

Abstract

Renewable energy is the new black. Countries all over the world are investing in renewable energy solutions in a bid to become sustainable. Wind energy is one of the major contributors to this green revolution with an annual increase of around 20%. Although this increase is indeed impressive, wind energy is still unable to compete against cheap fossil fuels. With current technologies, extracting energy (or torque) from the wind is difficult, intermittent and unpredictable in many respects. This unpredictability makes it - even now - a risky industry to invest in.

The European Union would like to reduce the uncertainties in wind resource assessment and forecasting to below 3% by 2030. If this is managed wind energy will be competitive. Among the wide range of multidisciplinary topics on wind energy technology, the European Technology Platform for Wind Energy identifies wind conditions as one of the key thematic areas for the development of future research activities in the sector. This term should encompass all of the relevant wind aspects that have an impact on the economic and technical feasibility of a wind farm deployment, notably: wind resource, turbulence characteristics (intensity, spectra as well as higher order statistics) and wind shear extremes.

A common way to evaluate the wind conditions of a test site is to place wind-measuring masts in the potential turbine locations. The potential power is then estimated with the combination of mast-based measurements, numerical engineering models and a significant portion of field experience. The latter is motivated mainly by the unreliability of the numerical models; models originally developed for mildly complex terrain under neutral atmospheric conditions.

In this dissertation we have made use of two such atmospheric wind measurement campaigns from two very topographically different nest sites: the German Growian experiment in a near homogenous terrain setting and the French Ersa wind park experiment where measurements were taken from within a wind farm on top of a mountain in Corsica. Both sites are subject to convective sea breezes

and both exhibit wind shear distributions where even coarse time-scale extremes are much more frequent than those previously predicted by Gaussian distributions. These frequent intermittent bursts are the major source of wind energy's unpredictability and the reason there are mechanical overloads, deviations from expected power production and large short-time power fluctuations.

From the governing equations of the velocity field, one can not only expect a (highly) non-Gaussian wind but also one that is scaling. By scaling we mean a given (statistical) self-similarity; a turbulent cascade of eddies. Stochastic multifractals (with multiple singularities and co-dimensions) easily reproduce the scaling, heavy-tailed probabilities that are ubiquitous with the wind and essential to quantify for the wind energy community. The few parameters that define these models can be derived either from theoretical considerations or from statistical data analysis.

For multifractal data analyses, the main aim is to determine the statistics of the velocity shears. It is sometimes possible to do this with the universal multifractal (UM) parameters: α - the index of multifractality ($0 \leq \alpha \leq 2$), C_1 - the co-dimension of the mean intermittency ($C_1 \geq 0$) and H - the degree of non-conservation. The latter of the three parameters is often called the Hurst exponent. We inter-compare the results from the rather standard method of empirical estimation of the UM parameters, the Double Trace Moment (DTM) method, with that of the Double Structure Function (DSF), a newly developed method.

We found that flux proxies based on the modulus of the wind velocity shears yield non-scaling statistical moments and therefore spurious multifractal parameter estimates. DSF does not require this proxy approximation thus providing parameters that describe the non-linearity of the structure-function to an extent. We found no truly stable estimate of alpha using standard methods. Moreover, the apparent agreement of the departure of the semi-analytic function with that of the empirical at the theoretically predicted order for a finite sample is not linear, contradictory to the classical UM theory.

This no longer occurs when we locally optimise (by fractionally differentiating) the DTM scaling behaviour. We then obtain very stable estimates of the multifractality index that are furthermore consistent (smaller than two) with other literature. On the contrary, the two other parameters (C_1 and H) become non-

linear functions of the order q of the statistical moments. These results suggest that the isotropic UM model cannot be used to reproduce the velocity shears in the atmospheric surface-layer.

To investigate the above hypothesis we use a rotated frame of reference to analyse the anisotropy of the horizontal velocity in the atmospheric surface-layer. This enables us to quantify the angular dependency of a Hurst exponent. Despite being anisotropic the Hurst exponent is consistent with other surface-layer literature. For time-scales above a few seconds, both data exhibit a strong, scaling anisotropy that decreases with height. We put forward an analytical expression for the angular variation of the Hurst exponent based on the correlation of the horizontal components. It determines the generation of wind shear extremes, including those in the wake of a turbine. We find that the turbulent wind shears are so extreme that their probability distributions follow a power law. The corresponding exponent (q_D) is rather the same in both sites at 50m heights ($4 \leq q_D \leq 5$), inspite of very different orographic conditions. We also discuss its consequences when analysing the stability of the atmospheric boundary-layer and propose a new method for its classification.

Finally, we analytically demonstrate that anisotropy increases the extremes' probability. This finding reveals one of the many possible turbulence mechanisms in the atmospheric surface-layer that may seemingly over-generate wind shear extremes if they are studied in an isotropic UM framework. We theoretically analyse the consequences of this on the UM estimates for the DTM method. The obtained analytical results fully support empirical findings. We then discuss how to take into account all of these considerations when simulating multifractal fields of the wind in the atmospheric boundary-layer. The overall results of this dissertation go beyond wind energy, they open up new perspectives for the theoretical predictions of extremes in the general case of strongly correlated data.

Keywords

wind energy, atmospheric turbulence, multifractal intermittence, surface-layer stability, anisotropy, extremes

Résumé

Les énergies renouvelables sont à la mode. Partout dans le monde les pays investissent dans ces énergies pour devenir durables. Avec une croissance annuelle d'environ 20%, l'énergie éolienne est un des principaux acteurs de cette révolution verte. Bien que cette augmentation soit impressionnante, l'énergie éolienne ne parvient toujours pas à être compétitive face aux combustibles fossiles bon marché. Avec les technologies actuelles, extraire l'énergie du vent est difficile, intermittent et imprévisible à bien des égards. Cette imprévisibilité fait de l'énergie éolienne - même maintenant - un investissement risqué.

L'Union européenne voudrait réduire les incertitudes à moins de 3% à l'horizon 2030 dans l'évaluation et la prévision des ressources éoliennes. Cela permettrait à l'énergie éolienne d'être enfin compétitive. Parmi la vaste gamme de sujets pluridisciplinaires sur la technologie éolienne, la Plate-forme Technologique européenne pour l'énergie éolienne identifie 'les conditions du vent' comme une des thématiques clés pour le développement des futures activités de recherche dans le domaine. Ce terme devrait englober tous les aspects du vent qui ont un impact sur la faisabilité économique et technique d'un parc éolien, notamment: la ressource, les caractéristiques de turbulence et les cisaillements extrêmes.

Un moyen classique d'évaluation du potentiel éolien sur un site choisi consiste à installer des mâts météorologiques dans les emplacements potentiels d'éoliennes. Dans cette thèse, nous avons exploité des mesures de vents atmosphériques réalisés pendant deux campagnes sur deux sites topographiquement très différents: Growian en Allemagne sur un terrain à peu près plat, et le parc éolien Ersa, où les mesures ont été prises entre les éoliennes situées au sommet d'une montagne en Corse (France). Les deux sites sont soumis à des brises de mer convectives et présentent des distributions de cisaillement où même à basse résolution les extrêmes sont plus fréquents que ceux précédemment prévus avec des distributions Gaussiennes. Ces fréquentes poussées intermittentes de vent sont la principale cause de l'imprévisibilité de l'énergie éolienne et la raison sous-jacente

aux surcharges mécaniques, aux écarts entre production d'énergie attendue et mesurée, ainsi qu'aux fluctuations importantes de puissance sur de courtes durées.

A partir des équations gouvernant le champ de vitesse, on peut non seulement s'attendre à un vent (fortement) non-gaussien, mais aussi à un vent présentant un comportement scalant. Par scalant' ou invariant d'échelle, nous faisons référence à un comportement statistique auto-similaire particulier; les cascades de tourbillons. Les multifractales stochastiques (avec des singularités et des co-dimensions multiples) reproduisent facilement le comportement scalant et les distributions de probabilités à queues épaisses omniprésentes dans le vent et dont la quantification est essentielle pour la communauté. Les quelques paramètres qui définissent ces modèles peuvent être déduits soit de considérations théoriques, soit de l'analyse statistique de données.

Il est parfois possible de caractériser les statistiques de cisaillement du vent à l'aide des paramètres des multifractals universelles (UM) : α - l'indice de multifractalité ($0 \leq \alpha \leq 2$), C_1 - la co-dimension de l'intermittence moyenne ($C_1 \geq 0$) et H - le degré de non-conservation. Le dernier des trois paramètres est souvent appelé exposant de Hurst. Nous comparons les résultats issus des estimations empiriques des paramètres UM via la méthode plutôt standard du Double Moment Trace (DTM), avec celle nouvellement développée de la Double Fonction de Structure (DSF).

Nous avons constaté que les approximations de flux basées sur le module du cisaillement du vent donnent des moments statistiques non-scalants et donc des estimations faussées des paramètres multifractals. La méthode DSF n'exige pas cette approximation et garantit un comportement scalant sur une certaine gamme d'échelles. Nous n'avons trouvé aucune estimation véritablement stable de α en utilisant des méthodes standards. Ceci n'arrive plus quand nous optimisons localement (par la différenciation fractionnaire) le comportement scalant du DTM. Nous obtenons alors des estimations très stables de l'indice de multifractalité qui sont en outre en accord ($\alpha \leq 2$) avec des résultats publiés. Au contraire, les deux autres paramètres (C_1 et H) deviennent des fonctions non-linéaires de l'ordre q des moments statistiques. Ces résultats suggèrent que le modèle UM isotrope ne peut être utilisé pour reproduire le cisaillement de vent dans la couche de surface atmosphérique.

Lesdites hypothèses sont examinées en utilisant un repère tournant pour analyser

l'anisotropie de la vitesse horizontale dans la couche de surface atmosphérique. Cela permet de quantifier la dépendance angulaire de l'exposant de Hurst. Les valeurs de cet exposant restent tout de même conformes aux résultats précédemment publiés. Pour des échelles de temps supérieures à quelques secondes, les deux jeux de données présentent une anisotropie scalante forte, qui décroît avec l'altitude. Nous mettons en évidence une expression analytique de la variation angulaire de l'exposant de Hurst, reposant sur les corrélations entre les composantes horizontales. Ceci pilote la formation des extrêmes du cisaillement, y compris dans le sillage d'une éolienne. Les cisaillements turbulents du vent sont si extrêmes que leur loi de probabilité est une loi de puissance. L'exposant correspondant (q_D) est similaire pour les deux sites à une hauteur de 50m ($4 \leq q_D \leq 5$), malgré des conditions orographiques très différentes. Nous discutons aussi de ses conséquences en analysant la stabilité de la couche limite atmosphérique et proposons une nouvelle méthode pour sa classification.

Enfin, nous démontrons analytiquement que l'anisotropie augmente la probabilité des extrêmes. Ce résultat met en lumière un des nombreux mécanismes de turbulence possibles dans la couche de surface qui peut apparemment surproduire les cisaillements extrêmes du vent, s'ils sont étudiés dans le cadre des UM isotropes. Nous en analysons théoriquement les conséquences sur les estimations des paramètres multifractales par la méthode DTM. Les résultats analytiques obtenus sont en parfait accord avec les observations empiriques. Nous discutons alors de la prise en compte de toutes ces considérations pour faire des simulations multifractales des champs du vent dans la couche limite atmosphérique.

Les résultats de cette thèse vont au-delà de la question de l'énergie éolienne. Ils ouvrent de nouvelles perspectives sur les prévisions théoriques d'extrêmes dans le cas général de données fortement corrélées.

Mots Clés

énergie éolienne, turbulence atmosphérique, intermittence multifractale, stabilité de la couche-limite, anisotropie, extrêmes