

La physique du curling.

Entre frottements solides et déplacements sur la glace.

Julien Chapuy

Travail d'initiative personnelle encadré, 2017-2018

Sommaire

- 1 Introduction
 - Préliminaires
 - Le curling
- 2 Partie théorique
 - Première approche
 - Étude des différents modèles
- 3 Partie expérimentale
 - Sans pebble
 - Avec pebble
- 4 Synthèse
 - Résultats
 - Problèmes rencontrés
 - Remerciements

Plan

- 1 Introduction
 - Préliminaires
 - Le curling
- 2 Partie théorique
 - Première approche
 - Étude des différents modèles
- 3 Partie expérimentale
 - Sans pebble
 - Avec pebble
- 4 Synthèse
 - Résultats
 - Problèmes rencontrés
 - Remerciements

Pourquoi le curling ?

- Sport méconnu mais intéressant et stratégique.
- Comporte de nombreux phénomènes physiques.
- Le curl de la pierre est surprenant.
- Absence d'explications concrètes concernant ce curl.

Nota Bene : par le terme "curl", on désigne la manière dont la pierre est déviée suite aux frottements qu'exerce la glace.

Rappel de la problématique du MCOT

“Est-il possible de mettre en oeuvre une expérience qui pourrait infirmer certains modèles, ou d'en améliorer dans le but de mieux modéliser la réalité physique ? ”

Objectifs

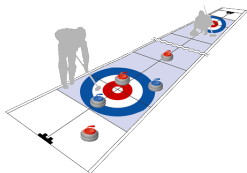
- Étudier les différents modèles théoriques concernant le curl de la pierre.
- Approche de la glace : aspect qualitatif et effet des différents paramètres sur le jeu.
- Reproduction d'une glace : mise en avant de l'impact du pebble.
- Valider ou réfuter un modèle en fonction des résultats.

Plan

- 1 Introduction
 - Préliminaires
 - Le curling
- 2 Partie théorique
 - Première approche
 - Étude des différents modèles
- 3 Partie expérimentale
 - Sans pebble
 - Avec pebble
- 4 Synthèse
 - Résultats
 - Problèmes rencontrés
 - Remerciements

Fondamentaux

- Sport d'origine écossaise.
- Oppose deux équipes de 4 joueurs en 10 manches.
- Dimensions de la piste : 42 m de long pour 5 m de large.
- Poids d'une pierre : 20 kg (granite).
- Diamètre d'une pierre : 29 cm.
- Hauteur d'une pierre : 11 cm.
- Diamètre de la cible : 3.66 m.



Matériel

- Chaussures : téflon (glissante), caoutchouc (accroche).

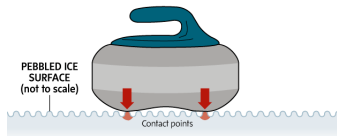


- Balais.
 - Vitesse d'aller-retour : jusqu'à 9 km.h^{-1} .
 - Force exercée : jusqu'à 450 N .



Particularités

- Le pebbling.



- Le curl.



Plan

- 1 Introduction
 - Préliminaires
 - Le curling
- 2 Partie théorique
 - Première approche
 - Étude des différents modèles
- 3 Partie expérimentale
 - Sans pebble
 - Avec pebble
- 4 Synthèse
 - Résultats
 - Problèmes rencontrés
 - Remerciements

Il faut introduire une asymétrie

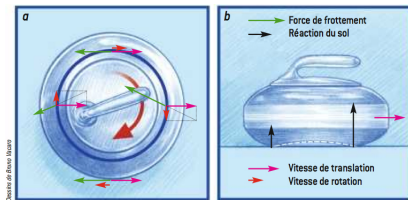
- Argument physique : si on a une symétrie de charge, alors par symétrie de l'ensemble des forces de frottements appliquées sur le système le verre subit une force équivalente opposée à sa vitesse de translation. Donc trajectoire rectiligne.
- Preuve formelle en annexe 1.

Expérience du verre retourné

- Expérience : lancer d'un verre retourné sur une table avec une rotation définie (cf expérience de Smarter Every Day [5]).
- Résultats : pour une rotation horaire (resp. anti-horaire) le verre dévie à gauche (resp. à droite). Mouvement inverse pour une pierre de curling.
- Argument physique : on introduit une asymétrie de charge du verre (le verre à son centre de gravité décalé vers l'avant lorsqu'il est en translation). Par symétrie de l'ensemble des frottements appliqués on retrouve le mouvement expérimental.

Introduction d'une seule asymétrie de charge

- On va considérer qu'à la manière d'une voiture qui freine, le verre / la pierre lorsqu'ils sont en translation sont légèrement inclinés sur la partie frontale (d'où une asymétrie de charge).
- Une illustration de ce modèle est présentée ci-dessous.



- On voit par symétrie que ce modèle implique qu'une pierre en rotation horaire devrait curler à gauche. Ce modèle caractérise donc le mouvement du verre mais n'explique pas celui de la pierre.

Modélisation informatique sous Python : asymétrie de charge

- On assimile la surface de contact à un cercle.
- On note $\mu(\theta, t)$ la masse angulaire sur le cercle, *i.e.*, à tout instant $\int_0^{2\pi} \mu(\theta, t) d\theta = M$
- On va modéliser l'asymétrie de charge telle que :

$$\mu(\theta, t) = \frac{M}{2\pi} \times \left[1 + A \times \sqrt{V_{trx}(t)^2 + V_{try}(t)^2} \times \sin\left(\theta + \text{Arctan}\left(\frac{V_{trx}(t)}{V_{try}(t)}\right)\right) \right]$$

- Où A est une constante (on prendra $A = 1$ par la suite).

Modélisation informatique sous Python : asymétrie de charge

- Ce modèle est pertinent car :
 - Si $\frac{V_{trx}}{V_{try}} \gg 1$ la charge est la plus importante sur les côtés de la pierre (en fonction du signe de V_{trx} et donc du sens de la rotation).
 - Si $\frac{V_{trx}}{V_{try}} \ll 1$ la charge est la plus importante sur le devant de la pierre.
 - La condition de normalisation est respectée.

Modélisation informatique sous Python : asymétrie de charge

- Code complet disponible en annexe 2.
- On remarque que ce modèle implique toujours un curl à droite (resp. à gauche) pour une rotation anti-horaire (resp. horaire).
- Ce modèle ne suffit donc pas à expliquer le mouvement d'une pierre de curling. Il faut donc ajouter une autre asymétrie.

Plan

- 1 Introduction
 - Préliminaires
 - Le curling
- 2 **Partie théorique**
 - Première approche
 - **Étude des différents modèles**
- 3 Partie expérimentale
 - Sans pebble
 - Avec pebble
- 4 Synthèse
 - Résultats
 - Problèmes rencontrés
 - Remerciements

Lois de Coulomb

- Deux catégories de frottements :
 - Solides ou secs. Indépendants de la dimension de la surface de contact, et de la norme de la vitesse.
 - Visqueux ou fluides. Fonctions de la vitesse et de la dimension de la surface de contact.
- On va s'intéresser principalement aux frottements solides.

Lois de Coulomb

- Frottements secs d'un solide sur un support, surface de contact plane :

- En phase statique

$\vec{T}_{support \rightarrow solide} \leq -f_s \frac{\sum \vec{F}_{normale \text{ à la surface de contact}}}{\|\sum \vec{F}_{normale \text{ à la surface de contact}}\|}$ où f_s est le coefficient de frottement statique. On a égalité à la limite du glissement.

- En phase dynamique

$\vec{T}_{support \rightarrow solide} = -f_c \frac{\sum \vec{F}_{normale \text{ à la surface de contact}}}{\|\sum \vec{F}_{normale \text{ à la surface de contact}}\|}$ où f_c est le coefficient de frottement cinétique.

- En général on a $f_s > f_c$

Exemple de valeurs de coefficients de frottements

Corps en contact	μ_s	μ_c
Acier sur acier (sec)	0.78	0.42
Acier sur acier (gras)	0.10	0.05
Acier sur acier (surfaces polies)	100	100
Bois sur bois	0.5	0.3
Métal sur glace	0.03	0.01
Pneu sur route sèche	0.8	0.6
Pneu sur route mouillée	0.15	0.1
Téflon sur téflon	0.04	0.04
Cuir sur fonte	0.28	0.56

Modèle de frottement sec par Mark Denny

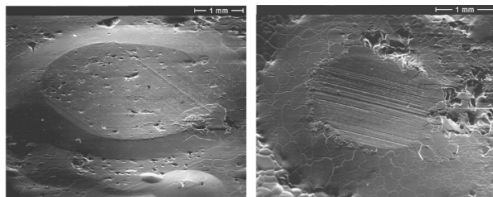
- Frottement sec.
- Agglomérats de cristaux de glace sur la face avant de la pierre.
- Donc frottement plus faible à l'avant.
- Raisonement inverse à celui vu précédemment.

Modèle de frottement semi-fluide asymétrique du Dr Schielgeski

- On introduit une asymétrie de charge (cf 2.1)
- Charge plus grande à l'avant \implies fusion partielle de la glace \implies frottement plus faible à l'avant.
- Comme dans le modèle de Mark Denny, cette asymétrie implique un plus fort frottement sur la face arrière et donc explique le curl de la pierre.

Étude de Wear of Materials

- Nouveau modèle soutenu par l'université d'Uppsala (2013) dans la revue *Wear of Materials*.
- Fondé sur un guidage de la pierre par des rainures.



- L'avant de la pierre creuse le pebble, ce qui crée cette déviation si particulière. (modèle illustré dans la vidéo de Smarter Every Day)

Synthèse

En définitive on peut retenir :

- il existe nécessairement une asymétrie physique (de charge, de nature de frottement, etc).
- il se peut que chaque phénomène existe et ait un impact sur le mouvement de la pierre (on peut donc se demander si l'un prédomine sur les autres).
- absence de modèle clair qui décrit parfaitement la situation.

Matériel

- Verre de cantine retourné (surface de contact analogue à celle de la pierre).
- Spatule de travaux (pour lisser la glace).
- Bac de 40 cm \times 80 cm pour réaliser la piste.
- Vaporisateur pour vitres (pour réaliser le pebble).
- Congélateur du lycée.
- Eau du robinet.

Lancers

Objectif : Réaliser de multiples lancers d'un verre sur une piste avec / sans pebble, animé de vitesses de translation et de rotation initiales non nulles afin de déterminer les impacts de chaque paramètres.

Plan

- 1 Introduction
 - Préliminaires
 - Le curling
- 2 Partie théorique
 - Première approche
 - Étude des différents modèles
- 3 **Partie expérimentale**
 - **Sans pebble**
 - Avec pebble
- 4 Synthèse
 - Résultats
 - Problèmes rencontrés
 - Remerciements

Fabrication de la glace

Protocole répété sur 7 semaines (entre les vacances de la Toussaint et les vacances de Noël), une fois par semaine :

- Nettoyer et racler le dessus de la glace déjà présente.
- Verser environ 2 L d'eau.



Plan

- 1 Introduction
 - Préliminaires
 - Le curling
- 2 Partie théorique
 - Première approche
 - Étude des différents modèles
- 3 Partie expérimentale**
 - Sans pebble
 - Avec pebble**
- 4 Synthèse
 - Résultats
 - Problèmes rencontrés
 - Remerciements

Préparation du pebble

Protocole répété sur 4 semaines (à partir de la première semaine de janvier), une à deux fois par semaine avec un temps de repos d'au moins 2 jours. :

- Nettoyer et racler (précautionneusement) le dessus de la glace. Il ne faut pas détruire complètement le pebble déjà présent mais plutôt en couper les pointes.
- Répartir $1/3$ du contenu du vaporisateur.

Zoom sur la surface de la glace



Plan

- 1 Introduction
 - Préliminaires
 - Le curling
- 2 Partie théorique
 - Première approche
 - Étude des différents modèles
- 3 Partie expérimentale
 - Sans pebble
 - Avec pebble
- 4 Synthèse
 - Résultats
 - Problèmes rencontrés
 - Remerciements

Résultats bruts

Tableau	Sans pebble	Avec pebble
Rotation horaire, curl à gauche.	65 %	35 %
Rotation horaire, curl à droite.	10 %	20 %
Rotation horaire, non concluant.	25 %	45 %

Commentaire :

Valeurs obtenues sur 20 lancers.

Interprétation

- Dans l'expérience sans pebble, on retrouve le cas du verre.
- Dans l'expérience avec pebble, le verre avait une trajectoire presque aléatoire.

Plan

- 1 Introduction
 - Préliminaires
 - Le curling
- 2 Partie théorique
 - Première approche
 - Étude des différents modèles
- 3 Partie expérimentale
 - Sans pebble
 - Avec pebble
- 4 Synthèse
 - Résultats
 - **Problèmes rencontrés**
 - Remerciements

Problèmes techniques

- Taille du bac.
- Température de la glace.

Problèmes de modélisation

- Le verre n'était probablement pas assez dense pour étudier les modèles 2 et 3.
- La taille des goutelettes du vaporisateur était trop importante par rapport à l'anneau de contact du verre.

Plan

- 1 Introduction
 - Préliminaires
 - Le curling
- 2 Partie théorique
 - Première approche
 - Étude des différents modèles
- 3 Partie expérimentale
 - Sans pebble
 - Avec pebble
- 4 Synthèse
 - Résultats
 - Problèmes rencontrés
 - Remerciements

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement les membres du club de curling suisse de Neufchâtel pour leur accueil chaleureux, notamment Monsieur Claude Alain-Vuille iceman du club pour m'avoir fait part de son expérience. Je remercie également Frédéric Joannette, iceman au Canada depuis plus de 25 ans et formateur pour l'Association canadienne de curling. Leurs conseils m'ont été d'une grande aide dans la compréhension de l'effet des paramètres physiques sur la qualité d'une glace et donc la manière dont elle interagit avec la pierre.



J.M. Courty et E. Kierlik.

Pierre qui tourne n'amasse que doute.

Pour la Science N°338

<http://blog.idphys.fr/2010/pierre-qui-tourne-n-amasse-que-doute/>



Pierre Barthélémy.

La physique des as du balai-brosse.

Le Monde Science et Techno paru le 03 février 2014

http://www.lemonde.fr/sciences/article/2014/02/03/la-physique-des-as-du-balaibrosse_4359338_1650684.html



John Minnaar.

Why do curling stones curl.

Paru en mars 2006

<http://www.scottishcurlingicegroup.org/reports/WhyDoCurlingStones>



Harald Nyberg, Sara Alfredson, Sture Hogmark et Staffan Jacobson

The asymmetrical friction mechanism that puts the curl in the curling stone.

Paru dans la revue *Wear of Materials* Volume 301, Issues 1-2, April-May 2013, Pages 583-589

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S00431648130007>



SmartereveryDay.

Cold Hard Science. The Controversial Physics of Curling - Smarter Every Day 111.

<https://www.youtube.com/watch?v=7CUojMQgDpM&t=2s>



A. Raymond Penner.

The physics of sliding cylinders and curling rocks.

American Journal of Physics 69(3) paru en mars 2001

www.researchgate.net/publication/243492518_The_physics_of_sliding_rocks



Mark R. A. Shegelski, Ross Niebergall, et Mark A. Walton.

The motion of a curling rock.

Revue canadienne de physique 74(9-10) parue en 1996, pages 663-670

<http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/p96-095#.Wnoil6jiZEY>



Mark Denny.

Comment on “The motion of a curling rock”.

Revue canadienne de physique 81(6) parue en 2003, pages
877-881

www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/p03-066#.WnoiX6jiZEY



Mark R.A Shegelski and Ross Niebergall.

Reply to the comment by M. Denny on “The motion of a
curling rock”.

Revue canadienne de physique 81(6) parue en 2003, pages
883-888

<http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/p03-064#.WnoipKjiZEY>



Mark Denny.

Curling rock dynamics : Towards a realistic model.

Revue canadienne de physique 80(9) parue en 2002, pages
1005-1014

[http ://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/p02-072#.Wnoio6jiZEY](http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/p02-072#.Wnoio6jiZEY)