

IDÉES DE PHYSIQUE

Bien glisser sur la neige

Pour réduire les frottements, il faut adapter à l'état de la neige la rigidité des skis, leurs semelles et leur fartage.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Pour améliorer les performances des skieurs de compétition, notamment les vitesses atteintes, les équipes sportives attachent un grand soin à la préparation de la semelle du ski. En fonction de la température, de l'état de la neige, de l'humidité ambiante, etc. les experts choisissent l'état de surface plus ou moins lisse qu'ils vont donner à la semelle du ski et la nature du fart dont ils vont l'enduire pour mieux glisser. Un savoir-faire qui peut utilement s'appuyer sur une connaissance de la physique mise en jeu.

Pour le débutant, tenir sur des skis est périlleux : il a le sentiment qu'ils glissent sur la neige au moindre déséquilibre. Le frottement sur de la neige sèche est un frottement solide, proportionnel à la force perpendiculaire exercée par les skis sur le sol, soit le poids du skieur pour une piste horizontale. Aux faibles vitesses, le coefficient de proportionnalité est de l'ordre de 0,04, c'est-à-dire 20 fois inférieur à celui du contact d'un chausson d'escalade sur de la roche !

Bien que faible, ce frottement est plus important que la force de traînée aérodynamique qui s'exerce sur le skieur aux vitesses modérées. Prenons l'exemple d'un skieur de 75 kilogrammes et mesurant 1,80 mètre, en tenue de compétition. Le produit du coefficient de traînée par la surface frontale vaut, d'après les mesures, 0,65 mètre carré lorsque le skieur est debout, et 0,23 mètre carré lorsqu'il est en position de l'œuf. Cela signifie qu'à une vitesse de dix mètres par seconde, la force de traînée aérody-

namique, proportionnelle au carré de la vitesse, varie de 15 à 40 newtons selon la position adoptée. La force de frottement solide approche alors les 30 newtons, valeur comparable à celle de la traînée à dix mètres par seconde. Quand la neige est humide, le frottement est plus élevé et domine la traînée jusqu'à une vitesse de 20 mètres par seconde.

Skis souples ou non, selon la neige

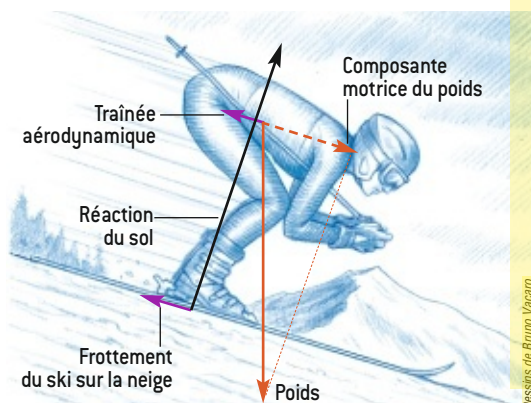
Réduire le frottement est donc un enjeu sportif considérable. Pour ce faire, il ne faut pas oublier le remodelage macroscopique de la neige soumise à la pression du ski, notamment lorsque cette neige est peu compacte. Car la formation d'un sillon est à l'origine d'un ralentissement : compaction

de la neige par le ski, déplacement, voire éjection, de la neige sont autant de sources de dissipation d'énergie qui agissent comme une force de frottement.

Le skieur peut toutefois s'en accommoder en choisissant bien ses skis. Pour une neige tendre, il prendra des skis souples, qui n'exercent qu'une faible pression à l'avant et à l'arrière. Cela permet de réduire la résistance due à l'impact du ski (car l'avant du ski ne s'enfonce pas sous la neige) et à la compaction de la neige. En revanche, pour une neige dure et compacte, il chaussera plutôt des skis rigides.

Pour aller plus loin, il faut se demander pourquoi un ski glisse sur la neige. Le mécanisme principal a été proposé en 1939 par Philip Bowden et T. Hughes, deux physiciens de Cambridge. Le frottement du ski dégage de la chaleur qui fait fondre la neige et il se forme un film d'eau d'épaisseur micrométrique qui lubrifie le contact entre la neige et le ski. Il s'ensuit un coefficient de frottement peu élevé, mais dont la valeur précise dépend de l'épaisseur du film liquide. Si cette épaisseur est très faible, le contact sera de nature solide/solide sans lubrification. Le frottement sec provient alors de la déformation, de la fracture et du fléchissement des aspérités des deux surfaces en contact.

Si l'une des surfaces est beaucoup plus dure que l'autre, les aspérités « dures » vont se frayer un chemin à travers le matériau « mou », ce qui accroît le frottement. Il convient alors d'adapter la dureté de la semelle du ski à celle de la neige : ni trop dure, ni trop souple.



1. LE SKIEUR EST FREINÉ PAR DEUX FORCES : la force de traînée aérodynamique, c'est-à-dire la résistance de l'air, et la force due au frottement du ski sur la neige. La traînée aérodynamique est proportionnelle au carré de la vitesse, la force de frottement est proportionnelle à la composante du poids perpendiculaire à la surface de contact. Les intensités de ces deux forces sont souvent comparables.

Dessins de Bruno Vacaro

Et si le film liquide est trop épais, des effets d'attraction capillaire et de ventouse apparaissent. On peut en faire l'expérience en mettant de l'eau sur une table et en faisant avancer à plat une règle en plastique. Si toute la surface de la règle est mouillée, celle-ci colle à la table : au lieu de lubrifier, l'eau augmente considérablement le frottement ! Dans ce cas, on cherche plutôt à éviter l'apparition de ponts liquides entre la neige et le ski, en rendant la semelle hydrophobe.

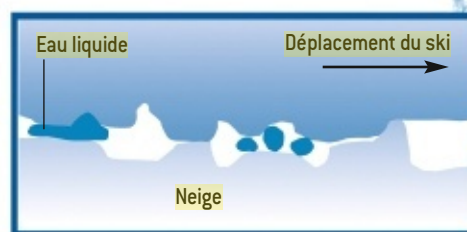
La semelle imbibée des molécules de fart

En pratique, les deux frottements – le frottement sec et *via* un film liquide – sont présents simultanément et leurs parts respectives dépendent beaucoup de la température, de la présence préalable d'eau liquide, de la vitesse du skieur et du ski lui-même. Pour les réduire, la solution moderne est une bonne semelle de base, sur laquelle on applique un fart adapté aux conditions de course attendues.

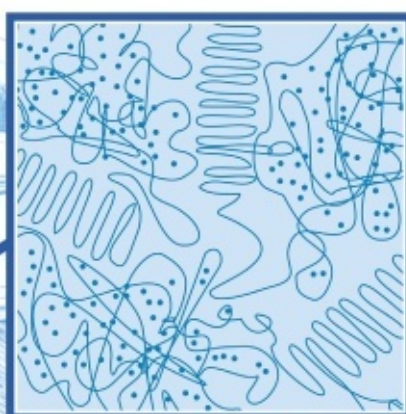
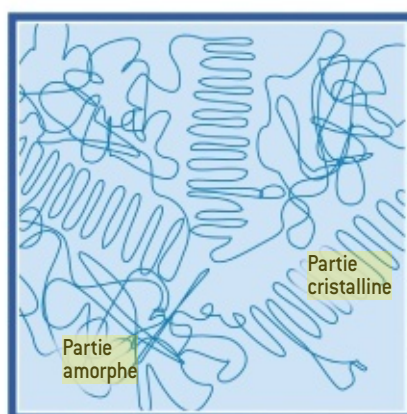
La plupart des semelles sont aujourd'hui constituées de polyéthylène de très grande masse moléculaire, très résistant à l'usure. Constitué de très longues chaînes carbonées (de centaines de milliers d'atomes), ce matériau a d'abord le bon goût d'être très hydrophobe. En revanche, sa dureté est supérieure à celle de la glace et il nécessite donc l'application d'un fart plus mou. Justement, ce

polyéthylène est constitué de parties cristallines, où les chaînes carbonées sont alignées et réparties périodiquement, et des parties amorphes. Les parties amorphes sont moins denses que les parties cristallines et peuvent absorber le fart, contrairement aux parties cristallines, trop compactes.

Enfin, ultime astuce, on applique au polyéthylène de la semelle un traitement anti-statique en y incorporant de la suie (du graphite, ce qui lui donne sa couleur noire). En effet, le frottement sur la neige charge électriquement la semelle. Le polyéthylène étant isolant, les charges pourraient s'accumuler en certains endroits et attirer fortement les cristaux de glace, notamment dans les cavités entre la semelle et la surface, ce qui augmenterait le frottement. Le graphite, au contraire, est conducteur, ce qui permet d'évacuer les charges et de réduire les effets électrostatiques.



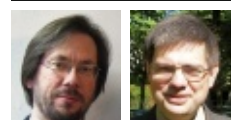
2. LES ASPÉRITÉS DES DEUX SURFACES EN CONTACT, celle de la neige et celle du ski, produisent une force de frottement par divers mécanismes. Il y a notamment la déformation de la neige et son déplacement sous la pression du ski, ainsi que des effets de capillarité – une attraction entre les deux surfaces due à la présence d'un film d'eau liquide suffisamment épais. Si ce film est peu épais, l'eau liquide joue au contraire un rôle lubrifiant.



3. LE POLYÉTHYLÈNE DONT EST COMPOSÉE la semelle du ski est un polymère dont les très longues chaînes moléculaires ont des parties cristallines et des parties amorphes. Seules les parties amorphes peu-

vent, en gonflant, absorber les molécules du fart (*points*), qui diffusent sur une certaine épaisseur de la semelle. Ces molécules sont en partie résorbées à la surface à mesure que la glisse du ski érode le fart.

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

✓ BIBLIOGRAPHIE

D. Lind et S. P. Sanders,
The Physics of Skiing,
Springer (2^e éd.), 2010.

D. A. Moldestad, *Some aspects of ski base sliding friction and ski base structure*,
thèse de doctorat, Université norvégienne de science et technologie, décembre 1999.

L. Karlöf *et al.*,
Why is ice and snow slippery? The tribo-physics of skiing,
note technique, Swix Sport AS
(<http://www.swixsport.com/dav/babc49f803.pdf>).

Retrouvez les articles de
J.-M. Courty et E. Kierlik sur
www.pourlascience.fr

Qu'en est-il du fart ? Il s'agit d'un mélange de cire et de paraffines qui fond facilement à chaud, avec un fer à repasser. On l'étale sur la semelle de polyéthylène et on le laisse pénétrer par simple diffusion. Généralement plus mou que la neige, il sera raboté lors de la glisse, mais il sera remplacé par le fart adsorbé dans la structure poreuse du polyéthylène, qui « transpirera » à la surface du ski.

Par ailleurs, si le fart est hydrophobe, on peut encore améliorer ses performances vis-à-vis de l'eau en rendant sa surface granuleuse. Cela semble paradoxal, mais on glisse mieux lorsque la surface du ski n'est pas parfaitement lisse. La structure granulaire permet d'écarter la semelle de la neige en cas de présence d'un film d'eau épais et de faciliter le drainage du liquide ; la taille appropriée des granularités va de

moins de un demi-millimètre pour de la neige froide et sèche, à près de un ou deux millimètres pour une neige chaude et humide.

Ainsi, le préparateur du ski devra d'abord choisir son fart, éventuellement en s'aidant de la couleur que lui a donnée le fabricant (cette couleur spécifie sous quelles conditions de neige utiliser le produit). Puis il le travaillera pour le structurer. S'il vise la performance, il ajoutera même au fart des lubrifiants solides, tel le graphite dont les lamelles glissent très bien les unes sur les autres. Dans le cas d'une neige polluée par des résidus solides non solubles, ces additifs limitent la friction sèche. Comme on le voit, la multiplicité des paramètres est telle que l'expert, même s'il s'appuie sur des critères scientifiques bien compris, peut laisser libre cours à son instinct et à son imagination.

