

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

QUAND LE PONT BALANCE, LES PIÉTONS DANSENT

**On croyait tout savoir sur la conception des ponts.
En fait, on avait oublié l'effet de leurs vibrations
sur la marche des piétons qui les franchissent.**

Le 10 juin 2000, le Millennium Bridge (la « passerelle du millénaire »), à Londres, était inauguré. Alors qu'une foule compacte le traversait, le pont s'est mis à osciller d'un côté à l'autre. L'amplitude du mouvement a atteint plusieurs centimètres, au point que les personnes étaient obligées de se tenir aux balustrades pour ne pas tomber. Les autorités fermeront la passerelle au public deux jours plus tard. Et il faudra 18 mois et 5 millions de livres de travaux sur la structure pour empêcher que la situation se reproduise.

Pourquoi les ingénieurs n'avaient-ils pas prévu une oscillation aussi forte ? En fait, un mécanisme original avait échappé à toutes les modélisations antérieures : lorsque les piétons sont assez nombreux, leur marche se synchronise spontanément avec les oscillations de la passerelle.

Pour comprendre les oscillations du Millennium Bridge, deux catastrophes datant du XIX^e siècle sont riches d'enseignements. La première s'est produite en 1831 avec le pont de Broughton, au Royaume-Uni : il s'est effondré lorsqu'une troupe de 60 militaires marchant au pas le franchissait. Pourquoi ? À cause d'un effet de résonance bien connu, dû à la coïncidence entre la fréquence du pas des soldats avec l'une des fréquences naturelles de vibration du pont.

RÉSONANCE SUR PONT OU SUR BALANÇOIRE

Le phénomène est le même que celui à l'œuvre lorsqu'on pousse un enfant sur une balançoire à chaque fois qu'il revient vers nous. Il n'est pas nécessaire que l'énergie fournie à chaque poussée soit importante pour que l'amplitude de l'oscillation augmente. Il suffit qu'elle soit

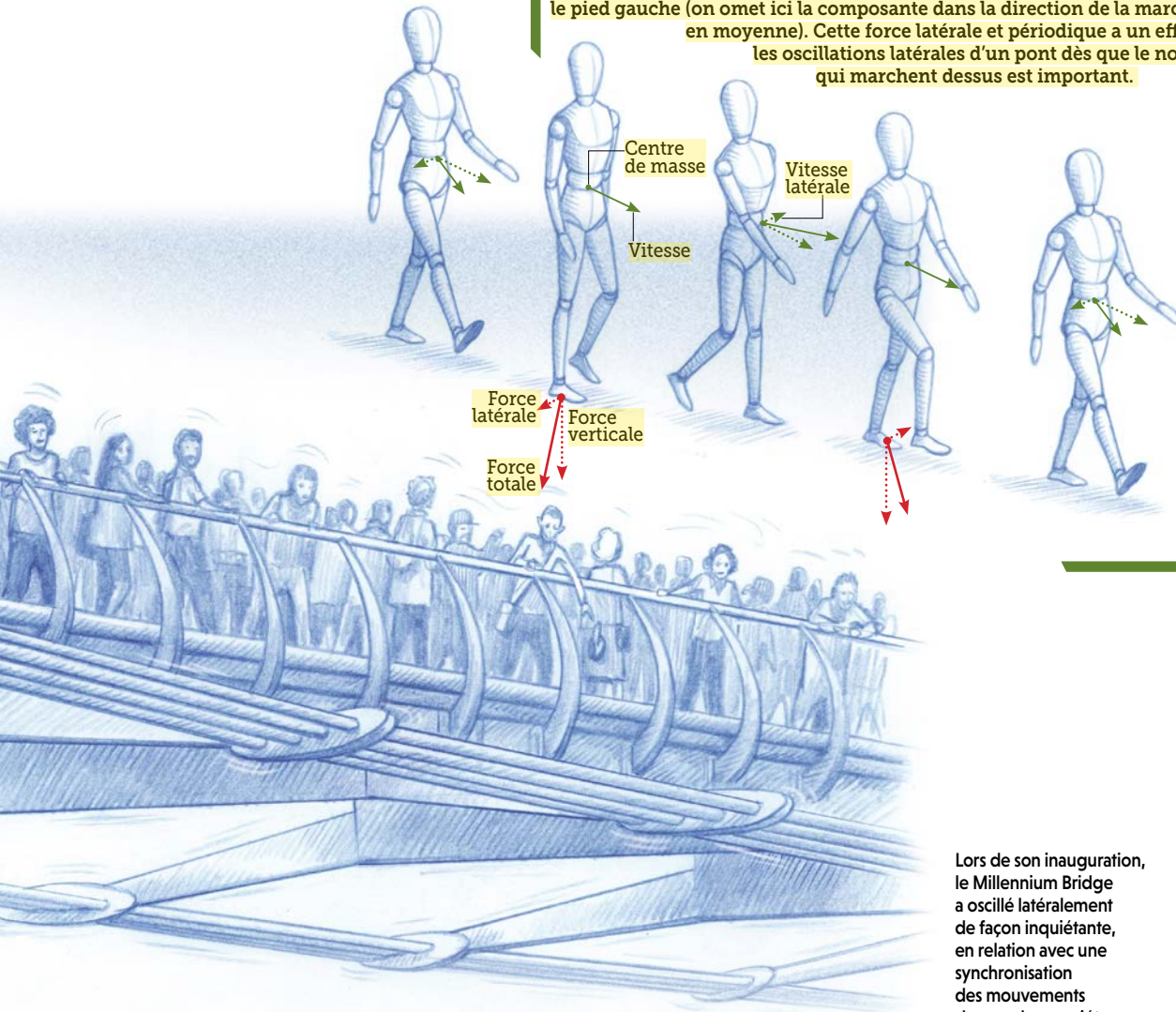
supérieure aux pertes subies par la balançoire lors d'une oscillation.

Dans le cas du pont de Broughton, l'effet d'un seul piéton marchant normalement était insuffisant pour le faire vibrer, car la dissipation l'emportait. Tel n'était plus le cas lorsque l'énergie était apportée par 60 gaillards marchant au pas ; d'autant plus que, amusés par les oscillations naissantes, ils se sont mis à marcher au rythme exact des mouvements du pont. Ainsi, à chaque pas, l'effet de l'impulsion verticale des pieds s'ajoutait à celui des pas précédents. L'amplitude des vibrations – ici verticales – s'est alors amplifiée jusqu'à ce que le pont cède.



UNE FORCE QUI SE DANDINE

Lorsqu'une personne marche, son centre de masse fait des va-et-vient verticalement, mais aussi latéralement. Ce mouvement latéral a pour conséquence que le pied qui touche le sol exerce sur celui-ci une force ayant une petite composante latérale, vers la droite pour le pied droit et vers la gauche pour le pied gauche (on omet ici la composante dans la direction de la marche, qui est nulle en moyenne). Cette force latérale et périodique a un effet sensible sur les oscillations latérales d'un pont dès que le nombre de piétons qui marchent dessus est important.



Lors de son inauguration, le Millennium Bridge a oscillé latéralement de façon inquiétante, en relation avec une synchronisation des mouvements des nombreux piétons.

Soyons un peu plus quantitatifs. Lorsque nous marchons, nous faisons, en gros, deux pas par seconde. Cela signifie que deux fois par seconde, c'est-à-dire à une fréquence de 2 hertz, nous appuyons sur le sol vers le bas avec une force dont l'amplitude moyenne est égale à notre poids. Et avec 60 piétons marchant au pas, l'ensemble de ces individus engendre une force périodique dont l'amplitude est 60 fois celle d'une personne.

Cependant, si les marcheurs ne se coordonnent pas, l'amplitude totale est bien plus faible, car certains vont par exemple marcher à contretemps. Les lois des phénomènes aléatoires montrent que la force augmente alors comme la racine

carrée du nombre de marcheurs. Autrement dit, la force exercée par une foule de 60 piétons sur un pont est près de 8 fois supérieure à celle exercée par 1 piéton, mais 8 fois plus faible que celle de 60 individus marchant au pas.

On comprend donc pourquoi, depuis la catastrophe de Broughton, les militaires ont pour consigne de rompre le pas sur les ponts. On comprend également pourquoi les ingénieurs conçoivent des ponts dont les fréquences naturelles de vibration diffèrent de 2 hertz. Ils font aussi en sorte que les vibrations du pont soient amorties au voisinage de cette fréquence, afin que les mouvements verticaux du pont engendrés par les marcheurs

restent limités et ne nuisent pas au confort de la marche.

Ces contraintes sont bien connues depuis longtemps et parfaitement intégrées par les cabinets d'architecture. Alors que s'est-il passé sur le Millennium Bridge? Une autre catastrophe va nous orienter vers la réponse. Le 16 avril 1850, en France, 220 soldats du 11^e régiment d'infanterie légère et 3 civils ont trouvé la mort lors de l'effondrement du pont de la Basse-Chaine à Angers, l'un des premiers >

Les auteurs ont récemment publié : **En avant la physique!**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).

