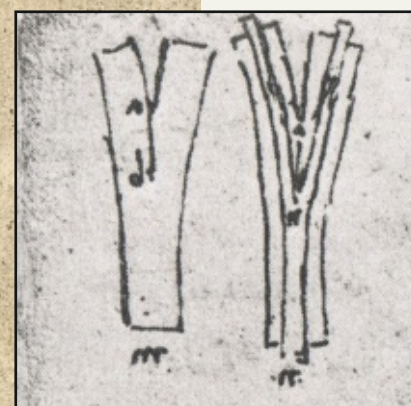




IDÉES DE PHYSIQUE

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

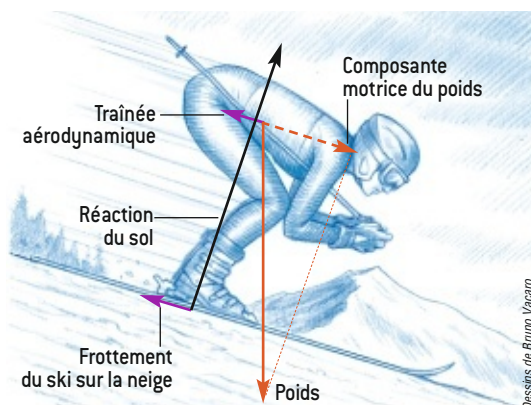
Réduire le frottement est donc un enjeu sportif considérable. Pour ce faire, il ne faut pas oublier le remodelage macroscopique de la neige soumise à la pression du ski, notamment lorsque cette neige est peu compacte. Car la formation d'un sillon est à l'origine d'un ralentissement : compaction

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.

Dessiné 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.

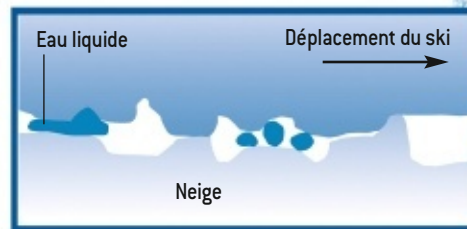
La semelle imbibée des molécules de fart

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 antistatique 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.



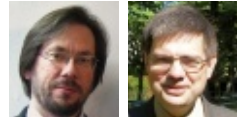
2. LES ASPÉRITÉS DES DEUX SURFACES EN CONTACT, celle de la neige et celle du ski, produisent une force de frottement par divers mécanismes. Il y a notamment la déformation de la neige et son déplacement sous la pression du ski, ainsi que des effets de capillarité – une attraction entre les deux surfaces 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.



SCIENCE & GASTRONOMIE

Un Noël de tendresse...

On évite la sécheresse de la dinde en faisant migrer du bouillon ou de la crème entre les fibres musculaires.

Hervé THIS



Occasion de grandes retrouvailles et de fraternité, le réveillon est toutefois souvent perturbé par la « sécheresse » de la chair de la dinde rôtie.

Il y a quelque temps, nous avons évoqué ici la possibilité de cuire la dinde à basse température, dans un lave-vaisselle, ce qui évite l'évaporation de l'eau et une trop complète coagulation des protéines de la chair. Toutefois, une autre solution plus « goûteuse » peut être envisagée : nous pouvons jouer intelligemment avec la structure du tissu collagénique.

Commençons par observer que la science substitue à des mots vagues des caractéristiques quantitatives : en sciences, l'article et l'adverbe doivent être remplacés par la réponse à la question « Combien ? ». La dinde est « sèche » ? À quel point ? Et puis, que signifie vraiment ce terme ? La chair peut sembler sèche, alors même que la teneur en eau n'est pas réduite.

La viande — en réalité le tissu musculaire — est un système formé de faisceaux de fibres. Ces dernières sont limitées par une peau de tissu collagénique, et contiennent de l'eau et des protéines (principalement les actines et les myosines) ; l'intérieur est analogue à du blanc d'œuf, en ce qui concerne la coagulation à la chaleur.

Au total, nous avons l'intérieur des fibres musculaires, qui durcit à la chaleur, et le tissu collagénique, qui, lui, peut être dégradé quand on s'y prend bien. En effet, ce tissu est fait de protéines de type « collagène », avec trois brins enroulés en hélice ; chaque brin est principalement un enchaînement de trois rési-

dus d'acides aminés qui sont la glycine, la proline et l'hydroxyproline. Chauffé dans l'eau, le tissu collagénique se dissocie, les trois brins des triples hélices de collagène se séparent, et chaque brin s'hydrolyse lentement, perdant des acides aminés dans le liquide aqueux où s'effectue le chauffage.

Les deux phénomènes, coagulation de l'intérieur des fibres musculaires et dissociation du tissu collagénique, sont simultanés et opposés : le premier durcit la viande, tandis que le second l'attendrit. Et c'est la raison pour laquelle la cuisine classique a bien des difficultés à produire d'un coup un résultat admissible.

En effet, quand on attendrit le tissu collagénique, on durcit les fibres, mais quand on évite le durcissement des fibres, on conserve un tissu collagénique dur... à moins qu'il soit réduit ou absent, comme dans la chair des poissons, par exemple, ou dans les morceaux les plus nobles des viandes de bœuf, tel le filet. Les cuisiniers estiment la tendreté de la viande en la pinçant : ils reconnaissent la pauvreté en collagène quand leurs doigts s'enfoncent facilement dans la chair.

La description précédente explique aussi pourquoi la viande bouillie trop longtemps laisse apparaître des fibres « sèches », séparées : le tissu collagénique dégradé laisse se séparer les fibres, qui n'ont pas perdu leur eau interne pour autant ; en revanche, les protéines de l'intérieur ont coagulé, formant comme une sorte de blanc d'œuf caoutchouteux, à l'intérieur des fibres séparées. Bref, la « sécheresse » est moins une teneur en eau réduite qu'une coagulation exces-

sive de l'intérieur des fibres musculaires (les protéines du collagène).

Analysons cette « Berezina » culinaire. Le tissu collagénique est dégradé par un chauffage ? Accentuons le phénomène, de sorte que les fibres, quand elles se séparent comme les poils d'un pinceau, absorbent un liquide goûteux (savoureux, odorant) où la viande sera cuite. Nous voulons éviter que les fibres paraissent sèches ? Il nous suffira de cuire à basse température.

La proposition, pour le réveillon, sera donc de s'y prendre très à l'avance : deux jours, trois jours même... De cuire la dinde à basse température dans un bouillon de volaille très corsé, ou, mieux, dans un bouillon corsé et additionné d'une forte quantité de crème, d'un peu de cognac, de jus de truffe... Les fibres se sépareront sans durcir, et le liquide de cuisson sera aspiré entre elles par capillarité. Finalement, on obtiendra une sorte d'éponge à bouillon ou à crème, avec en sus la saveur, dans le liquide de cuisson, des acides aminés libérés au cours de la longue cuisson.

Ainsi, la dinde étant remarquable, la réconciliation annuelle se fera dans les meilleures conditions !



Hervé This est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlascience.fr