Méthodes expérimentales pour l'étude du comportement aéroélastique des structures élancées

Experimental methods for the study of the aeroelastic behavior of slender structures

par E. Széchenyi
Institut Aérotechnique

The principle of fluid-structure coupling and the similarity considerations for aeroelastic wind tunnel testing are described briefly. The four experimental techniques used for predicting the aeroelastic behaviour of large slender structures are discussed giving the strengths and weaknesses of each.

I ■ INTRODUCTION

L'aéroélasticité des structures élancées dont il s'agit dans cette communication s'adresse plus particulièrement aux grands ouvrages du génie civil dans le vent. C'est-à-dire, des ponts, des cheminées, des tours, ... Bien que l'on rencontre des problèmes aéroélastiques sur tous ces types de structures, ce sont les ponts qui, de par leurs finesse, par leurs formes et par leurs enjeux économiques restent les structures les plus étudiées [1, 2 et 3].

L'aérodynamique des structures du génie civil est physiquement beaucoup plus complexe que celle des avions qui sont profilés, et se prête donc encore beaucoup moins bien à des prévisions théoriques. Aujourd'hui, seules des expériences permettent de faire des prévisions précises des comportements aéroélastiques des structures non profilées. Cet article tente de faire le point sur les méthodes expérimentales employées dans ce domaine.

II ■ L'AÉROÉLASTICITÉ DES STRUCTURES

● 2.1. Généralités

Avant d'aborder les détails des méthodes expérimentales, il est nécessaire de clarifier ce qu'est le phénomène physique de l'aéroélasticité sur des structures souples.

Les charges statiques exercées par le vent sur des structures ont depuis longtemps fait partie des calculs de conception. Déjà Eiffel tenait compte des charges aérodynamiques dans ses projets. Mais quand il s'agit de corps élancés et souples, cette prévision n'est plus suffisante car les effets aéroélastiques peuvent être dimensionnants.

Le vent soumet une structure à deux types de forces instantanées. D'une part, la turbulence du vent qui excite la structure sur ses fréquences propres modales et provoque des

vibrations qui peuvent être gênantes mais qui compromettent rarement l'intégrité de l'ouvrage. D'autre part, le couplage entre l'écoulement du vent et un ou plusieurs modes de vibration a un effet direct sur l'amortissement de la structure et peut donc provoquer une condition d'instabilité où l'amplitude de vibration peut croître jusqu'à la rupture. Elle peut aussi simplement diminuer l'amortissement mécanique de telle sorte que la structure subisse de fortes vibrations quand elle est soumise à des excitations par la turbulence du vent. C'est ce couplage entre le fluide et la structure qui est à l'origine du comportement aéroélastique de cette dernière.

● 2.2. Les équations

L'aéroélasticité se définit comme le couplage entre un fluide et une structure souple qui y est immergée. Les efforts aéroélastiques sont donc les forces aérodynamiques qui sont engendrées exclusivement par les déformations de la structure.

Le mouvement vibratoire d'une structure élancée peut être décrit simplement par les équations:

$$\mu\{\ddot{x}\} + B\{\dot{x}\} + K\{x\} = \{F\} \quad (1)$$

où μ , B et K sont les matrices de masse d'amortissement et de raideur structurelle et $\{F\}$ est le vecteur des forces aérodynamiques.

Dans cette formulation on peut négliger les forces d'amortissement de structure. Cette simplification est réaliste car les amortissements structurels sont en effet généralement très faibles. De ce fait, toutes les prévisions effectuées sont conservatrices.

Le vecteur des forces aérodynamiques peut être exprimé sous une forme générale par :

$$\{F\} = CK'\{x\} + CK''\{x\} + \{Q(t)\} \quad (2)$$

où $\{Q(t)\}$ est le vecteur des forces aérodynamiques instantanées indépendantes des mouvements de vibrations et n'intervient pas dans les considérations aéroélastiques. Ces

forces sont, par exemple, les excitations par la turbulence. K' et K'' sont les matrices des coefficients aéroélastiques réels et imaginaires respectivement (c'est-à-dire en phase et en quadrature avec le mouvement vibratoire).

C est une constante qui tient compte des caractéristiques de l'écoulement et de la géométrie de la structure.

L'équation (2) dans (1) décrit complètement le système fluide-structure couplé. Son application nécessite la connaissance des coefficients aéroélastiques. Ceux-ci ne peuvent être calculés par la théorie, si ce n'est dans le cas de sections minces et profilées (ailes d'avions) qui n'ont évidemment pas d'applications dans le domaine du génie civil où les sections des structures ne sont généralement pas profilées.

Par ailleurs, par son 2ème terme, l'équation (2) montre que le couplage fluide-structure engendre un amortissement aéro-dynamique du système couplé. Si cet amortissement est négatif, la structure est instable et les amplitudes de vibrations peuvent croître jusqu'à la rupture. Par contre, un amortissement positif vient suppléer l'amortissement mécanique de la structure et est donc un élément essentiel dans la prédiction des amplitudes de vibrations dues à des excitations par la turbulence du vent.

Dans le cas des structures élancées de sections peu évolutives, comme par exemple les tabliers de ponts, le vecteur des forces aérodynamiques peut généralement être limité aux deux modes propres fondamentaux les plus susceptibles de se coupler. Dans le cas de sections allongées comme les tabliers de ponts, ce sont les modes de flexion transverse et de torsion. Pour les sections très peu allongées, il s'agit des modes fondamentaux de flexion transverse et en ligne. Les efforts aérodynamiques généralisés peuvent alors être exprimés par :

$$F_\delta = C_1 (H_1 \delta / \omega + H_2 \theta / \omega + H_3 \theta + H_4 \delta) \quad (3)$$

$$F_\theta = C_2 (A_1 \delta / \omega + A_2 \theta / \omega + A_3 \theta + A_4 \delta)$$

où δ et θ sont les coordonnées généralisées du mouvement vibratoire

C_1 et C_2 sont des constantes, fonction de la géométrie de la section de la structure et de la vitesse du vent.

A et H sont les coefficients aéroélastiques bidimensionnels généralisés.

La connaissance des coefficients aéroélastiques est donc fondamentale pour prévoir des instabilités éventuelles ainsi que pour toutes prédictions de réponses vibratoires.

Les significations physiques des coefficients aéroélastiques sont :

— H_4 et A_3 sont les masses ou inerties aéroélastiques. S'ils sont négatifs, ils ajoutent de la masse à la structure et la fréquence propre baisse. S'ils sont positifs, c'est le contraire.

— H_1 et A_2 définissent les efforts en phase avec la vitesse de vibration des modes de flexion et de torsion respectivement. Quand ces coefficients sont positifs, l'écoulement apporte de l'énergie au système, sinon ils amortissent la structure. Par conséquent chacun de ces coefficients définit la stabilité du système pour le degré de liberté qui le concerne.

— Les quatre autres coefficients sont des termes de couplage entre les modes qui ne sont significatifs que s'il y a risque d'instabilités de couplage (le flottement classique dans le cas d'un couplage flexion-torsion).

Dans le cas particulier des tabliers de ponts, F_θ est le couple aérodynamique de torsion et θ l'angle de torsion et l'expérience [4] montre que :

— La masse ou raideur aéroélastique en flexion (H_4) est en général très faible et négligeable devant la masse de la structure.

— Les tabliers de pont modernes sont conçus pour avoir des fréquences propres fondamentales en flexion et en torsion très écartées. Dans ces circonstances, aucun couplage ne peut se produire et les termes de couplage aéroélastique peuvent être négligés. Une étude paramétrique montre que ces fréquences doivent être relativement proches ($0,75 < \omega_b / \omega_t < 1$ approximativement dans le cas le plus défavorable) pour qu'une instabilité de couplage puisse se produire.

— Il reste les termes d'amortissement (ou instabilité) en flexion (H_1) et en torsion (A_2). Le signe et la grandeur de ces coefficients dépendent fortement de la forme géométrique de la section du tablier. Seuls ces coefficients doivent toujours être connus pour prévoir les comportements aéroélastiques d'un pont.

III ■ LES CONDITIONS DE SIMILITUDES DES ESSAIS EN SOUFFLERIE

● 3.1. Généralités

La mesure des coefficients aéroélastiques sur des maquettes fait appel à des considérations de similitudes. Celles-ci s'appliquent aussi bien à l'écoulement qu'aux caractéristiques dynamiques de la structure. Il ne s'agit pas ici de faire une analyse complète de similitude aéroélastique [5], mais simplement de rappeler les conditions applicables aux structures élancées dans le vent. L'analyse aux dimensions impose en principe le respect des nombres de *Strouhal*, de *Froude* et de *Reynolds*.

$$\lambda = \frac{G_{\text{maquette}}}{G_{\text{réel}}}$$

En définissant le facteur d'échelle, λ , d'une grandeur G

comme : $\frac{G_{\text{maquette}}}{G_{\text{réel}}}$, les échelles à considérer sont :

λ_L : dimensions

$\lambda_{\rho f}$: masse volumique fluide

$\lambda_{\rho s}$: masse volumique structure

λ_w : fréquences

λ_v : vitesses dans le fluide

λ_p : pressions

λ_F : forces

● 3.2. Le nombre de Strouhal

Les phénomènes aéroélastiques sont étroitement liés aux paramètres fréquentiels. Le nombre de Strouhal ($S_t = fh / V$, avec V la vitesse du vent, h la hauteur de la structure face au vent et f la fréquence propre de la structure) doit donc être scrupuleusement respecté dans ce type d'étude.

● 3.3. Le nombre de Reynolds

Dans tous essais d'aérodynamique en soufflerie se pose la question du respect du nombre de Reynolds qui est une mesure du rapport entre les forces d'inertie du fluide et les forces de viscosité ($Re = \rho VL / \mu$). Ce nombre conditionne le caractère de l'écoulement turbulent, en particulier près et sur les parois qui le limitent.

En principe il faut rechercher une valeur de Re aussi voisine que possible de la réalité, mais en fait, il est généralement impossible de simuler correctement en soufflerie ce nombre pour des questions de respect d'échelles. Il existe toutefois des domaines de Re où le comportement de l'écoulement est à peu près invariant. Cela est particulièrement le cas pour des sections de structure qui présentent des angles vifs ou des discontinuités comme cela est souvent le cas dans le génie civil. On se borne alors à afficher une valeur telle que la dépendance des phénomènes par rapport à ce nombre soit faible dans la plage $Re_{\text{soufflerie}} < Re < Re_{\text{réel}}$.

Pour obtenir ce résultat on doit donc choisir les échelles λ_L , λ_r et λ_v aussi élevées que possible. Les limitations dans ce choix sont :

- λ_L est limité par les dimensions de la veine d'essais,
- λ_p est limité par la densité de l'air, même si dans certaines souffleries il y a possibilité de faire varier la pression génératrice,
- λ_v est limité par les effets de compressibilité, car on fait l'hypothèse de l'incompressibilité de l'air aux vitesses de vent qui intéressent les structures du génie civil (jusqu'à 100 m/s environ). Sinon, la limitation est encore plus forte car il faut respecter le nombre de Mach, donc $\lambda_v \approx 1$.

● 3.4. Le nombre de Froude

Le nombre de Froude décrit les effets de la gravité. En général son respect ne s'impose pas pour les problèmes dont il s'agit ici.

● 3.5. Choix des conditions de similitude

Si on prend comme facteurs d'échelle de base les conditions que peut imposer la soufflerie, comme par exemple la dimension, λ_L , la masse volumique λ_p et la vitesse du vent λ_v , on déduit en particulier :

$$\lambda_w = \lambda_v / \lambda_L, \lambda_p = \lambda_p \lambda_v^2, \lambda_{ps} = \lambda_{pf} \text{ et } \lambda_F = \lambda_p \lambda_v^2 \lambda_L^2.$$

La méthode d'essai choisie définit les paramètres de similitudes qui finalement s'imposent. La maquette dynamiquement semblable, par son principe même, nécessite le respect de tous les rapports dimensionnels. Dans le cas d'autres techniques de mesure où la maquette ne sert qu'à assurer les conditions aux limites spatio-temporelles de l'écoulement, seule la similitude des phénomènes aérodynamiques instantanés est recherchée.

IV ■ LES MÉTHODES D'ESSAIS PRÉVISIONNELS

● 4.1. Les approches

On peut dénombrer quatre méthodes d'essais différentes pour faire des prévisions du comportement aéroélastique dans le vent d'une structure élançée. Chacune a ses avantages et ses inconvénients.

La mesure du comportement de l'ensemble d'un ouvrage au moyen d'une maquette complète de la structure est séduisante car, par son principe, elle donne un résultat direct, mais elle comporte de nombreux pièges et souvent des impossibilités de simulation. Les prévisions au moyen des trois autres méthodes font appel à des calculs selon les équations 1 et 2. Bien entendu, les caractéristiques dynamiques de la structure réelle doivent être parfaitement connues dans tous les cas.

● 4.2. La maquette dynamiquement semblable

La maquette dynamiquement semblable reproduit, à l'échelle, le comportement aérodynamique et dynamique de l'ensemble de l'ouvrage. Il doit respecter à la fois les similitudes de forme, de répartition de la masse volumique et des modes propres (fréquences, déformées et amortissements). La réalisation d'une maquette dynamiquement semblable à très petite échelle est difficile. Cette difficulté réside principalement dans la nécessité du respect simultané de la conservation du rapport des masses volumiques et de la similitude des fréquences propres de structures. Mais pour certains types de structures, des techniques très sophistiquées de réalisation existent, même si elles sont fort coûteuses. La figure 1 [extraite de la référence 4] montre une telle réalisation pour un pont par le Boundary-Layer Wind Tunnel Laboratory de l'Université de Western Ontario.

1. Maquette dynamiquement semblable d'un pont au Boundary-Layer Wind Tunnel Laboratory de l'Université de Western Ontario.

Les maquettes dynamiquement semblables sont généralement à très petites échelles par rapport à la réalité, car les veines d'essai des souffleries sont petites devant les grandes structures du génie civil. Il faut donc veiller à ce que l'écart entre les nombres de Reynolds ne nuise pas à la qualité de la simulation aérodynamique. Mais si cette simulation est supposée satisfaisante, ces maquettes ont l'avantage de reproduire directement tous les comportements que l'on peut prévoir pour la structure. Toutefois, tous les rapports d'échelle sont fixés et on ne peut pas effectuer des études paramétriques pour déterminer les tendances par rapport aux propriétés dynamiques.

Enfin, par rapport à toutes les autres méthodes répertoriées ici, c'est la seule qui tienne parfaitement compte d'effets tridimensionnels éventuels car la forme complète de la structure est reproduite.

● 4.3. La méthode quasi-stationnaire

La méthode de prévision la plus simple fait appel à l'hypothèse de quasi-stationnarité. Cette hypothèse veut que la période de vibration soit beaucoup plus longue que le temps de passage d'une particule de vent sur la structure. Elle peut être considérée comme valable si le nombre de Strouhal de la structure dans le vent est très faible.

Si l'on admet cette hypothèse et s'il s'agit d'une structure qui peut être considérée comme bidimensionnelle, il suffit de connaître les coefficients aérodynamiques stationnaires de la

section de la structure pour obtenir certains coefficients aéroélastiques. En effet, ceux-ci sont alors simplement proportionnels aux dérivées des coefficients stationnaires :

$$\frac{dC_\delta}{d\alpha} \propto H_1 \propto H_3 \text{ et } \frac{dC_\theta}{d\alpha} \propto A_1 \propto A_3$$

où C_δ et C_θ sont les coefficients aérodynamiques stationnaires et α est l'angle d'incidence du vent

Du point de vue expérimental, il s'agit simplement de disposer d'une maquette rigide et bidimensionnelle fixée sur une balance à deux composantes (correspondant aux deux coordonnées δ et θ) et de mesurer les efforts aérodynamiques agissant sur la section en fonction de l'angle d'incidence. Seules les similitudes du nombre de Reynolds (dans la mesure du possible) et de la géométrie de la section sont à respecter.

Même si cette méthode a le mérite d'être simple, elle est très limitée. Dans la nature, la vitesse du vent est variable et ce ne sont pas obligatoirement les vents les plus forts qui sont les plus dangereux du point de vue du comportement vibratoire. Par exemple, cette méthode ne tient pas compte de comportements instationnaires réels de l'écoulement et ne peut prévoir la présence éventuelle d'un échappement tourbillonnaire.

Cette méthode permet des prévisions à moindres coûts qui sont certes incomplètes mais qui donne la possibilité de présélectionner des formes de section en fonction d'une propriété de stabilité.

● 4.4. La section rigide suspendue en similitude dynamique

Il s'agit d'une maquette bidimensionnelle rigide suspendue de façon à simuler les paramètres dynamiques d'une section de l'ouvrage (à l'échelle) et l'on étudie le comportement de la maquette dans le vent. A condition que la section soit représentative de l'essentiel de l'ouvrage, on peut extrapoler de la section rigide vers la structure complète.

Les paramètres de similitudes à respecter sont les mêmes que pour une maquette complète dynamiquement semblable, mais la réalisation d'une bonne simulation dynamique d'une section est néanmoins beaucoup moins difficile que pour une maquette complète car :

- l'échelle est beaucoup plus grande,
- les propriétés dynamiques sont réglées par la suspension et non pas par les caractéristiques dynamiques propres de la structure.

En général on étudie la suspension de ce type de maquette de façon à pouvoir facilement modifier les paramètres dynamiques. Au-delà de la simple simulation aéroélastique de la structure, ceci permet :

- d'estimer l'influence du nombre de Reynolds, et donc de s'assurer de la qualité de la simulation aérodynamique, en faisant varier la vitesse du vent tout en gardant la vitesse réduite constante.
- de mesurer certains coefficients aéroélastiques :
 - l'effet du vent sur les fréquences propres de vibration donne H_4 et A_3 ;
 - l'effet du vent sur l'amortissement de structure donne H_1 et A_2 .

Ces mesures sont relativement faciles à effectuer, par exemple au moyen de lâchers. On trouvera une analyse détaillée de ces mesures dans la référence [6].

La relative simplicité de cette méthode et son large potentiel prévisionnel font d'elle un outil très largement utilisé. La figure 2, comme la figure 1, en montre un exemple pour une section de pont au Boundary-Layer Wind Tunnel Laboratory de l'Université de Western Ontario [4].

2. Maquette rigide d'une section de pont suspendue dynamiquement au Boundary-Layer Wind Tunnel Laboratory de l'Université de Western Ontario

● 4.5. La mesure des coefficients aéroélastiques sur une maquette vibrante

Une maquette vibrante fait office d'instrument de mesure des coefficients aéroélastiques de la structure. Le comportement de la structure est ensuite calculé connaissant ses propriétés dynamiques. La maquette peut être une section bidimensionnelle [3] ou une forme tridimensionnelle [7].

Un des intérêts principaux de cette technique d'essai est le faible nombre de paramètres de similitude à respecter. En effet, des essais ayant pour but la mesure des forces aérodynamiques en écoulement considéré incompressible, comme c'est le cas ici, ne nécessitent le respect que de trois paramètres de similitude : la forme géométrique, le nombre de Strouhal et le nombre de Reynolds.

Afin qu'on puisse mesurer tous les coefficients aéroélastiques, la maquette doit être mise en vibration suivant les mouvements modaux de la structure réelle. Par exemple, dans le cas d'un tablier de pont, des mouvements en pompage (flexion du tablier) et en tangage (torsion du tablier) doivent être prévus. S'il s'agit d'une structure ayant une forme tridimensionnelle (par exemple une tour), la reproduction du mouvement modal peut s'avérer difficile. Dans ce cas on peut tenter d'approcher ce mouvement de déformation par des segments de droites. Pour chacun des modes de vibration imposés, on mesure les efforts aérodynamiques engendrés par le mouvement vibratoire, ainsi que les phases entre ce mouvement et les forces. Ces informations suffisent pour calculer les coefficients aéroélastiques qui correspondent aux fonctions de transfert : *force aérodynamique / mouvement vibratoire*.

Les forces instationnaires (aéroélastiques) sont obtenues à partir d'un nombre suffisant de mesures de pressions pariétales effectuées en divers points de la maquette pour obtenir les efforts par leur intégration en temps réel. Chaque pression est au préalable affectée d'un coefficient de position pour donner la composante de l'effort recherchée. La méthode suppose que chaque capteur mesure la pression moyenne sur l'élément de surface voisin.

Enfin, les fonctions de transfert entre les mouvements

Méthode	Avantages	Inconvénients	Remarques
Maquette complète dynamiquement semblable	<ul style="list-style-type: none"> • Similitude de comportement par rapport à la structure réelle • Prise en compte de toutes les formes de structure, notamment 3D 	<ul style="list-style-type: none"> • Très petite échelle • Étude paramétrique impossible 	À n'envisager que si aucune autre méthode n'est considérée satisfaisante
Quasi-stationnaire	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures simples sur balance aéro-dynamique stationnaire • Aucune similitude dynamique ou fréquentielle 	<ul style="list-style-type: none"> • Valable uniquement à très faibles fréquences • Ne reflète aucun phénomène instationnaire 	Peut être utile pour une première approche à moindre coût
Section rigide suspendue en similitude dynamique	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure des principaux coefficients aéroélastiques • Reproduit les comportements essentiels par rapport à la structure réelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Hypothèse d'une structure 2D • Ne mesure pas les coefficients de couplage entre modes de vibration 	Méthode la plus répandue
Mesure des coefficients aéroélastiques sur une maquette rigide vibrante	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure de tous les coefficients aéroélastiques • Possibilité d'analyses détaillées • Permet le catalogage des coefficients par forme de section et prévisions pour toutes structures 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures pratiquement possibles que sur des sections de type caisson • Reproduction de modes 3D souvent difficile 	La mesure la plus complète

Synthèse des avantages et des inconvénients des différentes méthodes.

vibratoires et les efforts donnent les coefficients aéroélastiques nécessaires à la prévision du comportement de la structure complète.

Cette méthode est puissante par son potentiel prévisionnel. En effet, elle est très riche d'enseignements car elle permet, par l'analyse des pressions, de remonter à l'origine des phénomènes indésirables éventuels. Par ailleurs, elle permet de faire des calculs pour une structure quelconque une fois les coefficients de sa section connus.

Il faut toutefois souligner une importante limitation. La technique de mesure fait l'hypothèse que l'on puisse mesurer les efforts aéroélastiques par intégration des pressions pariétales. Cela n'est pratiquement possible que sur des sections qui ont une forme de type caisson. Pour d'autres formes, tels des treillis, certains expérimentateurs utilisent des balances placées à l'encastrement de la maquette. Mais dans ce cas, les efforts inertiels de la maquette vibrante se confondent avec les efforts aéroélastiques et rendent très difficile, sinon impossible, une mesure suffisamment précise des coefficients aéroélastiques.

V ■ CONCLUSIONS

Les études en souffleries du comportement aéroélastique de structures du génie civil dans le vent peuvent être menées selon différentes méthodes. Aucune de celles-ci n'est universelle. Le choix de la méthode à adopter doit être adapté à chaque cas particulier de structure et de moyens d'essais.

L'approche quasi-stationnaire est la plus simple mais aussi la plus limitée. Elle permet au premier abord de rejeter des formes ou des caractéristiques dynamiques de structures a priori interdites.

À l'autre extrême, la maquette dynamiquement semblable paraît à première vue être la solution idéale car elle permet, en principe, de reproduire en soufflerie le comportement exact de la structure réelle. Toutefois, sa mise en œuvre, dif-

ficile à cause d'exigences de similitude et de dimensions de soufflerie, la rend souvent inapplicable. Par ailleurs, elle ne tolère que peu d'approximations car aucune étude paramétrique n'est possible pour étudier les tendances.

La maquette rigide bidimensionnelle suspendue pour simuler la dynamique de la structure est en général un bon compromis quand il s'agit de structures élançées qui ne présentent pas d'effets tridimensionnels importants. Cette technique est très largement utilisée.

Enfin, la mesure des coefficients aéroélastique sur des maquettes à mouvements vibratoires imposés est une approche puissante, que ce soit pour des structures bidimensionnelles ou tridimensionnelles. Mais la technique de mesure des efforts généralement employée, par intégration de pressions pariétales, limite cette méthode à des formes de structures du type caisson. Par ailleurs, la mise en vibration de maquettes ayant des formes tridimensionnelles reste souvent difficile et approximative.

Références

- [1]. AMANN O.H., VON KARMAN Th. and WOODRUFF G.B. - The failure of the Tacoma Narrows bridge. Report to the Federal Works Agency (USA) (1941).
- [2]. SCANLAN R.H. and TOMKO J.J. - Airfoil and bridge deck flutter derivatives. J. Eng. Mech. Div., ASCE, Vol 97 (1971)
- [3]. LOISEAU H. et SZECHENYI E. - Prévision et prévention des instabilités aéroélastiques des ponts à haubans. Colloque "Construire avec le Vent", CSTB, Nantes (1981).
- [4]. SIMIU E. and SCANLAN R. - Wind effects on structures: an introduction to wind engineering. John Wiley and Sons, 1978.
- [5]. DAT R. - La simulation aéroélastique. ONERA RT 010/5118RN.
- [6]. SARKAR P.P., JONES N.P. and SCANLAN R. - System identification for estimation of flutter derivatives. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44, 1992.
- [7]. SZECHENYI E. et PELEAU B. - Essais d'aéroélasticité et d'aérodynamique instationnaire sur une maquette d'Ariane 4. ONERA PV 2/3597 RY 200R, juillet 1984.