

## Le pont haubané de Millau

© Eiffage / Foster & Partners /  
Daniel JAMME - Millau pour C.E.V.M.



# LES EFFETS DU VENT SUR LES PONTS

Toujours plus hauts et toujours plus longs, les ponts se tordent, fléchissent, se balancent sous les effets du vent. En 1940, surprise ! le pont de Tacoma cède. Depuis les ingénieurs ont beaucoup appris. Combinant expériences de soufflerie et calculs par ordinateur, les ponts modernes sont conçus pour mieux résister au vent.

PAR **PASCAL HÉMON**, INGÉNIEUR DE RECHERCHE DU CNRS AU LABORATOIRE D'HYDRODYNAMIQUE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE (LADHYX)

**L'**étude des effets du vent sur les ponts reste marquée par deux événements majeurs, deux accidents qui permirent, voire forcèrent, les ingénieurs à faire progresser la connaissance dans ce domaine. En 1879, un jour de grand vent, le Firth of Tay Bridge, qui enjambe la rivière Tay en Écosse, s'effondre au passage d'un train, provoquant la mort de 80 personnes.

## Deux accidents majeurs

À l'époque, l'effet de la force exercée par le vent avait été largement sous-estimé. Dix ans plus tard, Gustave Eiffel (1832-1923) préconise pour ériger sa tour une pression du vent six fois supérieure à celle utilisée pour construire le Tay Bridge. Par la suite, les progrès de l'aérodynamique conjugués aux débuts de l'aviation permirent de mieux prendre en compte les effets statiques du vent sur les structures. Du moins, pour celles qui restent immobiles dans le vent. Mais que se passe-t-il lorsque

la structure se met à osciller ? Le 7 novembre 1940, le pont suspendu de Tacoma Narrows aux États-Unis s'effondre après une série d'oscillations qui a duré près de trois quarts d'heure ! Curieusement, la vitesse moyenne du vent était bien inférieure à la valeur limite utilisée pour sa conception. C'est donc bien l'effet des vibrations qui a conduit à sa destruction. Plus précisément, il s'agit d'une instabilité aéroélastique qui est engendrée par un couplage entre la force aérodynamique exercée par le vent et l'élasticité du pont. L'accident a été entièrement filmé, ce qui a largement contribué à faire connaître cet événement dans le monde entier.

Il marque aussi le début de l'époque moderne où les vibrations dues au vent, bien que globalement maîtrisées, restent encore difficiles à comprendre. L'étude des effets du vent sur ces ouvrages requiert alors de plus en plus des compétences dans différentes disciplines, mécanique des structures et des vibrations, aérodynamique, météorologie...

## 1879

**Le Firth of Tay Bridge qui enjambe la rivière Tay en Écosse, s'effondre** au passage d'un train, provoquant la mort de 80 personnes.

## 1940

**le pont suspendu de Tacoma Narrows aux États-Unis s'effondre le 7 novembre** après une série d'oscillations de près de trois quarts d'heure !

→ → →



Le pont suspendu de Tancarville. © Photothèque Eiffage Construction / Fôugerolle

Pour en savoir plus

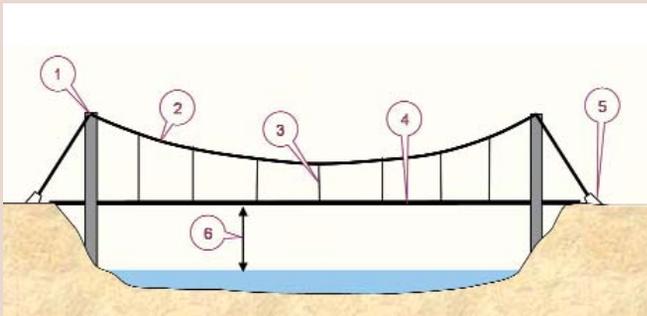
# Ponts suspendus et ponts haubanés

Les ponts suspendus diffèrent des ponts haubanés par la façon dont est soutenu le tablier (partie du pont où repose la chaussée). Les ponts haubanés sont plus faciles d'entretien et moins chers que les ponts suspendus dont le principe est plus ancien.



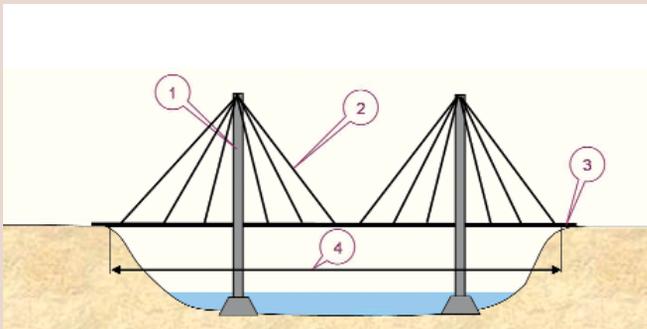
Le pont haubané de Millau. © Eiffage / Foster & Partners / Daniel JAMME - Millau pour C.E.V.M.

## Schéma d'un pont suspendu



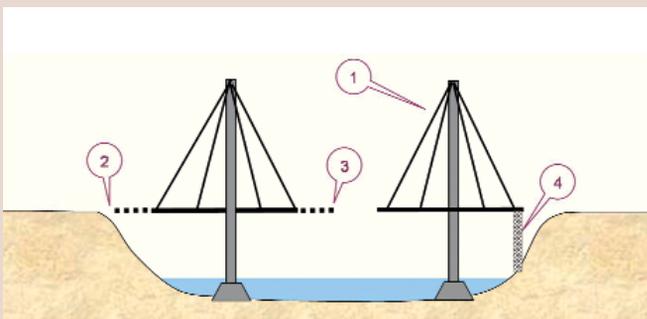
Deux pylônes <sup>(1)</sup> construits à chaque extrémité soutiennent un câble porteur <sup>(2)</sup> sur lequel est fixée une série de câbles verticaux plus petits, les suspentes <sup>(3)</sup>, qui soutiennent elles-mêmes le tablier <sup>(4)</sup>. Le câble porteur est fixé dans le sol aux points d'ancrage <sup>(5)</sup>. Ces points d'ancrage tiennent donc l'ensemble de la structure. Ce type de pont permet un tirant d'air <sup>(6)</sup> important ainsi qu'un large espace entre les pylônes n'entravant pas la navigation. Le pont de Tancarville est un exemple de pont suspendu.

## Schéma d'un pont haubané



Le tablier du pont est soutenu par des câbles inclinés : les haubans <sup>(2)</sup> directement fixés sur des pylônes de grande hauteur <sup>(1)</sup>. Les haubans peuvent atteindre 400 mètres de long. Un pont haubané est auto-équilibré car les pylônes sont chargés symétriquement. De plus, il n'a pas besoin d'ancrage au sol. Les deux extrémités du pont s'appuient sur des massifs de maçonnerie : les culées <sup>(3)</sup>. La travée <sup>(4)</sup> est la longueur de tablier située entre deux appuis consécutifs (elle correspond sur le dessin à la longueur totale du pont). En France, le pont de Normandie a longtemps détenu le record du monde de la plus longue travée. Plusieurs ensembles successifs peuvent être mis en place, comme pour le viaduc de Millau dont l'un des pylônes est le plus haut du monde.

## Schéma d'un pont haubané en construction



Pour ériger un pont haubané, on commence par construire les pylônes. En général, le tablier est ensuite progressivement suspendu avec les haubans correspondants de part et d'autre du pylône, de manière à garder un équilibre naturel de l'ensemble. Le fléau <sup>(1)</sup> est cet ensemble structural ainsi constitué qui est très souple, spécialement en torsion autour de la verticale, tout en présentant une très grande prise au vent. La période la plus critique survient juste avant le raccordement, ou clavetage, du tablier aux deux extrémités, vers une culée <sup>(2)</sup> ou un autre fléau <sup>(3)</sup>. Une structure provisoire <sup>(4)</sup> reliant l'extrémité du tablier au sol vient très souvent sécuriser l'opération.



## Un phénomène sous haute surveillance

Actuellement, les grands ponts, suspendus ou haubanés (encadré *Ponts suspendus et haubanés*), sont très légers et surtout très souples. Ils fléchissent, se tordent, se balancent, tout en subissant l'impact des rafales de vent. Tout l'art des ingénieurs d'aujourd'hui est d'en tenir compte.

### UN COUPLAGE DANGEREUX

Lorsque le vent souffle, même de façon stable, il déforme les structures souples, qui se plient ou se tordent sous son action, de sorte que la structure une fois déformée ne présente plus exactement la même surface au vent qu'auparavant. Cette déformation dépend naturellement de l'élasticité de la structure. En retour, la nouvelle forme de la structure engendre une modification de la force exercée par le vent, ce qui provoque de nouveau un changement de déformation. Et ainsi de suite...

Cet enchaînement d'actions/réactions, alors même que la vitesse du vent reste constante, conduit à un couplage entre le vent et l'élasticité de la structure. On parle de « couplage aéroélastique », qui caractérise les effets qu'un vent stabilisé produit sur les oscillations éventuelles d'un ouvrage. Dans certaines conditions, ce couplage peut mener à une instabilité déterminée par l'amplification des oscillations de la structure.

### L'INSTABILITÉ

Du fait du couplage aéroélastique, un échange d'énergie mécanique se produit entre le vent et le pont qui oscille. On dit que le pont est stable lorsque l'énergie mécanique est transférée du pont vers le vent qui la dissipe : lorsqu'un événement extérieur engendre une petite oscillation initiale, par exemple le passage d'un

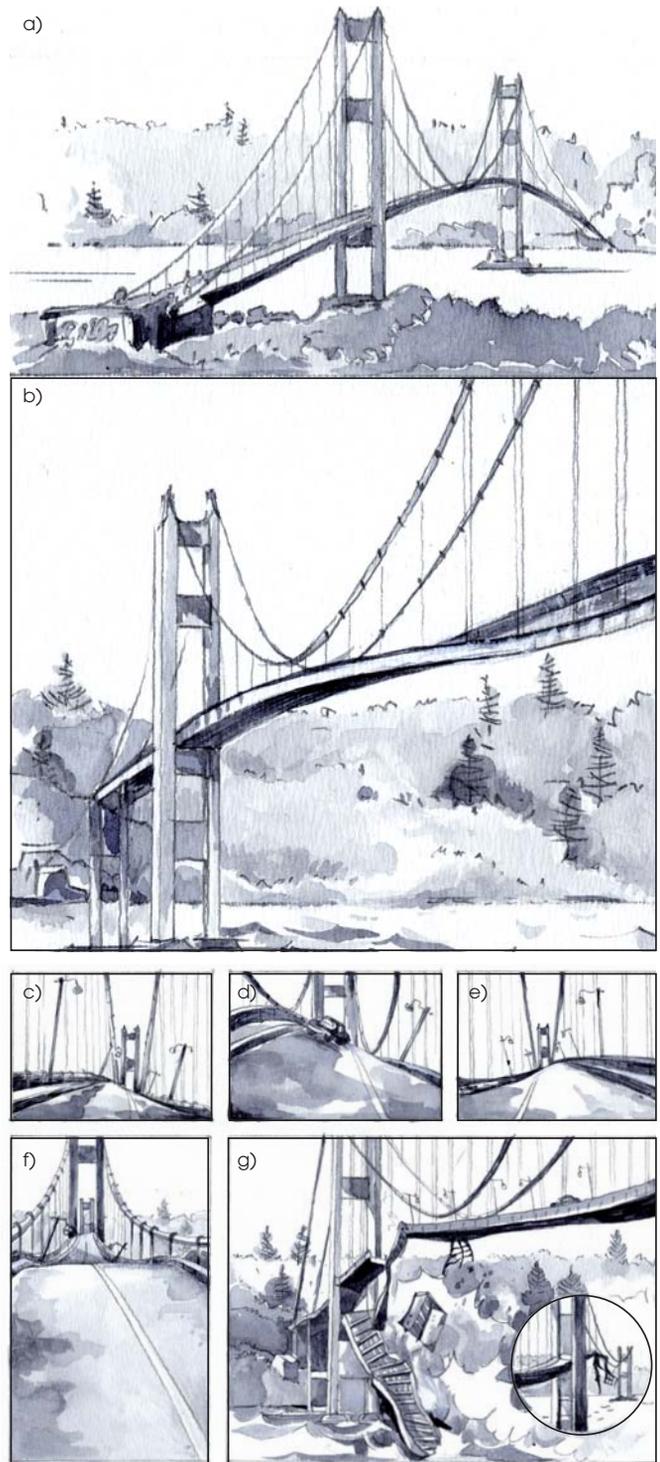


Figure 1. Reconstitution de l'accident du pont de Tacoma 1940 aux États-Unis. a) - e) Déformation en torsion menant jusqu'à la ruine f).

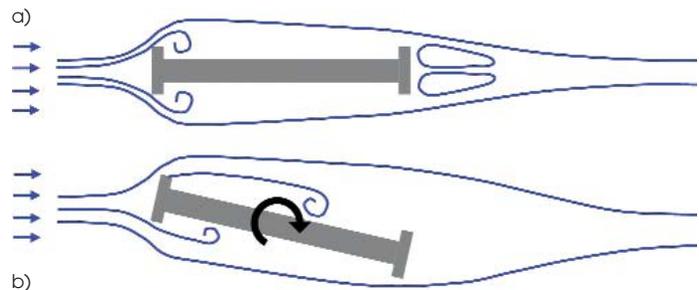
camion ou une soudaine rafale de vent, cette oscillation va ensuite s'amortir. De plus, le vent n'est jamais parfaitement constant : les petites variations de vitesse autour de la vitesse moyenne suffisent à produire de petites oscillations.

En revanche, si la vitesse moyenne du vent est suffisamment élevée, au-dessus de ce que l'on appelle la vitesse critique, le pont est instable et l'oscillation initiale s'amplifie. L'énergie se transfère alors du vent vers le pont (il existe d'ailleurs des projets d'éoliennes fondées sur ce principe) et les oscillations s'amplifient à cause du couplage aéroélastique, jusqu'à la ruine de l'ouvrage.

### L'ACCIDENT DE TACOMA DÉCORTIQUÉ

Dans le cas du pont de Tacoma, la déformation en torsion du tablier qui s'observe facilement sur les dessins (fig. 1a-1f) correspond à une variation de l'angle d'incidence du vent. Ce changement d'incidence modifie l'écoulement du vent autour du tablier qui, en retour, modifie le couple de torsion. Par conséquent, le pont capte de l'énergie au vent à chaque fois qu'il oscille (fig. 2a, 2b). L'amplitude des vibrations augmente progressivement jusqu'à ce que la déformation engendre des effets sur les câbles et les autres composants qui conduisent finalement à sa ruine. Cette explication a été confirmée par plusieurs études en soufflerie depuis les années 1940 et ce phénomène, aujourd'hui bien connu des concepteurs, est systématiquement étudié.

Presque tous les ponts subissent ce phénomène aéroélastique : le terme « aéroélasticité » vient de ce qu'il dépend des caractéristiques aérodynamiques du tablier et de sa rigidité élastique provenant de sa conception mécanique. Les grands ponts sont des ouvrages architecturaux uniques dont les tabliers doivent être testés en



soufflerie afin de garantir la qualité des études. Car l'écoulement du vent autour d'une structure aussi grande et complexe qu'un pont ne peut pas s'obtenir par le calcul, les essais en soufflerie donnant encore les résultats les plus fiables. Pour ce faire, on réalise une maquette d'un tronçon de tablier sur laquelle on va mesurer les forces aéroélastiques, afin de calculer ensuite la vitesse critique pour le pont complet.

Dans ce contexte, tout l'art de construire avec le vent réside dans la capacité des concepteurs à augmenter la vitesse critique, de telle sorte que le vent naturel ne puisse jamais l'atteindre.

## Les effets des rafales de vent

Le vent est très turbulent : il produit des variations de vitesse parfois très importantes sur des durées courtes, de l'ordre de quelques secondes. Le pont va être excité par ces rafales et produire une vibration qui pourrait endommager ou fatiguer sa structure. À l'inverse des instabilités aéroélastiques, il n'est pas possible d'éviter les rafales de vent. Aussi les ingénieurs doivent-ils en tenir compte lors du choix des matériaux et de la conception mécanique. À l'aide de données météorologiques, ils doivent modéliser les fluctuations du vent pour en calculer les effets sur le pont, notamment les contraintes induites dans la structure. La simulation numérique par ordinateur des vibrations trouve là une application concrète et effi-

**Figure 2. Illustration de la complexité de l'écoulement autour d'un tablier de type pont de Tacoma.**  
**a) Écoulement autour du tablier horizontal.**  
**b) Écoulement autour du tablier incliné.** Dès que le tablier est incliné par rapport au vent, l'écoulement se modifie et engendre un couple de torsion (flèche courbe en noir). À cause de ses caractéristiques aérodynamiques, il arrive que la variation de ce couple de torsion amplifie le mouvement au lieu de l'amortir. Ce fut le cas pour le pont de Tacoma.



## La fausse explication de la rupture du pont de Tacoma

**L'accident a suscité de nombreuses publications avec parfois des erreurs grossières sur la réalité scientifique.** Ce pont suspendu a été ouvert le 1<sup>er</sup> juillet 1940 ; l'accident a eu lieu quatre mois plus tard le 7 novembre. La travée mesurait 853 mètres et le tirant d'air 59 mètres ; les dégâts furent uniquement matériels. Une explication fautive de l'accident, néanmoins très répandue, consiste à incriminer un phénomène de résonance entre le pont et des tourbillons d'air formés dans le sillage du tablier. Ce type de tourbillons se crée à l'arrière de certains obstacles à une fréquence bien déterminée qui dépend de la vitesse moyenne du vent et de l'épaisseur transversale de l'obstacle. Ils produisent une variation alternative de la pression de l'air sur l'obstacle, ce qui engendre une force aérodynamique alternative. Lorsque la fréquence de cette force correspond à l'une des fréquences de vibration naturelle du pont, un phénomène de résonance se déclenche, au cours duquel les mouvements de la structure sont fortement amplifiés (c'est aussi pour éviter une résonance que les militaires cessent la marche au pas cadencé en traversant un pont). Mais dans le cas du pont de Tacoma, cette explication ne tient absolument pas car la fréquence de torsion du pont était de un cycle toute les 5 secondes (0,2 Hz), tandis que celle des tourbillons était de un cycle par seconde (1 Hz). Le rapport de ces deux fréquences étant de cinq, tout risque de résonance est exclu.



cace lorsque ces calculs de structure sont alimentés par les résultats des essais en soufflerie.

### UN PONT EN CONSTRUCTION EST FRAGILE

Mais si les ingénieurs réussissent à concevoir correctement un pont à l'état final,

c'est parce qu'ils prennent en compte la période de construction, lorsque la structure incomplète est plus fragile. En particulier, pour un pont haubané, durant la période critique précédent le clavetage (encadré *Ponts suspendus et ponts haubanés, schéma d'un pont haubané en construction*), la structure en fléau est particulièrement flexible et extrêmement sensible aux fluctuations de vitesse du vent. Les concepteurs peuvent même être amenés à ajouter une structure provisoire de type échafaudage pour renforcer la structure incomplète. De plus, le chantier de construction suit en permanence l'évolution des prévisions météorologiques afin d'anticiper les problèmes.

La connaissance fine des caractéristiques des rafales de vent constitue donc un enjeu majeur car elles forcent la vibration du pont. L'estimation des contraintes dans la structure qui en découle nécessite donc de connaître la vitesse du vent que l'on va rencontrer sur le site d'implantation. Il existe deux façons d'y parvenir :

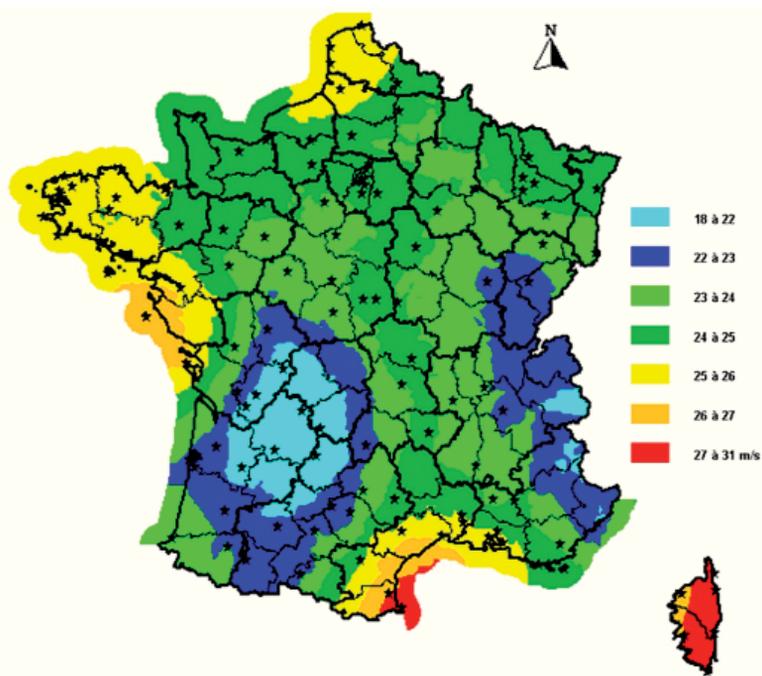


Figure 3. Carte de France des vents forts pour une période de 50 ans. © C. Sacré et al.

– soit le site est dégagé, par exemple en bord de mer pour un projet de pont enjamant un estuaire. La connaissance du vent et de ses caractéristiques est reliée principalement à la vitesse moyenne du vent que l'on peut obtenir par les statistiques météorologiques.

– soit des reliefs naturels sont présents, comme pour le viaduc de Millau situé dans un massif montagneux. Pour ce cas précis, la simple connaissance de la vitesse du vent à l'échelle météorologique est insuffisante. Il faut affiner la connaissance par des études spécifiques en soufflerie d'une maquette de paysage, complétée par des campagnes de mesures sur le terrain et un recalage avec la station météorologique la plus proche.

En France, la vitesse moyenne du vent à prendre en compte pour les constructions a été déterminée par le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) en collaboration avec Météo France. L'exploitation systématique des enregistrements des stations météorologiques du territoire a permis de produire la carte de France des vents forts (fig. 3) qui est intégrée au sein de la norme européenne. C'est l'outil de base incontournable et indispensable des ingénieurs et architectes pour l'étude des effets du vent sur les structures.

## Curieux filets d'eau

Un nouveau problème a surgi sur les ponts haubanés au cours des années 1980. Certains haubans se sont mis à vibrer à grande amplitude par temps de pluie et de vent, alors qu'ils ne bougeaient pas par temps sec. Les haubans concernés étaient gainés par un tube circulaire lisse en inox ou en plastique pour les protéger de la corrosion. Sans avoir un pouvoir aussi destructeur qu'une instabilité aéroélastique, ces oscillations ne sont néanmoins

pas acceptables car elles engendrent une fatigue prématurée des câbles.

Le mécanisme incriminé, qui reste toujours l'objet de recherches, est celui de la formation de filets d'eau de pluie positionnés par le vent de part et d'autre de la circonférence du hauban. Ces filets provoquent une modification de la forme extérieure circulaire qui accentue la sensibilité aux vibrations. Pour traiter ce problème, les ingénieurs ont imaginé des gaines munies de nervures ou d'appendices dont l'objectif est de briser l'organisation des filets d'eau. Ainsi le pont de Normandie a été équipé de telles gaines modifiées dès sa construction.

L'évolution actuelle des projets de grands ponts engendre donc de nouvelles problématiques, notamment en couplant les effets du vent avec d'autres phénomènes. C'est ainsi qu'après avoir appris à maîtriser les effets statiques du vent, ses effets vibratoires, l'effet des rafales, les ingénieurs ont eu à se confronter à un nouveau mécanisme conjoint avec la pluie.

Mais la tendance du « toujours plus haut et toujours plus long » reste constante. Sans nul doute, l'histoire ne s'arrêtera pas là.

P. H.

## Pour aller plus loin

**Crémona C. et Foucriat J.-C.** Éd., *Comportement au vent des ponts*. Presses de l'ENPC, 2002.

**EUROCODE 1** *Actions sur les structures – Partie 1-4 : Actions générales – Actions du vent*. EN 1991-1-4, 2005.

**Hémon P.**, *Vibrations des structures couplées avec le vent*. Éditions de l'École polytechnique, 2006.

**Montens S.**, *Les plus beaux ponts de France*. Éditions Bonneton, 2001.

**Sacré C., Sabre M. et Flori J.-P.**, *Cartographie des vents extrêmes en France métropolitaine*. Rapport du CSTB, EN-CAPE 05.180 C, 2003.

## Pascal Hémon

est ingénieur de recherche du CNRS au laboratoire d'hydrodynamique de l'École polytechnique (LadHyX). Ses travaux de recherche portent sur les effets aéroélastiques du vent sur les structures souples tels que les ponts et les ailes d'avion. Il enseigne également l'aéroélasticité à l'ISAE de Toulouse et l'ESSTIN de Nancy