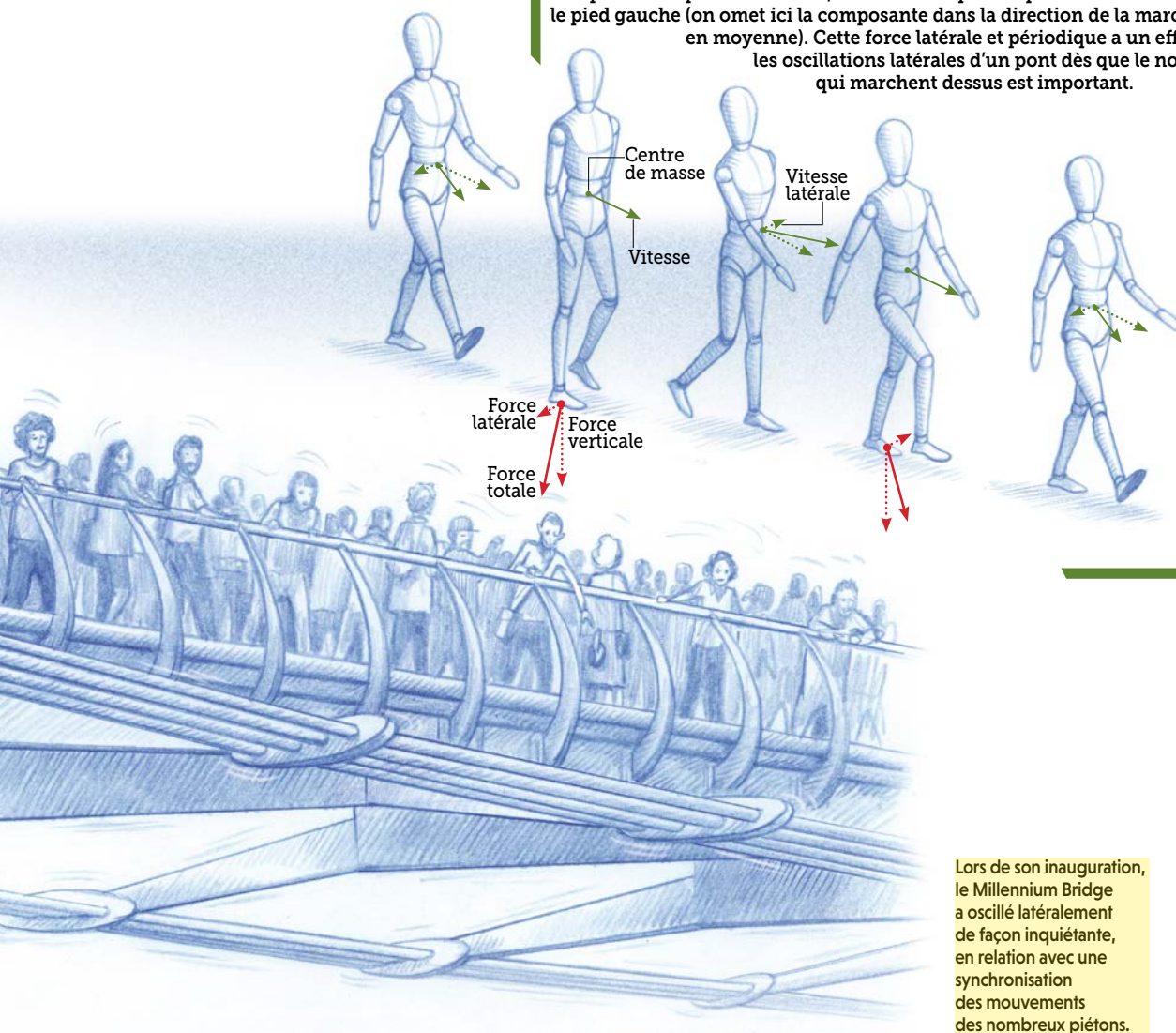


UNE FORCE QUI SE DANDINE

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).



➤ ponts suspendus. L'ordre avait pourtant été donné aux soldats de rompre le pas. Toutefois, sous l'effet de rafales de vent, le pont a commencé à s'agiter latéralement. Pour s'équilibrer, les soldats se sont portés d'un côté puis de l'autre; ces mouvements coordonnés ont alors amplifié les embardées horizontales du pont jusqu'à provoquer son effondrement. Ainsi, alors qu'en arrivant sur le pont, les soldats avaient cessé de coordonner leurs pas, les oscillations de la structure ont resynchronisé ces derniers!

UNE SYNCHRONISATION INATTENDUE

C'est un phénomène de même nature qui s'est produit à Londres avec le Millennium Bridge, mais selon un mécanisme non anticipé. Lorsque nous marchons, nos deux pieds avancent chacun sur deux lignes parallèles distantes l'une de l'autre de la largeur de nos hanches. Par conséquent, en plus d'oscillations verticales, notre centre de masse oscille horizontalement.

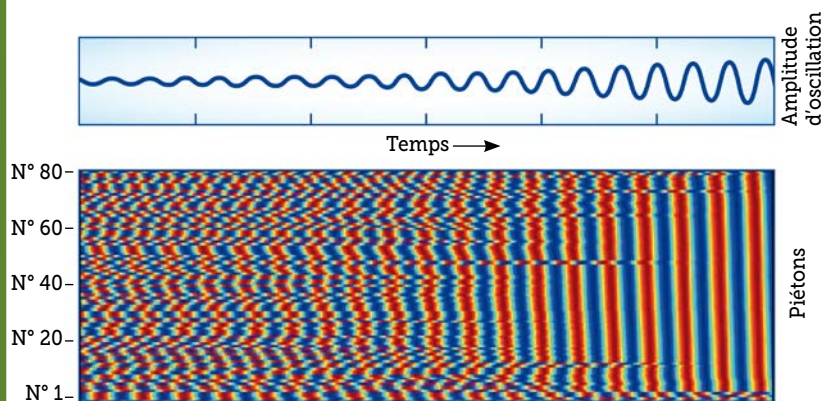
La force exercée par nos pieds sur le sol a donc une petite composante horizontale dirigée vers l'extérieur du pied: vers la gauche pour le pied gauche, vers la droite pour le pied droit (voir l'encadré page précédente). Comme nous posons chaque pied une fois par seconde, la fréquence de cette force latérale est de 1 hertz. Son amplitude est de l'ordre de 1 % du poids, et l'on s'attend donc à un effet très faible.

C'est vrai pour l'effet sur l'amplitude du mouvement du pont qui, dans notre cas, n'a jamais dépassé quelques centimètres, mais pas pour l'effet sur la marche des piétons. Pourquoi? Parce que lorsque le sol bouge sous nos pieds, nous sommes bien plus déstabilisés par des mouvements latéraux que par des mouvements verticaux; nous essayons alors de retrouver notre équilibre par des réajustements de la position des pieds et divers autres mouvements.

Détaillons. Puisque les piétons ne marchent pas tous exactement au même rythme, l'amplitude de la force latérale est de l'ordre de la force d'un seul marcheur multipliée par la racine carrée du nombre de piétons. Cela fait légèrement osciller latéralement le pont. Tant que l'amplitude de cette oscillation reste faible, les piétons ne sont pas perturbés. Mais quand le nombre de marcheurs est élevé, elle devient assez importante pour affecter la marche de quelques-uns, ceux dont les pas étaient pratiquement au rythme des oscillations latérales.

DES MARCHES QUI SE SYNCHRONISENT

Diverses modélisations et simulations numériques ont reproduit le phénomène de synchronisation de la marche de piétons qui franchissent un pont, sous l'effet des oscillations latérales de celui-ci. Les graphiques ci-dessous montrent les résultats d'une telle modélisation, publiée en 2017 par Bruno Eckhardt et ses collègues (voir la bibliographie). Le graphique du haut montre l'amplitude des oscillations du pont en fonction du temps; celui du bas représente, toujours en fonction du temps, la phase de la marche (codée en couleur) de chaque piéton d'une foule constituée de 80 personnes. On constate que l'amplitude des oscillations augmente à mesure que les marches des piétons se synchronisent.



Ces piétons vont alors spontanément synchroniser leurs pas avec les mouvements du pont, ce qui accroît l'amplitude des oscillations. Celles-ci deviennent alors suffisantes pour affecter des piétons qui étaient un peu moins en rythme et les synchroniser. Ainsi, par un effet boule de neige, l'amplitude des oscillations et le nombre de piétons qui marchent en synchronie se renforcent mutuellement. Les accélérations latérales atteignent alors des valeurs suffisantes (de l'ordre de 0,3 mètre par seconde carrée, soit 3 % de l'accélération de la pesanteur) pour déséquilibrer les marcheurs.

Des simulations numériques et des expériences en grandeur réelle sont venues confirmer quantitativement cette explication (voir l'encadré ci-dessus). L'effet avait été mentionné depuis longtemps, à la fois par des ingénieurs et par des scientifiques, mais il était considéré comme anecdotique. Il a fallu la mésaventure du Millennium Bridge et les études qui ont suivi pour qu'on l'identifie clairement et qu'on le prenne en compte correctement dans les modélisations et la construction de nouveaux ponts. Cet incident a aussi permis de se rendre compte que ce phénomène d'oscillation latérale n'était pas isolé et concernait de nombreux ponts dans le monde, quel que soit leur type de structure. ■

ET LE PONT DE TACOMA ?

La rupture en 1940 du fameux pont de Tacoma, aux États-Unis, ne relève pas des mécanismes de résonance ou de synchronisation décrits ici. Cette catastrophe était due à l'interaction des oscillations de torsion du pont avec les tourbillons d'air créés au niveau du pont par des vents forts (voir « Pont de Tacoma : la contre-enquête », Pour la Science, février 2008).

BIBLIOGRAPHIE

B. Eckhardt et al., **Modeling walker synchronization on the Millennium Bridge**, *Physical Review E*, vol. 75, article 021110, 2017.

P. Dallard et al., **The London Millennium Footbridge**, *The Structural Engineer*, vol. 79(22), pp. 17-33, 2001.

Vidéo de l'oscillation du Millennium Bridge en 2000 : www.youtube.com/watch?v=eAXVa__XWZ8