



Le claquement du fouet

R. LEHOUCQ • J.-M. COURTY • É. KIERLIK

Le fouet claque parce que son extrémité dépasse... la vitesse du son! Les physiciens ont mesuré la vitesse de l'extrémité de la lanière du fouet et visualisé l'onde de choc créée par le bang supersonique.

En 1887, les Autrichiens Ernst Mach et Peter Salcher montrent qu'un projectile animé d'une vitesse supérieure à celle du son engendre une onde de choc qui se manifeste par un claquement. Peu après, en 1899, Mach compare ce claquement au bruit d'explosion que produit une météorite quand celle-ci traverse l'atmosphère. Ils en déduisent que la vitesse d'entrée des météorites dans l'air terrestre est supersonique. Inspiré par ces travaux, l'Allemand Otto Lummer suggère, en 1905, que le claquement du fouet soit aussi dû à l'émission d'une onde de choc. Nombre de ses collègues sont incrédules, mais l'explication a droit de cité : les physiciens allemands Winkelmann et Prandtl n'hésitent pas à l'exposer dans des articles qu'ils écrivent vers 1910 dans des encyclopédies. Dès lors, l'idée que l'extrémité du fouet se déplace plus vite que le son se retrouve dans de nombreux ouvrages qui traitent d'acoustique ou d'aérodynamique. Toutefois, elle reste au stade d'hypothèse plus ou moins bien acceptée pendant encore une vingtaine d'années avant de faire des études plus précises (les physiciens ont souvent d'autres chats à fouetter). Aussi, tout au long du siècle, la physique du fouet ne progressera-t-elle que par épisodes.

Pour vérifier l'intuition de Lummer, le professeur Carrière de Toulouse réalise, en 1927, une ingénieuse expérience. Pour photographier le phénomène, reproduire un claquement identique lors de chaque essai, Carrière construit un fouet méca-

nique qui ressemble peu à celui du cocher : le manche du fouet est remplacé par un élastique sous tension qui tire sur une cordelette passant autour d'une poulie.

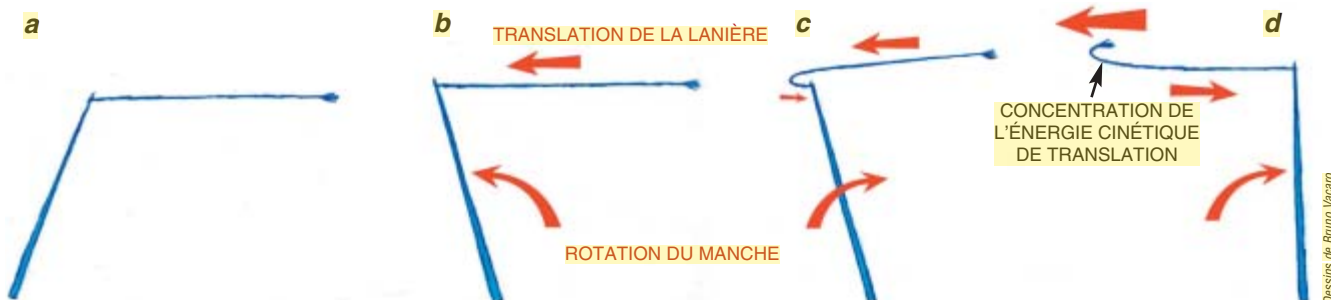
LA VITESSE DU FOUET

Dans les années 1930, ni les caméras rapides ni les flashes n'existent. Aussi, Carrière photographie le fouet en l'éclairant un bref instant avec la lumière produite par l'étincelle d'une lampe à arc (le flash n'existe pas!). L'étincelle doit être allumée au moment adéquat, peu après le déclenchement du coup de fouet. Le mécanisme actionnant le fouet libère simultanément une planche qui dans sa chute actionne l'interrupteur qui produit l'étincelle. Carrière ajuste le délai qui sépare le déclenchement du coup de fouet de l'étincelle en modifiant la hauteur d'où la planche chute. En plaçant un second interrupteur juste en dessous du premier, il trouve même le moyen de réaliser une seconde étincelle immédiatement après la première. Il obtient ainsi, sur la même plaque photographique, deux images successives de l'extrémité de la corde. Carrière calcule ainsi la vitesse de l'extrémité du fouet en divisant la distance qu'à parcourue l'extrémité entre les deux prises de vue, par la durée qui sépare les deux étincelles (un millième de seconde environ). Il confirme sa mesure en enregistrant la vitesse angulaire atteinte par la poulie. Carrière mesure une vitesse de 350 mètres par seconde, légèrement supérieure à la vitesse du son

dans l'air (330 mètres par seconde). Ce résultat corrobore l'hypothèse d'une pointe de fouet supersonique, toutefois, les imprécisions de la mesure ainsi que le caractère peu naturel du dispositif mimant le fouet empêchent de conclure avec une certitude absolue.

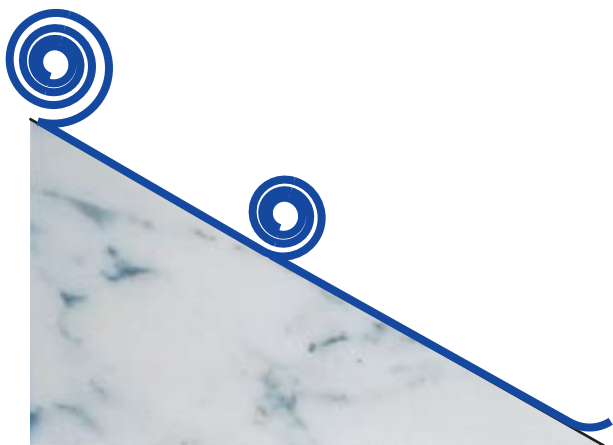
Le fouet de laboratoire du professeur Carrière laisse un problème en suspens : est-il vraiment possible d'amener l'extrémité du fouet à une vitesse supersonique par un simple mouvement du bras? Cette question est abordée par hasard dans les années 1950 : de nombreux cochers allemands sont affligés d'un étrange mal : des particules de cuivre sont retrouvées au fond de leurs yeux, par ailleurs apparemment indemnes de toute lésion. Or, à la même époque, les extrémités des fouets sont faites de fils de cuivre. Des physiciens de Stuttgart font le rapprochement et avancent que de fines particules de cuivre se détachent à grande vitesse de l'extrémité du fouet lors du claquement, traversent la cornée sans l'endommager, pour s'arrêter au fond de l'œil. Les physiciens élaborent alors un modèle de la propagation d'une déformation le long de la lanière et concluent qu'il est possible de conférer une vitesse aussi grande que l'on veut à l'extrémité du fouet. Pour cela, un mouvement sec crée un coude qui se propage et qui isole une partie mobile de la lanière dont la vitesse augmenterait indéfiniment.

Le mécanisme d'accélération de l'extrémité du fouet à une vitesse superso-

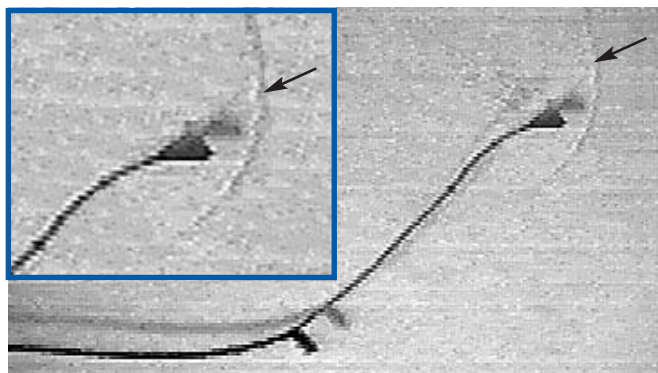


Mouvement du fouet de charretier : en (a), la lanière est lancée vers l'arrière ; en (b), la rotation du manche lui confère une énergie cinétique de translation ; en (c), un brusque rappel du manche crée

un coude. En (d), la propagation de ce coude concentre l'énergie cinétique dans la partie mobile au bout de la lanière, laquelle atteint une vitesse supersonique.



Un mécanisme analogue à celui du fouet permet de comprendre l'accélération importante subie par un tapis qui se déroule et dont la masse en mouvement diminue au cours du temps. Les vitesses obtenues sont toutefois loin d'être supersoniques et le claquement entendu est produit par le choc de l'extrémité du tapis sur le sol.



Visualisation de l'onde de choc (flèches) à l'extrémité du fouet. Cette photographie a été prise par une caméra ultra-rapide (9 000 images par seconde) à l'Institut Ernst Mach de la Société Fraunhofer de Fribourg par l'équipe dirigée par Peter Krehl. La houppe à l'extrémité du fouet augmente l'intensité de l'onde de choc.

nique ainsi établi, le mouvement de la lanière suffit-il pour créer une onde de choc? En 1958, trois chercheurs américains du laboratoire de recherche navale de la marine américaine s'interrogent : le claquement du fouet ne résulte-t-il pas plutôt d'un choc mécanique entre deux parties de la lanière? Pour lever cette ambiguïté, les chercheurs décident d'employer l'une des nouvelles caméras ultrarapides, qui, à la fin des années 1950, fixent déjà jusqu'à 4 000 images par seconde. Ils embauchent une équipe d'artistes de music-hall : les *Los Larabees*. Ces artistes entraînés peuvent reproduire des claquements de fouet comparables toujours au même endroit : dans le champ de la caméra. Les chercheurs mesurent ainsi, pour la première fois, la vitesse de l'extrémité d'un fouet réel : elle est 30 pour cent supérieure à la vitesse du son.

Il reste à visualiser l'onde de choc. Cela est possible en éclairant la scène avec une impulsion lumineuse très brève déclenchée grâce à un micro placé près de la zone du claquement. S'il permet de voir l'onde de choc, ce dispositif ne permet pas de prendre des images de sa formation. Il faut donc réaliser une expérience définitive qui prouve de façon indiscutable que le déplacement supersonique de l'extrémité du fouet engendre bien une onde de choc sonore.

En 1998, trois physiciens de l'Institut Fraunhofer pour l'étude des phénomènes brefs (à Fribourg) réalisent cette expérience. Grâce à une caméra vidéo enregistrant plus de 9 000 images par seconde, ils prennent des images d'excellente qualité et mesurent avec précision la vitesse de l'extrémité du fouet : elle excède la vitesse du son pendant une durée très courte d'environ 1,2 millièmes de seconde. La vitesse de l'extrémité du fouet peut même excéder deux fois celle du son. L'accélération de l'extrémité atteint alors 50 000 fois celle de la pesanteur (soit 500 kilomètres par seconde au carré). Dans

cette expérience, les physiciens utilisent un laser aux impulsions ultra brèves, qu'ils synchronisent avec la caméra, afin de prendre une image du fouet tout en observant l'ombre créée par l'onde de choc à chaque instant. Leur but est de mettre en évidence l'onde de choc et les résultats ne laissent aucune place au doute : au moment où la vitesse du fouet devient supersonique une onde de choc est émise. Ils constatent aussi qu'en moins de 20 centimètres, l'extrémité de la lanière décélère et repasse sous la vitesse du son.

Grâce à ces avancées, une image cohérente de la physique du claquement de fouet se dégage aujourd'hui. Il apparaît qu'un fouet est une machine à transformer le mouvement lent de la lanière en un mouvement final ultra rapide de la masselotte attachée à son extrémité (ou de la masse de son extrémité).

LA PHYSIQUE DU COUP DE FOUET

Examinons la dynamique d'un fouet de charretier fait d'une lanière attachée à un manche rigide. D'un mouvement rapide du poignet, le charretier crée un coude qui se propage le long de la lanière du manche vers l'extrémité.

Lors de ce mouvement, il incline son manche vers l'arrière afin de dérouler la lanière dans l'air, puis le ramène brusquement vers l'avant pour lui imprimer une vitesse d'ensemble. Poursuivant son mouvement, le charretier ramène le manche à la position initiale. Au cours de la première phase de son mouvement de poignet, la lanière acquiert une quantité d'énergie cinétique proportionnelle au produit de sa masse par le carré de la vitesse de l'extrémité du manche (la vitesse d'ensemble de la lanière). La deuxième phase du mouvement crée le coude recherché ; celui-ci se forme au voisinage du manche, et se propage vers l'extrémité de la lanière.

À mesure que ce coude se propage, l'énergie cinétique conférée initialement à l'ensemble de la lanière se concentre dans la portion mobile dont la vitesse augmente. Avec ces approximations, l'énergie cinétique initiale étant concentrée dans l'extrémité de la lanière, sa vitesse est la vitesse initiale de la lanière multipliée par le quotient des racines carrées des masses de l'ensemble et de l'extrémité de la lanière (jusqu'à une certaine valeur limite). Dans les fouets usuels, ce rapport est typiquement de l'ordre de 300. Il suffit donc que le charretier imprime une vitesse initiale de l'ordre de 20 mètres par seconde à l'ensemble de la lanière pour que l'extrémité dépasse la vitesse du son.

Les expériences réalisées à l'aide de fouets de laboratoire montrent qu'un nœud placé près de l'extrémité est arraché au cours du claquement, comme si des ciseaux invisibles l'avaient tranché! Les fortes tensions à l'origine de ce phénomène expliquent aussi pourquoi l'extrémité d'un fouet s'effiloche et se transforme en une houppe, c'est-à-dire en un faisceau de fils. Cette houppe favoriserait l'émission de claquements plus bruyants, ce que les expériences menées à Fribourg ont confirmé.

Le mécanisme dominant dans l'émission sonore serait le pivotement rapide de cette houppe (90 degrés en 0,1 millièmes de seconde). Lummer a raison, depuis plus d'un siècle : le claquement du fouet résulte d'un choc supersonique.

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA. **Jean-Michel COURT**Y est physicien, chargé de recherche au CNRS. **Edouard KIERLIK** est physicien et maître de conférences à l'Université Pierre et Marie Curie.

P. Krehl, S. Engemann and D. Schwenkel, The puzzle of whip cracking uncovered by a correlation of whip-tip kinematics with shock wave emission, Shock Wave, vol. 8, pp. 1-9, 1998.