

Vers un ruban adhésif silencieux ?

par Vincent DE ZOTTI

Lycée Louis Thuillier – 80000 Amiens

vincent.de-zotti@ac-amiens.fr

et Hélène PIOT-DURAND

École Normale Supérieure de Lyon – 69007 Lyon

helene.piot-durand@ens-lyon.fr

LE BRUIT typique que l'on peut entendre lors du décollement d'un ruban adhésif a pour origine une instabilité de pelage. En observant le ruban adhésif de près, on remarque qu'il ne se détache pas de façon continue, mais de façon saccadée. Des phases de décollement très rapides sont entrecoupées par des phases de non-décollement, ce qui est caractéristique d'une instabilité de « stick-slip » (ou « collé-glissé » en français). Bien que celle-ci soit étudiée depuis de nombreuses années, son origine n'est pas encore parfaitement comprise. Après une rapide présentation de l'histoire du ruban adhésif et de son pelage, nous proposons dans cet article de retracer l'étude de cette instabilité, jusqu'à la récente découverte de son aspect multi-échelle.

1. HISTOIRE DU RUBAN ADHÉSIF

1.1. L'invention de Richard Drew

Après une rapide carrière de banjoïste dans le Minnesota aux États-Unis, Richard Gurley Drew est recruté par l'entreprise 3M Company en 1921 [1]. En 1923, il remarqua lors d'une visite chez un carrossier que pour délimiter deux zones de couleurs différentes à peindre sur une voiture, les ouvriers en masquaient une avec du papier journal collé sur la carrosserie. L'idée était ingénieuse, mais peu pratique. Richard Drew inventa alors en 1925 le premier ruban adhésif de masquage, commercialisé sous le nom de Scotch® Masking Tape.

Le ruban était constitué d'une large bande de papier, dont les bords seulement étaient enduits de colle. Il pouvait ainsi être facilement décollé de la carrosserie sans en abîmer la peinture. Les ouvriers trouvaient cependant que le ruban n'adhérait pas assez bien, et en conclurent que 3M cherchait à faire des économies de colle. L'histoire leur attribue alors cette phrase : *Take this tape back to those Scotch bosses of yours and tell them to put more adhesive on it!*, soit *Rapportez ce ruban à vos écossais de patrons et dites-leur de mettre plus de colle dessus !* sachant que les avares étaient qualifiés d'écossais à cette époque. L'entreprise choisira finalement le nom de Scotch® et l'emblème du tartan écossais pour toute sa gamme de rubans adhésifs.

1.2. L'évolution jusqu'à nos jours

Richard Drew développa par la suite le premier ruban adhésif transparent, qui fut commercialisé à partir de 1930 sous le nom de Scotch® Cellulose Tape (cf. figure 1). Il rencontra un grand succès aux États-Unis, en particulier durant la Grande Dépression, car il permettait de réparer facilement et à bas coût les objets de la vie quotidienne.



Wikipedia

Figure 1 - Le Scotch® Cellulose Tape.

Le ruban double-face fut inventé durant la Seconde Guerre mondiale. À cette époque, 3M produisait déjà plus d'une centaine de types de ruban adhésif, en particulier à destination de l'armée.

Au cours de la seconde moitié du xx^e siècle, l'utilisation du ruban adhésif s'est démocratisée à travers le monde entier, jusqu'à ce qu'il devienne un objet de la vie courante. À titre d'exemple, il se vend aujourd'hui plus de trente-cinq millions de rouleaux chaque année rien qu'en France !

1.3. Des usages détournés

De nos jours, l'utilisation du ruban adhésif ne se limite plus uniquement à son intérêt pratique et fonctionnel. Il est de plus en plus utilisé pour son aspect décoratif et dans le milieu artistique. Il a d'ailleurs donné naissance à un mouvement à part entière, le *tape art*, dans lequel s'inscrivent par exemple les sculptures de Mark Jenkins et les œuvres de Mark Khaisman (cf. figure 2, page ci-contre).

Des études ont également mis en évidence que le pelage d'un ruban adhésif dans le vide produit des rayons X par triboluminescence. En 2008, il a été montré qu'ils sont suffisamment puissants pour réaliser la radiographie d'un doigt [2].



Wikipedia

Figure 2 - Exemples d'œuvres de *tape art* : la girafe de Mark Jenkins et la chaise de Mark Khaisman.

Enfin, le prix Nobel de physique a été attribué en 2010 à Kostya Novoselov et Andre Geim pour leurs expériences sur le graphène, un cristal de carbone bidimensionnel [3]. Ils ont développé une technique simple afin de produire un feuillet de graphène à partir d'une pastille de graphite et d'un ruban adhésif, ce dernier permettant d'arracher des couches très fines de graphite. Une identification optique permet ensuite d'identifier les échantillons constitués d'une couche unique.

2. UN PELAGE SACCADÉ

2.1. Pelage d'un ruban adhésif

La plupart des rubans adhésifs sont constitués d'un film mince élastique, appelé le dos, sur lequel est déposé une couche d'adhésif sensible à la pression. Il suffit donc d'exercer une pression, en appuyant avec le doigt par exemple, pour les faire adhérer à un substrat.

L'adhésion d'un ruban est habituellement caractérisée en réalisant son pelage, par exemple en imposant une vitesse constante à une extrémité à l'aide d'un moteur, comme représenté en figure 3. La force nécessaire dépend alors de nombreux para-

mètres, tels que la nature du substrat, la rhéologie de l'adhésif, l'angle de pelage θ , et bien évidemment la vitesse de pelage V .

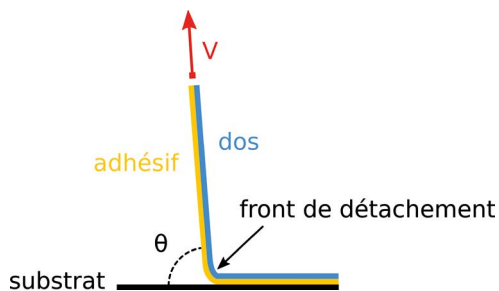


Figure 3 - Pelage d'un ruban adhésif depuis un substrat plan à vitesse imposée.

2.2. Dynamique du front de détachement

Plusieurs études expérimentales se sont intéressées à la dynamique du front de détachement lors d'un pelage à vitesse imposée. Pour la plupart des rubans adhésifs, le front avance linéairement au cours du temps lorsque la vitesse de pelage V est faible. Un exemple pour une expérience réalisée au Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon est présenté sur la figure 4A, il correspond au pelage de Scotch® 600 à une vitesse $V = 0,11$ m/s [4].

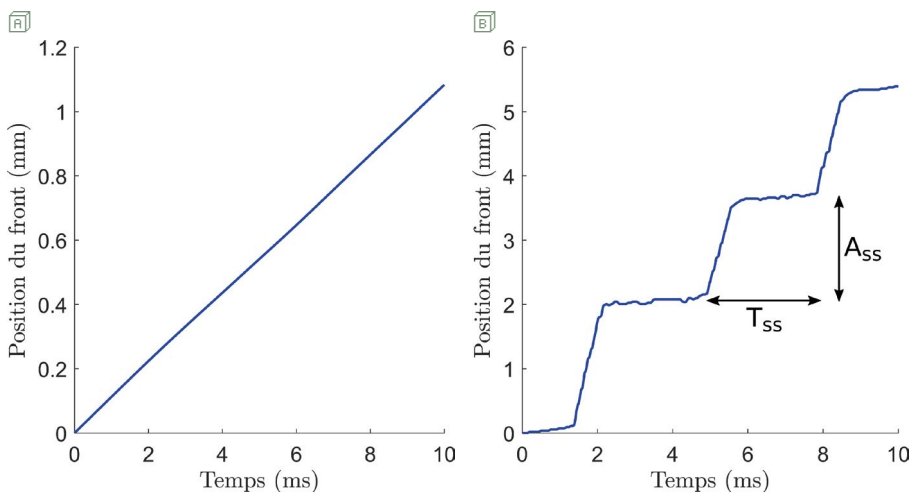


Figure 4 - Dynamique du front de détachement lors d'un pelage régulier (à gauche) et lors d'un pelage présentant une instabilité de *stick-slip* (à droite).

Pour une certaine gamme de vitesses, dépendant du ruban adhésif et des condi-

tions du pelage, la dynamique du front n'est pas régulière, mais saccadée. Un exemple est présenté sur la figure 4B (page ci-contre), il correspond au pelage de Scotch® 600 réalisé à une vitesse $V = 0,55 \text{ m/s}$ [4]. Cette dynamique est caractéristique d'une instabilité de *stick-slip*. Elle présente une alternance entre des phases rapides (*slip*), où la vitesse du front est bien supérieure à la vitesse moyenne du pelage, et des phases lentes (*stick*), où le front est immobile.

Lorsque la dynamique du front est saccadée, le ruban adhésif produit un bruit typique et désagréable. On retrouve cette caractéristique pour de nombreux phénomènes de la vie quotidienne présentant du *stick-slip*, notamment lors de frottements entre solides : crissement d'une craie sur un tableau, grincement d'une porte mal huilée...

Dans l'industrie, l'instabilité de *stick-slip* apparaissant lors du pelage présente plusieurs désagréments. En effet, le bruit généré peut provoquer des nuisances sonores importantes. De plus, ce type de pelage abîme l'adhésif et le dos du ruban, ce qui empêche de réutiliser ce dernier. La recherche d'une solution permettant d'éviter cette instabilité représente ainsi un enjeu important.

2.3. Origine du *stick-slip*

Il est possible d'expliquer l'origine de l'instabilité de *stick-slip* en mesurant la force appliquée par le moteur pour réaliser le pelage du ruban à vitesse constante [5]. L'évolution schématique de la force de pelage F en fonction de la vitesse V est représentée en figure 5. Celle-ci présente deux branches croissantes, l'une à basses vitesses et l'autre à hautes vitesses, reliées entre elles par une branche décroissante.

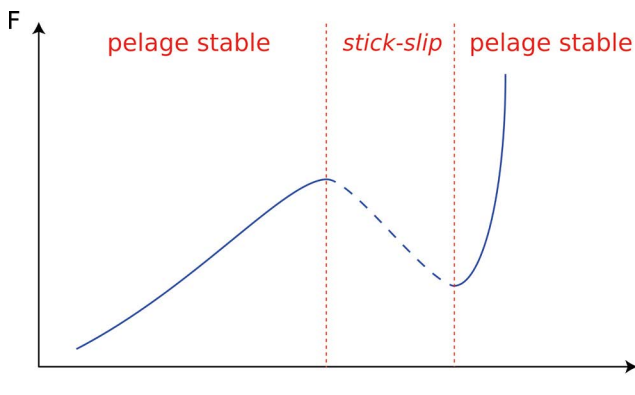


Figure 5 - Évolution schématique de la force de pelage en fonction de la vitesse imposée.

Lorsque la force croît avec la vitesse, le pelage observé est régulier. Du point de

vue énergétique, puisqu'il est plus coûteux pour le front de détachement d'avancer plus vite, le pelage se stabilise à la vitesse imposée. En revanche, lorsque la force décroît avec la vitesse, il est moins coûteux pour le front d'accélérer que de conserver la vitesse imposée. L'énergie potentielle emmagasinée dans le ruban élastique tendu est alors relâchée rapidement et engendre une phase de *slip*. Celle-ci est suivie d'une phase de *stick* où le ruban se tend à nouveau et où son énergie potentielle augmente. La gamme de vitesses imposées pour laquelle $F(V)$ décroît correspond donc à l'observation d'une instabilité de *stick-slip*.

3. UNE INSTABILITÉ COMPLEXE

3.1. Caractérisation du *stick-slip*

Différentes techniques ont été utilisées au cours de ces dernières décennies afin d'étudier l'instabilité. Outre la mesure de la force de pelage, il est évidemment possible de se focaliser sur l'émission acoustique produite lors du *stick-slip* [6]. Un exemple de signal que nous avons mesuré lors d'un pelage à vitesse imposée est présenté en figure 6. Le maximum de chaque bouffée correspond à une phase de *slip*. Il est ainsi possible de remonter à la période du *stick-slip* T_{ss} en mesurant la durée entre deux bouffées successives. De façon analogue, on peut caractériser la périodicité des émissions lumineuses produites lors du pelage [7].

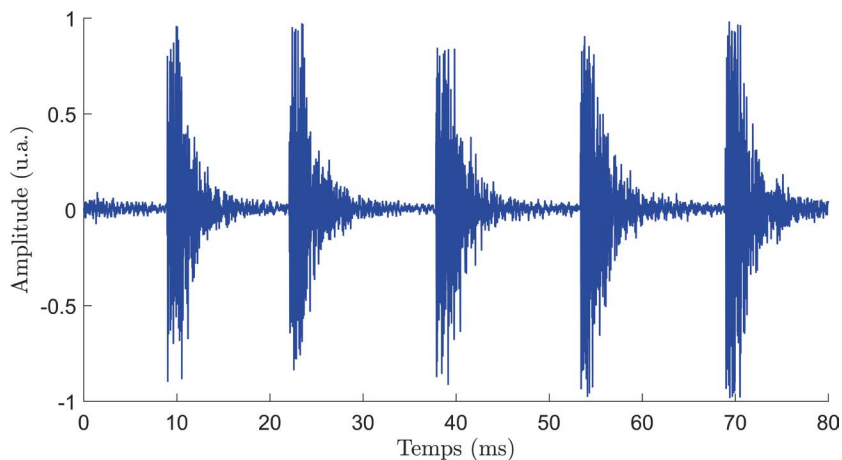


Figure 6 - Émission acoustique mesurée lors d'un pelage présentant du *stick-slip*.

Une autre méthode de caractérisation de l'instabilité consiste à analyser l'état du ruban ou du substrat après le pelage à l'aide d'un microscope [8]. En présence de *stick-slip*, ces derniers montrent une alternance de bandes qui correspondent à l'adhésif laissé

sur le substrat lors des phases de *stick*. Une photographie d'un substrat après le pelage d'un ruban est présentée en figure 7, la distance entre deux bandes verticales correspond ainsi à l'amplitude du *stick-slip* A_{ss} .

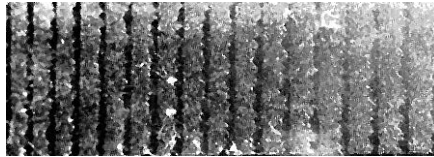


Figure 7 - Motifs observés sur un substrat après le pelage d'un ruban présentant du *stick-slip*.

Ces différentes techniques présentent toutefois l'inconvénient de caractériser l'instabilité de façon indirecte (par l'intermédiaire de l'émission acoustique, de l'adhésif déposé...). Le développement de l'imagerie rapide, au cours de ces dernières années, a permis de réaliser de grandes avancées puisqu'il est maintenant possible de visualiser le front de détachement du ruban à chaque instant lors du pelage. On peut ainsi suivre directement l'évolution de la position du front au cours du temps, comme pour les exemples présentés en figure 4.

L'amplitude A_{ss} de l'instabilité est typiquement de l'ordre du millimètre, tandis que sa période T_{ss} est de l'ordre de la milliseconde. Pour un même ruban adhésif, ces propriétés évoluent cependant en fonction des paramètres du pelage, notamment la vitesse V , la longueur du ruban pelé et l'angle de pelage θ [9]. Ces évolutions sont aujourd'hui assez bien comprises par différents modèles théoriques [5, 9]. Néanmoins, la découverte récente de son aspect multi-échelle a remis en question l'origine de cette instabilité.

3.2. Une instabilité multi-échelle

Des expériences de visualisation du front de détachement à l'aide d'une caméra ultra-rapide, prenant jusqu'à un million d'images par seconde, ont été réalisées en 2010 [10]. Il a alors été observé que l'avancée du front lors des phases rapides du *stick-slip* n'est pas régulière, mais saccadée ! Un exemple de cette micro-instabilité est présenté dans l'agrandissement en figure 8 (cf. page ci-après).

Ces avancées saccadées ont une amplitude A_{mss} de l'ordre de la centaine de micromètres, et sont espacées d'une période T_{mss} de l'ordre de la dizaine de microsecondes. L'instabilité a alors été qualifiée de *micro-stick-slip*, afin de la différencier du *stick-slip* étudié précédemment qui apparaît à des échelles spatiales et temporelles plus grandes. Une étude acoustique a également mis en évidence une émission ultrasonore lors du pelage qui s'ajoute à l'émission audible [11]. Les fréquences obtenues correspondent bien à la périodicité du *micro-stick-slip*.

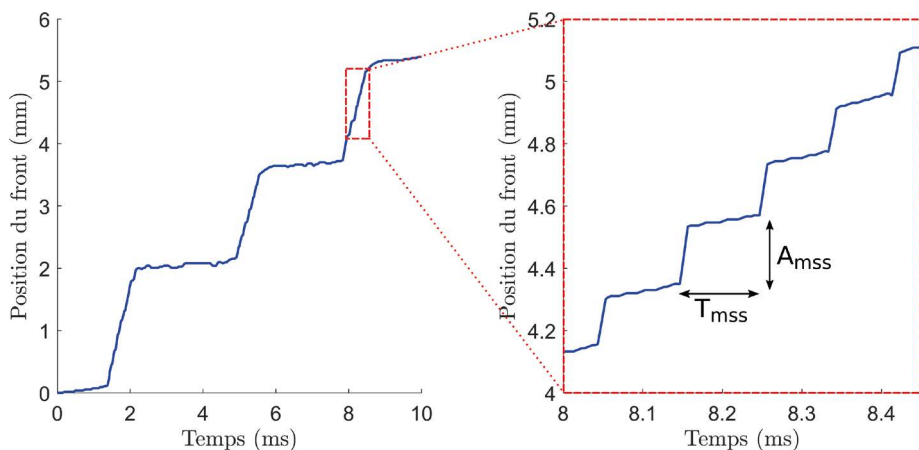


Figure 8 - Dynamique du front de détachement lors d'un pelage présentant du *stick-slip*. L'agrandissement lors d'une phase rapide permet de mettre en évidence le *micro-stick-slip*.

La caractérisation de cette micro-instabilité, que nous avons récemment réalisée au Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon, montre que son amplitude et sa période varient peu avec les paramètres du pelage, tels que la vitesse imposée ou l'angle de pelage, mais évoluent avec les propriétés du ruban au niveau du front de détachement [12]. Il a notamment été montré qu'une augmentation de la rigidité en flexion du ruban est associée à une amplitude A_{mss} plus importante.

CONCLUSION

Le bruit caractéristique entendu lors du pelage d'un ruban adhésif provient d'une interaction complexe entre deux instabilités de *stick-slip* à des échelles différentes. Loin d'être anecdotiques, ces instabilités entraînent des conséquences dommageables lors de la production et de l'utilisation d'un ruban adhésif. Malgré les nombreuses études réalisées au cours de ces dernières décennies, et l'amélioration de notre compréhension de l'origine de ces instabilités, il n'est toujours pas possible aujourd'hui de contrôler l'apparition du *stick-slip*. Le ruban adhésif risque donc de continuer à faire du bruit pendant encore longtemps !

BIBLIOGRAPHIE

- [1] D. Dollemore, *Scotch Transparent Tape*, American Chemical Society National Historic Chemical Landmarks, 2007.

- [2] C. G. Camara, J.V. Escobar, J. R. Hird and S.J. Putterman, “Correlation between nanosecond x-ray flashes and stick-slip friction in peeling tape”, *Nature*, vol. 455, n° 7216, p. 1089-1092, 2008.
- [3] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva and A.A. Firsov, “Electric field effect in atomically thin carbon films”, *Science*, vol. 306, n° 5696, p. 666-669, 2004.
- [4] V. De Zotti, L. Vanel, P.-P. Cortet et S. Santucci, « Instabilité de stick-slip lors du pelage d’un ruban adhésif », *23^e Congrès français de mécanique*, Association française de mécanique, 2017.
- [5] D. Maugis and M. Barquins, “Stick-Slip and Peeling of Adhesive Tapes”, *Adhesion 12*, p. 205-222, 1988.
- [6] M. Ciccotti, B. Giorgini, D. Vallet and M. Barquins, “Complex dynamics in the peeling of an adhesive tape”, *International journal of adhesion and adhesives*, vol. 24, n° 2, p. 143-151, 2004.
- [7] M. Barquins et M. Ciccotti, « On the kinetics of peeling of an adhesive tape under a constant imposed load », *International journal of adhesion and adhesives*, vol. 17, n° 1, p. 65-68, 1997.
- [8] Y. Yamazaki and A. Toda, “Pattern formation and spatiotemporal behavior of adhesive in peeling”, *Physica D*, vol. 214, n° 2, p. 120-131, 2006.
- [9] M.-J. Dalbe, « Instabilité de Stick-Slip lors du pelage d’un adhésif », thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 2014.
- [10] S. Thoroddsen, H. Nguyen, K. Takehara et T. Etoth, “Stick-slip substructure in rapid tape peeling”, *Physical Review E*, vol. 82, n° 4, p. 046107, 2010.
- [11] J. O. Marston, P. W. Riker and S. Thoroddsen, “Generation of ultra-sound during tape peeling”, *Scientific reports*, vol. 4, p. 4326, 2014.
- [12] V. De Zotti, « Instabilité de pelage d’un ruban adhésif : effet de l’inertie sur la dynamique multi-échelle du front de détachement », thèse de doctorat, ENS de Lyon, 2018.

**Vincent DE ZOTTI**

Professeur de sciences physiques en CPGE
Lycée Louis Thuillier
Amiens (Somme)

**Hélène PIOT-DURAND**

Doctorante
Laboratoire de physique
École normale supérieure de Lyon
Lyon (Rhône)