

Pont de Tacoma : la contre-enquête

Nos limiers physiciens déclarent que l'effondrement du pont de Tacoma, en 1940 aux États-Unis, n'est pas dû à un phénomène de résonance.

Le 7 novembre 1940, après d'impressionnantes oscillations, le pont de Tacoma s'écroule, sous les yeux médusés de nombreux témoins. Cette catastrophe sans victimes, mais abondamment filmée et photographiée, a acquis depuis une renommée mondiale, avec un coupable tout désigné : le phénomène de résonance. L'erreur judiciaire pointe car, contrairement à ce qui est affirmé dans nombre d'ouvrages, l'accusé n'est pas à l'origine de la catastrophe.

Commençons l'enquête par les faits. Avant les funestes événements du 7 novembre 1940, la victime était déjà bien connue des services de sécurité de l'État de Washington. Dès sa prime jeunesse, le pont de Tacoma, inauguré le 1^{er} juillet 1940, se comportait dangereusement. Son tablier avait la fâcheuse tendance d'osciller verticalement dès qu'une petite brise se levait. Ces oscillations d'une amplitude de plusieurs dizaines de centimètres étaient impressionnantes. Mais l'élasticité naturelle des matériaux permettait au pont de se déformer sans rompre. Soumis à des sollicitations extérieures telles que le vent ou le passage des véhicules, le pont se mettait à osciller selon des modes bien définis. Ses concepteurs estimaient toutefois que ces oscillations resteraient limitées et qu'il n'y avait pas de soucis majeurs de sécurité. Le début de l'automne sembla leur donner rai-

son : le pont résista aisément à des vents de plus de 80 kilomètres par heure.

Mais le matin du 7 novembre, sous l'effet de vents modérés (60 à 70 kilomètres par heure), le tablier du pont se met à vibrer plus que d'habitude, avec une amplitude de plus d'un mètre, assez pour interdire le trafic. À dix heures du matin, coup de théâtre : les oscillations verticales se transforment en torsions périodiques ! À partir de ce moment, à chaque va-et-vient, l'inclinaison du tablier par rapport à l'horizontale augmente, jusqu'à atteindre des déplacements du tablier de neuf mètres et une inclinaison de 45 degrés. Ce nouveau régime d'oscillation est fatal : au bout d'une demi-heure, des morceaux du pont commencent à tomber dans le fleuve, et à 11 h 02, près de 200 mètres de tablier se détachent. Le pont de Tacoma a vécu.

La résonance dispose d'un alibi

À quoi attribuer ce désastre ? La rumeur ne tarda pas à accuser le phénomène de résonance et, encore de nos jours, c'est cette fausse explication qui est colportée. Rappelons ce qu'est une résonance avec l'exemple d'un enfant sur une balançoire. À cause des frottements, les oscillations de la balançoire cessent d'elles-mêmes si l'on n'apporte pas continuellement de l'énergie au système. Les pertes d'énergie étant faibles, il



1. Résonance avec une balançoire : une faible poussée, imprimée à la même fréquence que les oscillations de la balançoire, compense les pertes d'énergie par frottements et augmente peu à peu l'amplitude du mouvement.



2. Avant de s'effondrer, le tablier du pont de Tacoma a subi, sous l'influence de vents modérés, des oscillations verticales ainsi que des mouvements périodiques de torsion le long de son axe, l'inclinaison allant jusqu'à 45 degrés.

suffit à un parent compatissant de pousser régulièrement l'enfant pour entretenir le mouvement ou pour en augmenter l'amplitude. S'il règle précisément la fréquence de ses interventions sur le rythme des oscillations de la balançoire, il lui suffira d'exercer une toute petite force pour obtenir un effet très important : c'est le phénomène de résonance.

Une structure complexe (pont, immeuble, véhicule, etc.) présente en général différents modes de vibration, chacun pouvant entrer en résonance à une fréquence caractéristique. L'effondrement partiel d'une autoroute californienne, en 1989, à la suite d'un séisme, semble ainsi dû à une résonance à deux hertz, l'une des fréquences propres de vibration de la structure autoroutière : le terrain sous-jacent filtrait les fréquences des mouvements du sol et transmettait justement celles qui étaient proches de deux hertz.

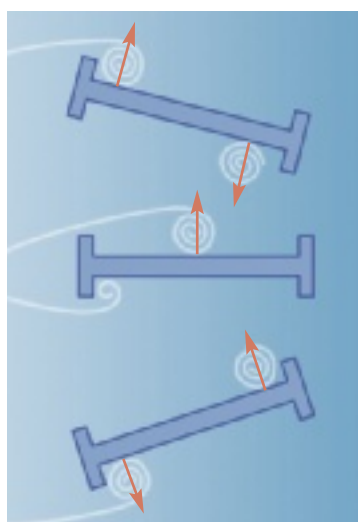
En était-il de même pour le pont de Tacoma, le vent turbulent jouant le rôle du tremblement de terre ? La réponse est « oui » pour les oscillations que connaissait le pont depuis sa construction, mais « non » pour celles qui ont provoqué sa rupture. Les rafales de vent ne pouvaient avoir l'énergie et la régularité nécessaires sur une durée aussi longue que celle observée : plus d'une demi-heure, avec une période de cinq secondes, c'est-à-dire une fréquence de 0,2 hertz.

L'accusation ne se laissa pas démonter. Faisant preuve d'une grande culture physique, elle fit appel aux « allées de von Karman ». Il s'agit de rangées périodiques de tourbillons semblables à celles qu'on observe dans l'eau derrière les piliers des ponts. Elles apparaissent quand un fluide s'écoule assez vite autour d'un obstacle fixe. À la série de tourbillons aérodynamiques créés par le tablier du pont est ainsi associée une dépression qui s'exerce alternativement sur le dessus puis le dessous du tablier.

La force périodique qui s'ensuit aurait-elle fait entrer le pont de Tacoma en résonance ? Le réquisitoire est séduisant, mais il tourne court. En effet, le calcul de la fréquence d'émission de ces tourbillons donne un hertz, soit cinq fois plus que le 0,2 hertz observé par les témoins ou mesuré en soufflerie sur des maquettes.

Quel est alors le vrai coupable ? On ne peut décrypter le comportement du pont de Tacoma en faisant intervenir séparément les oscillations du pont et l'écoulement aérodynamique. En revanche, tout s'éclaire quand on comprend que ces deux phénomènes se couplent et s'amplifient l'un l'autre.

La section du tablier a une forme de H très aplati : les barres verticales correspondent aux parapets qui se trouvent de part et d'autre de la chaussée. Lorsque le vent souffle de côté, il rencontre un parapet. Cet obstacle vertical crée naturellement deux tourbillons identiques de part et d'autre du tablier. Leurs effets mécaniques sur le pont se compensent. Cette symétrie est cependant brisée dès que la chaussée s'incline : le tourbillon qui se trouve sur la face du pont protégée du vent grossit et tire le tablier vers le haut, ce qui accentue l'inclinaison. En revanche, quand le mouvement s'inverse, le tourbillon décroche du parapet et parcourt la largeur du tablier avant de s'éloigner tandis que, de l'autre côté, un autre tourbillon croît.



3. Quand le vent souffle de côté (ici de gauche à droite), les parapets du pont engendrent des tourbillons d'air au-dessus et au-dessous du tablier. Si le tablier reste horizontal, les forces (flèches rouges) exercées sur le pont par les tourbillons se compensent. En revanche, si le tablier oscille périodiquement autour de son axe, les tourbillons amplifient ces mouvements de torsion.

Un complot torsion-tourbillons

L'oscillation du tablier crée donc des tourbillons synchrones, dont l'action amplifie l'oscillation ; en retour, celle-ci donne naissance à des tourbillons encore plus importants, et ainsi de suite. C'est ce mécanisme subtil qui a provoqué *in fine* l'effondrement du pont de Tacoma.

Ainsi, il ne s'agit pas d'une résonance sous l'effet d'une force périodique. Telle une anche oscillant sous le souffle régulier du clarinettiste, le pont de Tacoma est entré en vibration sous l'effet du vent. Ces vibrations se sont couplées à des tourbillons, couplage qui a amplifié les mouvements.

Les procureurs très pointilleux pourraient souligner une faiblesse de notre argumentation. La reconstitution laisse en effet de côté la naissance des mouvements de torsion. Ce point est toujours controversé : rupture ou déplacement subit d'un câble de soutien ? Couplage entre différents types de tourbillons ? Comme dans toutes les bonnes affaires criminelles, il reste une petite part de mystère.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris.

D. GREEN et W. G. UNRUH, *The failure of the Tacoma bridge : a physical model*, in *American Journal of Physics*, vol. 74, n° 8, pp. 706-716, 2006.

Y. K. BILLAH et R. H. SCANLAN, *Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks*, in *American Journal of Physics*, vol. 59, n° 2, pp. 118-124, 1991.

<http://www.youtube.com/watch?v=AsCBK-fRNRk>