

Détermination des fonctions indicielles de l'effet rafale de structures élancées soumises aux effets du vent

Grégory TURBELIN

g.turbelin@cemif.univ-evry.fr

CEMIF - Université d'Evry Val d'Essonne

40 rue du Pelvoux, 91020 Evry cedex, France

Introduction

La constante amélioration des matériaux et des méthodes de calculs a rendu possible la maîtrise technologique de structures de génie civil de plus en plus légères et élancées. Mais, vu leurs dimensions, ces structures présentent l'inconvénient d'offrir une extrême sensibilité aux sollicitations extérieures et doivent, de ce fait, relever un défi majeur : résister au vent. En effet, dans la couche limite atmosphérique, qui est la partie de l'atmosphère située juste au dessus de la surface terrestre, les constructions sont des obstacles qui interagissent avec le vent : une construction agit sur le vent en modifiant localement sa vitesse et sa trajectoire et, réciproquement, le vent agit sur la structure en exerçant, sur ses parois, un champ de force fluctuant. Ces interactions dépendent à la fois de la nature de l'écoulement incident, de la forme de l'obstacle et de son environnement proche.¹ Aussi, pour étudier l'action dynamique du vent sur les constructions, *une modélisation préalable de la source d'effort engendrée par le vent est nécessaire*. Pour cela, l'idée d'utiliser un modèle mathématique s'est rapidement imposée et une nouvelle discipline est apparue : l'étude numérique de l'action du vent sur les structures (Computational Wind Engineering, ou CWE, en anglais). Cette discipline, qui s'appuie sur la théorie générale des écoulements turbulents, a pour objectif de représenter numériquement le vent à l'aide de techniques issues de la dynamique des fluides numérique (Computational Fluid Dynamic ou CFD). Notons que le vent se situe entièrement dans le régime des écoulements incompressibles, turbulents, à basse vitesse, et que les structures à traiter, non profilées, produisent localement des écoulements détachés. Dans ce travail, nous avons choisi d'utiliser les outils mis à notre disposition par CASTEM 2000 pour caractériser les efforts aérodynamiques induits par le vent sur des structures élancées, de type "tablier de pont". *Notre objectif est de calculer les fonctions indicielles de l'effet rafale de ce type de structures afin de mettre en évidence les limitations de l'approche quasi-statique, généralement utilisées pour représenter l'action du vent.*

1 Eléments de théorie

Pour étudier le comportement vibratoire d'une structure élancée, sous l'action du vent turbulent, l'approche quasi-statique, corrigée par l'utilisation de fonctions indicielles, permet de relier, dans le domaine des fréquences, les efforts turbulents aux fluctuations de la vitesse du vent. Cette méthode, issue de l'aéronautique, est basée sur un modèle linéarisé, où le sillage reste fixe, et donne de bons résultats pour un grand nombre de structures aérodynamiquement profilées [Scanlan (1995)]. Sous cette hypothèse, la portance induite par les fluctuations de vitesse du vent (rafales) est exprimée, dans le domaine

1. Dans le cas des constructions souples, si la structure est elle même en mouvement, des phénomènes aéroélastiques, comme le flottement, peuvent venir se rajouter aux précédents. Ces phénomènes complexes ne seront pas traités ici.

des fréquences sous la forme suivante :

$$\hat{F}_l^t(\omega) = \frac{1}{2}\rho U^2 B [2C_l(\alpha_0) \frac{\hat{u}_x(\omega)}{U} \hat{\Phi}'_{l_x}(\omega) + C_l'(\alpha_0) \frac{\hat{u}_z(\omega)}{U} \hat{\Psi}'_{l_z}(\omega)] \quad (1)$$

où “ $\hat{}$ ” désigne la transformée de Fourier, C_l et C_l' le coefficient stationnaire de portance et sa pente, B la largeur de la section, ρ la densité de l’air et U la vitesse moyenne incidente. La fonction $\hat{\Phi}_{l_x}$, associée aux fluctuations horizontales de la vitesse, est une fonction indicielle de type Wagner, la fonction $\hat{\Psi}_{l_z}$, associée aux fluctuations verticales de la vitesse, est *la fonction indicielle de l’effet rafale*, analogue à la fonction de Küssner de pénétration dans une rafale uniforme pour le cas d’un profil mince. Rappelons que, par définition, une fonction indicielle décrit la réponse transitoire d’un système à une sollicitation de type échelon. A partir de l’équation (1), et en négligeant les termes liés à la densité interspectrale, on obtient une expression qui relie, de façon simple, les spectres des forces aérodynamiques aux spectres des composantes turbulentes du vent :

$$S_{\hat{F}_l^t}(\omega) = \frac{1}{4}\rho^2 U^4 B^2 [4C_l^2(\alpha_0) \frac{S_{u_x}(\omega)}{U^2} \chi_{l_x}^2(\omega) + C_l'^2(\alpha_0) \frac{S_{u_z}(\omega)}{U^2} \chi_{l_z}^2(\omega)] \quad (2)$$

Cette expression fait apparaître les densités spectrales des composantes turbulentes u_x , u_z et les fonctions d’admittance aérodynamique, $\chi_{l_x}^2 = \hat{\Phi}'_{l_x}(\omega) \hat{\Phi}_{l_x}^{*\prime}(\omega)$ et $\chi_{l_z}^2 = \hat{\Psi}'_{l_z}(\omega) \hat{\Psi}_{l_z}^{*\prime}(\omega)$, similaires à la fonction de Sears dans le cas d’un profil mince (“*” désigne l’opérateur de conjugaison). Les modèles linéaires (1) et (2), qui expriment les efforts turbulents en fonction des fluctuations de vitesse de l’écoulement incident, supposent un sillage rectiligne. Ils ne sont donc pas adaptés aux structures non profilées. En effet, lorsqu’un écoulement aborde transversalement une telle structure, il décolle au niveau des arêtes vives et un sillage turbulent se forme. Ce phénomène, généré par la structure elle-même, induit une turbulence qui perturbe l’écoulement et modifie les efforts aérodynamiques. Puisque l’origine de cette turbulence se trouve au niveau du bord d’attaque de la structure, *on dit qu’elle est enveloppée par sa signature turbulente*. Il est important de connaître la limite de validité de l’approche quasi-statique. Pour cela, nous avons calculé la fonction indicielle de l’effet rafale de trois sections de référence : un profil d’aile NACA0012, une section rectangulaire et la section du tablier du pont de Normandie. Ceci nous a permis de mettre en évidence plusieurs comportements et d’identifier les cas où l’approche quasi-statique reste valable.

2 Approche numérique

Dans l’étude bidimensionnelle réalisée avec CASTEM 2000, le vent est assimilé à un écoulement de fluide incompressible régi, dans la couche limite atmosphérique, par les équations de Navier-Stokes moyennées. La turbulence est représentée à l’aide du modèle RNG $k - \varepsilon$. Ce modèle, que nous avons implanté dans CASTEM, est capable, de prédéterminer la variation du vent sur un site donné, de représenter des écoulements atmosphériques autour d’ouvrages et d’estimer les efforts instationnaires exercés par le vent [Turbelin (1999)]. Les domaines de calcul sont composés d’éléments de type QUAS. Leurs dimensions sont les suivantes : $4B$ en amont, $8B$ en aval, $4B$ en haut et en bas. Les maillages sont affinés près des parois. Les variables sont adimensionnées par rapport à la largeur du profil et par rapport à la vitesse de référence incidente U_0 . On se place dans le cas où l’écoulement est pleinement turbulent avec $Re = 8.10^6$. Afin d’initialiser les variables, un premier calcul est réalisé sans rafale. La vitesse longitudinale incidente est constante et égale à la vitesse de référence, l’intensité de la turbulence est de 2%, la

dissipation est exprimée en fonction de l'énergie et de la taille caractéristique des gros tourbillons. En haut, en bas, et en sortie, les conditions sont libres (contraintes totales nulles). Au niveau des parois de l'aile, la vitesse normale est nulle. La vitesse tangentielle, l'énergie cinétique et la dissipation sont calculées à l'aide de fonctions de paroi standards (cas lisse). Ensuite, une fois le régime permanent atteint, on soumet la section à une rafale uniforme de type échelon. *Soumettre une section à une rafale uniforme de type échelon, c'est porter brusquement la valeur de la vitesse verticale incidente de la valeur zéro à une autre valeur constante et laisser ensuite la perturbation se propager le long de la section.* La rafale utilisée a pour valeur $\frac{u_{z0}}{U_0} = 0,0875$ et correspond à un angle d'incidence effectif de 5° . Soumis à ce type de sollicitation, la portance évolue de façon transitoire avant d'atteindre un nouveau régime permanent. La forme de cette réponse caractérise la fonction indicielle. A l'aide d'une transformée de Fourier, on peut également calculer la fonction d'admittance aérodynamique.

3 Résultats

- Dans le cas du profil d'aile NACA0012, "corps aérodynamique profilé de référence", lorsque le profil rencontre une rafale, l'écoulement reste attaché aux parois et la portance évolue brusquement vers un nouvel état d'équilibre : on retrouve les résultats théoriques de Küssner et Sears.
- Dans le cas des sections rectangulaires, pendant la période transitoire, *la portance atteint une valeur maximale largement supérieure à la valeur définitive (dépassement indiciel)*, puis chute brusquement, passe par un minimum, avant d'atteindre la valeur établie. Plus l'épaisseur relative de la section est élevée, plus ce pic de portance est atteint rapidement et plus le dépassement indiciel est important. Au niveau des fonctions d'admittance, ceci se traduit par la présence d'une pulsation de résonance. Cette dernière est liée à la durée des transitoires, son amplitude est proportionnelle au dépassement indiciel.
- Après avoir examiné l'évolution des lignes de courant, nous nous sommes aperçus que *la forme de ces fonctions dépend explicitement de la formation de poches de décollement et de la présence de grosses structures tourbillonnaires en aval de l'obstacle* : dans le cas des sections profilées, lorsque l'écoulement ne décolle pas, il n'y a pas de signature turbulente, la réponse transitoire de la portance ne présente pas de dépassement indiciel (réponse hyperamortie), la fonction d'admittance traduit l'effet réducteur de dimension des rafales. Pour les sections non profilées, l'écoulement décolle, la signature turbulente est importante, des poches de recirculation se forment, des tourbillons s'échappent, la réponse transitoire de la portance présente de forts dépassements indiciels (overshoots), ce qui se traduit, au niveau de la fonction d'admittance, par la présence d'une pulsation de résonance.
- Dans le cas du tablier du pont de Normandie, les phénomènes de décollement et d'échappement tourbillonnaire restent limités, la portance évolue d'une valeur établie à une autre en passant par un maximum, légèrement supérieur à la valeur définitive et la fonction d'admittance reste proche de l'unité ou décroît tout en restant supérieure à la fonction de Sears. *Ce comportement est différent de celui des ailes d'avion sans pour autant correspondre à celui des sections rectangulaires.*

Conclusion

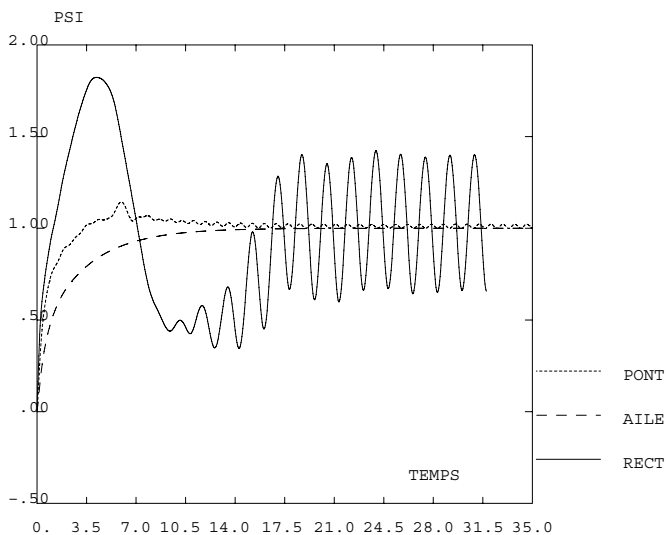
A partir de ces résultats, obtenus avec CASTEM 2000, il est possible d'identifier la présence de signatures turbulentes et de déterminer les limitations de l'approche quasi-statique. En effet, l'absence de dépassement indiciel traduit l'absence de signature turbulente. Dans ce cas, l'approche quasi-statique est valable avec la fonction de Sears comme

admittance. Tout dépassement indiciel traduit la présence de signature turbulente. Aussi, dès que l'on s'éloigne du cas idéal de l'aile, la fonction de Sears n'est plus valable. Pour les sections de pont aérodynamiquement profilées, pour lesquelles la signature turbulente reste faible, la valeur unité semble mieux adaptée. En présence de forts dépassements indiciels, les effets de la signature turbulente ne peuvent plus être ignorés. Dans ce cas, seule une approche globale permet de modéliser de façon "simple" les efforts aérodynamiques. Cette approche s'appuie sur l'utilisation des fonctions d'admittance modifiées telles que nous les avons calculées.

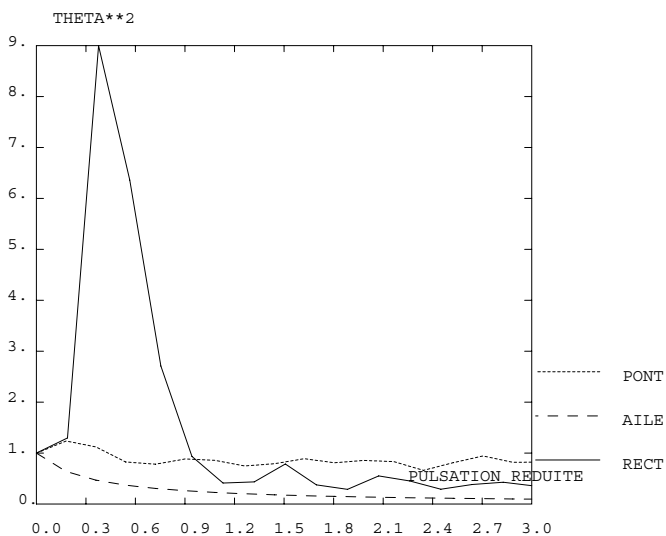
Références

Scanlan R.H. ; 1995, *Liens méthodologiques entre l'aéroélasticité des corps allongés en génie civil et l'aéroélasticité des avions*, Revue Française de Mécanique, No 1995-1

Turbelin G. ; 1999, *Modélisation de la turbulence atmosphérique en vue de l'étude de l'action du vent sur les structures. Choix d'un modèle de turbulence*, 14^{ème} congrès français de mécanique, Toulouse, France



FONCTIONS INDICIELLES



FONCTIONS D'ADMITTANCE

