which they dissipated less energy when normalized to entry speed ($r = -0.620$, $p = 0.008$), it appears they did so with variable turn strategies approaches.

Keywords: alpine skiing, performance, trajectory, GNSS, force-plate

INTRODUCTION

To achieve the lowest possible race time, alpine skiers must continuously adapt their strategy and technique. Skiers perform turns according to their position, speed, and balance (influenced by the previous turn), individual capacity evolving with fatigue (technical, physical, psychological), and environmental factors (e.g., snow characteristics and micro reliefs, steepness, visibility, course setting, ski gear) (Supej and Holmberg, 2019). Some parameters cannot be anticipated before the race, which means skiers must continuously adapt their turn line strategy throughout the race.

In this article, the alpine skiing turn is defined by a straight line (SL) followed by a turning phase (TP). The trajectory and overarching turn characteristics the skiers choose (i.e., “line strategy”) can generate substantial differences in turn-time in giant slalom (GS) (Brodie et al., 2008) or on the following sections (Supej and Cernigoj, 2006). Skiers accelerate quasi-exclusively by converting potential energy into kinetic energy during the SL, while aerodynamic and ski/snow friction dissipate energy notably during TP. Energy dissipation characteristics are used to quantify performance (Hébert-Losier et al., 2014) and are commonly defined by the differential of the sum of kinetic and potential energy normalized to skier mass (m) (Supej, 2008; Reid et al., 2009). Since performance is partially dependent on the turns preceding it, normalizing energy dissipation to the velocity at the entry of the corresponding segment (v_{in}) provides a means of characterizing sectional performance ($\Delta e_{mech}/v_{in}$) (Supej and Holmberg, 2019). From a mechanical perspective, better turns are described by dissipating less energy via friction while following the most direct trajectory, which maximizes the transfer between potential to kinetic energy (Supej, 2008).

At every turn, skiers must balance between two strategic line approaches (Supej, 2008; Federolf, 2012).

The first line strategy focuses on reducing mechanical energy dissipation throughout the TP by avoiding skidding. This line strategy is typified by “carving” the skis in long arcing turning phases initiated higher on the slope and greater turn radii during the TP (Müller and Schwameder, 2003). It induces longer TP time, typically longer path lengths, an “S”-shape trajectory, and less speed gained during the SL due to less time spent close to the fall line. Barring high-energy dissipation during the TP, the technique should induce a low variation of energy dissipation during the turn. Coaches advise adopting this technique during low-dynamic phases and in flat, high-speed, and straight sections and do not recommend it after periods of high-speed dissipation (for example after heavy braking due to mistakes or cornering) (Lind and Sanders, 2004). The second-turn line strategy is based on maximizing the transfer of potential to kinetic energy between gates by following a trajectory closer to the fall line. Following this line strategy, skiers will typically delay the beginning of a TP and create a long SL between short TP resulting in a “Z”-shape trajectory. Since more time is spent close to the fall line, skiers gain more speed, and dissipate little energy during the extended SL phase. However, the approach is also characterized by sharper turns (i.e., lower radii), which might change ski–snow interactions and induce skidding and associated

energy dissipation during the TP. Consequently, this approach is recommended by coaches in steep, turning, and high dynamic sections. Skiers adopting these two approaches could feasibly gain the same turn or sectional performance, with drastically different energy behaviors (i.e., variability in energy dissipation within the turn) during each turn. Theoretically, these two strategies are called “S” and “Z” strategies in this article, respectively, and represent opposite ends of a continuum of performance separated and identified by length of the SL.

Few studies have assessed the interaction between line strategy and performance. Articles focusing on turn line strategy and Δe_{mech} in giant slalom (Supej, 2008) or in slalom (Federolf, 2012) have not presented clear correlations. This result may be linked to the small and homogeneous observed samples or specific factors relating to the course setup (e.g., a small number of gates observed). Moreover, for skiers with higher v_{in} (typical of high-level skiers), increased velocity or preserved energy is more challenging than for other skiers, and the normalization per entry velocity (i.e., $\Delta e_{mech}/v_{in}$) effectively quantifies skiing efficiency. Consequently, subsequent investigations presented a very strong correlation between $\Delta e_{mech}/v_{in}$ and race time in slalom (Supej et al., 2011) and in GS (Spörri et al., 2018). In the latter example, the authors presented a mechanical model of performance that quantified the weighted contribution of the capacity to gain or maintain speed relative to the previous section performance (i.e., $\Delta e_{mech}/v_{in}$) and the trajectory of the skier (as the cumulated distance per turn) (Spörri et al., 2018). Better-performing skiers typically minimized energy dissipation relative to $\Delta e_{mech}/v_{in}$, without an association with path length. The authors concluded that potentially the turn may be separated into phases with distinct aims, with the former half of the turn characterized by minimizing dissipation of energy and a shortening of the path length being preferable in the latter. Spörri et al. (2012) reported that a higher altitude of turn initiations and turn ends were associated with a reduction of time on short sections around the analyzed turn—albeit based on only one skier trial. However, while the interaction between line strategy and performance is associated with minimizing sectional energy dissipation relative to entry velocity, SL, and TP specific energy behaviors have never been clearly assessed.

According to Newtonian physics, a skier must apply external force to deviate from rectilinear motion to turn. When a skier is turning with carving technique, a radial force (i.e., in the direction of the center of the turn) is applied and depends on the speed, the mass of the skier, and the turn radius (radial force [$F_r = m \cdot \text{velocity}^2 / r$]). The radial force can be considered as the component of the ground reaction force acting in the direction of the center of the turn. Therefore, to increase this force, a skier can theoretically increase the lateral angulation with the snow and increase the resultant normal reaction force (i.e., the normal reaction force applied to the ski in the ski reference, nSkiRF). The positive correlation between mean nSkiRF value and performance is shown by some studies on direct and indirect measurement (Cross et al., 2019). Moreover, the application of nSkiRF differs with turn trajectory, radius (Nakazato et al., 2011), and skier level (Supej et al., 2011). According to the radial force equation above, at equal entry speed, the “Z”-shape trajectory

strategy (i.e., associated with smaller turn radii during TP) will require higher nSkiRF during the TP, necessitating greater muscular output, and technical management of the ski snow contact (Federolf, 2012). High-level skiers present intrinsically better technical (i.e., capacity to carve at shorter turn radii) and physical skills (Vogt and Hoppeler, 2014; Franchi et al., 2019), which could allow them freedom to select the Z line strategy while maintaining ski snow contact with low skidding. The low variation of energy dissipation (i.e., “S” trajectory) technique is associated with carving, more extended turning phases, and longer force application time (Brodie et al., 2008); consequently, time to transfer force from one ski to the other could be shorter. This time without nSkiRF on the outside foot is considered as the edge switch moment and could be related to the line strategy used and the technical abilities of the skiers. In this case, technical abilities may allow skiers to perform complex tasks quicker, apply force more effectively to the snow, and continually adapt their trajectory. The assessed lag between force application and consequences on trajectory could be an interesting parameter of technical level. However, the interaction between force application and energy dissipation strategies has never been directly assessed.

The turn switch (TS) is the event used to separate two turns. Despite appearing to be a key event of strategic decisions for skiers, behavior during this period has attracted less attention in the research. At present, there are several ways to separate a course into individual turns via detection of the TS from kinematic and kinetic markers (Fasel and Gilgien, 2016) and subsequently separate a course into individual turns. In the first instance, the available methods are dictated by the sensors involved during the experimentation: stereoscopic 3D cameras (Supej and Nemec, 2003; Spörri et al., 2016), GNSS (global navigation satellite system) with IMU (inertial measurement unit) (Fasel et al., 2016), or force plate (Schaff et al., 1996; Nakazato et al., 2011). These various sensors detect one or multiple events between two turns. According to various definitions, several events can define the end of a turn, the beginning of the following turn, or the switch event between two turns. In chronological order, the turning radius passes above 30 m (1), the skier stops applying force on external foot (2, corresponding to the ski-edge release), the minimum summated nSkiRF over a given turn cycle (3), beginning of force application on subsequent external foot (4, ski-edge taking), and a turn radius below 30 m (5). The order of these events is stable regardless of the skiers and turns (Delhayé et al., 2019). The time when the turn radius is above 30 m is associated with the duration of the SL and period between Fbeg to Fend is considered as edge switch time. While not tested, the distance traveled by the skier with a radius above 30 m and time without force application will theoretically vary according to the line strategy used. Since the timing of these TS events is feasibly a result of different techniques, biomechanical mechanisms, and/or interaction between them, a better understanding of the timing and energy behaviors during this phase could provide insight into skier performance.

The first aim of the study was to (i) identify the kinetic and kinematic characteristics associated with the line strategy. We hypothesize that line Z strategy (characterize by longer path

length in the straight line) is associated with (i.a) shorter path length in entire turn, (i.b) greater speed amplitude during the straight line and the turning phase, (i.c) more energy dissipated during the turning phase and entire turn, (i.d) longer time in the straight line normalized to the entire turn time, and (i.e) a longer time without force application between turns. The second aim of the study was to (ii) evaluate the interaction between selected strategy and performance level. We hypothesized (ii.a) that high-level skiers would be more inclined to use Z line strategy and (ii.b) line strategy would be associated with final race time.

MATERIALS AND METHODS

Participants

Seventeen male alpine skiers participated in this study (mean \pm SD: age 28.6 ± 9.3 years, height 179.7 ± 5.7 cm, weight 75.6 ± 9.3 kg). Skiers had mixed performance levels, consisting of recreational club level (not ranked by International Ski Federation [FIS]) to top-ranked current and previous elite world cup competitors (FIS points < 2). Each skier was informed of the content of the study and gave their written consent to participate. The experiment was conducted under the Declaration of Helsinki and was approved by the local ethics committee of the Université Savoie Mont-Blanc.

Experimental Protocol and Data Collection

Following 2–3 familiarization trials of the course while being equipped with the various experimental technology, skiers performed one or two timed runs on a 16-gate giant slalom course. Skiers were instructed to ski as fast as possible while avoiding the risk of falling. The athletes were provided with instructions to prioritize finishing the race and within these constraints reduce the race time as much as possible. The course setting was initially performed by a national ski coach, per a 16-gate GS setup with an average distance of 23 m and an offset of 8 m on a 25° inclined groom slope. Setup was close to competition setup featuring irregularities while avoiding side-slope, jumps, and slope-break during turns. Landmark poles were placed close to the course outside of the grooming area, and gate positions were measured relative to them and to these poles in order to triangulate them at every course setting. Skiers used the same pair of race skis (SALOMON Lab X-Race—Annecy—France; radius: 30 m, length: 193 cm) and were equipped with the same model of ski boots (SALOMON XLAB 140+ WC—Annecy—France). Skiers used their own race suits and other FIS-approved race clothing and protective gear (e.g., helmet, goggles, back protectors).

Throughout the duration of experimentation (30 days), snow quality (hardness, humidity, and temperature) and environmental conditions (temperature, wind, and visibility) were observed. Testing took place during the first 3 h after the resort opening, the slope was groomed every night, and snow cleaning was performed between every run to limit the formation of micro-reliefs. Testing was performed only if the temperature during the preceding night was cold enough to freeze the snow. If these factors were not acceptable, experimentation was delayed until the conditions stabilized. Skiers were equipped

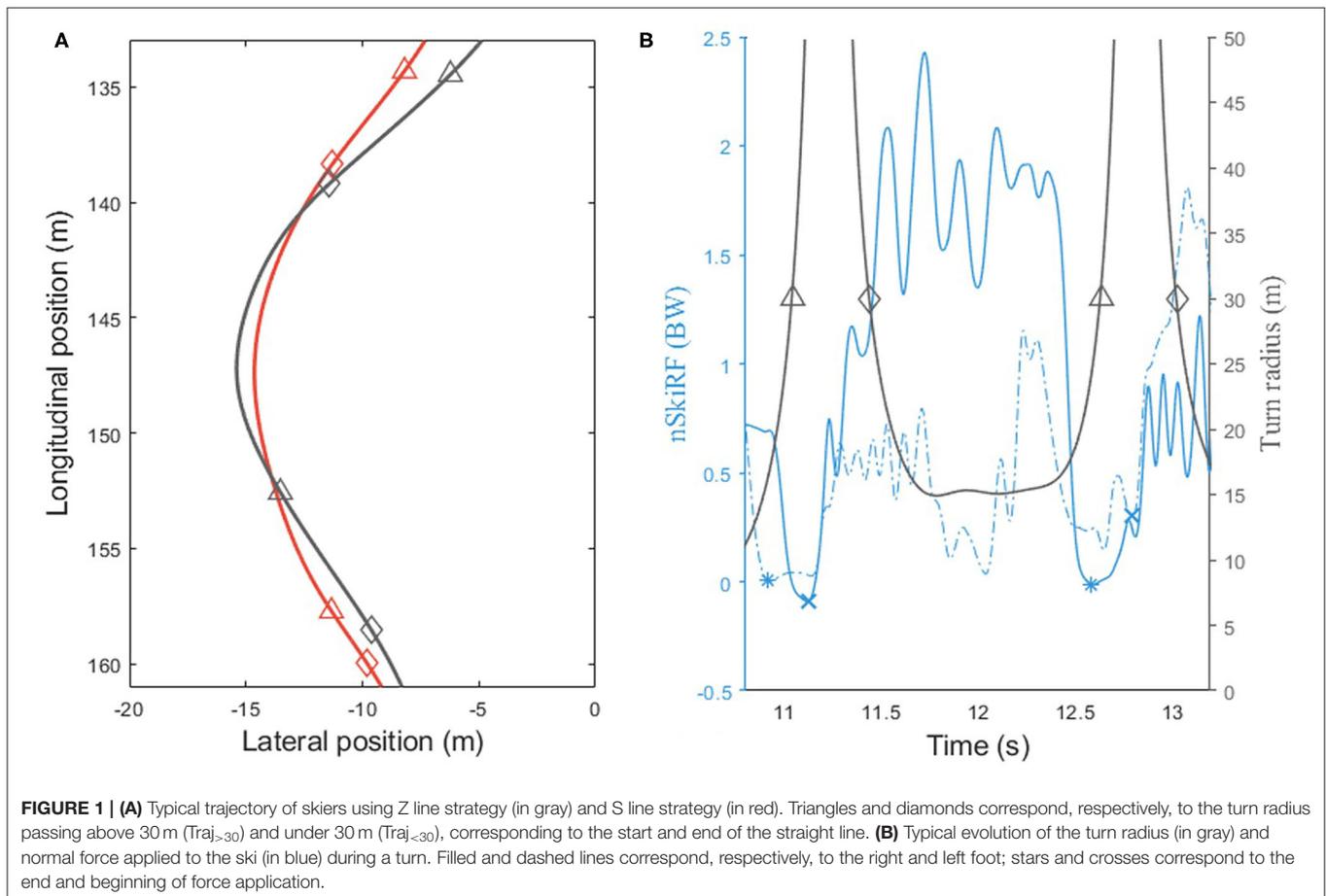
with onboard validated force plates (Falda-Buscaiot et al., 2016). These force sensors (Sensix—Poitiers—France) 1400 gr per foot and raised the skier by 6 mm. The reaction force normal to the ski on the outside foot (nSkiRF) was amplified and recorded at 200 Hz. The power supply and acquisition gear were placed in a hip bag for a total weight of ~ 1 kg. Calibration to body weight was performed by lifting each foot successively while being fully equipped with the technology and equipment. The calibration procedure was performed on the same flat hard surface before the start of the race. Position and doppler speed were recorded by a synchronized GNSS/IMU unit (MacLloyd—Paris—France) with factory fusion computations recorded at ~ 10 Hz mounted on the hip. Race time was measured with a FIS approved laser cell system (Tag-Heuer—La Chaux-de-Fonds—Switzerland), which was used as the top level performance variable in the subsequent analyses (i.e., better performance = lesser course time).

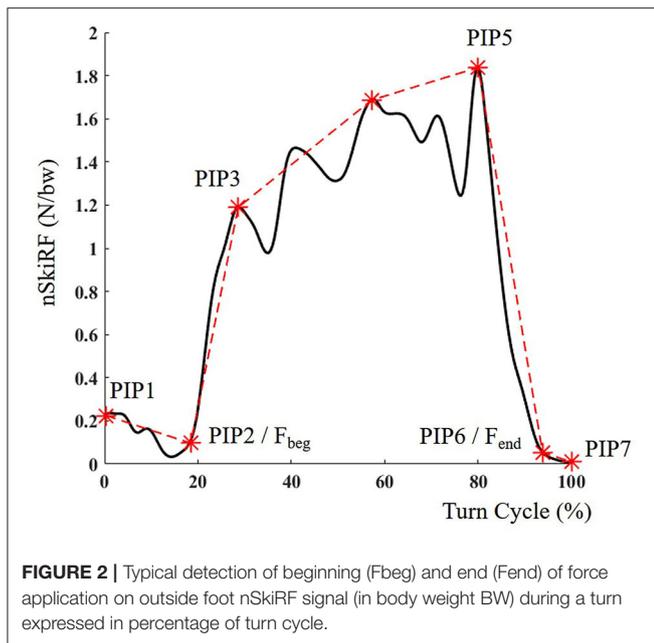
Data Processing

Only the best performance (fastest time) was used for analysis, with the first turns of the race containing skating steps excluded. All the data analyses were performed using Matlab version R2019a (MathWorks—Natick—USA). To synchronize GNSS/IMU with a force plate, skiers hit the snow with their skis before and after the race to create acceleration and nSkiRF peak. Using these acceleration and force peaks, all data from

force plate and GNSS/IMU were interpolated to resample data at 200 Hz. The “makima” method was used to perform a smoothing interpolation (with less undulation than “spline”).

Four TS events were computed (**Figure 1**): two events from nSkiRF data and two from GNSS positional data. End of force application of the outside foot (F_{end}) and beginning of force application on the outside foot (F_{beg}) were detected on a 12-Hz low pass-filtered nSkiRF signal. The typical nSkiRF pattern on the outside ski during a turn is composed by a clear increase, a plateau, and a decrease (**Figure 2**); two consecutive patterns are separated by a period of low force application. Events on the force data were determined using the Perceptually Important Point method (PIP) (Fu et al., 2007). PIP is based on geometrical detection of the furthest vertical distance between data and a line between the endpoints of the interval. This computation is repeated five times to obtain the 7 PIPs (**Figure 2**). PIP6 and PIP2, respectively, represented F_{end} and F_{beg} events. All points were checked manually to ensure they corresponded to the end of the main decrease of force and the beginning of the main increase of force. The lag time between F_{end} and F_{beg} represents the switch between ski edges. The two events computed from positional data are the moment the turn radius passes above 30 meters ($\text{Traj}_{>30}$) and under 30 m ($\text{Traj}_{<30}$), corresponding to the end of the previous and start of the next turning phase, respectively (Spörri et al., 2012). Longitude and latitude positional data





were converted into the Ellipsoid plane using WGS84 standard transformation. All radius and speed relevant parameters were computed using 2D data (longitude and latitude), and path length was computed in the 3D plane (longitude and latitude and altitude). Positional data were smoothed using a Savitzky–Golay filter (order 2, 1-s window). The radius was computed by circle fitting using the Pratt method (Pratt, 1987) (0.3-s window). Automatic detection was performed when the radius crossed the 30-m threshold, and in the case of multiple crossing at the TS last event was retained. The path length was computed as the cumulated displacement in all axes. The lag between $Traj_{>30}$ and $Traj_{<30}$ represents absolute time in SL (T SL in ms). Percentage of the turn in SL (T%SL in %) was defined as T SL relative to the sum of T SL and time of the following TP. The path length is computed for the SL and the sum of the SL and the following TP (Path SL+TP in m). Path length during edge switch was computed using the same approach (Path edge switch in m).

Speed was computed by the GNSS/IMU unit by Doppler measurement related to satellite motion. This computation method is more accurate than derivation of position. To compliment SL and edge switch detection, the amplitude of speed during the SL was computed as the difference between the minimum and maximum speed in the SL (Δ Speed SL) and for the entire turn (Δ Speed SL+TP).

Based on positional data, mechanical energy was computed at each point of the race as the sum of potential and kinetic energy, relative to the body mass of the skier (i.e., specific mechanical energy Supej, 2008; Supej et al., 2011). The change in specific mechanical energy was calculated for the following sectional divisions and normalized to the velocity of the first point ($\Delta e_{\text{mech}/v_{\text{in}}}$): SL ($\Delta e_{\text{mech}/v_{\text{in}}}$ SL), TP ($\Delta e_{\text{mech}/v_{\text{in}}}$ TP), and SL + TP ($\Delta e_{\text{mech}/v_{\text{in}}}$ SL+TP). Finally, race time is considered as the macroscopic indicator of skier performance level and $\Delta e_{\text{mech}/v_{\text{in}}}$

SL+TP $\Delta e_{\text{mech}/v_{\text{in}}}$ SL+TP is considered as the instantaneous performance level indicator.

Statistical Analysis

Normality of each parameter was tested using the Shapiro–Wilk test except course time which approaches an expected flat distribution. To evaluate the first aim of the study (i.e., assess the kinetic and kinematic characteristics associated with the line strategy), the correlation between path length in SL and kinematic turn parameters (absolute time in SL, time ratio, speed amplitude in SL, speed amplitude in entire turn, path length in entire turn and $\Delta e_{\text{mech}/v_{\text{in}}}$ in TP and during entire turn, time without force application) was tested using Pearson coefficient (r), the mean of skier turn cycles ($n = 17$). The second aim of the study regarding the interaction between line strategy and performance was also tested via correlation of straight-line length and race time ($n = 17$).

A hierarchical linear regression analysis was performed to determine whether the line strategy (assessed via the path length in SL) parameter improved the performance prediction provided by $\Delta e_{\text{mech}/v_{\text{in}}}$ SL+TP. This parameter is already defined in previous literature as a predictor of performance and thus was first forced into the regression. The adding of path length in SL in the equation is tested in a second step to test its influence on race time prediction. Coefficient of determination (r^2) and change in r^2 (Δr^2) between models were calculated. All descriptive data were expressed as means \pm standard deviation (SD), and all statistical analyses were performed on JASP (Version 0.13.1—Amsterdam—Netherlands) with an alpha level set at $p = 0.05$.

RESULTS

Mean course time was 29.47 s (SD: 1.85, min: 26.37, max: 34.61), the difference between the minimum and maximum time (i.e., 8.24 s). Once skating steps were removed, 185 turn cycles remained for the final analyses. Correlations between path length in the straight line and kinetics or kinematic parameters of the turn are reported in **Table 1**. T%SL (mean: 32.9%, SD: 4.32%, min: 26.78% max 43.58%) is well-correlated with the path length in SL ($r = 0.967$, $p < 0.001$).

Secondly, mean path length SL is computed for each skier during the race. The mean path length in SL of the population was 8.96 m (SD: 1.16, min: 7.71, max: 11.67). Correlations between race time and path length in SL ($n = 17$) are presented in **Figure 3A**. Correlations between race time and specific mechanical energy dissipation ($n = 17$) are presented in **Figures 3B,C**. There was a moderate relationship of $\Delta e_{\text{mech}/v_{\text{in}}}$ during turning phase ($r = -0.505$, $p = 0.041$) and entire turn ($r = -0.620$, $p = 0.008$) with race time.

The results of the hierarchical linear regression are summarized in **Table 2**. To assess the predictive power of the model, F and F change values were computed; the root mean square error (RMSE) of the predictive model (i.e., square root of the differences between observed and predicted race time values using full equation) was calculated to evaluate the accuracy of predicted race time in comparison with $\Delta e_{\text{mech}/v_{\text{in}}}$ SL+TP alone; the p -value indicates the significance of the model

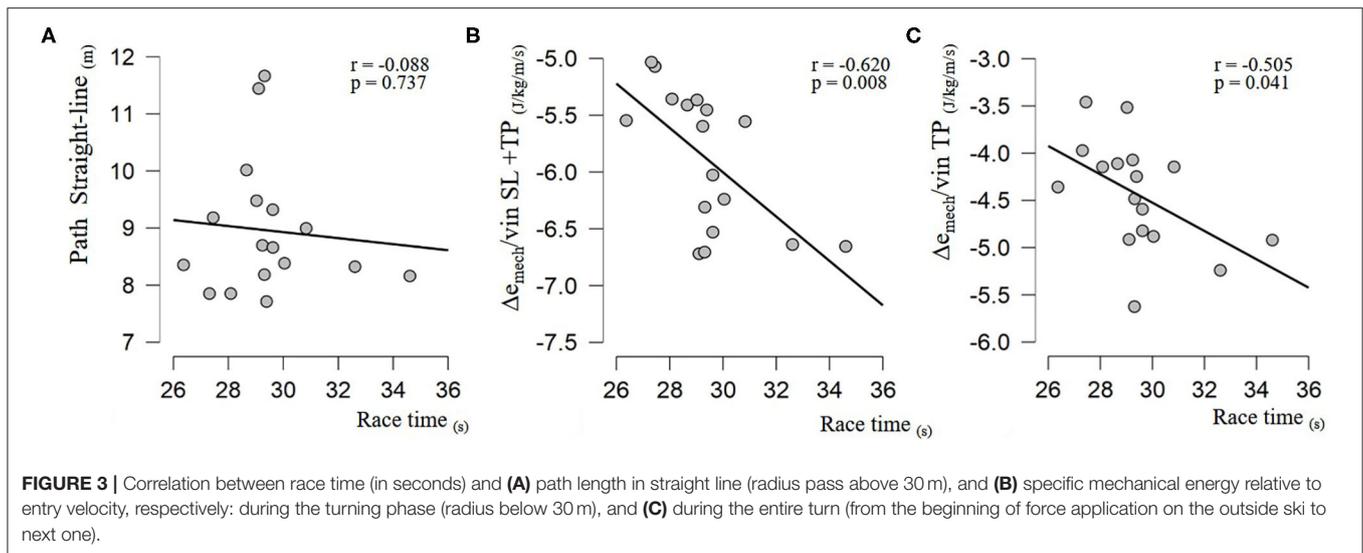


TABLE 1 | Correlation tests between path length in straight line (Path SL), and kinetic and kinematic parameters of the turn.

	<i>r</i> Pearson	<i>p</i>
Path SL+TP (m)	-0.481	0.051
ΔSpeed SL (m/s)	0.672	0.003
ΔSpeed TP (m/s)	-0.418	0.095
Δ <i>e</i> _{mech} / <i>v</i> _{in} TP (J/kg/m/s)	-0.223	0.390
Δ <i>e</i> _{mech} / <i>v</i> _{in} SL+TP (J/kg/m/s)	-0.064	0.808
T%SL (%)	0.967	<0.001
T SL (ms)	0.876	<0.001
T Edge switch (ms)	0.195	0.453

Path length in straight line is the cumulative distance traveled by the skiers between two turning phases where the radius is above 30 m. Successive correlated parameters are the path length in entire turn (both straight line and turning phase); speed amplitude during the straight line and turning phase; Δ*e*_{mech}/*v*_{in} during the turning phase and entire turn; absolute time in a straight line, and relative time to the entire turn time. Edge switch time corresponds to the lag between end of the force application on the outside foot and start of the force application in the new outside foot and edge switch path to the distance travel during this period. Indices of correlation test Pearson's *r* (*r*) and *p*-value (*p*) were reported.

prediction. Δ*e*_{mech}/*v*_{in} SL+TP was forced in *Model 0*, path length in SL was added in *Model 1*, and path length in SL was finally not included in the model as a significant improvement of race time prediction (*p* = 0.301, *R*² change = 0.047).

DISCUSSION

Our first result focuses on the links between line strategy and mechanical or kinematic parameters of the turn. Line strategy has to be considered as a continuum characterized by path length in SL. However, the extremes of this continuum are dependent on the course setting and observed population. Consequently, this method only allows characterization of skiers on the same course. The increase in path length in SL was positively linked with longer absolute time in SL (*r* = 0.966, *p* < 0.001), and

ΔSpeed SL (*r* = 0.554, *p* < 0.001). There was a trend for a negative correlation between the total path length during the entire turn and path length in SL (*r* = -0.481, *p* = 0.051). These results follow previous works (Federolf, 2012) and corroborate the statement that Z strategy is used by skiers to increase their speed between turns and decrease their total path length. However, a decrease of speed in the following turn was not correlated with the path length in SL (*r* = -0.418, *p* = 0.095). Skiers using the Z line strategy do not necessarily lose their additional speed gained in the SL in the following TP. Absence of significant results could be explained by the capacity of some skiers to conserve their speed even when using a Z line strategy. This capacity could come from a better technical level and better manipulation of the ski angle to decrease friction (Reid et al., 2020). This interpretation is supported by the absence of a relationship between strategy adopted and energy dissipation during the TP (*r* = -0.223, *p* = 0.390). Another explanation could be that some skiers using the S line strategy possibly drift at the beginning of the TP (Müller et al., 1998), which increases delta of specific mechanical energy even with a short path length in SL. This behavior is used when skiers exceed their “velocity barrier” (Supej et al., 2011), in other words when skier’s speed is too high to perform the turn imposed by the gate setting.

Absolute and relative time in SL were strongly associated with the path length in SL. However, time of edge switch based on the nSkiRF measurements (i.e., the time between end and start of force application on the outside foot) was independent of the path length in SL. The time of edge switch was not influenced by temporal pressure variation induced by shorter or longer SL. Consequently, the time of edge switch should not be used to quantify the duration of the straight-line trajectory. Rather than turn line strategy, this parameter might be indicative of balance or technical abilities.

The main questions of this study concerned the link between the performance level and the line strategy. In the first instance, path length in SL is not correlated with Δ*e*_{mech}/*v*_{in} SL+TP

TABLE 2 | Hierarchical linear regression model result, specific mechanical energy relative to entry velocity in entire turn ($\Delta e_{\text{mech}}/v_{\text{in}}$ SL+TP) was forced in the *Model 0*; in *Model 1*, path length in SL was added to *Model 0*.

Model	R	R ²	Adjusted R ²	RMSE	R ² change	F change	F	p
Model summary of regression analyses to determine prediction of race time								
0	0.621	0.385	0.344	1.566	0.385	9.396	9.396	0.008
1	0.657	0.432	0.351	1.558	0.047	1.152	5.321	0.301

during entire turn ($r = -0.064$, $p = 0.808$). Moreover, a lack of relationship between path length in SL and race time (Figures 3A,B) indicates that the use of one predominant strategy is not necessarily linked with overall course performance. Absence of precise results is mainly due to the high variability of the strategy used by medium- and high-level skiers. Among skiers of a similar level (i.e., ranked 5th to 13th with race time between 28 and 30 s), there was substantial variation in SL path length. For example, two skiers performed mean SL path length above 11 m, yet others presented values <8 m. The choice of the strategy used could be determined by various anthropometrical (Haymes and Dickinson, 1980), physiological (White and Johnson, 1991), and technical profiles (Raschner et al., 1995; Müller et al., 2017). However, these interactions have not been recently evaluated on adult skiers.

Finally, according to linear regression results, $\Delta e_{\text{mech}}/v_{\text{in}}$ SL+TP is negatively correlated with the performance, without a clear contribution of path length in SL. In agreement with previous works (Spörri et al., 2018), line strategy is not a predictor of the performance and does not lead to a decrease in the residuals of $\Delta e_{\text{mech}}/v_{\text{in}}$ SL+TP correlation. As such, it would seem that independent of the line strategy used, reducing sectional energy dissipation is a key behavior to decreasing race time. These results highlight the presence of skier profiles able to decrease their dissipation of specific mechanical energy, in particular on a given strategy.

In conclusion, the strategy used is associated with differences in kinetic parameters. Increasing the path length in SL (related to Z strategy) induces a higher speed variation during SL, longer turn absolute and relative time spent in SL, and a tendency of shorter length path. However, the strategy used is not linked to time without force application on outside ski between two turns. Overall, the strategy adopted does not appear to be strictly associated with course-level performance of the skiers. The significant dispersion of strategies for the same performance level highlights that radically different approaches can result in similar energy dissipation characteristics. Consequently, it would seem that better skiers possess a profile that enables them to decrease energy dissipation across a variety of preferred and adopted turn strategies.

LIMITATIONS

The top-level performance variable in this study was course time, which represents a macroscopic index and lacks the descriptive information potentially provided by more detailed

analyses. Indeed, this parameter is not representative of each turn performance; a high-level skier who made a mistake is considered as the same level as a lower-level skier who did not. Moreover, race time is influenced by snow condition, and even under “acceptable snow conditions,” the snow quality variation between subjects could create differences between them. At last, race time is influenced here by the capacity of the skiers to be accustomed to ski gear and experiment devices. Finally, only male skiers were tested, and while we assume our findings apply to female skiers, more research is needed on female skiers.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors, without undue reservation.

ETHICS STATEMENT

Each skier was informed of the content of the study and gave their written consent to participate. The experiment was conducted under the Declaration of Helsinki and was approved by the local ethics committee of the Université Savoie Mont-Blanc.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

CD, FH, and MC conducted the data collection. CD, FH, MC, and PS conceptualized the study design and interpretation of the data. CD, MB, and MC contributed to the data analysis. CD drafted the manuscript. All authors revised it critically, approved the final version, and agreed to be accountable for all aspects of this work.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the staff associated with Avoriaz skiing resort and Ecole du ski français d'Avoriaz for their help during the experiments. Thanks to Nicolas Horvais, Loïc Le Quellec, and Amy Nguyen for their assistance in setting the course and their help in the experiment project. Thank you to Salomon's engineers and specifically Valéry Boget for their help and support with the ski equipment. Thank you to all the various students for their assistance during the experimentation, and notably Thibaut Gregoire for his assistance in the data treatment of the positional data. Lastly, sincere thanks are given to all skiers who gave their time and best effort in furthering science.

REFERENCES

- Brodie, M., Walmsley, A., and Page, W. (2008). Fusion motion capture: a prototype system using inertial measurement units and GPS for the biomechanical analysis of ski racing. *Sport Technol.* 1, 17–28. doi: 10.1080/19346182.2008.9648447
- Cross, M., Delhay, C., Bowen, M., Coulmy, N., Morin, J.-B., Hintzy, F., et al. (2019). “Magnitude and relationship between force output and performance in giant slalom,” in *Science and Skiing VIII*, eds M. Karczewska-Lindinger, A. Hakkarainen, V. Linnamo, and S. Lindinger (Jyväskylä: Meyer & Meyer Sport Ltd), 80–87.
- Delhay, C., Cross, M., Bowen, M., Samozino, P., and Hintzy, F. (2019). “Kinetic and kinematic turn switch detection in giant slalom,” in *Science and Skiing VIII*, eds M. Karczewska-Lindinger, A. Hakkarainen, V. Linnamo, and S. Lindinger (Jyväskylä: Meyer & Meyer Sport Ltd), 73–79.
- Falda-Buscaiot, T., Hintzy, F., Rougier, P., Coulmy, N., and Lacouture, P. (2016). “Development of a new 6-components force sensor design for biomechanical research in alpine skiing,” in *Science and Skiing VII*, eds E. Müller, J. Kröll, S. Lindinger, J. Pfusterschmied, J. Spörri, and T. Stöggl (St. Christoph/Arlberg: Meyer & Meyer Sport Ltd), 348–356.
- Fasel, B., and Gilgien, M. (2016). “IMU and GNSS-based turn switch detection in alpine ski racing,” in *Science and Skiing VII*, eds E. Müller, J. Kröll, S. Lindinger, J. Pfusterschmied, J. Spörri, and T. Stöggl (Christoph/Arlberg: Meyer & Meyer Sport Ltd), 86–92.
- Fasel, B., Spörri, J., Gilgien, M., Boffi, G., Chardonnens, J., Müller, E., et al. (2016). Three-dimensional body and centre of mass kinematics in alpine ski racing using differential GNSS and inertial sensors. *Remote Sens.* 8:671. doi: 10.3390/rs8080671
- Federolf, P. A. (2012). Quantifying instantaneous performance in alpine ski racing. *J. Sports Sci.* 30, 1063–1068. doi: 10.1080/02640414.2012.690073
- Franchi, M. V., Ellenberger, L., Javet, M., Bruhin, B., Romann, M., Frey, W. O., et al. (2019). Maximal eccentric hamstrings strength in competitive alpine skiers: cross-sectional observations from youth to elite level. *Front. Physiol.* 10:88. doi: 10.3389/fphys.2019.00088
- Fu, T. C., Chung, F. I., Luk, R., and Ng, C. M. (2007). Stock time series pattern matching: template-based vs. rule-based approaches. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 20, 347–364. doi: 10.1016/j.engappai.2006.07.003
- Haymes, E. M., and Dickinson, A. L. (1980). Characteristics of elite male and female ski racers. *Med. Sci. Sports Exerc.* 12, 153–158. doi: 10.1249/00005768-198023000-00005
- Hébert-Losier, K., Supej, M., and Holmberg, H. C. (2014). Biomechanical factors influencing the performance of elite alpine ski racers. *Sport. Med.* 44, 519–533. doi: 10.1007/s40279-013-0132-z
- Lind, D., and Sanders, S. P. (2004). *Physics of Skiing - Skiing at Triple Point*. 2nd Edn. (Springer Science). doi: 10.1007/978-1-4757-4345-6
- Müller, E., Bartlett, R., Raschner, C., Schwameder, H., Benko-Bernwick, U., and Lindinger, S. (1998). Comparisons of the ski turn techniques of experienced and intermediate skiers. *J. Sports Sci.* 16, 545–559. doi: 10.1080/026404198366515
- Müller, E., and Schwameder, H. (2003). Biomechanical aspects of new techniques in alpine skiing and ski-jumping. *J. Sports Sci.* 21, 679–692. doi: 10.1080/0264041031000140284
- Müller, L., Hildebrandt, C., Müller, E., Fink, C., and Raschner, C. (2017). Long-term athletic development in youth alpine ski racing: the effect of physical fitness, ski racing technique, anthropometrics and biological maturity status on injuries. *Front. Physiol.* 8:656. doi: 10.3389/fphys.2017.00656
- Nakazato, K., Scheiber, P., and Müller, E. (2011). A comparison of ground reaction forces determined by portable force-plate and pressure-insole systems in alpine skiing. *J. Sport. Sci. Med.* 10, 754–762. doi: 10.1007/s12283-013-0119-x
- Pratt, V. (1987). “Direct least-squares fitting of algebraic surfaces,” in *Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1987* (New York, NY: ACM Press), 145–152. doi: 10.1145/37401.37420
- Raschner, C., Müller, E., Schwameder, H., Haid, C., and Männel, D. (1995). “Zum Einfluss anthropometrischer Merkmale auf die Wettkampfleistung im Slalom bei jugendlichen Skirennläufern (The influence of anthropometric characteristics on the performance in slalom in adolescent ski racers),” in *Sportliche Leistung und Training. Sports Perform. Training*, eds J. Krug and H. J. Minow (Leipzig: Academia Verlag), 341–346.
- Reid, R., Gilgien, M., Moger, T., Tjørhom, H., Haugen, P., Kipp, R., et al. (2009). “Turn characteristics and energy dissipation in slalom,” in *Science and Skiing IV*, eds S. Lindinger, T. Stöggl, and E. Müller (Christoph/Arlberg: Meyer & Meyer Sport Ltd), 419–429.
- Reid, R. C., Haugen, P., Gilgien, M., Kipp, R. W., Smith, G. A., and Reid, R. C. (2020). Alpine ski motion characteristics in slalom. *Front. Sports Act. Living* 2, 1–11. doi: 10.3389/fspor.2020.00025
- Schaff, P., Senner, V., and Kaiser, F. (1996). “Pressure distribution measurements for the alpine skier - from the biomechanical high tech measurement to its application as swingbeep feedback system,” in *Science and Skiing*, eds E. Kornexl, E. Müller, C. Raschner, and H. Schwameder (Christoph/Arlberg: Meyer & Meyer Sport Ltd), 159–172.
- Spörri, J., Kröll, J., Gilgien, M., and Müller, E. (2016). Sidecut radius and the mechanics of turning-equipment designed to reduce risk of severe traumatic knee injuries in alpine giant slalom ski racing. *Br. J. Sports Med.* 50, 14–19. doi: 10.1136/bjsports-2015-095737
- Spörri, J., Kröll, J., Schwameder, H., and Müller, E. (2012). Turn characteristics of a top world class athlete in giant slalom: a case study assessing current performance prediction concepts. *Int. J. Sports Sci. Coach.* 7, 647–659. doi: 10.1260/1747-9541.7.4.647
- Spörri, J., Kröll, J., Schwameder, H., and Müller, E. (2018). The role of path length and speed-related factors for the enhancement of section performance in alpine giant slalom. *Eur. J. Sport Sci.* 18, 911–919. doi: 10.1080/17461391.2018.1453870
- Supej, M. (2008). Differential specific mechanical energy as a quality parameter in racing alpine skiing. *J. Appl. Biomech.* 24, 121–129. doi: 10.1123/jab.24.2.121
- Supej, M., and Cernigoj, M. (2006). Relations between different technical and tactical approaches and overall time at Men’s world cup giant slalom races. *Kinesiol. Slov.* 12, 59–68.
- Supej, M., and Holmberg, H.-C. (2019). Recent kinematic and kinetic advances in olympic alpine skiing: pyeongchang and beyond. *Front. Physiol.* 10:111. doi: 10.3389/fphys.2019.00111
- Supej, M., Kipp, R., and Holmberg, H. C. (2011). Mechanical parameters as predictors of performance in alpine World Cup slalom racing. *Scand. J. Med. Sci. Sport.* 21, 72–81. doi: 10.1111/j.1600-0838.2010.01159.x
- Supej, M., and Nemeč, B. (2003). Kinematic determination of the beginning of a ski turn. *Kinesiol. Slov.* 9, 11–17.
- Vogt, M., and Hoppeler, H. H. (2014). Eccentric exercise: Mechanisms and effects when used as training regime or training adjunct. *J. Appl. Physiol.* 116, 1446–1454. doi: 10.1152/jappphysiol.00146.2013
- White, A. T., and Johnson, S. C. (1991). Physiological comparison of international, national and regional alpine skiers. *Int. J. Sports Med.* 12, 374–378. doi: 10.1055/s-2007-1024697

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

Copyright © 2020 Delhay, Cross, Bowen, Samozino and Hintzy. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

Annexe 4 - Cross, M. R. (2020). Production de force des skieurs alpins : évaluation sur et hors neige et relation avec la performance. – Pages 121-145 : Etude d'évaluation de la précision du système Mac-Lloyd utilisé et de l'approche méthodologique associée.

3.2. VALIDITY OF TURN-AVERAGED KINEMATICS IN ALPINE SKIING USING A LOW-COST REAL-TIME KINEMATIC (RTK) SYSTEM

3.2.1. ABSTRACT

3.2.1.1. English

The advent of increasingly accessible global navigation satellite systems (GNSS) has exciting implications for alpine skiing research and practice. The aims of the study were to test the validity and reliability of a low-cost real-time kinetics (RTK) system to be subsequently used as a criterion measure to validate a sports GNSS for detecting macroscopic turn-averaged and sectional performance variables in skiing. Two experiments were performed, consisting of 1) attaching an RTK system to a mountain coaster which ran along a repeatable track four times in an alpine environment, and 2) both the RTK (criterion) and a sports GNSS attached to skiers on a set giant-slalom course. For the former experiment, the validity and reliability of the system were tested by computing the systematic and random error, respectively, against a digitized ground track. For the latter experiment, the validity of the GNSS was assessed for velocity, path length, radial force, and energy dissipation, across individual turns and turns collapsed into sections (four turns), using absolute bias, correlation, and typical error (CV%) statistics in comparison to the ‘criterion’ RTK system. The mountain coaster experiment revealed very low random error and variability in longitude (0.023 ± 0.0075 m) and altitude (0.19 ± 0.066 m). The moderate systematic error and variability (mean= $0.431-0.697$ m, standard deviation= $0.616-0.366$ m) was due to limitations in the digitized ground plan and an offset between the rails and the attachment of the antenna which was exacerbated while turning (due to the sledge inclining towards the turn centres). For the skiing test, data were typically low bias (<1.5% for all variables, except energy dissipation [4.5%]), with *moderate* to *very strong* agreement in all variables. In general, variability was low (CV<5%) except for radial force and energy dissipation when considering individual turn analysis (7.0 and 12.9%, respectively). Adopting a sectional approach substantially improved agreement and error, with all representing *strong* or *very strong* agreement except radial force (*moderate*) and all

CV<9.1%. These results evidence the accuracy of a low-cost RTK unit in ski-similar conditions and support a turn-averaged approach to detect worthwhile differences in a variety of performance variables using common sports positional units.

3.2.1.2 Français

L'avènement de systèmes de navigation par satellite (GNSS) de plus en plus accessibles a des implications passionnantes pour la recherche et la pratique du ski alpin. Les objectifs de l'étude étaient de tester la validité et la fiabilité d'un système de cinétique en temps réel (RTK) à faible coût qui sera ensuite utilisé comme critère de mesure pour valider un système GNSS sportif (tel que celui utilisé dans l'étude précédente) pour la détection de variables macroscopiques de performance moyennées sur des sections en ski. Deux expériences ont été réalisées, consistant à 1) attacher un système RTK à une luge d'été qui descendait une piste sur des rails quatre fois dans un environnement alpin, et 2) attacher le RTK (référence) et un système GNSS sportif aux skieurs sur un parcours de slalom géant. Pour la première expérience, la validité et la fiabilité du système ont été testées en calculant l'erreur systématique et aléatoire, respectivement, par rapport à une trace au sol numérisée. Pour la deuxième expérience, la validité du GNSS a été évaluée pour la vitesse, la longueur du trajet, la force radiale et la dissipation d'énergie, sur les valeurs des virages individuels et moyennés par sections (quatre virages), en utilisant la régression linéaire, la corrélation et le coefficient de variation (CV). L'expérience de la luge d'été a révélé une erreur aléatoire et une variabilité très faible en longitude ($0,023 \pm 0,0075$ m) et en altitude ($0,19 \pm 0,066$ m). L'erreur et la variabilité systématique étaient modérées (moyenne= $0,431-0,697$ m, écart type= $0,616-0,366$ m) en raison des limites du plan au sol numérisé et d'un décalage entre les rails et la fixation de l'antenne qui a été exacerbé lors du virage (en raison de l'inclinaison de la luge vers le centre de virage). Pour le test de ski, les données montraient un biais généralement faible (<1,5% pour toutes les variables, à l'exception de la dissipation d'énergie [4,5%]), avec une concordance modérée à très forte pour toutes les variables. En général, la variabilité était faible (CV<5%) à l'exception de la force radiale et de la dissipation d'énergie pour l'analyse virage par virage (7,0 et 12,9%, respectivement). L'adoption d'une approche par section a considérablement amélioré la concordance et l'erreur, toutes représentant une concordance forte ou très forte, à l'exception de la force radiale (modérée) avec tous les CV<9,1%. Ces

résultats témoignent de l'exactitude d'un RTK à faible coût dans des conditions de similaires au ski et prend en charge une approche moyennée en virages pour détecter des différences intéressantes dans une variété de variables de performance en utilisant des unités de position sportives communes.

3.2.2 PRELUDE

This chapter has a methodological focus, and experimentally falls within the purview of the previous one, although chronologically occurred afterwards. This chapter includes two experiments which validate a low-cost high-accuracy global positioning system in the first instance, and subsequently use this unit as a criterion device to test the accuracy of a typical sports unit (the one used in the previous study) to detect worthwhile differences in skiing performance metrics. Specifically, a relatively unique, albeit macroscopic approach, is adopted to bolster the data collected in our previous study, and to provide information regarding the use of more accessible technologies for skiing trajectory measurements. Note: while unfortunate, the low-cost RTK presented in this chapter was not used as the primary means of detecting positional data in the previous on-snow experiments (i.e., see Chapter 3.1) due to the simple fact that the system had not yet been developed and tested at that stage of the thesis. Rather, its development was driven in tandem to a need to further test and hopefully strengthen our methodological approach, and for implementation in later studies (subsequently cancelled, due to seasonal interruptions).

3.2.2.1 Co-authored works associated with this section

Cross, M. R., Delhay, C., Morin, J.-B., Bowen, M., Coulmy, N., Hintzy, F., & Samozino, P. (2020). Force output in giant-slalom skiing: A practical model of force application effectiveness [Supplemental material: Pilot-data of sports GNSS validity using a low-cost Real-Time Kinematic (RTK) system as a criterion]. *PLoS ONE*. *In review*.

3.2.3 INTRODUCTION

In alpine skiing, measurements of trajectory are valuable for biomechanics research and for practitioners to provide valuable feedback to athletes. Unfortunately, the complex alpine

nature of skiing represents a challenge in providing such data. Several accurate capture methods exist (e.g., motion capture), but their complexity often results in brief capture windows (1-3 turns). Global Navigation Satellite Systems (GNSS) can feasibly provide a variety of important metrics for performance, ranging from merely time and velocity data to more sensitive parameters such as a change in mechanical energy (Supej et al., 2020). The ongoing development of GNSS technology and the increased accessibility provides exciting possibilities for their integration into alpine skiing research and practice.

While the consensus leans in favor of the usefulness of GNSS devices in alpine skiing (Supej et al., 2020), the field of technology falling under this general moniker is broad and variable. For example, multiband units operate on several satellite systems (e.g., American ‘GPS’, Russian ‘GLONASS,’ and Chinese ‘BeiDou’), provide more positioning possibilities, and consequently tend to be more accurate than their older counterparts (Jackson, Polglaze, Dawson, King, & Peeling, 2018). Some modern systems combine positional data from satellites with that collected via inertial measurement units to corroborate and correct movement at high frequencies and further improve positioning (Brodie et al., 2007). Other approaches use data collected from a stationary unit (‘base-station’) to correct random error in the signal of a moving unit (‘rover’) (e.g., differential GNSS [dGNSS]). Typically, GNSS units rely on ‘code-based’ positioning, which corroborates the 3-dimensional position of the receiver based on the delay in code (Pseudo Random Code) received from each satellite by the antenna. The gold standard are Real-Time-Kinematic (RTK) systems, which use a ‘carrier-based’ ranging technique in combination with corrections from a base-station unit to drastically improve positioning accuracy (see Figure 33). These units are widely used in commercial spheres, and have been implemented in sports including alpine skiing (Gussiãs, 2017; Supej et al., 2020). Unfortunately, the cost and ungainly nature of RTK units has typically hindered their wide integration into research and regular performance monitoring. Given the value of the information they provide, information on the ability to utilize the results from different types of technology in alpine skiing is interesting and worthwhile.

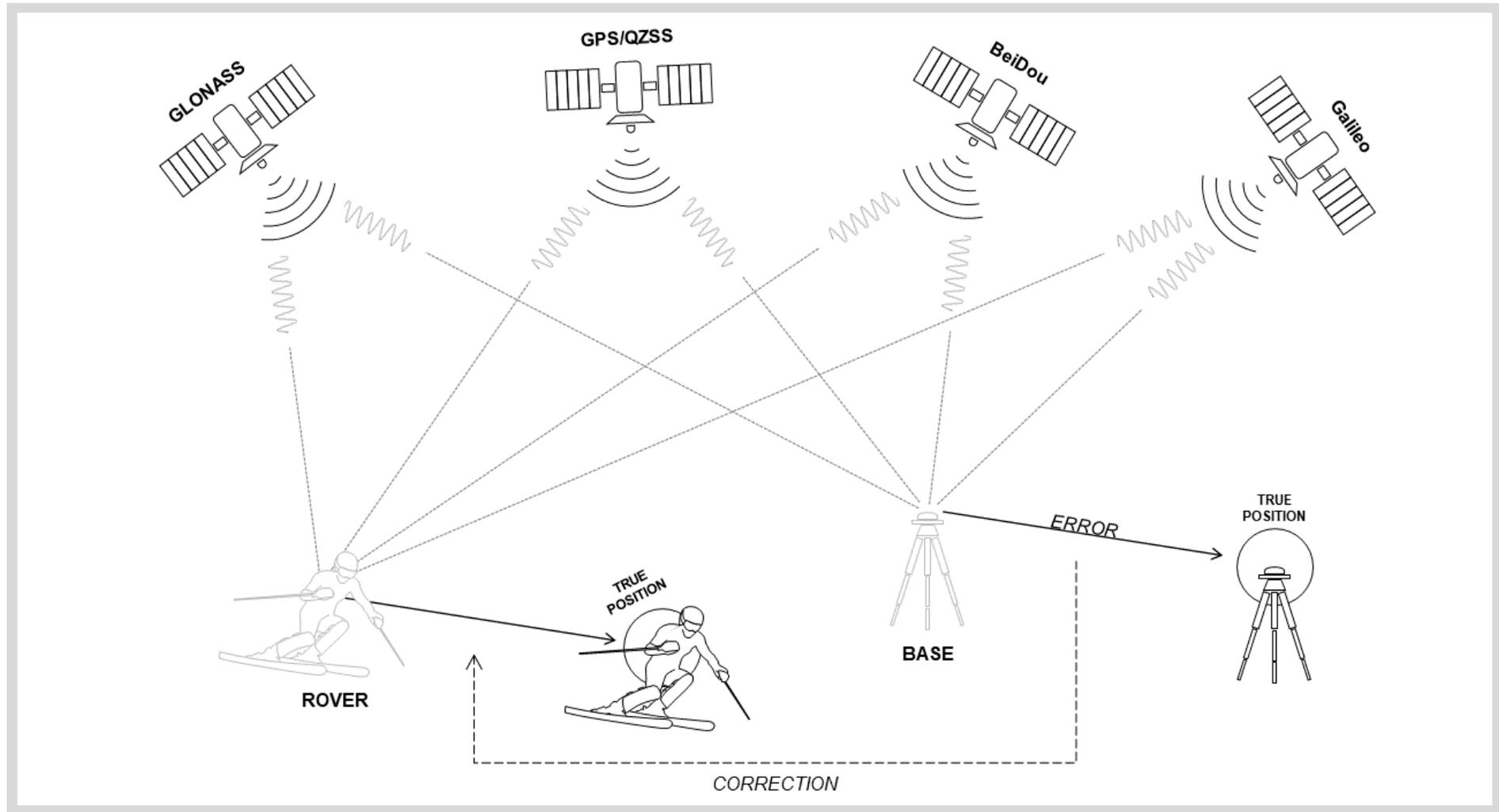


Figure 33. RTK in skiing.

Practical illustration of the integration of RTK into skiing practice. In addition to utilizing different signal processing that drastically increases accuracy, random error is measured in a stationary base station ('BASE') which is then corrected to the signal measured by the measurement unit ('ROVER'), for a final position of improved accuracy ('TRUE POSITION'). Various satellite systems utilized by RTK system are also pictured. Note, the system used in this research is BeiDou 'ready' but does not currently function on this system.

The skiing literature features a host of interesting biomechanical parameters that can be measured using GNSS technologies. The most obvious of which is instantaneous position paired with time on a given course, separated into various temporal markers (e.g., section times, or position relative to a gate). These basic parameters can be enhanced with information regarding the athlete's velocity, sectional energy behaviors (e.g., loss in mechanical energy normalized to entry velocity [$\Delta e_{\text{mech}}/v_{\text{in}}$] (Supej, 2008)), and various force parameters (Gilgien et al., 2013). While values of <0.1 m are deemed acceptable for trajectory in high-level athletes (Supej et al., 2020), there is limited information regarding the smallest-worthwhile differences across important variables and skiing cohorts considering both device accuracy and athlete variability.

While the technology is broad and continually evolving, manufacturers typically quote positional errors at ~ 1 m in modern typical GNSS units, although errors of up to 4.5 m have been reported in favorable conditions with single satellite positioning (Gilgien, Spörri, Limpach, et al., 2014)). At face value, RTK systems are far more accurate than basic GNSS units (i.e., <0.01 m error (Supej, 2010)), with dGNSS similarly providing impressive accuracy during skiing trials (i.e., ~ 0.04 m (Gilgien, Spörri, Limpach, et al., 2014)). Typically, very high-quality units are used for research (Supej, 2010), and while low-cost versions of these technologies exist (notably, RTK kit-set units (Takasu & Yasuda, 2009; Valente et al., 2020)) earlier variations have shown concerning error rates in alpine skiing (Gussiås, 2017).

Most error rates are calculated based on instantaneous trajectory measures, as deviation from a high-end criterion device, and rarely on performance metrics. This is logical, since most variables are derived from the same potentially erroneous signal will feature inflated inaccuracies. Nevertheless, feasibly a more 'macroscopic' approach using turn or sectional averaged data could reduce error rates (e.g., four 'trials' halves the error (Hopkins et al., 2009)), and potentially reduce concerns associated with systematic bias or 'false fix' data. Moreover, the lack of discriminate capability of technology to elite athletes does not necessarily degrade situational efficacy to lower-level counterparts. Recent sports devices appear acceptable in cross-country skiing (Gloersen et al., 2018), and the accessibility of similar accessible GNSS units is of interest to many practitioners and researchers. Regardless, there are still concerns around the ability of typical units to provide accurate and reliable

enough data to detect worthwhile differences in performance metrics in the notoriously challenging alpine skiing.

This study aimed to test the validity of a sports GNSS device to measure various performance parameters in alpine skiing. To this end, we performed 1) a reliability and validity study on a custom compiled low-cost RTK system, and 2) a subsequent criterion validity comparison against between the sports GNSS and the RTK for individual turns, and multiple turns collapsed into ‘sectional’ averages.

3.2.4. METHODS

3.2.4.1. Procedures

3.2.4.1.1. *Mountain coaster experiment*

An RTK unit was fixed to a mountain coaster rail system that circulated throughout an overcast morning of experimentation (see Figure 34). The rail system was at a French ski resort (Saint François Longchamp, France; altitude ~1700 m), and consisted of a ~900 m track that turned back and forth alongside a ski slope. A two-seated sledge circulated around the course at a velocity controlled by the riders (via a braking system). The sledge path was practically immovable, comprising of a central metal rail and two adjoining parallel rails.



Figure 34. Illustration of luge setup

Depiction of the mountain coaster sledge, upon which the RTK antenna was fixed (dashed circle). The stylized black lines represent the track on which the sledge ran and were approximated in the digitized plans provided and used for our validity comparisons.

The RTK antenna was placed atop and centre of a padded seat at the rear of the sledge above the riders' heads, and the electronics in a small bag affixed to the bottom of the seat. A base station was affixed to the roof of a vehicle positioned in an unobstructed location near the bottom of the course. We performed four separate trials in the morning over three hours in overcast metrological conditions. Each run had different velocity traces (and time) due to non-normalised braking patterns by the operators. The mountain coaster was selected for this test for three interrelated reasons: 1) it provided a quasi-identical trajectory across multiple runs, which significantly improved the ease with which numerous trials can be compared for reliability without biological error, 2) it shares key similarities to skiing, including a mountainous environment, similar speeds and loss of elevation, and quasi-similar alternating turning styles, and 3) while unable to access a higher quality reference system

against which to validate the system, we were provided with a digital high-resolution ground-track document that allowed digitization for overlay and comparison.

3.2.4.1.2. *Sküing experiment*

Athletes performed two trials of a marked giant-slalom course while equipped with the custom built RTK and a sports GNSS system. The experimental collection was performed during the final stages of the habitual training practice, and as such the athletes were already familiar with the course, warmed-up, and ready for maximum effort skiing. Athletes performed 1-2 race-paced runs, after which various performance metrics were derived from turn-by-turn and turns grouped into sections and then compared to test the validity of the sports-GNSS device. Athletes provided written informed consent, and the operational procedures were approved by the ethics board of the University Savoie Mont Blanc and were in congruence with the Declaration of Helsinki.

The athletes were female regional-level skiers ($N=4$; age, 19 ± 1 yr). Testing occurred on hard groomed snow, and during stable environmental conditions (~ 1 hr, during the morning). Brush gates were set by a federation coach to model a giant slalom setup (20 gates) on a moderate-grade consistent grade slope ($\sim 17^\circ$ relief). Athletes wore their own boots and used their own ski gear and equipment (e.g. helmet, goggles, and back protectors). Athletes were equipped with two distinct systems that provided positional data: 1) a sports GNSS system (model: Stadium tracker, Mac-Lloyd Sport, Paris, France), and 2) a custom built RTK system (as the ‘criterion’ measure).

Two ‘rover’ RTK units were worn by athletes during the testing period in a small backpack, with the antenna attached to the helmet in the same manner as the sports GNSS. An identical unit was used as a base/reference station that was fixed to a tripod on a flat open area above the testing site and remained stationary and unobstructed throughout the testing procedures.

3.2.4.2. *Equipment*

For both experiments, position was provided by low-cost RTK (see Figure 35) compatible GNSS unit/s built from the following componentry: a high-fidelity antenna (model: ANN-MB, uBlox, Thalwil, Switzerland; gain, 28 ± 3.0 dB) and RTK compatible receiver (model:

M8T, uBlox, Thalwil, Switzerland), wired to a small portable computer (model: RaspberryPi zero, Kubii, Lyon, France) and small battery pack (~100 g). The units were capable of reading signals from a variety of satellite systems (American [GPS], Russian [GLONASS], European [Galileo], and Chinese [BeiDou]), on the L1 frequency at 10 Hz. Each unit cost ~150 euros, which was 5-10× less costly than comparable commercial alternatives.

For the skiing experiment, an additional sports GNSS system provided positional data from the Russian (GLONASS) and American (GPS) satellite systems at a down-sampled rate of 10 Hz fused with data from an onboard inertial measurement unit (Gloersen et al., 2018). The units were lightweight (~20 g per unit) and were worn attached to the helmet of the user using commercial Velcro.

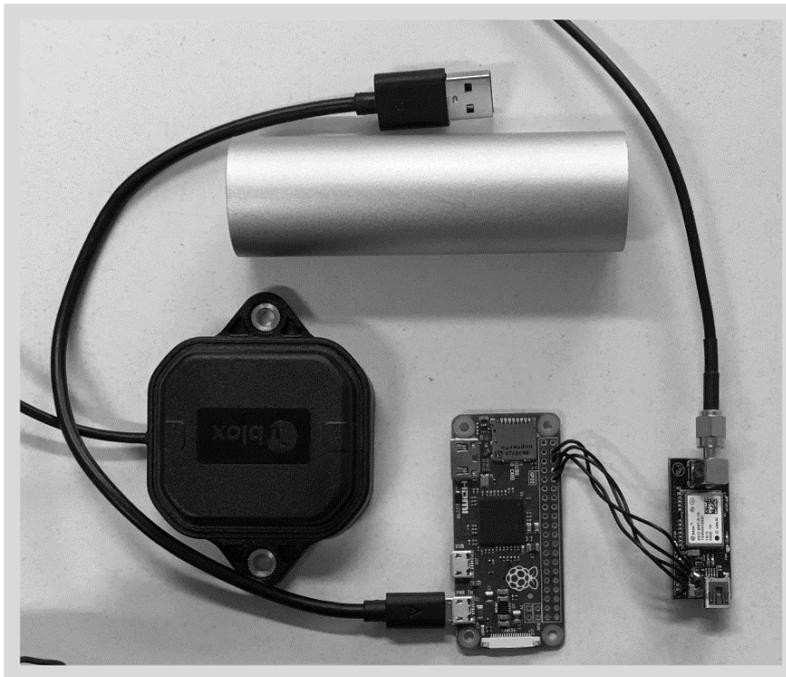


Figure 35. Low-cost Real-Time Kinetic (RTK) device.

Clockwise from top: battery pack, RTK compatible receiver, portable computer system, and a high-fidelity antenna.

Trials were also recorded by video to corroborate data where necessary (camera model: Hero 5, GoPro, San Mateo, USA; stabilizer model: G5, FeiyuTech, Guilin, China), which was held by a researcher who skied behind the athlete at a safe distance.

3.2.4.3. Data analysis

For each experiment, rather than providing a ‘real-time’ feedback, the data from the RTK rovers and base-station were extracted and analysed post-operatively using programs from the RTKLIB (version: 2.4.3 b33) directory (Takasu & Yasuda, 2009). The distinct navigational data from the rover and base station were combined to provide kinematic positioning solutions, with an elevation mask of 20° to exclude low-strength satellites (per the manufacturer’s instructions). Where used, the sports GNSS data were downloaded using the manufacturer supplied software. From this point, the results were imported and processed using MATLAB (model: R2019b, Mathworks Inc., Natick, Massachusetts, USA).

3.2.4.3.1. *Mountain coaster data*

The downhill portion of the run was separated from the total course for analysis, just after the release of the carriage for the first run (i.e., just after the first low speed turn). The rationale for this decision was that the beginning, uphill and straight portions of the start of the course were covered and impaired signal acquisition, in addition to comprising mostly slow or stationary periods of motion. Just before the downhill portion, the RTK system transitioned to a fixed solution. Data were synchronised at a distinct geographical point and zeroed in all axis. The raw, unfiltered data were used for comparisons.

A reference ground track was generated from the information obtained from the building plans. Specifically, distinct data regarding the measurement scale, and the centre axis of the sledge track was extracted using the image digitization plugin in MATLAB. Due to the lack of exact geographic positioning, the resulting northing-easting data for the ground track was rotated to fit the overlaid trajectories of the RTK system using cross-correlation. Note: the plans from which the ground track was digitized were preliminary building plans which did not necessarily represent the exact dimensions of the finished structure, and represented the centre of the rails upon which the sledge ran (i.e., the RTK antenna was ~ 1.5 m above the rails, and the rails ranged from <1 m from the ground to >3 m). As such, this comparison features several limitations which we will discuss in the interpretations of the results.

3.2.4.3.2. *Skiing data*

Positional data (northing, easting, and altitude) were smoothed (11 frame Savitzky-Golay), and then low-pass filtered (1 Hz second order Butterworth). The files were initially cut at just before and after the trial using velocity-time data (as just before the athlete began the trial, until after they braked and came to a stop following the final gate). From this stage, individual turns were extracted using the point of inflection in the triple derived easting positional data (Adelsberger et al., 2014) as distinct turn-switch events (i.e., the end of one turn and the beginning of the proceeding turn). Turns during which the RTK system did not provide the most accurate outcome solution (i.e., ‘float’ rather than ‘fixed’ = four turns in total) were excluded from the analysis for both units. The final data selected for analysis consisted of 16-17 turns per athlete (total of 93 turns), depending on the ‘tactical’ approach to the first and last turn cycles (i.e., early skidding on the last turn was excluded).

3.2.4.3.3. *Parameter computation for the mountain coaster*

For the RTK validity test, only longitude, latitude, and altitude were extracted for comparison across different runs. No other variables were extracted, mostly due to different operator speeds across runs voiding the possibility of assessing other interesting variable sets (e.g., energy behaviours). Moreover, the aim here was to test the accuracy of the raw positional data provided by the RTK system from which all the other variables will be computed during skiing. The difference in longitude and altitude data from the ‘criterion’ digitized ground track in m were computed along position in latitude for each of the four trials.

3.2.4.3.4. *Parameter computation for skiing*

Per each distinct data-stream, for each turn, the following variables were computed: turn-entry and averaged velocity (v_{in} and v_{avg} , respectively), cumulated displacement (L) (Spörri, Kröll, Schwameder, et al., 2018)), average radial force (Jentschura & Fahrbach, 2004), and the difference in specific mechanical energy normalized to the velocity at turn entry ($\Delta e_{mech}/v_{in}$ (Supej & Holmberg, 2011)). The computation of these variables are discussed in detail in the previous chapter (see Chapter 3.1).

Two distinct data analysis approaches were employed to test the validity of the devices: 1) Data from all possible turns were individually compared between the units (e.g., L turn 1 for each athlete, GNSS vs. RTK), and 2) data from each athlete (16 turns, with the first turn excluded where necessary) were grouped into four consecutive turns, averaged and then compared in the same manner (e.g., L averaged across turns 1-4 for each athlete, GNSS vs. RTK).

3.2.4.4. Statistical analysis

For the mountain coaster, we adopted a simplified approach to detecting systematic and random error and variability to measure validity and reliability, respectively. Specifically, along each dimension of northing (i.e., on each point of the trajectory), the mean and standard deviation of the difference of the trajectory of the four runs between RTK and reference digitized ground track data for altitude and longitude were calculated. Subsequently, the mean and standard deviation over the entire run of the mean difference (across the 4 runs) between RTK and ground track trajectory represented the systematic error and its variability across the entire run, respectively. These two indexes were used to assess the ‘validity’ of the RTK system in comparison to the ‘reference’ ground track data. To represent the random error of the RTK units and its variability across the entire run, the mean and standard deviation of the standard deviation (across the 4 runs) between RTK and ground track trajectory were similarly calculated across the entire run. These two later indexes were used to assess the reliability of the RTK system across the 4 runs.

Descriptive data are presented as means \pm standard deviation. For the skiing experiment, The RTK and GNSS data were compared using bias, Pearson’s correlations, and typical error. Overall bias between the methods was assessed using the mean difference between the practical (GNSS) and that from the criterion (RTK) and reported in raw units \pm 95% confidence intervals. The strength of agreement between the two measures was assessed using Pearson’s correlation coefficient (r) on the log-transformed data, and threshold values of 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 to represent weak, moderate, strong, very strong agreement, respectively. Typical error of estimate as a percentage (CV%) provided a measure of error magnitude. All individual turns were analyzed in the first instance, and then the analysis was repeated on the ‘grouped’ turns for all athletes.

3.2.5. RESULTS

3.2.5.1. Mountain coaster

The mean systematic error compared to the ground track in longitude data was 0.697 m, with the variability along the course in this error being 0.616 m. For altitude, the mean systematic error compared to the ground track was 0.431 m, with the variability along the course in this error being 0.366 m. For longitude data, the mean random error was 0.023 m, with the variability along the course of this error being 0.0075 m. For altitude, the mean random error was 0.19 m, with the variability along the course of this error being 0.066 m. The longitude- and altitude-northing data are presented in Figure 36 and Figure 37, respectively.

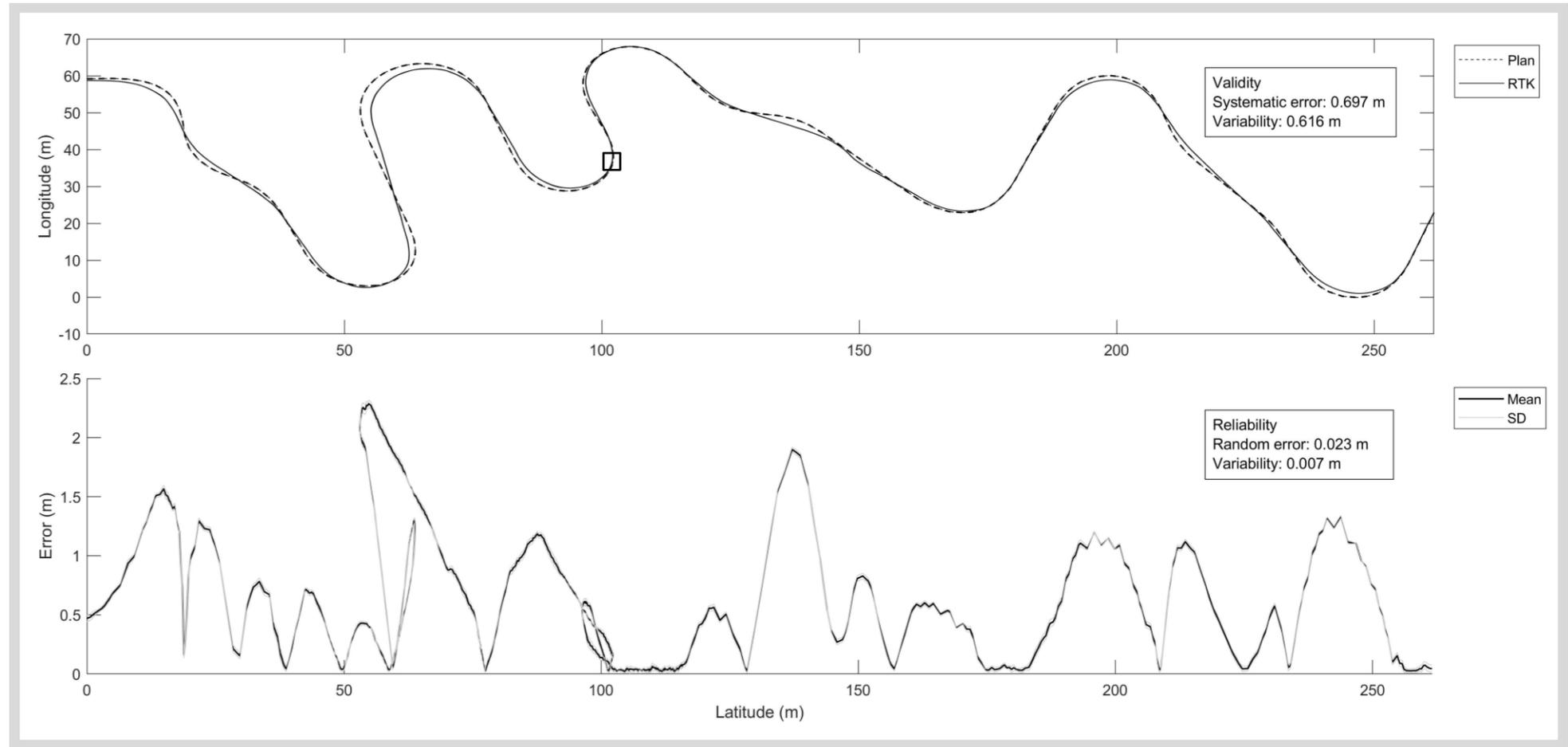


Figure 36. Systematic and random error between the RTK device and the digitized ground-track data in longitude data

Figure depicts data collected from four trials of the RTK device, relative to that from the digitized ground plan of the mountain coaster, displayed here as longitude normalised to latitude. The top figure displays the longitude of the four runs (black lines) and the ground track (dashed line) as a function of the displacement in latitude. The small black box indicates the approximate range of the ‘exploded’ data displayed in Figure 38. The bottom graph displays the mean systematic variability between the RTK and ground track in m (black), and the variability (light grey SD lines) along the latitude. Note: the variability is extremely low, so the SD bars cross the mean error.

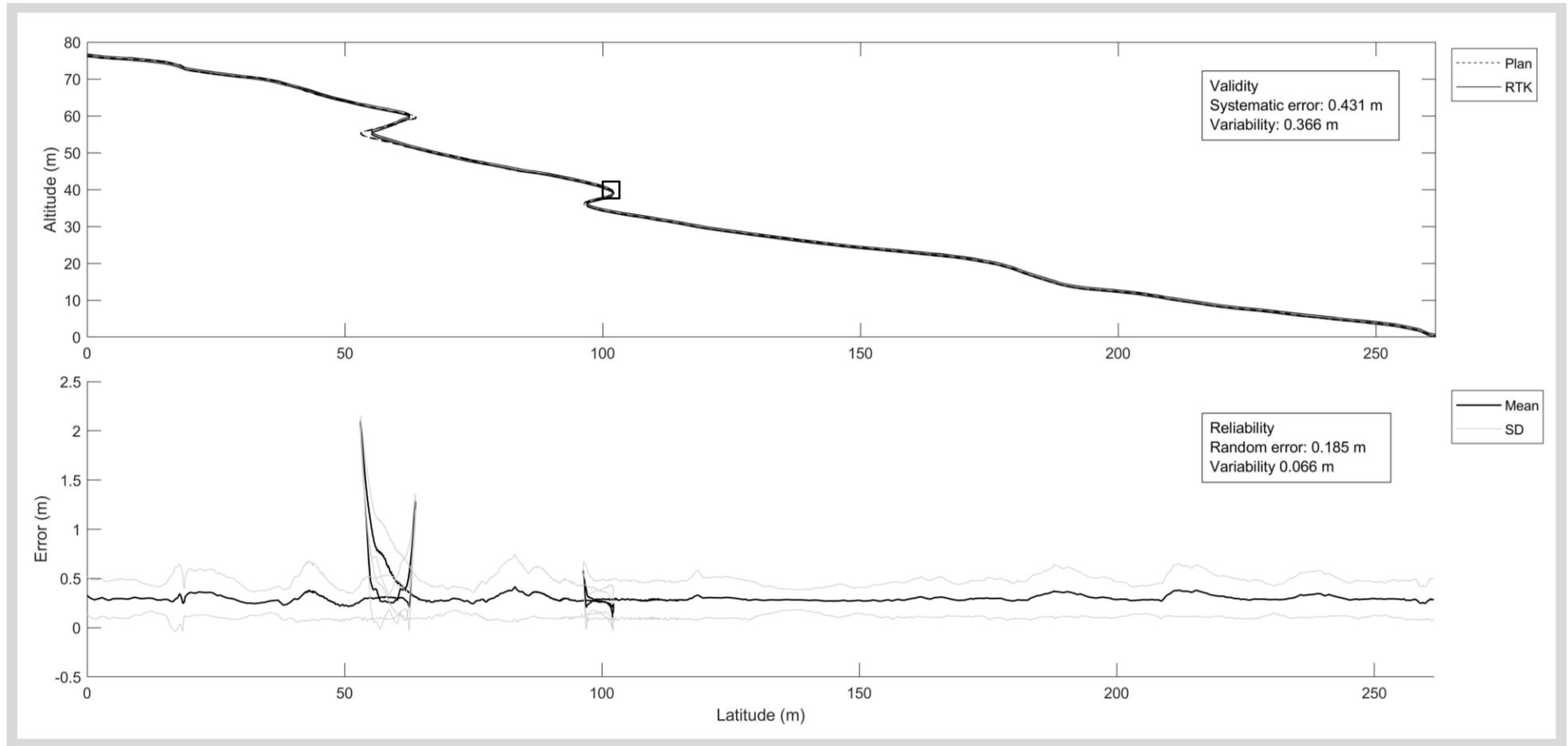


Figure 37. Systematic and random error between the RTK device and the digitized ground-track data in altitude data

Figure depicts data collected from four trials of the RTK device, relative to that from the digitized ground plan of the mountain coaster, displayed here as altitude normalised to latitude. The top figure displays the altitude of the four runs (black lines) and the ground track (dashed line) as a function of the displacement in latitude. The small black box indicates the approximate range of the ‘exploded’ data displayed in Figure 38. The bottom graph displays the mean systematic variability between the RTK and ground track in m (black), and the variability (light grey SD lines) along the latitude.

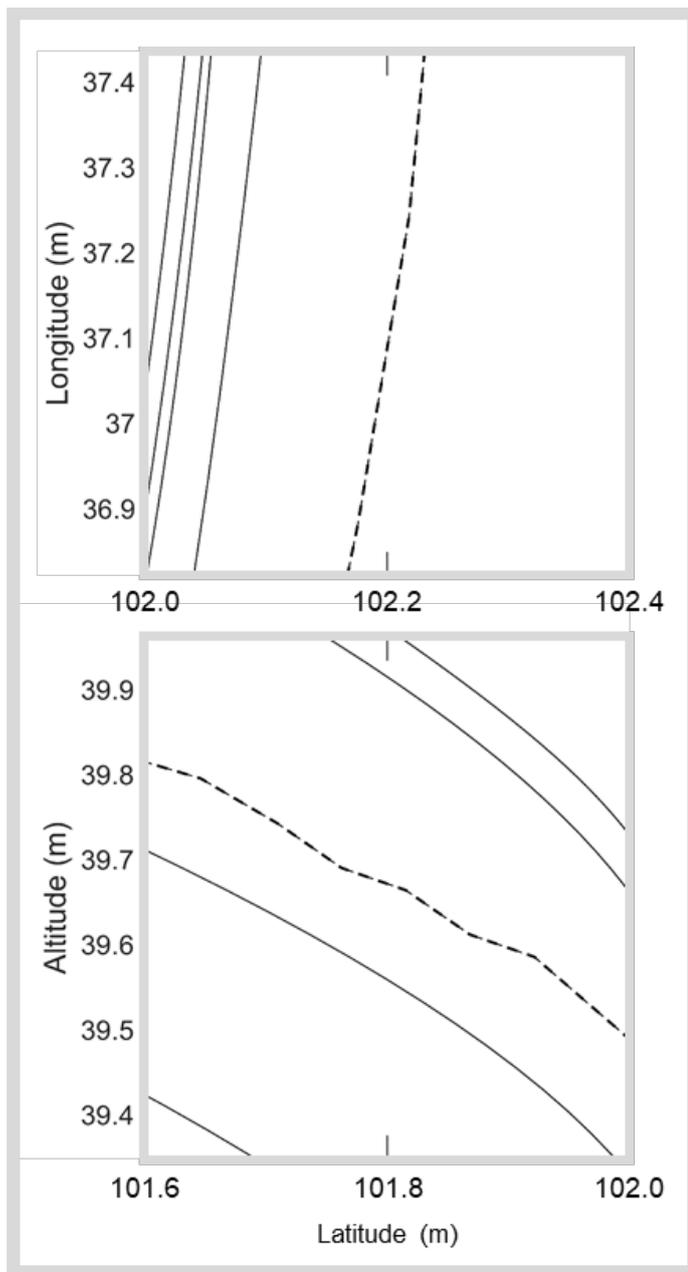


Figure 38. 'Exploded' view of RTK and ground-track data

Data here corresponds to the 'exploded' section of RTK and ground-track data displayed in Figure 36 and Figure 37 (top and bottom, respectively), corresponding (approximately, the box is oversized for visibility) to the small black box on each figure. The purpose here is to show that the graphic does indeed display four separate trajectories (black lines) alongside the digitized ground path of the coaster (dashed line).

3.2.5.2. Skiing experiment

Full descriptive data and results are presented in Table 6, with plots of the bias $\pm 95\%$ limits of agreement (associated to Bland Altman plots) for the two levels of analyses displayed in

Figure 39. Turn-by-turn data were typically low bias (<1.5% for all variables, except $e_{\text{mech}}/v_{\text{in}}$ [4.5%]), with *moderate* to *very strong* agreement in all variables. In general, variability was low ($CV < 5\%$) except for F_r and $\Delta e_{\text{mech}}/v_{\text{in}}$, which exhibited *large* and *very large* error (7.0 and 12.9%), respectively.

Sectional data understandably shared similar bias scores to turn-by-turn analyses (<1.4%). However, agreement was substantially improved with all but F_r representing *strong* or *very strong* agreement (*moderate* agreement for F_r). Similarly, error was markedly reduced by adopting a sectional approach, with all variables $CV < 9.1\%$.

Table 6. Comparison of variables calculated from positional data collected from RTK and GNSS units

Turn variables	RTK		GNSS		RTK vs. GNSS		
	Mean	\pm SD	Mean	\pm SD	Overall raw bias (95% CI)	Pearson's (r)	Typical error (%)
Turn-by-turn ($N=93$)							
T (s)	1.58	± 0.13	1.58	± 0.15	0.0022 (-0.012; 0.017)	0.86	4.2
v_{avg} (m/s)	17.93	± 1.24	17.96	± 1.40	0.036 (-0.069; 0.14)	0.91	3.1
v_{in} (m/s)	18.06	± 1.54	17.89	± 1.63	-0.17 (-0.31; -0.034)	0.93	3.6
L (m)	29.92	± 1.69	29.86	± 2.13	-0.054 (-0.24; 0.17)	0.62	4.5
F_r (N/kg)	8.19	± 0.73	8.34	± 1.03	0.15 (0.0081; 0.30)	0.69	7.0
$\Delta e_{\text{mech}}/v_{\text{in}}$ (Js/kg/m)	-3.72	± 0.52	-3.66	± 1.02	0.051 (-0.23; 0.13)	0.51	12.9
Grouped turns ($N=23$)							
T (s)	1.58	± 0.08	1.58	± 0.08	0.0022 (-0.0058; 0.010)	0.97	1.2
v_{avg} (m/s)	18.17	± 0.43	18.19	± 0.65	0.018 (-0.16; 0.20)	0.78	1.5
v_{in} (m/s)	18.35	± 0.51	18.17	± 0.73	-0.18 (-0.35; -0.000029)	0.84	1.5
L (m)	30.45	± 1.77	30.39	± 1.99	-0.066 (-0.34; 0.21)	0.95	1.8
F_r (N/kg)	8.23	± 0.36	8.35	± 0.60	0.13 (-0.064; 0.32)	0.69	3.3
$\Delta e_{\text{mech}}/v_{\text{in}}$ (Js/kg/m)	-3.83	± 0.65	-3.81	± 0.80	0.022 (-0.19; 0.15)	0.82	9.1

RTK, Global Navigation Satellite System with real-time kinematic post-processing capabilities; GNSS, Global Navigation Satellite System; SD, standard deviation; CI, confidence intervals; v_{avg} , averaged velocity; v_{in} , velocity at turn entry; L , cumulated distance traveled; F_r , radial force; $\Delta e_{\text{mech}}/v_{\text{in}}$, change in specific mechanical energy normalized to velocity at turn entry; s, seconds; m/s, meters per second; m, meters; N/kg, Newtons per kilogram; Js/kg/m, joule seconds per kilogram per meter.

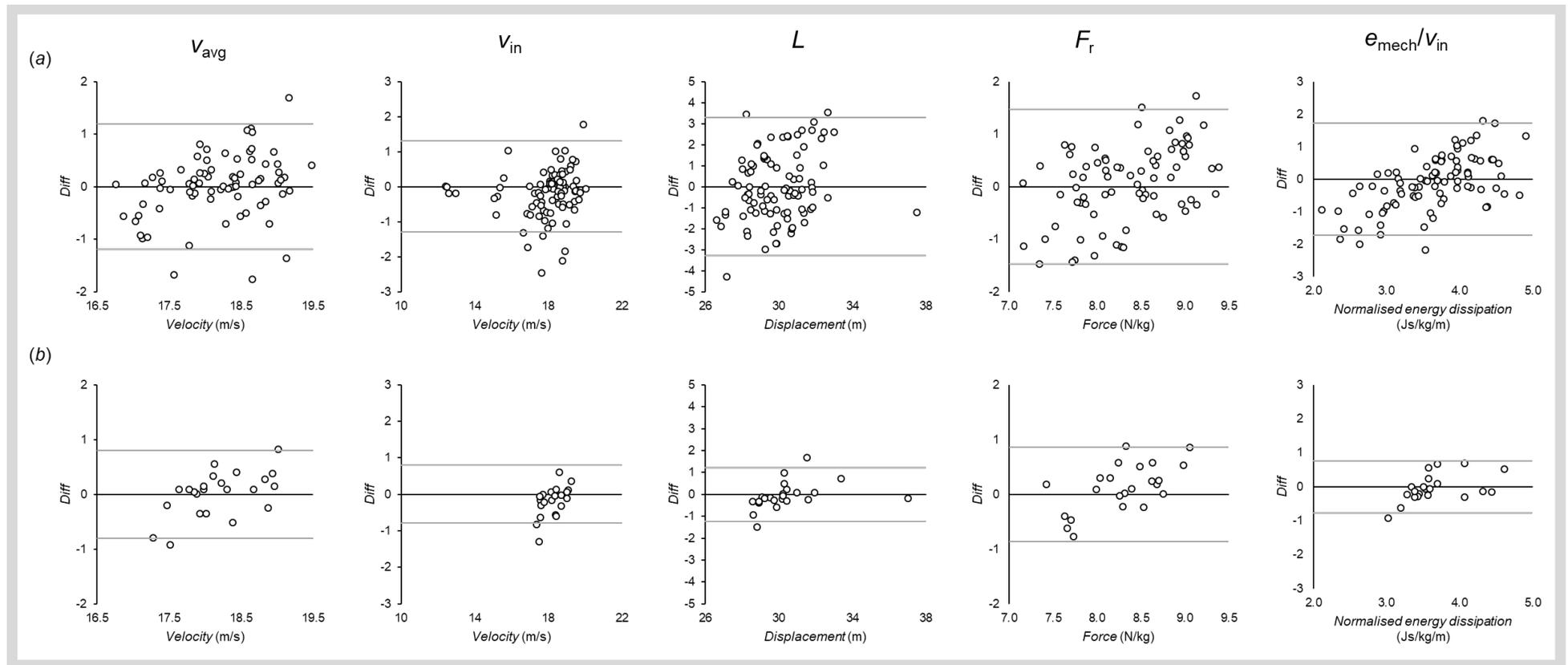


Figure 39. Bland-Altman plot of variables calculated from the RTK and GNSS devices.

Vertical pairs of plots correspond to each variable, with the horizontal corresponding to either turn-by-turn analysis (a), or ‘sectional’ analyses (b). y -axes display the difference between the two devices for the corresponding variable, with the grey lines representing limits of agreement (± 1.96 SD). v_{avg} , averaged velocity; v_{in} , velocity at turn entry; L , cumulated distance traveled; F_r , radial force; $\Delta e_{mech}/v_{in}$, change in specific mechanical energy normalized to velocity at turn entry; s, seconds; m/s, meters per second; m, meters; N/kg, Newtons per kilogram; Js/kg/m, joule seconds per kilogram per meter. Note: turn time is not displayed in this figure, since the data were not easily readable (most differences were identical, at either 0 or 0.1 s).

3.2.6. DISCUSSION

On the one hand, despite systematic error in our measurements (not associated with the RTK system), we can infer validity and excellent reliability in the low-cost RTK device in these testing conditions. On the other hand, in this brief investigation, a typical sports GNSS unit provided sufficient estimates of several key performance parameters in ski racing. Surprisingly the values provided from turn-by-turn analyses appear generally very acceptable, adopting a ‘sectional’ approach markedly reduced systematic and random error. As such, practitioners and researchers might benefit from adopting a sectional approach in their analyses and athlete feedback, particularly when examining variables such as $\Delta e_{\text{mech}}/v_{\text{in}}$ and F_r that are valuable in contextualizing skiing performance but suffer from inflated computational errors (albeit within acceptable bounds compared to other sports science measurements). Such an approach could feasibly allow the use of relatively common sports GNSS technology into alpine skiing practice and research, albeit requiring post-processing and considering the remaining error of some variables.

While at face value the mountain coaster validity data appear relatively poor, there are several explanations for these results. Namely, the position of the RTK antenna was above that inferred from the ground track of the coaster, and along the track the rails were set to pivot the coaster back and forth. As such, this pivoting created an offset in the northing-easting position between the top of the sledge (i.e., the antenna position) and the ground track. This pivoting typically occurred during turning (i.e., to offset F_r), and probably explains the characteristic tracking of the RTK trajectory inside each turn (see the clear and repeated offsets in Figure 36). Moreover, since the digitized plan was not final, presumably there are some minor differences between our plot and that finalised on the course. Lastly, the accuracy of our digitization was constrained by the quality of the document provided (specifically, line ‘finesness’), which resulted in some estimation granularity. For these reasons, we can reasonably assume that the systematic errors observed between RTK and the ground track were due to the latter not exactly describing the actual coaster trajectory, notably during turns where the higher systematic errors were observed. Consequently, considering the very high reliability of the RTK system, we can infer the validity of the RTK system, even if a validation using a true criterion trajectory is needed.

Importantly, the results from our mountain coaster experiment depict low levels of random error and variability in both altitude and longitude data. Moreover, we theorise that these error rates are inflated due to the necessity of data normalisation required integration of error along another axis. Specifically, while higher random error in altitude was expected (Gilgien, Spörri, Limpach, et al., 2014), the necessity of normalisation for comparisons compounded error via that induced in the longitude-latitude plane. In any case, these results are encouraging for the integration of similar technologies into alpine skiing practice, given the similar characteristics under which this experiment was performed (e.g., alpine environment, similar speeds and trajectory characteristics). Nevertheless, some concerns still exist regarding the capability of such units to detect appropriate targeting solutions in various environments, since a concern with such ‘low-cost’ units is their disposition to fail to find a fixed solution, or detect a ‘false’ fix (Gilgien, Spörri, Limpach, et al., 2014; Gussiås, 2017). More research using similar updated technology—notably integrating higher quality antennae and higher sampling frequencies in congruence with the concerns of previous investigations (Gussiås, 2017)—are warranted.

The core kinematic variables detected from the sports GNSS displayed low turn-by-turn bias and acceptable TE overall when compared to our criterion measurement in regional level skiers. The base variable of T had negligible bias between the methods (<0.01 s). However, since T represents the time between trajectory inflection for each athlete (i.e., a representation of the technical approach of each athlete rather than the more traditional ‘timing split’ between two standardized geographical points), the actual practical utility of this variable is probably limited. Nevertheless, the difference in turn time helps clarify where subsequent errors in the signal arise (Gilgien, Spörri, Limpach, et al., 2014). In the first instance, some inflated error can be expected due to the low sampling frequency of each unit (i.e., a minimum difference of 0.1 s). Moreover, errors in determining the turn-switch moment directly affects the subsequent turn (e.g., turn 1 = +0.1 s, turn 2 = -0.1 s); this is a further argument for averaging several turns or trials to minimize this error when adopting the same turn switch detection approach. Both velocity measures had negligible bias between the units, and approximately 0.5 and 0.6 m/s of error. Similar results were observed in cumulated path length (L), albeit with slightly inflated error, probably as a partial result of turn-cutting technique. The overall error of ± 1.32 m is considerably larger than the values presented for

worthwhile differences in high-level athletes (Supej et al., 2020), albeit based on different measures of the trajectory. Understandably, the more computationally complex variables exhibited inflated error scores. Slightly higher F_t scores were observed when measured from the sports GNSS, with *moderate* agreement and large error (0.54 N/kg). The agreement and error from $\Delta e_{\text{mech}}/v_{\text{in}}$ were the worst of the variables calculated (*moderate* agreement and *very large* error, respectively). While the SWD for various cohorts is not well known, clearly caution is necessary when assessing these variables in turn-by-turn in low-cost GNSS. Nevertheless, there may be some applications in lower-level athletes as a coaching feedback tool.

When implementing a sectional/averaged approach, there were drastic reductions in error. In the first instance, the reduced difference between the methods in turn-time (70% error reduction) supports this approach as a means of accounting for problems caused by consecutive offsets in turn detection. As an example of this correction, the typical error of L drastically reduced to 0.56 m. The error of all other variables followed suit, albeit with the agreement maintaining or slightly worsening (potentially caused by reduced and more heterogenous datapoints). In any case, these results support the use of a ‘sectional’ approach to reduce error in sports GNSS units or, indeed, improve the capability to detect small and worthwhile changes in higher levels athletes with more advanced technologies (Hopkins et al., 2009). While the slope in this study was separated into nondescript ‘sections’ of consecutively grouped turns, feasibly, this approach could be applied to sections with distinct geomorphological or technical characteristics (as performed in the previous chapter). Providing similar performance outcomes for distinct sections (e.g., steep vs. flat) could viably provide coaches and athletes with valuable information with which to contextualize the regular feedback received by expert eyes and video (Gilgien, Reid, et al., 2018). Moreover, such an approach might allow the greater implementation of monitoring, since our results support the capability of relatively low-cost units to provide valid measures of a variety of variables. Of course, these findings should be tempered with an acknowledgment that GNSS units are still at risk for several confounding factors (e.g., signal obstruction due to rocky over-cropping) that should be considered when implementing into practice.

3.2.6.1. Limitations

While used to validate the system used in the subsequent criterion validation of the sports GNSS, the experiment featured the following limitations: It was performed on a different mountain, persistent lack of ‘time-synced’ criterion device, lack of ‘snow’ surface (i.e., which can complicate positioning), and problems with the comparison to the digitized ground-track and the true trajectory of the sledge. Regarding the latter point, we digitized the ground plan from a high-resolution document provided by the ski station and created an XYZ plan of the mountain coaster ground track. However, the plan was a building layout, and may not have represented the coaster as it was finalised in the environment. Moreover, the plan was for the central axis of the coaster track (and more accurately to the vertical projection of the track to the ground), and the antenna was fixed approximately ~1.5 m from the rails (and potentially 2-3 m above the ground at some places). Moreover, as discussed above, during the turns the track dips and inclines the sledge towards the turn centre, or otherwise to enhance the experience of the rider. These limitations in the comparison explain, in part, the differences we observed between the highly repeatable RTK trajectory and that provided by the digitized ground plan. Nevertheless, a validation against a true high-quality positional technology or a more accurate known ground-track would provide a clearer picture of the validity of the device.

For the skiing experiment, both units were attached to the head, which is distinct from the center of mass trajectory. While an attachment point closer to the COM would have been preferable to increase the interest in several variables (Supej et al., 2020), the helmet was chosen here for practicality (i.e., difficulty attaching both units in a small space, without compromising the safety of the athlete) and for the likelihood of providing clear satellite coverage for both units. Moreover, there is some evidence to suggest the bias introduced by such an approach is rather minimal and systematic (Meyer & Borrani, 2018). The present study aimed to test the validity of GNSS signal to obtain key variables for skiing performance, but not to study and interpret these variables per se. While we acknowledge different signal strength is possible with different attachment points (Supej et al., 2020) our results support the agreement between sports GNSS and criterion measures when the raw signal is good.

3.2.7. CONCLUSIONS

Sufficiently accurate performance data can be measured from sports GNSS units, particularly when paired with a 'sectional' approach to analyzing presenting data. While acceptable, error associated with force and energy behaviors was still present and should be considered when interpreting study results. Our results evidence typical GNSS exhibit inflated error compared to more accurate tools and measurements but remain a possible alternative to assessing performance metrics in research and practice when integrated with analytical approaches to improve accuracy.

Annexe 5 - Cross, M., Delhay, C., Bowen, M., Coulmy, N., Morin, J.-B., Hintzy, F., et al. (2019). "Magnitude and relationship between force output and performance in giant slalom," in *Science and Skiing VIII*, eds. M. Karczewska-Lindinger, A. Hakkarainen, V. Linnamo, and S. Lindinger (Meyer & Meyer Sport Ltd), 80–87.

MAGNITUDE AND RELATIONSHIP BETWEEN FORCE OUTPUT AND PERFORMANCE IN GIANT SLALOM

Cross Matt R.^{1,2}, Delhaye Clément¹, Bowen Maximilien¹, Coulmy Nicolas², Morin Jean-Benoit³, Hintzy Frederique¹, Samozino Pierre¹

¹Université Savoie Mont Blanc, LIBM, France,

²Fédération Française de ski, France,

³Université Cote d'Azur, France

Keywords: biomechanics, force-plates, ground reaction forces

Introduction

In alpine skiing, an athlete must negotiate the course by managing the production and absorption of external forces. While aerodynamic forces have been shown to be predictive of performance in some disciplines (Hebert-Losier et al., 2014), ground reaction forces (GRFs) are the primary mechanism for skiing actions. For these reasons, force output in skiers has attracted interest in both applied research (Hebert-Losier et al., 2014) and conditioning practice (Hydren et al., 2013).

Logically, the amount of ground reaction forces produced during skiing is intrinsically related to the kinematic characteristics observed. That is, a turn performed at higher speeds and a tighter turn radius (i.e. radial force = velocity²/radius) will be associated with a greater GRF profile than slower and less aggressive turn tactics (assuming consistent body-weight [BW]). While force is often explained as the subsidiary variable in this equation (i.e. greater GRFs are a result of the speed and line choice), the inverse explanation holds interest for understanding performance for training athletes: Athletes who can produce greater force (and notably radial force) can similarly turn with a smaller radius while maintaining a high velocity or turn at a higher velocity with a given radius (Nakazato et al., 2011). Certainly, an enhanced capacity for force production is generally accepted as a necessary physical component for ski athletes (Hydren et al., 2013; Turnbull et al., 2009). However, while some evidence suggests advanced athletes exhibit a greater ability to produce force (Keranen et al., 2010), the relationship is likely more complicated (Supej et al., 2011). Data on the subject is rare, and often features limitations due to technology and the complex nature of collection in an alpine environment.

In alpine skiing, GRFs can be measured in a variety of means, but generally: 1) directly, either assuming output via pressure insoles (Falda-Buscaiot et al., 2017) or

using specialized force platforms (Nakazato et al., 2011), and 2) indirectly using video (Supej et al., 2011) or GNSS in combination with other micro-technologies (Sporri et al., 2018). Clearly, among these methods force-platforms are the gold-standard in measuring kinetic activity, but the challenging alpine environment and difficulty integrating technology with skiing material has substantially limited studies utilizing this method. Technological limitations have complicated data capture capabilities and resulted in somewhat invasive designs (e.g. increased clip-in height, weight and modifications to the rigidity of the ski) that inevitably degrade measurement validity. A recent system presented by Falda-Buscaiot et al. (2016) shows promise by addressing several of the confounding factors featured in traditional devices. Using such technology in high-level skiing practice could feasibly provide a deeper understanding of athlete force production during both biomechanical and strength and conditioning practice.

Using validated force plates (Falda-Buscaiot et al., 2016) we aimed to (i) compute magnitudes and balance of force produced on a giant slalom course, (ii) test the relationship between force output parameters and kinematic parameters, and (iii) test the relationship between course performance and force measures.

Methods

13 alpine skiing athletes of varied capabilities (club to world cup level) performed race-paced trials of a 16-gate giant slalom course (gate-to-gate distance and offset = 24 and 8 m; ~25° groomed). Athletes were equipped with a force plate system, and a modern GNSS system, to provide turn-by-turn GRFs and positional data during race-paced trials of the course.

A validated force collection (Falda-Buscaiot et al., 2016) system, comprising of custom-routed aluminum frames housing two force sensors (Sensix, Poitiers, France) per boot, was used to gain GRF data. The units attached to a typical alpine racing boot, and subsequently clipped into a typical race binding; in this manner the sensor comprised the sole point of connection between the ski boot and the ski. The units were lighter (~1.2 kg) and mounted lower (2 mm) than traditional systems. The sensors were wired to an acquisition card (Jam Ingénierie, Chambéry, France) carried in a small bag worn just above the iliac crest of the hips (approximating center of mass). Raw voltage data was recorded and was subsequently converted into force using calibration files.

A GNSS system (Stadium tracker, Mac-Lloyd Sport, Paris, France), provided positional and accelerometer collecting data at an output frequency of 10Hz. The data were collected using the manufacturer supplied software, featuring a fusion algorithm to improve positioning accuracy, and were exported in raw form for later processing.

Course time was collected using a photovoltaic system (Tag Heuer, La Chaux-de-Fonds, Switzerland), set at the starting-gate (typical FIS style trigger) and at the final gate in the course (dual-beam cell set at thigh height). Athletes wore a standardized selection of ski boots (X LAB+ 140 WC, Salomon, Annecy, France), in their respective size and with their own boot liners, and the same pair of waxed and edged race skis (LAB X-RACE GS, Salomon, Annecy, France; radius: 30m; length: 193 cm; bindings: X19 LAB, Salomon, Annecy, France). Athletes wore FIS approved race suits and protective gear (e.g. helmet, goggles, and back protectors).

Following a warm-up and course familiarization, athletes performed a short calibration and synchronization procedure for the various sensors. 1 to 2 trials of the course were performed, interspersed with approximately 15 minutes of rest.

The synchronized force and positional data were separated into 14 turns by detecting the turn-switch moment as the inflexion point of the COM trajectory (Adelsberger et al., 2014). From this point the resultant force produced by the two limbs filtered using a 10Hz low-pass Butterworth filter. The data were expressed as multiples of bodyweight (BW) and summated to provide a total value of GRF for both limbs. Peak (F_{peak}) and mean (F_{mean}) force were computed for each turn, and the absolute difference in mean force between limbs was calculated and expressed as a percentage of F_{mean} (F_{diff}). The averaged velocity (v_{avg}) and the cumulated distance (Tra) traveled were both calculated per turn from the raw positional data provided in the 3 axes. The final data were averaged (to provide course average values) for final analysis. All data processing were performed in MATLAB (Massachusetts, USA).

The mean data were entered into a correlation matrix to firstly test for their relationship to total course time (T), and secondly to examine the interrelationship between the variables using the Pearson's correlation coefficient (r , $p < 0.05$). The strength of relationship was interpreted using values of 0.5, 0.7, 0.9, and 1.0, as thresholds for moderate, large, very large and nearly perfect, respectively (Hopkins et al., 2009).

Results

Full correlation results are presented in Table 1. The mean time to complete the course was 28.83 ± 1.22 s. Average velocity was nearly perfectly related to course time ($p < 0.001$), where cumulated distance was not.

Table 1 Correlations between course time and kinetic and kinematic variables.

	<i>T</i>	<i>F</i> _{avg}	<i>F</i> _{diff}	<i>F</i> _{max}	<i>Traj</i>
<i>F</i> _{avg}	-0.74**	—	—	—	—
<i>F</i> _{diff}	0.36	-0.17	—	—	—
<i>F</i> _{max}	-0.60*	0.74	0.18	—	—
<i>Traj</i>	-0.10	0.22	-0.016	0.12	—
<i>v</i> _{avg}	-0.97***	0.75**	-0.34	0.56*	0.30

$p < 0.05$; ** $p < 0.01$; and *** $p < 0.001$

T, total course time; *F*_{avg}, averaged force output; *bal*, portion of total force between limbs; *F*_{max}, peak force output; *Traj*, cumulated distance; *v*_{avg}, averaged velocity output (all variables turn averaged).

Mean (1.70 ± 0.15 BW) and peak force (3.76 ± 0.42 BW) produced across the turn cycles had very large ($p = 0.004$) and large ($p = 0.032$) relationships with course time, respectively. The difference in output between limbs was 32 ± 7 % of *F*_{mean} and was not predictive of performance.

Discussion & conclusions

Our findings show that in a giant slalom course average velocity was of much greater predictive value than the trajectory chosen. While the predominance of velocity as a predictor of performance is probably a result of the conditions under which variables were measured (i.e. course and discipline), it is in agreement with research in giant slalom (Sporri et al., 2018).

The average and peak GRFs measured in this study are substantial and, while it is difficult to compare values from different methodological approaches, technologies and courses, our magnitudes are generally congruent with the literature (Falda-Buscaiot et al., 2016; Nakazato et al., 2011). The peak forces observed in our study were typically higher than presented (e.g. Nakazato et al., 2011), which feasibly might represent differences in methodological approaches and a potentially more sensitive measurement techniques.

GRF output was split between the limbs in approximately a 2:1 ratio (outside to inside limb). While the outside limb takes precedence in the literature and coaching practice as the dominant and driving limb during the turn, the inside limb is still required to present substantial levels of force production (on average, 0.54 BW throughout the turn cycle). This is particularly notable given the disparate knee and hip angles at which these forces are produced (Turnbull et al., 2009), which might highlight an increased necessity to train force throughout the knee/hip complex at different angles. Interestingly, while it is common to cue athletes to emphasize pressure on the outside ski, in our results there was no clear relationship between how the athletes presented the force between the two limbs and course time.

The large to very large correlations observed between the force developed by the skier's limbs and the total run performance may indicate better performing athletes present greater force production ability. While the relationship was clear ($p < 0.01$) and substantial (52% of variability explained), the magnitude of unexplained variability highlights the reality that indiscriminant force output probably doesn't differentiate between higher level performances. The similarly large unexplained variance between F_{avg} and v_{avg} adds strength to the argument that the better skiers are those who possess enhanced technical and physical capability to orient their force output in the necessary direction (Hebert-Losier et al., 2014).

The ability to generate peak force was strongly related to better course performance. This result can be partially explained by an associated generalized force output capability (i.e. athletes with high average force output, also present high peak force), but is nevertheless interesting given research typically presents an inverse relationship between higher peak force output and performance (Hebert-Losier et al., 2014). Notably, while instantaneously high GRF output measured via inverse dynamics from center of mass is probably associated with dissipation of energy, force measured directly from the limbs could feasibly represent different mechanisms. Our GRF data do not match the characteristically smooth force-time data typically presented (see Figure 1), and the large peaks and troughs observed might point to the necessity of high rate and magnitude force production absent in in-direct measurements of force output. Micro-deviations in ski trajectory, reaction to changes in terrain, skis 'skipping' over the snow in their edging, all could potentially explain our results, and further

research might consider examining rate of force development capability as a determinant physical quality in ski athletes.

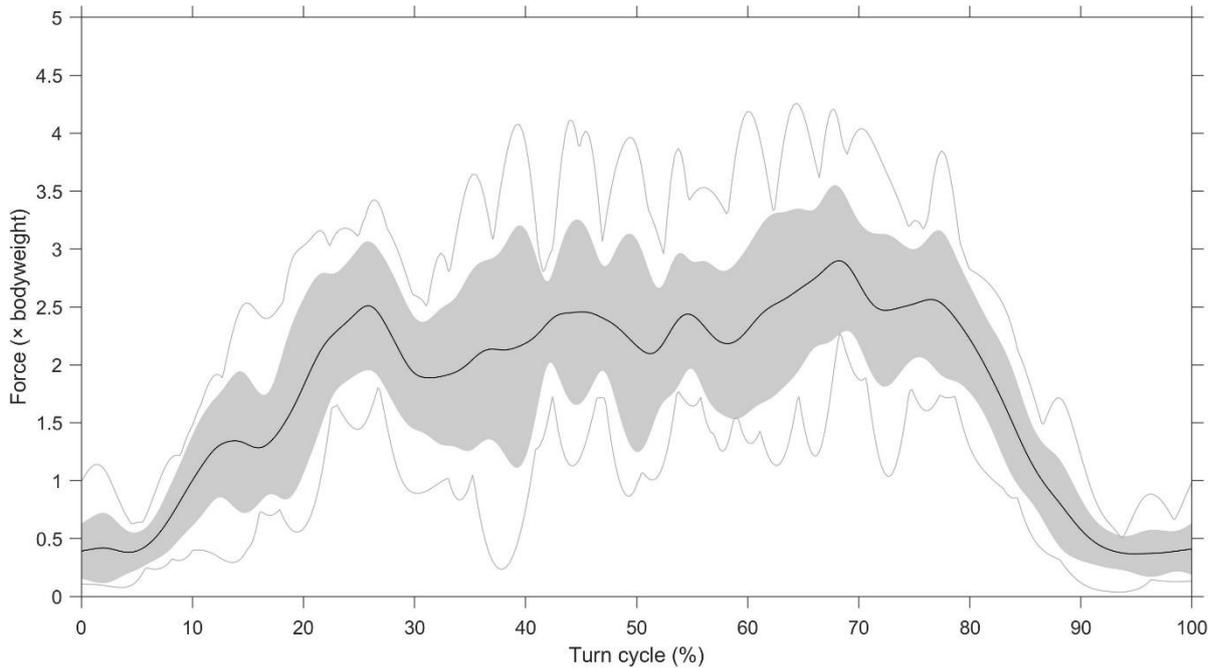


Figure 1 Turn-normalised resultant force output from a high level athlete. Black line, mean of all turns; grey area, standard deviation; and grey line, range of maximum and minimum values.

Using updated technology, our results confirm large magnitudes of force production in ski athletes and show that advanced GRF characteristics are typically related with greater course velocity, and faster course times. Substantial values of peak force and a strong relationship with performance are surprising and highlight that high level athletes require the capability to create and maintain high levels of force throughout a ski run punctuated with fast, recurrent and very high-magnitude force output. Ongoing investigation is required to clarify the exact bounds of these relationships, but at minimum our results corroborate a baseline requirement of advanced force production capabilities in ski racers.

Limitations

The study took place on a closed race course over the course of a 1-month period. While weather conditions were monitored and controlled as closely as possible, variable meteorological conditions might have affected our results. Due to the nature of the study, athletes were required to wear and use non-habitual equipment (i.e. skis and boots). While athletes were familiarized and were fitted as well as possible to the equipment at hand, it is possible that performance was affected. This was unavoidable, given the nature of the study design, and controlled for in the nature of

the comparison (course time, rather than external measures of performance level [e.g. FIS points]).

References

- Adelsberger R., Aufdenblatten S., Gilgien M., Tröster G. (2014), On Bending Characteristics of Skis in Use. *Procedia Engineering*, 72, 362-367, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.063>
- Falda-Buscaiot T., Hintzy F., Rougier P., Coulmy N., Lacouture P. (2016), Development of a new 6 components force sensor design for biomechanical research in alpine skiing. In E. Müller, J. Kröll, S. Lindinger, J. Pfusterschmied, J. Spörri, & T. Stöggl (Eds.), *Science and Skiing VII: St. Christoph a. Arlberg, Austria, December 10 - 15, 2016, Proceedings*. Berkshire, England: Meyer & Meyer Sport
- 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, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176975>
- Hebert-Losier K., Supej M., Holmberg H.C. (2014), Biomechanical factors influencing the performance of elite Alpine ski racers. *Sports Med*, 44(4), 519-533, <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0132-z>
- Hopkins W.G., Marshall S.W., Batterham A.M., Hanin J. (2009), Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc*, 41(1), 3-13, <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31818cb278>
- Hydren J.R., Volek J.S., Maresh C.M., Comstock B.A., Kraemer W.J. (2013), Review of strength and conditioning for alpine ski racing. *Strength and Conditioning Journal*, 35(1), 10-28, <https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e31828238be>
- Keranen T., Ihalainen S., Hynynen E., Salo T. (2010), FIS-ranking and carving turn force production profile. presented at the meeting of the 5th International Congress on Science and Skiing, Salzburg, Austria
- Nakazato K., Scheiber P., Müller E. (2011), A comparison of ground reaction forces determined by portable force-plate and pressure-insole systems in alpine skiing. *J Sports Sci Med*, 10(4), 754-762, <https://doi.org/10.1007/s12283-013-0119-x>
- Sporri J., Kroll J., Schwameder H., Muller E. (2018), The role of path length- and speed-related factors for the enhancement of section performance in alpine giant slalom. *Eur J Sport Sci*, 1-9, <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1453870>
- Supej M., Kipp R., Holmberg H.C. (2011), Mechanical parameters as predictors of performance in alpine World Cup slalom racing. *Scand J Med Sci Sports*, 21(6), 72-81, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01159.x>

Turnbull J.R., Kilding A.E., Keogh J.W. (2009), Physiology of alpine skiing. *Scand J Med Sci Sports*, 19(2), 146-155, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2009.00901.x>