

Modèle physique d'interaction ski/neige

F. Hadri, K. Boudjlida, S. Charles, E. Monacelli, A. Benali, N. Chilot

Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles (LISV)

Ferhat.hadri@uvsq.fr

Résumé :

Ces dernières années, plusieurs travaux de recherche ont été réalisés sur les sports de glisse en général et le ski en particulier afin de mieux comprendre le comportement du ski sur la neige. Dans le but d'améliorer les modèles physiques existants, plusieurs chercheurs s'intéressent à la complexité du contact entre la neige et le ski d'une part et au comportement hétérogène de la neige d'autre part. Dans cette contribution, nous proposons un modèle physique capable de prendre en compte l'influence de l'état thermodynamique de la neige sur le contact ski/neige.

Abstract:

In recent years, several studies have been done on the subject of skiing. Several researchers are interested in the complexity of the contact between the snow quality and skiing due to the heterogeneous behavior of snow. In this contribution, we propose a physical model to take into account the influence of the state of the snow on the ski / snow contact.

Mots clefs : Mots clefs

Frottement, Modèle physique, Simulation, Sport de glisse

1. Introduction

Le ski est un sport nécessitant d'importantes capacités en termes d'endurance et d'équilibre. Cette activité exige des conditions musculaires appropriées qui peuvent être atteintes et maintenues uniquement par un entraînement constant. Depuis les années 90, des simulateurs de ski ont été développés pour les entraînements mais aussi pour permettre aux personnes éloignées des sites dédiés à ce sport de le pratiquer [5, 8, 9, 11, 13]. Cependant, les simulateurs existants actuellement s'avèrent assez limités en comparaison aux conditions réelles sur piste, notamment en terme de réalisme des retours sensoriels. Plusieurs études et travaux de recherche ont été réalisés ces dernières années afin d'améliorer la compréhension et la modélisation du comportement complexe d'un skieur sur neige [1, 2, 3, 4, 6, 7, 10, 12, 14]. Ce travail s'inscrit dans ce sens.

Cette contribution fait partie d'un projet sur la modélisation et la virtualisation d'un simulateur de ski au Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles. L'utilisation finale s'oriente vers une utilisation active et passive du simulateur pour des entraînements et loisirs mais aussi pour évaluer les capacités d'un individu à pratiquer ce sport dans le cas de rééducation ou de handicap [14]. Cette contribution concerne la modélisation du contact ski/neige. On s'intéresse plus particulièrement à la prise en compte de la qualité de la neige. En effet, l'objectif principal est d'améliorer la modélisation

du contact complexe ski/neige afin de proposer un modèle physique représentatif des conditions réelles de glisse. Nous nous basons sur les différents modèles existants dans la littérature afin de proposer un modèle plus réaliste régissant ce contact [1, 2, 4, 7, 14, 15].

En tenant compte des phénomènes thermiques, nous proposons un modèle physique qui prend en compte le frottement sec à faible température, le frottement mixte en fonction du film d'eau créé entre le ski et la neige et finalement, le frottement capillaire à des températures très proches de zéro. Ce modèle sera implémenté dans un simulateur combinant une plateforme à retours haptiques et un environnement de réalité virtuelle en projection frontale.

2. Interaction ski/neige

Compte tenu de la complexité du comportement hétérogène de la neige, nous allons nous focaliser sur les différentes forces ayant une influence sur le glissement entre ski et neige. En effet, le frottement entre le ski et la neige n'est pas dû à un phénomène unique, ce contact est impacté par plusieurs facteurs tels que : la température, la vitesse, le type de neige, le chargement, l'état de surface et le comportement mécanique du ski [1, 2, 3, 4]. Nous pouvons évaluer le frottement global comme un ensemble de coefficients de frottement indépendants. L'ensemble des forces est généralement exprimé sous forme d'une résultante trouvée expérimentalement. Ces forces sont exprimées en fonctions des différents coefficients de frottement impactant le contact entre le ski et la neige.

Le frottement est localement donné par [1, 2] :

$$\mu = f(\mu_{\text{sec}}, \mu_{\text{film}}, \mu_{\text{char}}, \mu_{\text{cap}}, \mu_{\text{sal}}) \quad \text{Équation 1}$$

μ_{sec} , μ_{film} , μ_{char} , μ_{cap} et μ_{sal} sont respectivement les frottements sec, lubrifié, de charriage, capillaire et de saleté.

Dans ce travail, nous allons aborder le frottement global comme étant la somme de l'ensemble des forces de frottement exprimées indépendamment [2]. Dans la section suivante, nous allons détailler/expliciter les différentes forces de frottement mise en jeu. Les résultats seront comparés aux résultats existants dans la littérature.

2.1 Frottement sec

Le frottement sec apparaît à de faibles températures. Dans ce cas, le contact est non lubrifié et les vitesses relativement faibles [1, 2, 7, 14]. La force de frottement sec F_{Fsec} est généralement modélisée comme une interaction solide-solide. Par conséquent la résistance aux déplacements provient du cisaillement des aspérités de la neige [16]. Ici, cette résistance à l'avancement est considérée comme un frottement entre deux solides indeformables et elle peut s'exprimer par la formule de coulomb. La relation suivante exprime cette force.

$$F_{\text{Fsec}} = \mu_{\text{sec}} \cdot F_n \quad \text{Équation 2}$$

Avec μ_{sec} le coefficient de frottement sec. Ce dernier est le rapport entre la contrainte tangentielle τ et la contrainte normale σ ($\mu_{\text{sec}} = \frac{\tau}{\sigma}$).

2.2 Frottement lubrifié

Les frottements lubrifiés représentent les forces hydrodynamiques associées au cisaillement du film d'eau présent entre le ski et la neige et ils dépendent de l'épaisseur de ce film. L'apparition de l'eau entre le ski et la neige est conditionnée non seulement par la température ambiante mais aussi par la chaleur générée par le frottement entre la neige et le ski. En effet, lorsque la température de fusion de la neige est atteinte, un film d'eau va se créer entre le ski et la neige et va agir comme lubrifiant. Ce

dernier réduit la valeur du frottement entre la neige et le ski. Par conséquent la force due au frottement lubrifié peut s'exprimer par [2] :

$$F_{\text{film}} = \frac{\eta A v}{h} \quad \text{Équation 3}$$

Avec A la surface de contact réelle entre le ski et la surface rugueuse de la neige, h l'épaisseur du film d'eau, v la vitesse du ski et η la viscosité dynamique du film d'eau.

La viscosité dynamique de l'eau est donnée en fonction de la température par l'équation 4 [2] :

$$\eta = (1.79 - 0.054T)10^{-3} \quad \text{Équation 4}$$

T est la température de neige en °C.

2.3 Frottement dû au déglacement de la neige

Cette partie regroupe le compactage et le déplacement de la neige. Elle peut constituer une fraction importante du coefficient de frottement total. Cependant, cette contribution est considérablement réduite sur les pistes damées [2, 11].

Le compactage quasi plastique qui se produit lors de la mise en piste avec un ski peut s'écrire :

$$F_{\text{char}} = \frac{\Delta y}{L} F_n \quad \text{Équation 5}$$

Δy , L , F_n sont respectivement la profondeur verticale du compactage, la longueur du ski et la charge normale.

La résistance au déplacement peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$F_{\text{dép}} = \rho B \Delta y v^2 \quad \text{Équation 6}$$

ρ est la densité de la neige, B la largeur du ski, Δy la profondeur verticale du compactage et v la vitesse du skieur.

2.4 Frottement capillaire

L'attraction capillaire est due aux forces de tension superficielles. Elle se produit entre la surface du ski et la neige à travers des ponts liquides, qui exercent une force de résistance sur le ski. Cette présence de ponts liquides dans un milieu granulaire génère des forces de cohésion entre les grains. Ces forces dépendent de la quantité de liquide présente dans le milieu et de ses propriétés. Se basant sur des résultats expérimentaux, Colbeck propose d'exprimer le coefficient de frottement capillaire par l'équation suivante [2] :

$$\mu_{\text{cap}} = \beta h^3 \quad \text{Équation 7}$$

Avec h , l'épaisseur du film d'eau et b une constante exprimée à partir de travaux expérimentaux.

2.5 Frottement dû aux saletés

Quand un ski frotte la surface de la neige, il se charge électro-statiquement telle une tige de verre que l'on frotte avec un tissu. Si la surface de la neige contient une accumulation des impuretés ou des poussières de roche, la base du ski sera chargée électriquement et attirera de la poussière. La présence d'un tel matériau dur entre le matériau de base des skis, entraîne une augmentation de la traînée et de l'abrasion des deux surfaces[2,3].

3. Résultats et discussion

D'après plusieurs auteurs [1, 2, 3, 4], les forces résistantes dues au contact ski/neige sont tributaires de la présence ou non du film fluide qui se crée à la surface du contact. Dans ce travail, si nous considérons une piste bien damée et propre, ceci va nous permettre de négliger l'influence des saletés présentes entre le ski et la neige ainsi que le charriage (déplacement de la neige). Les forces résistantes sont donc exprimées par la somme des forces de frottement sec, fluide et capillaire [1, 2, 3]. Avant l'apparition du frottement capillaire (entre -20 et -1°C), la présence du film d'eau nous amène à prendre en considération un frottement mixte dû à la présence du frottement sec et fluide au même temps.

Pour des températures inférieures à -20°C, nous pouvons assimiler le frottement entre le ski et la neige à un frottement solide/solide (loi de frottement de coulomb). Ce coefficient de frottement peut s'exprimer par la loi de coulomb.

Dans le cas du frottement mixte, alliant les phénomènes de frottement sec et fluide, la contribution aux efforts résistants du frottement sec diminue progressivement avec l'augmentation des forces résistantes dues au frottement fluide. Dans les travaux expérimentaux de la littérature [1, 2, 3], nous pouvons remarquer l'influence importante sur le frottement du film d'eau créé entre le ski et la neige. Sachant que l'épaisseur de cette couche fluide est directement liée à la température, nous pouvons exprimer directement le frottement dans ce cas en fonction de la hauteur de ce film [2].

Pour des températures comprises entre -20 et -11°C, le coefficient de frottement qu'on nommera μ_{film} , peut être exprimé par l'équation suivante :

$$\mu_{film} = \frac{\eta_w A v}{h F_n} \quad \text{Équation 8}$$

Dans ce cas, la hauteur du film peut s'exprimer par $h = \alpha T$ avec α une constante trouvée expérimentalement.

Concernant les températures comprises entre -11 et -1°C, d'après les travaux de Buhl, l'augmentation de la hauteur du film d'eau en fonction de la température n'est pas linéaire. Elle peut s'exprimer par l'équation ci-dessous [1,2] :

$$h^4 = \frac{3cr^2\eta^2v^2}{2L\rho} \quad \text{Équation 9}$$

h , c , r , η , v , L , ρ sont respectivement : épaisseur du film d'eau, rapport surface de contact/charge, rayon de contact, viscosité dynamique, chaleur latente de fusion de la neige et masse volumique.

Enfin, le frottement capillaire commence dès que l'épaisseur de la couche du film d'eau devient importante et couvre la quasi-totalité du ski. Considérant les résultats expérimentaux présentés dans la figure 1 obtenus par Buhl en utilisant un tribomètre et un chargement de 50N [1], nous proposons ici d'exprimer le comportement du coefficient de frottement capillaire par un polynôme de troisième degré suivant (Figure 1) :

$$\mu_{cap} = aT^3 + bT^2 + c \quad \text{Équation 10}$$

a , b et c sont des constantes extraites à partir des valeurs expérimentales ($a= 0.0247$, $b=0.4769$ et $c= 5.8071$).

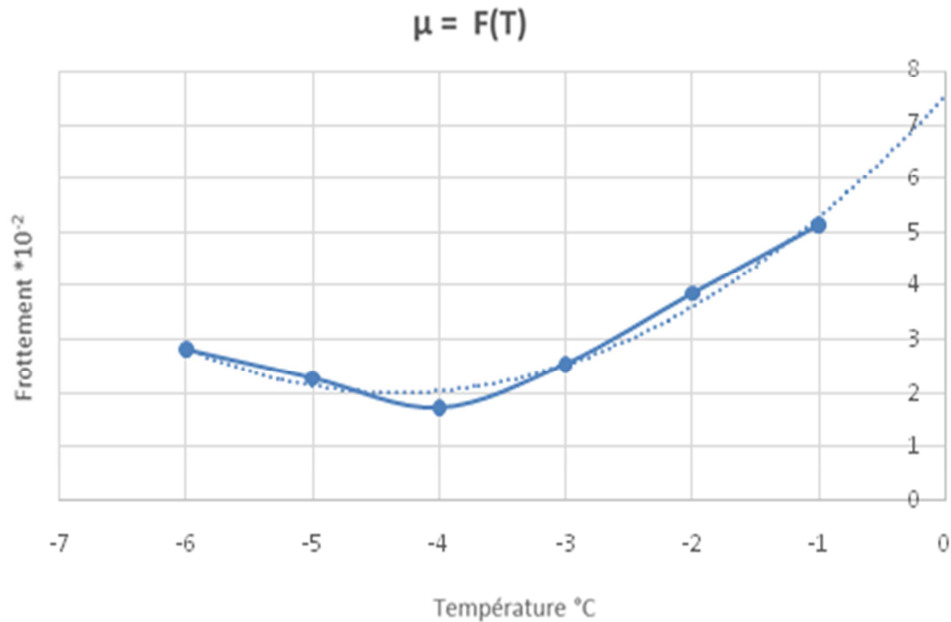


Figure 1. Coefficient du frottement capillaire en fonction de la température (trait pointillé : résultats de Buhl [1], trait continu : résultats avec le modèle proposé).

Les simulations ont été conduites sous Matlab avec un ski de type Aerox 2009 Salomon (figure 1). La surface totale du ski est de 0.0159 m² avec une longueur de 1,7 m. Nous considérons un contact avec les caractéristiques suivantes : chaleur latente de fusion de la neige $L = 334$ J/g ; rayon de contact $r = 0.001$ m ; viscosité dynamique de l'eau $\eta = 10^{-3}$ Pa.s ; masse volumique de la glace $\rho = 920$ Kg/m³ ; rapport de surface de contact par rapport à la charge $c = 3,05$ MPa. L'utilisation de chaque type de frottement est considérée en fonction de la température. Jusqu'à -20°C, le frottement est sec, entre -20°C et -11°C, le frottement est mixte et supérieur à 3°C le comportement est capillaire.

Les simulations ont été calculées pour une vitesse de 5 m/s et une plage de températures comprises entre -25 et 0°C afin de couvrir l'ensemble des différents modes de frottements. La figure 2 nous donne le coefficient du frottement total ($\mu = \mu_{sec} + \mu_{film} + \mu_{cap}$) en fonction de la température pour le modèle proposé en comparaison aux résultats expérimentaux de Buhl [1].

Les résultats de la simulation numérique pour une plage de température comprise entre -25 et -1°C suivent l'allure des résultats obtenus par Buhl [1] dans ses travaux expérimentaux sur l'influence de la température et du film d'eau sur le contact solide/neige. Nous remarquons un léger décalage entre -15 et -8°C entre les deux résultats avec une erreur maximale proche de 10%. Ceci peut s'expliquer en partie par le comportement très complexe du contact dû à la présence de frottements fluide et sec simultanés. De plus, dans cette plage de température, d'après Colbeck [2], la hauteur d'eau peut s'exprimer de deux façons différentes en fonction de la température.

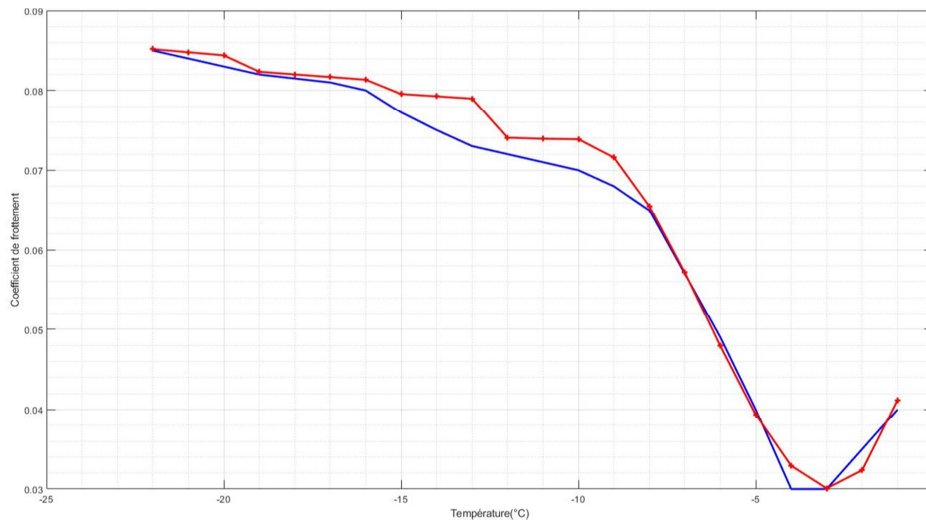


Figure 2. Coefficient du frottement total en fonction de la température (trait continu : résultats de Buhl [1], trait continu marqué par des signes + : résultats avec le modèle proposé).

4. Conclusion

L'étude de l'influence de la température sur le contact ski/neige présentée dans cette contribution montre que le modèle proposé donne des résultats proches des résultats expérimentaux de Buhl [1]. En effet, nous remarquons une diminution importante du coefficient de frottement dès que les gouttelettes d'eau commencent à apparaître une fois la phase de frottement mixte atteinte (frottement sec en parallèle du frottement fluide) pour atteindre un minimum vers -3°C . A partir de cette température, le coefficient de frottement augmente plus rapidement. Ce phénomène peut s'expliquer par l'apparition du frottement capillaire dû à l'augmentation de la couche fluide sous et autour du ski. Dans la suite de ce travail, nous allons dans un premier temps affiner le modèle proposé pour prendre en compte plus efficacement le frottement mixte. Dans un second temps, nous allons nous intéresser au comportement du contact ski/neige en fonction de la vitesse relative entre le ski et la neige.

Références

- [1] D. Buhl, M. Fauve, H. Rhyner, The kinetic friction of polyethylen on snow: the influence of the snow temperature and the load. *Cold Regions Science and Technology*, 33, 133-140. 2001.
- [2] S. C. Colbeck, A review of the friction of snow. *Journal of Sports Sciences*, 12, 3, 1994.
- [3] S. C. Colbeck, C. Samuel, A review of the processes that control snow friction, US Army, Cold, Regions Research & Engineering Laboratory. Springfield, 1992.
- [4] S. C. Colbeck, The kinetic friction of snow. *Journal of Glaciology*, 34, 116, 78–86, 1988.
- [5] H.T. Lee, Y.J. Kim Y.S. Kim, Kinematic study with and without ski boots using ski, *Cold Regions Science and Technology* 33 133–140, 2001.
- [6] C. Smith, J.C. Green, Modeled behavior of hydrodynamic bearings in thermal engine, *Mechanics & Industry* 10 55-72, 2009.
- [7] M. Mössner, et al, Modeling of the Ski-Snow Contact for a Carved Turn, *The Engineering of Sport*, 195-200, 2006.
- [8] M. A. Babcock, Waterskiing simulator, U.S. Patent, 5 318 488, June 7, 1994.

-
- [9] R. Kallman, M. Plotnick, B. A. Weinstein, Exercise and ski simulating device, U.S. Patent 5 496 239, March 5, (brevet) 1996.
- [10] F. Bruck, P. Lugner, H. Schretter, A dynamic model for the performance of carving skis, ASTM STP 1440, 10–23, 2003.
- [11] F. Braghin, F. Cheli, S. Melzi, E. Sabbioni, S. Maldifassi., The engineering approach to winter sports, 2016.
- [12] N. Scot, T. Yoneyama, H. Kagawa and K. Osada, et al, Measurement of ski snow pressure profiles, Sport Eng, 10, 145-156, 2007.
- [13] R. Oboe, R. Antonello, F. Biral, Development of a water ski simulator for indoor training with proprioceptive and visual feedback. Advanced Motion Control, IEEE 13th International Workshop, Yokohama, Japan, 2014.
- [14] F. Braghin, F. Cheli, S. Maldifassi, S. Melzi, E. Sabbioni, The Engineering Approach to Winter Sports, ISBN : ISBN 978-1-4939-3019-7, Springer, 2014.
- [15] P. J Blau, The significance and use of the friction coefficient, Tribology International, 34, 585-591, 2001.
- [16] D. Kuroiwa, the kinetic friction on snow and ice, Journal of Glaciology, vol 19, N° 81, 1977.