

Reconstruction de séries temporelles représentatives du vent, application à l'excitation de structures

Version mise à jour le 12 juin 2008

Grégory Turbelin, Pierre Ngae, Michel Grignon

Laboratoire de Mécanique et d'Energétique d'Evry (LMEE)
40 rue du Pelvoux
91020 Evry Cedex

Résumé :

Pour modéliser l'action du vent sur les structures, on génère des signaux représentatifs du vent à l'aide d'un modèle semi-déterministe. Ce dernier est basé, d'une part, sur des réseaux de neurones artificiels, utilisant des données météo régionales, qui permettent de générer les fluctuations lentes, et d'autre part, sur un modèle classique de génération de processus stochastiques, utilisant des formules de densité spectrale empiriques, qui permet de générer les fluctuations turbulentes. Une procédure de vérification, basée sur la transformation en ondelettes continues, montre que seules les échelles de temps supérieures à 20000s (grandes échelles de temps) sont correctement reconstruites à l'aide des réseaux de neurones.

Abstract :

To compute wind action on structures, wind-speed time series are generated by using a semi-deterministic model. Artificial neural networks are used, with regional meteorological observations as input arguments, to generate the slowly varying wind speed component. Validation tests, using discrete wavelet transform, show that this model is only able to simulate time-scales larger than 20000s. So the turbulent wind speed fluctuations are generated, as stochastic processes, by using a traditional method which uses analytical power spectrum formula.

Mots clefs :

Action du vent ; réseau de neurones ; ondelettes ; turbulence

Introduction

Dans la région de l'atmosphère située juste au dessus de la surface terrestre, le vent est un écoulement d'air turbulent qui induit, sur les parois des obstacles qu'il rencontre, un champ de force fluctuant. Sous l'action de ces forces, une structure souple est soumise à des phénomènes vibratoires complexes qu'il faut prévoir dès le stade de la conception. La rapide augmentation des moyens de calcul a favorisé le développement de modèles numériques capables de représenter le comportement dynamique des structures soumises à des actions aléatoires, telle que celle de la turbulence du vent. Parmi ces modèles, on distingue ceux de type « computational wind engineering » [1], dans lesquels le vent est représenté à l'aide de modèles issus de la mécanique des fluides numérique, et ceux de type « intégration directe » [2], qui consistent à intégrer temporellement les équations de la dynamique des structures. Tous ces modèles permettent une étude approfondie de l'action aérodynamique du vent sur les structures. Mais ils nécessitent l'utilisation de signaux synthétiques représentatifs du vent sur le site d'implantation de l'ouvrage : pour définir la vitesse d'entrée, sur la partie amont du domaine de calcul, dans la première approche, pour définir le chargement, sur la structure, dans la seconde (le passage entre les vitesses et les forces nodales, générées par celles-ci, se faisant à l'aide de coefficients aérodynamiques mesurés en soufflerie).

Dans cet article nous proposons une méthode de génération semi-déterministe de signaux synthétiques, représentatifs du vent, qui exploite à la fois les mesures expérimentales effectuées sur le site considéré et les mesures issues des stations météorologiques se trouvant à proximité. *L'originalité de la méthode est qu'elle permet de représenter, à la fois, les fluctuations rapides de vitesses, caractéristiques de la turbulence générées localement, et les fluctuations plus lentes caractéristiques de mouvements atmosphériques de plus larges étendue.* Le site d'étude est situé à Evry (91), au sud de Paris, les stations de Météo France les plus proches sont celles d'Orly (94), Brétigny (91) et Melun-Villaroche (77).

1 Echelles de fluctuation du vent

L'activité humaine reste confinée dans le premier dixième de la couche limite atmosphérique, appelée couche de surface. Dans cette région, le vent est un écoulement d'air dont la vitesse, en un point donné de l'espace, présente de fortes variations plus ou moins irrégulières d'amplitudes et de fréquences différentes. En effet, l'écoulement de l'air est constitué d'une large gamme d'écoulements interdépendants caractérisés par leur extension horizontale et par leur durée de vie (ces deux paramètres étant fortement corrélés). Une analyse spectrale montre que l'énergie des fluctuations lentes (basses fréquences) est principalement concentrée près des périodes de 4 jours (variations associées aux perturbations qui traversent une région donnée) et 24 heures (variations journalières, transition jour-nuit). Pour les fréquences plus élevées (variations à court terme), l'énergie est concentrée autour de périodes de l'ordre de la minute et de la seconde. Ces périodes sont celles de la micro-turbulence générée par la rugosité des sols et par les obstacles locaux. Il faut également noter que pour les périodes comprises entre plusieurs minutes et quelques heures, il existe un « trou » d'énergie. La vitesse instantanée du vent, en un point M de l'espace, notée $\vec{u}(M, t)$, reflète la nature fluctuante du vent. On la décompose en une *partie déterministe* $\vec{U}(M, t)$ et en une *partie turbulente, aléatoire*, $\vec{u}'(M, t)$, soit :

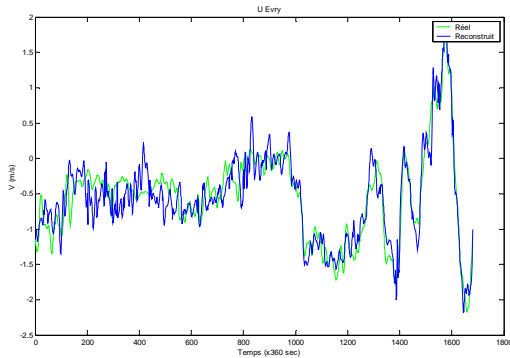
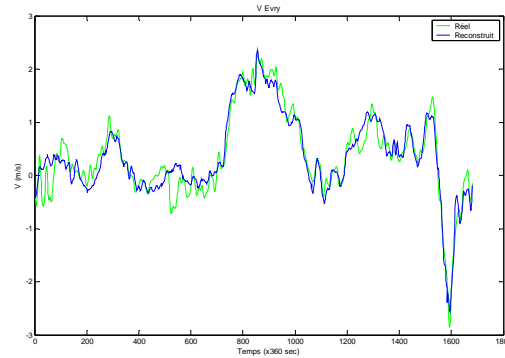
$$\vec{u}(M, t) = \vec{U}(M, t) + \vec{u}'(M, t)$$

La partie déterministe, qui fluctue lentement, traduit la « force » du vent en un point de l'espace. Elle varie avec la hauteur et dépend de la localisation du site. Les maxima de ces valeurs servent à calculer la charge « statique » que le concepteur retiendra lors du dimensionnement de la structure. La partie turbulente, appelée vitesse de rafale, est une fonction aléatoire qui représente les fluctuations turbulentes de la vitesse autour de la partie déterministe. Ces fluctuations sont successibles d'exciter les grandes structures de génie civil (dont les fréquences d'oscillation sont comprises entre 0,1 et 5 Hz). Chaque composante du champ stochastique $\vec{u}'(M, t)$ est décrite par son écart type (ou son taux de turbulence) et, d'une façon plus complète, par sa densité spectrale. Cette décomposition de la vitesse instantanée suppose implicitement que les fluctuations lentes sont essentiellement organisées et que le caractère aléatoire ne concerne que les fluctuations rapides. Aussi les premières, qui dépendent principalement de la localisation géographique du site, peuvent être reconstruites à partir des mesures effectuées dans les stations météorologiques les plus proches du site d'implantation. Pour cela, nous proposons d'avoir recours *aux réseaux de neurones artificiels (RNA) non récurrents* et de *vérifier leur efficacité à l'aide des propriétés temps-échelles des transformées en ondelettes continues*. On pourra ainsi définir la gamme de fluctuation que le modèle est apte à restituer. Les secondes, qui dépendent de l'environnement proche (nature du terrain, rugosité, topographie, présence d'obstacles naturels ou artificiels), mais aussi de la valeur prise par la partie déterministe, peuvent être *modélisées statistiquement, de façon plus classique*, leurs caractéristiques statistiques étant déterminées soit à partir de mesures effectuées sur la zone soit à partir de modèles empiriques disponibles dans la littérature.

2 Génération des vitesses à l'aide de réseaux de neurones

Pour reconstruire les fluctuations de vitesse du vent, on a recours aux réseaux de neurones artificiels (RNA) non récurrents. Pour une description détaillée de l'architecture utilisée le lecteur pourra utilement se référer à [3]. De façon générale, la modélisation à l'aide des RNA s'effectue en deux phases. La première est la *phase d'apprentissage* au cours de laquelle le réseau établit des relations entre ses entrées et ses sorties. Au cours de cette phase, on lui fournit des données pertinentes pour lesquelles les entrées et les sorties sont supposées corrélées. Une fois ces relations déterminées le réseau doit être en mesure de calculer l'évolution des sorties s'il dispose de nouvelles entrées. C'est la seconde phase, appelée *phase de validation*. Pour le cas présent, on désire faire apprendre à des réseaux de neurones le comportement dynamique du vent d'une région située

au sud de Paris. Les entrées des réseaux sont constituées des composantes horizontales du vent mesurées dans différentes stations de Météo-France (Orly, Brétigny et Melun-Villaroche) entourant le site d'étude. Les sorties sont les composantes horizontales du vent en un point test situé à Evry. Pour cela, le vent est représenté par ces projections suivant les axes Est-Ouest, notée $U(t)$, et Nord-Sud, notée $V(t)$. Deux RNA sont nécessaires pour déterminer les composantes d'Evry $U_e(t)$ et $V_e(t)$. Le tableau 1, présenté en annexe, récapitule leurs paramètres, dont le choix et l'optimisation ont été décrits par [3].

FIG. 1 – U_e mesurée et reconstruiteFIG. 2 – V_e mesurée et reconstruite

Les courbes présentées (figure 1) et (figure 2) représentent les signaux reconstruits et les signaux réels sur une semaine. On voit que les différents RNA arrivent à reproduire les perturbations grandes à moyennes. Il est donc indispensable de préciser les échelles convenablement représentées. De façon classique, l'efficacité de ces réseaux, à l'image d'autres modèles d'identification, est mesurée à l'aide d'un critère quadratique qu'il faut minimiser. Ce critère favorise, le plus souvent, la restitution des grandes fluctuations au détriment des petites. Cette distorsion devient préoccupante dès lors que l'on souhaite identifier un phénomène multiéchelle à l'image du vent. Aussi, puisque la seule considération d'un critère quadratique ne permet pas, à priori, de mesurer l'aptitude du modèle à restituer l'ensemble des échelles contenues dans un signal, nous proposons de mesurer cette efficacité à l'aide des propriétés temps-échelles des transformées en ondelettes continues. On pourra ainsi définir la gamme de fluctuation que le modèle est apte à restituer.

3 Validation du modèle par une analyse temps-échelle

La technique de transformée en ondelettes continues permet de mettre en évidence les caractéristiques d'un signal au cours du temps à une ou plusieurs échelles données [4]. Cet outil est adapté à la description des phénomènes transitoires, intermittents et multiéchelles. Afin de qualifier l'efficacité des réseaux (*phase de validation*) on calcule, à différentes échelles, la fonction de corrélation croisée en ondelettes [5] entre les spectres en ondelettes des signaux mesurés et prédits. On obtient ainsi, pour chaque échelle a , le déphasage τ_m , pour lequel le coefficient de corrélation croisée en ondelettes, $C(a, \tau)$, est maximum. Si les composantes des signaux sont ressemblantes, alors le déphasage relatif τ_m / T_a (où T_a est la fréquence de Fourier équivalente à l'échelle a) doit être faible tandis que le coefficient de corrélation maximal $C(a, \tau_m)$ doit être proche de 1. Dans la suite, les deux paramètres sont représentés sur un même graphique, on peut ainsi visualiser les échelles pour lesquelles on a une bonne ressemblance (entre signaux réels et signaux prédits) caractérisée, simultanément, par un fort coefficient de corrélation et un faible déphasage. Sur les résultats présentés (figure 3) et (figure 4), on voit que le RNA destiné à l'identification de la composante U_e du vent à Evry est performant lorsque les perturbations qu'il est sensé reproduire ont des périodes supérieures à 20000 secondes. En dessous de ce seuil, les spectres en ondelettes des signaux réels et prédits sont différents. Ceci est caractérisé par un faible niveau de corrélation maximale et/ou par un fort déphasage relatif. Ceci illustre, de façon quantitative, le phénomène déjà observé, de façon qualitative, sur les courbes représentant les évolutions temporelles : le modèle restitue convenablement les grandes alternances. La même analyse faite avec le RNA destiné à l'identification de la composante V_e du vent montre de bonnes performances également à partir des périodes supérieures à 20000 secondes. *Nous voyons que ce modèle, basé sur*

deux RNA, ne reconstruit correctement que les grandes échelles, qui correspondent aux fluctuations lentes, notées $\bar{U}(M, t)$, supérieures à 2000s.

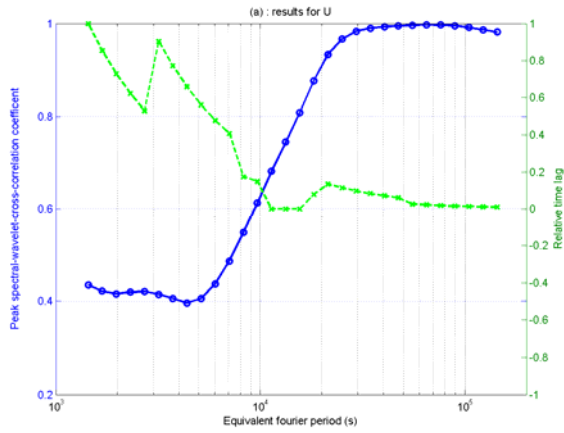


FIG. 3 – Évolution du coefficient maximum de corrélation spectrale croisée en ondelettes (-o-), et du déphasage relatif (--x--), en fonction de la période de Fourier équivalente (pour U_e)

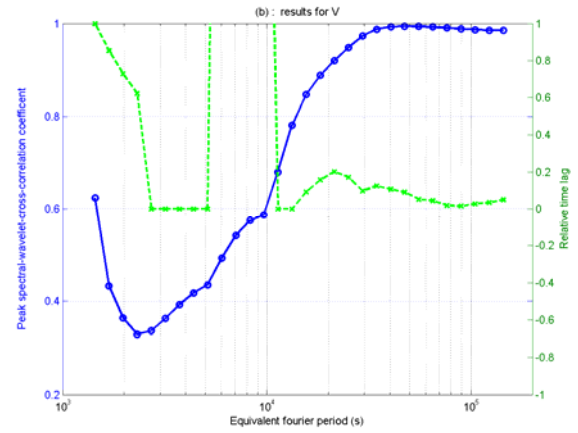


FIG. 4 – Évolution du coefficient maximum de corrélation spectrale croisée en ondelettes (-o-), et du déphasage relatif (--x--), en fonction de la période de Fourier équivalente (pour V_e)

4 Génération des fluctuations rapides

Les échelles de temps pour lesquelles le modèle précédent n'est plus valable correspondent approximativement au trou d'énergie évoqué dans la première partie. Sur ces périodes de temps, assez grandes pour englober un grand nombre de fluctuations turbulentes, mais suffisamment petites devant l'échelle des autres fluctuations, la composante déterministe horizontale conserve une direction constante, repérée par le vecteur \vec{i} , voir (figure 5-a), et ne varie qu'avec la hauteur :

$$\vec{U}(M, t) = U_h(z, t) \vec{i} \text{ avec } U_h(z, t) = \sqrt{U^2(z, t) + V^2(z, t)}$$

Notons que la détermination des intervalles de temps T sur lequel ces conditions sont vérifiées avec une certaine régularité, doit s'appuyer sur une analyse spectrale locale permettant de déterminer l'étendue du trou d'énergie. Dans ce cas, le champ stochastique $\vec{u}'(M, t)$, qui représente les fluctuations de haute fréquence, peut être représenté par un processus aléatoire gaussien, de moyenne statistique nulle, stationnaire du second ordre. Chaque composante de ce champ est caractérisée par sa densité spectrale de puissance $S_\varepsilon(n)$ ($\varepsilon = u', v', w'$) où n représente la fréquence. D'une manière générale, en l'absence de mesures expérimentales effectuées sur site, on trouve, dans la littérature, des expressions empiriques de ces fonctions. Nous utilisons ici celles données par [6], et utilisées par l'eurocode 1 [7]. Elles s'expriment, pour les fluctuations longitudinales (suivant \vec{i}) u' , latérales v' et verticales w' , sous la forme :

$$\frac{n S_\varepsilon(z, n)}{\sigma_\varepsilon^2(z)} = \frac{d_\varepsilon n L_\varepsilon(z) / \bar{U}_h(z)}{\left(1 + 1.5 d_\varepsilon n L_\varepsilon(z) / \bar{U}_h(z)\right)^{5/3}} \text{ avec } d_{u'} = 6.868, d_{v'} = d_{w'} = 9.434$$

On voit que ces fonctions dépendent des échelles longitudinales $L_\varepsilon(z)$ (qui caractérisent l'importance spatiale du phénomène), des écarts types des fluctuations $\sigma_\varepsilon(z)$ et de la vitesse horizontale moyenne $\bar{U}_h(z)$. Pour les terrains non complexes (ni très vallonnés, ni montagneux), tous ces paramètres varient avec la hauteur et dépendent principalement de l'intensité de la turbulence I_ε et de la rugosité locale, caractérisée par une échelle de longueur, notée z_0 , appelée longueur de rugosité. Ces grandeurs peuvent être évaluées, par identification, à partir de mesures de vitesses de vent, effectuées localement et sur les sites de

référence. Dans notre cas on trouve $z_0 = 0,75$ et $I_\varepsilon = 0,3$. Ces résultats sont en accord avec les valeurs caractéristiques des sites de type "banlieues urbaines".

En utilisant les formules données dans [6], et rappelées en annexe (tableau 2), on peut correctement estimer les fonctions précédentes. Les vitesses turbulentes sont alors construites sous forme d'une combinaison d'oscillations harmoniques, à phases aléatoires, obtenue par transformée de Fourier inverse d'un signal dont le spectre d'amplitude est connu (et obtenu par discrétisation de l'expression analytique) et pour lequel les phases sont tirées aléatoirement dans l'intervalle $[0, 2\pi]$. Puisque les écarts types des fluctuations, qui permettent de recalibrer les amplitudes des fluctuations, sont des fonctions croissantes de la vitesse déterministe, présentée (figure 5b), *notre modèle permet de prendre en compte l'influence de ces vitesses sur les caractéristiques de la turbulence*, comme le montre les (figures 5c, 5d, 5e). Notons, même si cette possibilité n'est pas illustrée ici, que cette technique permet également de générer, en N points de l'espace, des signaux corrélés spatialement.

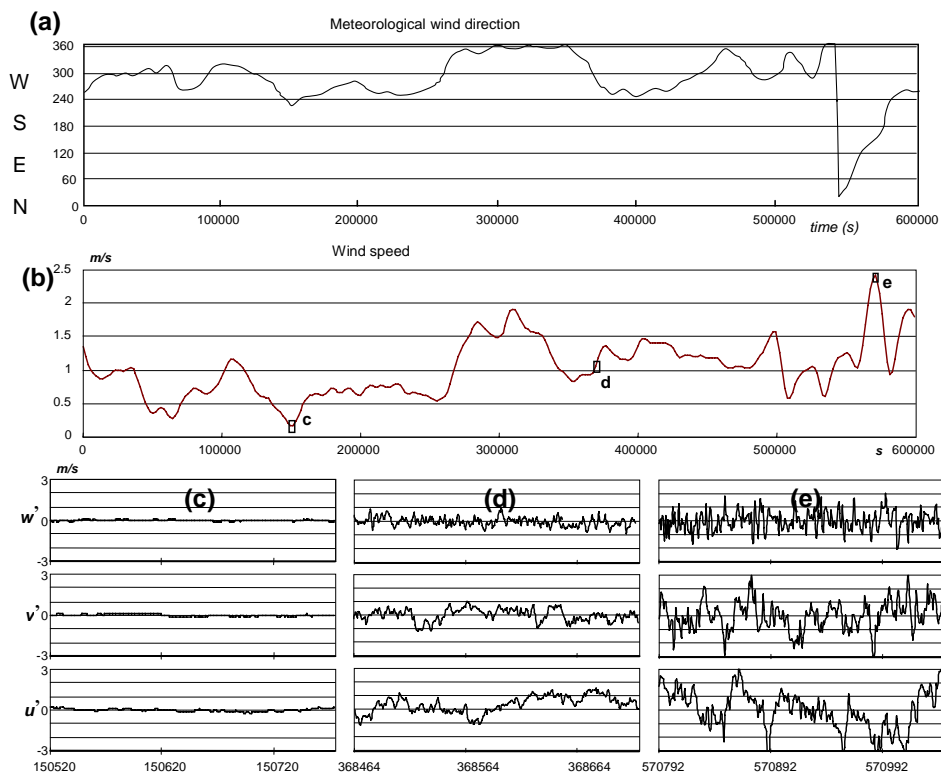


FIG. 5 – Direction (a), module (b) de la vitesse déterministe, et fluctuations rapides (1 Hz), générées, pour $\bar{U}_h = 0.16 \text{ ms}^{-1}$ (c), $\bar{U}_h = 1.01 \text{ ms}^{-1}$ (d), $\bar{U}_h = 2.41 \text{ ms}^{-1}$ (e).

Conclusion

Un modèle, basé sur les réseaux de neurones artificiels (RNA) non récurrents, a permis de générer, à Evry en zone périurbaine, des signaux temporels, représentatifs du vent, à partir de mesures effectuées dans les stations météorologiques de Météo France les plus proches du site. Une procédure de vérification, basée sur la transformation en ondelettes continues, a fixé la validité du modèle : seules les échelles de temps supérieures à 20000s (fluctuations lentes) sont correctement représentées. Aussi, pour déterminer les fluctuations rapides, un modèle classique de génération de processus stochastique gaussien, localement stationnaire, basé sur une description empirique de la turbulence, a été utilisé. Ce dernier prend en compte l'influence des valeurs déterministes sur les caractéristiques turbulentes et, superposé aux fluctuations lentes, permet de générer des signaux réalistes sur de longues périodes de temps. Une nouvelle campagne de mesure sera réalisée à l'aide d'un anémomètre sonique. Couplée à l'utilisation d'outils de transformée en ondelettes elle doit permettre d'améliorer l'identification et la modélisation des fluctuations turbulentes locales.

Annexes

	<i>RNA de U</i>	<i>RNA de V</i>
Fct. tfr. en entrée	<i>Linéaire</i>	
Fct. tfr. couche cachée	<i>Tangente Hyperbolique</i>	
Fct. tfr. en sortie	<i>Linéaire</i>	
Entrées (b pour Bretigny, o pour Orly, m pour Melun) k instant d'échantillonnage,	$Ub(k) \dots Ub(k-3)$ $Vb(k) \dots Vb(k-3)$ $Um(k) \dots Um(k-3)$ $Vm(k) \dots Vm(k-3)$ $Uo(k) \dots Uo(k-3)$ $Vo(k) \dots Vo(k-3)$	
Sortie (e pour Evry)	$Ue(k)$	$Ve(k)$
Nombre de neurones (couche cachée)	12	10

TAB. 1 – Paramètres des réseaux de Neurones pour les composantes U et V de la vitesse

Échelles longitudinales ($\varepsilon = u', v', w'$)	$L_\varepsilon(z) = 300 \lambda_\varepsilon \left(\frac{z}{200} \right)^{0.67+0.05 \ln(z/z_0)}$ avec $\lambda_{u'} = 1$ $\lambda_{v'} = 0.25 \lambda_{u'}$ $\lambda_{w'} = 0.1 \lambda_{u'}$.
Écart types des fluctuations	$\sigma_\varepsilon(z) = I_\varepsilon \bar{U}(z)$ et $I_{v'} = 0.75 I_{u'}$ $I_{w'} = 0.5 I_{u'}$

TAB. 2 – Caractéristiques des fluctuations turbulentes d'après [6]

Références

- [1] H. Noda, A. Nakayama, Reproducibility of flow past two-dimensional rectangular cylinders in a homogeneous turbulent flow by LES, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 91, 2003
- [2] M. Lazzari, A.V. Sietta, R. Vitaliani, Non-linear dynamic analysis of cable-suspended structures subjected to wind actions, Computers and structures, 79, 2001
- [3] N. Ba, Passage d'un modèle de connaissance régional à un modèle de connaissance local des vitesses et direction du vent, Thèse de doctorat de l'Université d'Evry Val d'Essonne, 2000
- [4] A. Kareem, T. Kijewski, Time-frequency analysis of wind effects on structures, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90, 2002
- [5] P. Ngae, M. Grignon, J.G. Poloniecki, A new convection velocity based on the wavelet decomposition of a thermal field, Int J Therm Sci, 38, 1999
- [6] G. Solari, G. Piccardo, Probabilistic 3-D turbulence modelling for gust buffeting of structures, Probabilistic Eng Mech, 16, 2001
- [7] European Prestandard, Eurocode 1-Actions on Structures, Part 1-4 General actions – wind actions, European Committee for Standardisation, 1996