



# FORCES À L'INTERFACE SKI-NEIGE EN SKI ALPIN : DE LA PRÉVENTION DES BLESSURES À LA PERFORMANCE. SCIENCES<sup>2024</sup>

**Author:** Frédérique Hintzy<sup>1</sup> [frederique.hintzy@univ-smb.fr](mailto:frederique.hintzy@univ-smb.fr)  
**Co-auteur:** Pierre Samozino, Matthew Cross, Maximilien Bowen, Clément Delhaye, Baptiste Morel Prieur<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité LIBM, Université USMB, Le Bourget du Lac, France

Conférence Sciences<sup>2024</sup>: saison 2021

<https://sciences2024.polytechnique.fr>

May 28, 2021

**Mots clefs:** cinétique ; ingénierie.

## 1 Introduction

Les forces de réaction au sol sont couramment étudiées en analyse cinétique du mouvement, dans des disciplines classiques comme la course à pied ou le cyclisme [8]. Ces études ont permis de tracer avec précision l'évolution des forces et des moments dans les 3 dimensions de l'appui en fonction du temps. Ces courbes répétables dans leurs formes mais dont les valeurs varient en fonctions des sujets et des conditions, peuvent être considérées comme des signatures de force. Leurs mesures ont permis de nombreuses avancées dans les domaines de l'entraînement et de l'évaluation, dans la compréhension des facteurs de la performance, dans la prévention des blessures, dans le développement de matériel sportif. Dans les disciplines de glisse comme le ski alpin, simuler l'activité en laboratoire devient bien plus compliqué et surtout, dénature l'activité. Des tentatives de développer et valider des ergomètres peuvent être relevées dans la littérature, mais les différences entre des paramètres mesurés en condition réelle de ski alpin et sur ces différents ergomètres sont trop importantes [13]. En ski nordique, il existe des plateformes de force intégrées sous une piste recouverte de neige [9], mais cette situation ne peut pas s'appliquer au ski alpin du fait d'une trop grande surface de mesure et du dénivelé. En conséquence, la nécessité de réaliser des études sur le terrain s'est imposée et donc celle de pouvoir utiliser des systèmes de mesure de la force à l'interface skieur/ski embarquables. Les premières systèmes datent des années 1970 [6, 7] et ils s'enchaînent au fur et à mesure des avancées technologiques et des besoins, en repartant de systèmes existants ou non. Le lieu de la mesure est devenu aussi un sujet de recherche, Wimmer et Holzner [15] ayant démontré qu'un capteur placé entre le ski et la fixation devenait très imprécis lorsque le ski se déforme. Ceci n'est pas vrai pour un capteur placé dans le bas de la coque de la chaussure, comme proposé par Nemec ou Niessen [12]. Les systèmes de mesure les plus récents proposent des systèmes embarqués et précis de mesure de la force en 3D,

par l'utilisation de plateformes placées entre la chaussure de ski et la fixation, sans modifier l'équipement existant [10]. Ces dernières solutions semblent être plutôt performantes, mais il restait encore des limites importantes empêchant une pratique écologique à haut niveau, comme la rigidification de l'ensemble à skier, une surélévation importante de la chaussure, ainsi que le poids supplémentaire du dispositif. En conséquence, un outil embarqué de mesure des efforts à l'interface ski alpin / skieur (MEF3D) a été développé et validé par l'équipe de Hintzy et collègues du LIBM [5], en collaboration avec la Fédération Française de Ski et l'équipementier Salomon SA Figure 1. L'originalité de ce capteur est sa faible surépaisseur (6 mm), sa faible masse (1.25 kg), sa conception en 2 parties distinctes (avant et arrière de la chaussure, à l'interface avec la fixation), son utilisation permise sur la majorité des skis et chaussures alpines, son ergonomie embarquée et les possibles synchronisations avec d'autres systèmes de mesure. Ce capteur permet de mesurer précisément les forces et les moments de forces en 3D entre la chaussure de ski et la fixation, lors d'une pratique alpine loisir à haut-niveau, sans influencer sur le comportement du skieur et de son équipement. Le verrou technologique ayant été levé, de nombreuses réponses ont pu être apportées à des défis sociétaux majeurs : (1) un enjeu scientifique de compréhension des phénomènes mécaniques mis en jeu à l'interface ski-neige, (2) un défi sociétal dans le domaine de la santé, grâce à une meilleure compréhension des contraintes mécaniques qui s'appliquent au corps humain lors de la pratique, (3) un enjeu de performance en proposant un outil d'aide à l'entraînement des athlètes pour objectiver la motricité et (4) un enjeu technologique par le développement de nouveaux équipements de ski alpin issues de l'intégration de données objectives. Le but de cette conférence est de présenter quelques résultats majeurs tirés des thèses récentes de Cross [1] et Delhaye [2] préparées au sein du LIBM, portant sur la compréhension de la production de force lors de virages en ski alpin, ses spécificités individuelles et les potentiels lien avec la performance.

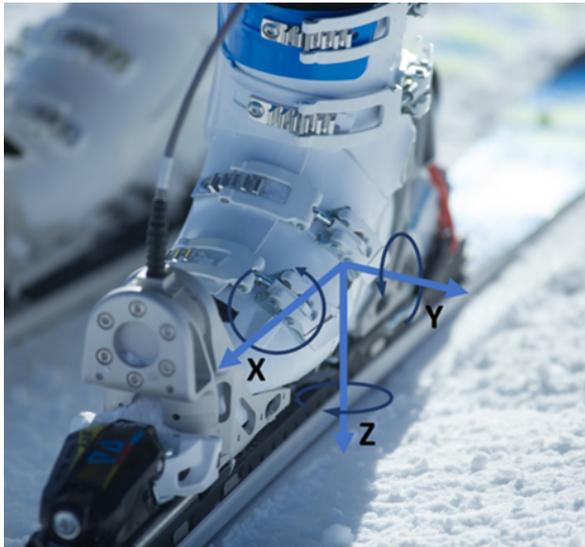


Figure 1: Présentation du capteur MEF3D

## 2 Méthode utilisée

Dix-neuf skieurs (âge  $26 \pm 5$  ans ; taille  $1.79 \pm 0.06$  m ; masse  $84.0 \pm 8.1$  kg), de niveau départemental à coupe du monde, ont effectué un tracé de géant de 18 portes au profil varié. La performance des skieurs était déterminée par leur temps de course (Cellule Tag Heuer, La Chaux-de-Fonds, Switzerland). Les skieurs étaient équipés du capteur de force MEF3D (200Hz) et d'un système de mesure de la trajectoire du centre de masse (centrales inertielles Mac-Lloyd, Paris- France ; 18 et 100 Hz pour respectivement les données GPS et IMU), tous deux resynchronisés post-traitement pour évaluer la cinétique de l'appui au cours de chaque virage. Au total, 267 virages ont été analysés et les paramètres cinétiques suivants ont été retenus: l'intensité de la force totale ( $F_t$ , somme de l'intensité de la force résultante des 2 appuis) et de la force radiale ( $F_r$ ) ; l'indice d'efficacité d'application de la force ( $RF = F_r / F_{tot}$ ) ; la composante de force normale au ski sous chaque appui ( $F_n$ ). Sont calculés l'évolution de ces paramètres au cours du virage ou de certaines phases du virage, pour définir des points clés sur chaque virage exprimés en pourcentage de poids de corps (force moyenne, maximale et force rapide). Enfin, des paramètres cinématiques étaient aussi calculés : vitesse d'entrée dans le virage, longueur de la trajectoire, dissipation d'énergie mécanique (delta d'énergie mécanique / vitesse d'entrée : indice de performance proposé par Supej et al. [14].

## 3 Résultats obtenus et discussion

La figure 2 illustre l'évolution de  $F_n$  sur le pied extérieur au cours d'un virage, sur tous les skieurs et tous les virages. Cette première description permet de confirmer et d'interpréter les invariants de la signature de force typique en ski alpin, déjà montré par Nakazato [11]: une montée en force, un plateau plus ou moins long et haut, une diminution, avec des valeurs minimales lors des changements de carre. Les valeurs moyennes et max de  $F_n$  sont de  $1.80 \pm 0.16$  et  $4.95 \pm 0.62$  %BW, respectivement. Des analyses plus poussées ont montré

aussi l'influence de la phase du virage, de la section de course et le lien trajectoire-force. L'influence de la force sur la performance temps de course a été aussi démontré au travers de différents résultats. (i) Les meilleures performances sont associées à des valeurs élevées de  $F_n$  et de  $F_r$  ( $p < 0,05$ ). Ainsi, la production de force radiale est un facteur limitant la performance (faible dissipation d'énergie) lors d'un virage en ski, cette force radiale étant liée à la fois au niveau de la force totale développée par le skieur ( $F_t$ ) et que de l'efficacité (RF) de son application lors du virage en ski [1]. Ce résultat peut s'expliquer par l'énergie cinétique plus importante à l'entrée du virage, une technique permettant de transmettre plus de force radialement et/ou une capacité musculaire plus importante chez le skieur de haut niveau. La variabilité de ces indices est elle aussi positivement corrélée à la performance ( $p < 0,05$ ). Les skieurs performants semblent avoir la capacité à adapter leur  $F_t$  et  $F_n$  au cours d'un virage, notamment lors de la prise de carres. (ii) Les meilleurs skieurs présentent des profils musculaires spécifiques (haut niveau de force maximale à vitesse faible) et un taux de développement de force élevé, avec des spécificités de ces qualités musculaires en fonction de la discipline alpine (vitesse vs technique).

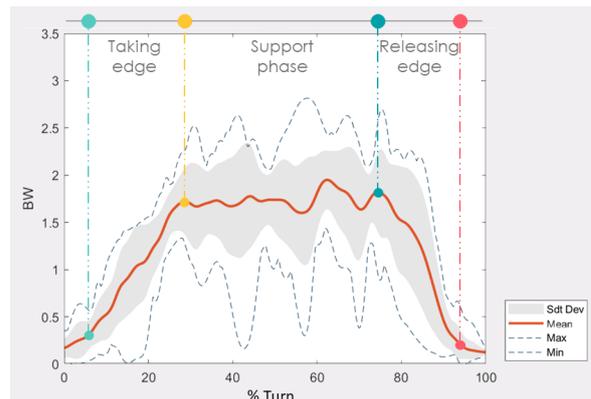


Figure 2: Evolution de la Force normale (en pourcentage de poids de corps) sous le pied extérieur au cours d'un virage (en pourcentage du cycle, avec les 3 phases successives). Sont présentées les valeurs moyenne, déviation standard, min et max.

## 4 Conclusion et perspectives

Nos récentes études ont permis de mieux comprendre les facteurs de prévention et de performance de ces signatures de force en lien avec la trajectoire du skieur. Elles montrent ainsi le lien entre trajectoire du skieur et caractéristiques cinématiques mesurées à l'interface chaussure fixation [3, 4].

## References

- [1] M. Cross. *Thèse Université Savoie Mont Blanc, France. Production de force des skieurs alpins : évaluation sur et hors neige et relation avec la performance.* PhD thesis, 2020.
- [2] C. Delhaye. *Thèse Université Savoie Mont Blanc,*

France. *Relation entre la performance & la cinétique de l'appui, au cours d'un virage en ski alpin*. PhD thesis, 2021.

- [3] C. Delhayé, M. Cross, M. Bowen, P. Samozino, and F. Hintzy. Kinetic and kinematic turn switch detection in giant slalom. *Science and Skiing VIII*, pages 73–79, 2019.
- [4] C. Delhayé, M. Cross, M. Bowen, P. Samozino, and F. Hintzy. Influence of line-strategy between two turns on performance in giant slalom. *Frontiers of Sports and Active Living*, 2020.
- [5] T. Falda, F. Hintzy, P. Rougier, N. Coulmy, and P. Lacouture. Development of a new 6-components force sensor design for biomechanical research in alpine skiing. *Science and Skiing VII*, pages 348–356, 2017.
- [6] M. Hull and C. Mode. Pulse code modulation telemetry in ski injuryresearch I. *Biotelemetry*, 1: 276–296, 1974.
- [7] M. Hull and C. Mode. Pulse code modulation telemetry in ski injuryresearch ii. *Biotelemetry*, 2: 276–296, 1975.
- [8] Morin JB., Samozino P., Bonnefoy R., Edouard P., and Belli A. Direct measurement of power during one single sprint on treadmill. *Journal of Biomechanics*, 43:1970–1975, 2010.
- [9] A. Leppavuori, M. Karras, H. Rusko, and J. Viitasalo. A new method of measuring 3-d ground reaction forces under the ski during skiing on snow. *Journal of Applied Biomechanics*, 9:315–328, 1993.
- [10] F. Meyer. *Thèse de Université de Lausanne, Suisse: Biomechanical analysis of alpine skiers performing giant slalom turns*. PhD thesis, 2011.
- [11] K. Nakazato, P. Scheiber, and E. Muller. A comparison of ground reaction forces determined by portable force-plate and pressure-insole systems in alpine skiing. *Journal of Sports Science and Medicine*, 10:754–762, 2011.
- [12] W. Niessen, E. Muller, and H. Schwameder. Force and moment measurements during alpine skiing. *International Symposium on Biomechanics in Sports*, 1999.
- [13] F. Panizzolo, N. Petrone, and G. Marcolin. Comparative analysis of muscle activation patterns between skiing on slopes and on training devices. *Procedia Engineering*, 2:2537–2542, 2010.
- [14] M. Supej, R. Kipp, and H. Holmberg. Mechanical parameters as predictors of performance in alpine world cup slalom racing. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 21:72–81, 2011.
- [15] M. Wimmer and R. Holzner. Constraint forces may influence the measurement of vertical ground reaction forces during slalom skiing. *Sciences and Skiing*, 1997.