

La chute du pont de Tacoma

Le pont suspendu de Tacoma a été ouvert le 1^{er} juillet 1940 aux Etats-Unis. L'accident a eu lieu quatre mois plus tard le 7 novembre. La vitesse du vent n'était que de 68 km/h. Les dégâts furent uniquement matériels.

Par Xavier Amandolese et Pascal Hémon

Ecole Polytechnique - Département de Mécanique - Laboratoire d'Hydrodynamique (LadHyX)

Ce pont franchissait le détroit de Tacoma (Tacoma Narrows) dans l'état de Washington. Dès le début de sa mise en service l'ouvrage était réputé pour osciller dans le vent. Le jour de l'accident il soufflait à 65-70 km/h, une vitesse pourtant modérée.

A cette époque l'aérodynamique des ponts était une science balbutiante. Les vibrations dues au vent n'étaient pas prises en compte malgré la souplesse des ouvrages. L'accident est célèbre dans le monde entier à cause du film pris par un particulier.

Le pont en quelques chiffres	
Portée principale :	854 m
Longueur totale :	1650 m
Largeur du tablier :	12 m
Hauteur du tablier :	2,40 m
Tirant d'air :	59 m



Les ponts suspendus sont très souples car le tablier (la chaussée) est suspendu au bout de câbles. S'il souffle assez fort le vent peut engendrer une petite déformation. Ici à l'évidence c'est une torsion du tablier qui est concernée.

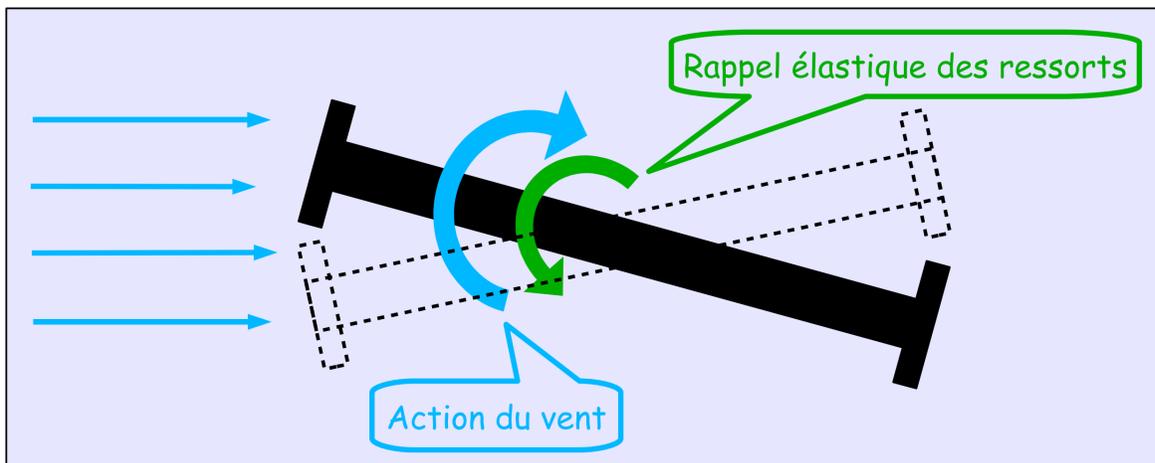
Mais le vent n'est jamais parfaitement constant. Ses variations de vitesse entraînent des petites oscillations de la déformation. Lorsque la forme aérodynamique du tablier est mal conçue, il peut arriver que ces petites oscillations soient amplifiées au cours du temps. Le vent transfère son énergie au pont qui oscille. Comme pour une éolienne qui tourne dans le vent : mais là, c'est volontaire !

L'amplitude des oscillations ne cesse de croître : le pont finit par casser.

Attention. On rencontre très fréquemment une explication de l'accident qui est fautive : des tourbillons d'air créés dans le sillage du tablier auraient pu se détacher à la même fréquence que la fréquence naturelle du pont. Cela aurait alors engendré un phénomène de résonance, comme le chant de la Castafiore faisant éclater un verre de cristal. Ce n'est pas possible ici, car la fréquence des tourbillons (qui existent effectivement) est bien trop différente de celle du pont.



Dans l'expérience proposée, nous avons reproduit en la simplifiant la forme du tablier. Il s'agit d'un H très aplati de rapport hauteur sur largeur de 1 sur 5. Un tronçon rigide est monté mécaniquement avec la possibilité d'osciller en torsion, comme le tablier du pont réel. L'expérience démontre que cette forme en H aplati est mauvaise. Alliée à la souplesse du pont, c'est elle qui est la cause de l'accident.



Car dès qu'un petit angle de torsion est initié, par exemple par une rafale de vent, la structure du pont tend à ramener sa position à l'horizontale. Ici ce sont les deux ressorts qui jouent ce rôle. Sauf qu'avec cette forme de tablier, le rappel élastique s'effectue avec un petit retard à chaque oscillation. La durée du retard augmentant avec la vitesse du vent, l'énergie transmise par le vent est de plus en plus grande.

Si le vent souffle suffisamment fort, cette énergie n'est plus absorbée naturellement par le pont et elle alimente les oscillations qui s'amplifient.

La chute du pont de Tacoma

La conséquence d'une instabilité aéroélastique en torsion

Par Xavier Amandolese et Pascal Hémon

Ecole Polytechnique - Département de Mécanique - Laboratoire d'Hydrodynamique (LadHyX)

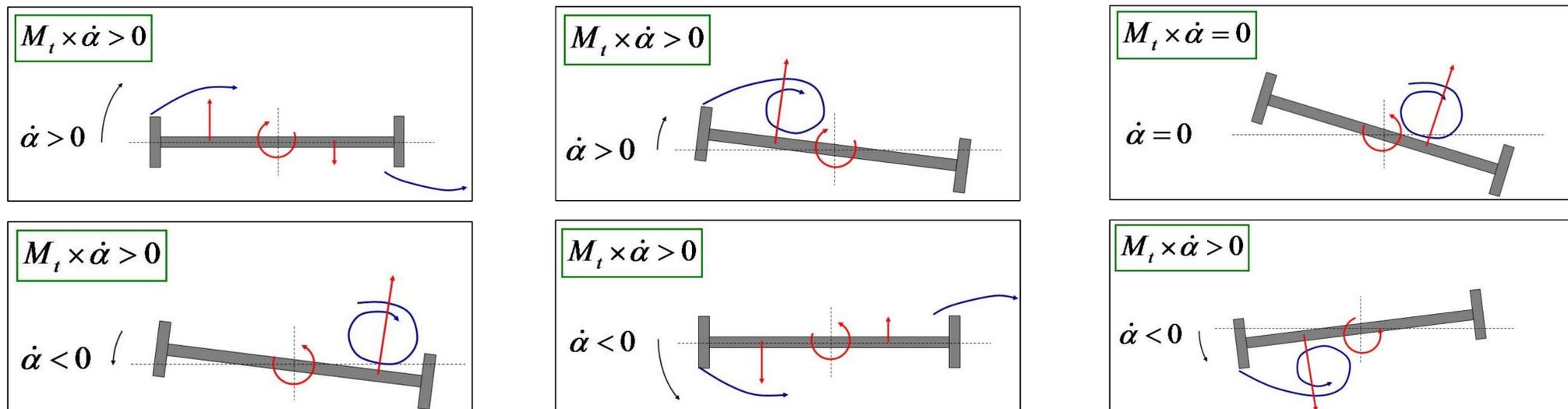
D'après le film de la catastrophe et le témoignage du Professeur Farquharson (département de génie civil de l'université de Washington), le vent soufflait à moins de 70 km/h lorsque le pont se mis à osciller fortement. Il s'effondra 45 minutes plus tard, dans un mouvement vibratoire de forte amplitude, dominé par un mode de torsion antisymétrique dont la fréquence était proche de 0,2 Hz.



Le pont de Tacoma n'a pas été victime de son sillage tourbillonnaire.

Pourtant des allées de tourbillons alternés de Bénard-Von Karman se développaient dans le sillage du pont. Ces tourbillons de sillage étaient même particulièrement actifs, entraînant des vibrations en flexion auto-limités en amplitude dès les premières brises. Mais la fréquence du détachement de ces tourbillons de sillage associée à un vent proche de 70 km/h était presque 5 fois plus élevée que celle du mouvement de torsion mis en jeu lors de la chute du pont.

Quels sont donc les mécanismes mis en jeu ? Pour répondre à cette question il faut s'intéresser aux conséquences du mouvement sur les efforts aérodynamiques. Supposons que le tablier se mette à osciller selon un mode de torsion (sous l'effet d'un chargement initial qui peut être la turbulence du vent, le trafic routier...). Le mouvement engendre alors des mécanismes d'adaptation complexes de l'écoulement qui contourne chaque section de tablier.



Des tourbillons produits par le mouvement sont convectés alternativement de part et d'autre du tablier. La synchronisation particulière de ce mécanisme de génération-convection de tourbillons avec le mouvement, peut conduire à un transfert d'énergie défavorable entre le vent et la structure. Le travail de l'effort aérodynamique $M_t \times \dot{\alpha}$ résultant est globalement positif : le vent donne de l'énergie à la structure.

Au delà d'une certaine vitesse du vent le pont n'absorbe plus cette énergie et son mouvement est amplifié.

Modélisation de l'effort aéro-élastique. La conséquence des mécanismes d'adaptation de l'écoulement au mouvement est un moment de torsion M_t périodique à la fréquence des oscillations. Son amplitude et son déphasage par rapport au mouvement dépendent de la vitesse réduite U_r qui fait intervenir B la largeur du tablier, U la vitesse du vent et f la fréquence naturelle de torsion du tablier. Au sein de la communauté du génie civil ce moment de torsion aéro-élastique est exprimé sous la forme :

$$M_t(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left[\left(\frac{2\pi}{U_r} \right)^2 A3^* \alpha(t) + \left(\frac{2\pi}{U_r} \right) A2^* \frac{B \dot{\alpha}(t)}{U} \right]$$

$A2^*$ et $A3^*$ sont des coefficients sans dimension mesurés en soufflerie en fonction de la vitesse réduite. La figure ci-contre montre l'évolution du coefficient $A2^*$, qui caractérise le terme d'amortissement aéroélastique pour différentes géométries de section de tablier.

Celle du pont de Tacoma présente une croissance rapide en valeur positive, donc défavorable, ce qui rend le système vent-pont instable ! A l'inverse, les autres formes de pont mieux profilées (types 1 & 2) restent en valeur négative, donc stables.

