



**TURBULENCE ET INTERMITTENCE DANS LES
ENERGIES MARINES : MESURES A HAUTE FREQUENCE
EN LABORATOIRE DE LA RELATION ENTRE PUISSANCE
PRODUITE PAR UNE HYDROLIENNE ET TURBULENCE**

***TURBULENCE AND INTERMITTENCE IN MARINE
ENERGY: LABORATORY MEASUREMENTS AT HIGH
FREQUENCY, RELATIONSHIP BETWEEN MARINE
CURRENT TURBINE AND TURBULENCE***

O. DURAN MEDINA¹, F. G. SCHMITT², R. CALIF³, B. GAURIER⁴, G. GERMAIN⁴.

¹ Université Lille 1, Laboratoire LOG UMR 8187, 28 av Foch, 62930 Wimereux

² CNRS, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, UMR 8187 LOG, 28 av Foch, 62930 Wimereux

³ Laboratoire LARGE, Université des Antilles Guyane, Fouillole BP 250, 97157 Pointe-à-Pitre

⁴ IFREMER, Laboratoire Comportement des Structures en Mer, Centre Manche-Mer du Nord, 150 quais Gambetta, BP 699, 62200 Boulogne-sur-Mer

olmo.duran-medina@etudiant.univ-lille1.fr

Résumé

A partir de données à haute fréquence acquises pendant une longue période de temps, on cherche à déterminer les différentes caractéristiques de l'écoulement généré au bassin d'essais à houle et courant d'IFREMER à Boulogne-Sur-Mer. Ces données mesurées avec un système LDV permettent de caractériser la turbulence et les fluctuations de la vitesse du courant incident. Les conditions contrôlées du bassin et les longues périodes d'acquisition du système LDV nous donneront une bonne estimation des différentes caractéristiques de l'écoulement tels que la dissipation, le nombre de Reynolds, les échelles d'injection, de Taylor et de Kolmogorov. Dans un deuxième temps nous étudions les effets de la turbulence de l'écoulement sur le comportement d'une hydrolienne tri-pale à axe horizontal.

L'objectif est de placer la maquette d'hydrolienne dans cet écoulement et étudier l'influence de la turbulence sur le rotor de cette turbine. La vitesse de l'écoulement est imposée et deux taux de turbulence différents ont été étudiés.

Summary

From measurements obtained at high level frequency over a long period of time, we aim to determine the different characteristics of the flow situated in the IFREMER (French Research Institute for Exploration of the Sea) wave and current flume tank in Boulogne-Sur-Mer. This

data measured with a LDV (Laser Doppler Velocimetry) allows to get the characteristics of turbulence and the incident velocity fluctuations. The well-controlled conditions in the flume and the high sampling frequency of LDV system will give us a good estimate of the different flow characteristics such as dissipation, the Reynolds number, the injection scales, Taylor and Kolmogorov. The objective is to place the marine current turbine in this flow and then to study the influence of turbulence on the rotor of this turbine. The flow velocity is imposed and two different rates of turbulence are analysed.

I – Introduction

Dans le contexte de la transition énergétique, l'énergie éolienne et hydrolienne sont des sources d'énergie potentielles pour satisfaire partiellement la demande croissante. Le principal problème de ce type d'énergie, qu'elle partage avec d'autres types d'énergies renouvelables, demeure la variabilité de la puissance électrique produite à différentes échelles, amenant à de fortes variations, appelées « intermittence ». Cette intermittence de l'énergie éolienne et hydrolienne est intrinsèquement liée à la nature turbulente du vent [7,8] et des courants [5, 9,10]. Nous considérons ici cette intermittence de la production en relation avec l'intermittence turbulente de la ressource. Le cadre théorique est celui des cascades d'énergie multifractales, cadre devenu classique en physique de la turbulence.

Nous présenterons tout d'abord le dispositif expérimental utilisé et les caractéristiques des bases de données utilisées. La caractérisation de l'écoulement généré en bassin permettra in fine d'aborder les différents paramètres caractéristiques utilisés dans cette étude. Les résultats permettant de corrélérer les fluctuations de puissance générée par une hydrolienne tri-pales à axe horizontal aux fluctuations de l'écoulement incident seront ensuite présentés.

II – Dispositif expérimental

Les essais ont été réalisés au bassin à houle et courant de l'IFREMER comportant une longueur utile de 12 m et une section d'essais de 4 m de large par 2 m de profondeur [5]. Un écoulement homogène présentant un taux de turbulence de 3 à 15 % peut y être généré dans une gamme de vitesse de 0,1 à 2,2 m/s. Dans cette étude, deux taux de turbulence de l'écoulement amont ont été considérés, 3 et 15 %, pour une vitesse de 0,8 m/s durant une période d'acquisition de 3h. Le taux de turbulence I_∞ en amont est défini par :

$$I_\infty = 100 \sqrt{\frac{\frac{1}{3} [\sigma^2(u_\infty) + \sigma^2(v_\infty) + \sigma^2(w_\infty)]}{u_\infty^2 + v_\infty^2 + w_\infty^2}} \quad (1)$$

où les composantes de vitesse u_∞ , v_∞ , w_∞ , correspondent à la vitesse incidente U_∞ .

Une maquette d'hydrolienne tri-pales à axe horizontal de 70 cm de diamètre réglée en vitesse de rotation, a été utilisée pendant ces essais. La mesure de couple est directe grâce à l'utilisation d'un couplemètre rotatif inséré entre le rotor et le système de régulation de vitesse. Les résultats de mesures présentés dans cette étude ont été obtenus pour le point de fonctionnement nominal de la turbine à TSR = 4 [5].

Le TSR (Tip Speed Ratio) correspond au rapport entre la vitesse en bout de pale de l'hydrolienne et la vitesse du courant incident :

$$TSR = \frac{|\Omega_x| R}{U_\infty} \quad (3)$$

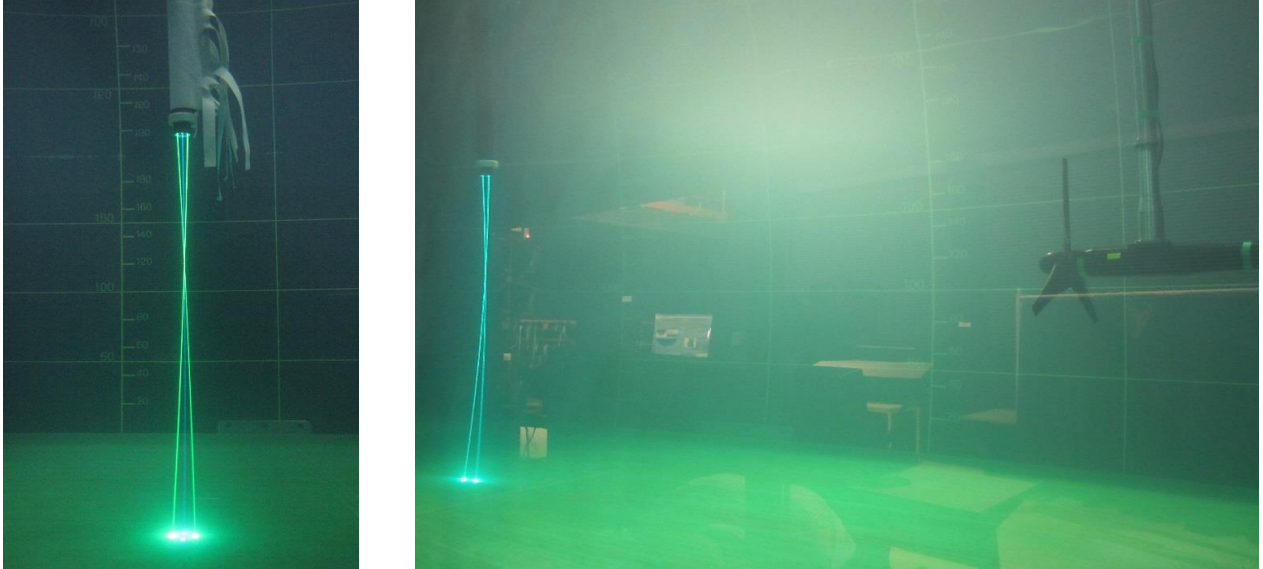


Figure 1: Montage du dispositif expérimental, les mesures de courant réalisées par le système LDV sont effectuées en amont d'une maquette d'hydrolienne située à une distance de 4 fois son diamètre D.

Un système de mesure 2D par vélocimétrie laser à effet Doppler (LDV) a été utilisé pour mesurer les caractéristiques de l'écoulement incident mais également de l'écoulement dans le sillage émis par la machine à une distance égale à 4 fois le diamètre de l'hydrolienne D. Les mesures LDV et de puissance générée par l'hydrolienne sont synchronisées, la fréquence d'acquisition des performances de la turbine étant effectuées à une fréquence de 100 Hz alors que celle des mesures LDV étant de l'ordre de 800 Hz. Des mesures de longue durée (3h) ont été effectuées pour constituer une base de données permettant d'accéder aux caractéristiques prises de l'écoulement. Les mesures LDV sont réalisées dans le plan x0y, le taux de turbulence correspondant est défini par :

$$I_\infty = 100 \sqrt{\frac{\frac{1}{2} [\sigma^2(u_\infty) + \sigma^2(v_\infty)]}{\overline{u_\infty}^2 + \overline{v_\infty}^2}} \quad (2)$$

Une contrainte majeure de la mesure LDV est l'irrégularité du temps d'acquisition, en effet la vitesse du courant est calculée pour chaque particule traversant le volume de mesure créé à l'intersection de deux faisceaux lasers. Nous allons mettre en place des méthodes permettant de tenir compte de ces contraintes. On s'intéressera dans un premiers temps à l'estimation de la dissipation afin d'estimer ensuite les différentes caractéristiques de l'écoulement (nombre de Reynolds, échelles d'injection, de Taylor, de Kolmogorov). La synchronisation des mesures LDV et de puissance générée nous permettra enfin d'étudier le fonctionnement de l'hydrolienne dans cet écoulement.

III – Caractérisation de l'écoulement incident et de la turbulence

III – 1 Caractérisation de la turbulence

Nous nous plaçons dans le cadre de la turbulence homogène et isotrope (Frisch 1995). Dans ce contexte, on suppose que la densité spectrale d'énergie va suivre pour certaines fréquences la décroissance en $-5/3$ de Kolmogorov (Kolmogorov 1941, Obukhov 1941). La valeur ϵ est calculée à partir du spectre de la vitesse du courant avec l'hypothèse d'une isotropie locale. On peut ainsi appliquer l'équation de Kolmogorov pour un fluide turbulent [1] :

$$E(k) = C\epsilon^{2/3}k^{-5/3} \quad (4)$$

où $E(k)$ est l'énergie, $C=1,5$ est une constante et k est le nombre d'onde. V_0 étant la valeur moyenne du courant, on relie $k = \frac{2\pi}{l}$ à la fréquence $f = \frac{1}{T}$ via $V_0 = \frac{l}{T} = lf$:

$$k = \frac{2\pi}{l_0} = \frac{2\pi f}{V_0} \quad (5)$$

Ceci permet de remplacer le nombre d'onde k par la fréquence f dans la relation (4). On peut alors utiliser ceci pour déterminer ϵ suivante par la relation [2] :

$$\epsilon = \left(\frac{C_0}{C}\right)^{3/2} \left(\frac{2\pi}{V_0}\right)^{5/2} \quad (6)$$

où C_0 est la constante multiplicative devant la loi de puissance $E(f) = C_0 f^{-5/3}$ (figure 2). Ici, nous rencontrons le problème de l'irrégularité des temps de mesure, une caractéristique intrinsèque des données LDV. La méthode classique pour estimer le spectre, la méthode FFT (Fast Fourier Transform) demande en effet un échantillonnage régulier.

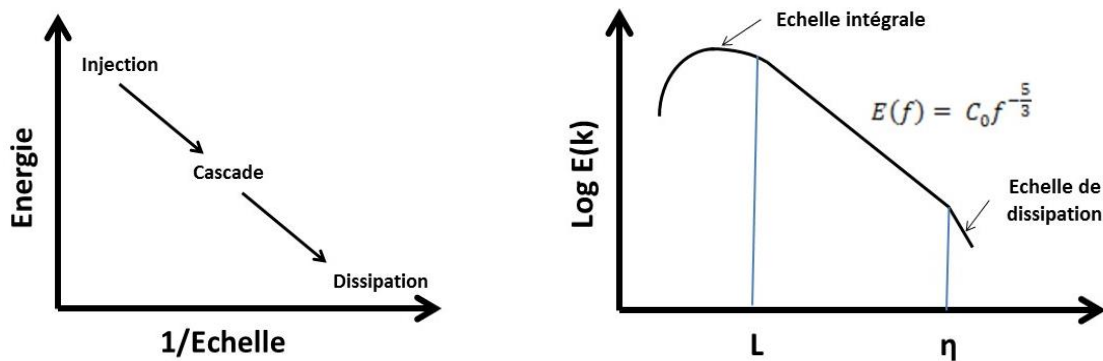


Figure 2: Schéma de la cascade d'énergie de Kolmogorov-Richardson

III- 2 Méthode de traitement.

Nous évaluons tout d'abord la densité de probabilité des temps entre deux mesures de courant (LDV). La figure 3 représente cette PDF en échelle log-lin. Celle-ci suit une loi exponentielle. On constate que si $p(x)$ est la densité de probabilité des inter-temps, la loi suivante est extrêmement bien respectée :

$$p(x) = Ae^{-bx} \quad (7)$$

où $p(x)$ est la densité de probabilité des inter-temps avec $A=0.33$, $b=1.15$ pour le cas « 3% » et $A = 0.34$, $b=0.93$ pour le cas « 15% ». Cette loi correspond à une distribution de Poisson des particules dans un écoulement turbulent.

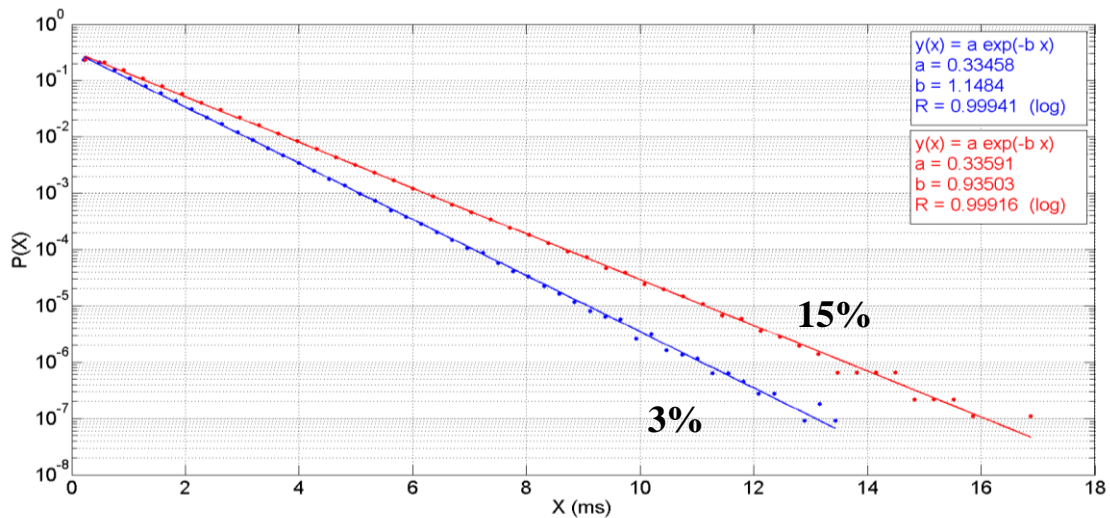


Figure 3: Représentation des PDF des inter-temps pour le cas à 3% et à 15%.

On réalise ensuite deux interpolations distinctes, linéaire et cubique, afin d'obtenir un pas de temps régulier nécessaire pour appliquer une transformée de Fourier (FFT). La fréquence d'échantillonnage « f_s » a été choisie afin d'obtenir le même nombre de points de la série temporelle acquise dans le bassin, dans le cas présent $f_s = 892$ Hz qui coïncide bien avec l'intervalle de la fréquence d'acquisition propre au système LDV, c'est-à-dire entre 800 et 900Hz. Une comparaison des spectres du courant U (m/s) résultants de deux interpolations vérifie la superposition des courbes (figure 4) sauf pour les hautes fréquences où il y a une différence entre les deux méthodes. Le choix de la méthode d'interpolation a donc peu d'influence sur la loi de puissance que nous cherchons à établir. On constate une très bonne superposition de deux méthodes, montrant que l'interpolation effectuée est suffisante pour l'estimation de la dissipation.

III-3 Estimation des différents paramètres.

On estime ainsi les spectres (figure 4). L'ajustement de la portion invariante d'échelle avec une loi en $-5/3$ permet d'estimer la constante C_0 . A partir de l'estimation de C_0 et de l'équation (6), on est capable de calculer les différentes caractéristiques de l'écoulement telles que la dissipation, le nombre de Reynolds, les échelles d'injection, de Taylor et de Kolmogorov.

Ces coefficients C_0 obtenus sont $C_{01} = 6,8207 \cdot 10^{-05}$ et $C_{02} = 1,6843 \cdot 10^{-03}$ (figure 4).

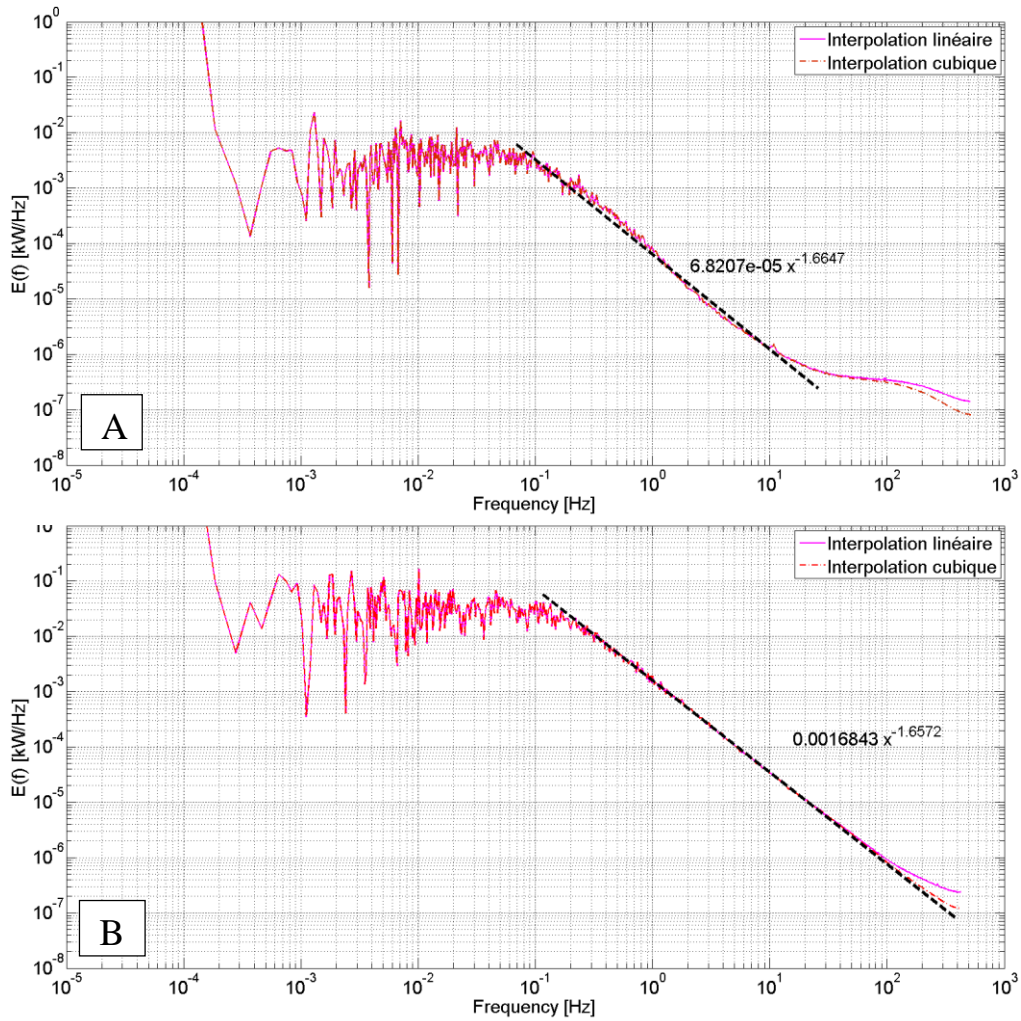


Figure 4: Superposition des spectres obtenus à partir de 2 interpolations pour (A) les données à 3% et (B) les données à 15%.

Le coefficient C_0 permet tout d'abord d'estimer la dissipation ϵ puis l'échelle de Kolmogorov qui s'écrit :

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{1/4} \quad (8)$$

où ν est la viscosité (ici $\nu = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ à 15°C). L'échelle de Kolmogorov est l'échelle des plus petites structures de la turbulence. Elle est souvent de l'ordre du millimètre (mm). L'échelle de temps de Kolmogorov s'écrit :

$$\tau_\eta = \sqrt{\frac{\nu}{\epsilon}} \quad (9)$$

Il s'agit de l'équivalent temporel de l'échelle de Kolmogorov η . L'échelle d'injection s'écrit :

$$L = \frac{u^3}{\epsilon} \quad (10)$$

où $u' = \sqrt{\langle V^2 \rangle - V_0^2}$ est l'écart type de la vitesse. On se place ici dans le cadre de fluctuations isotropes, V étant la vitesse du courant et V_0 la moyenne de celle-ci. L'échelle de Taylor est donnée par :

$$\lambda = \sqrt{\frac{15 \cdot \nu}{\epsilon}} u' \quad (11)$$

L'échelle de Taylor est une échelle spatiale, intermédiaire entre l'échelle d'injection L et l'échelle de Kolmogorov η . Nous vérifions le taux de turbulence à l'aide de la formule :

$$I(\%) = \frac{u'}{V_0} \quad (12)$$

Ensuite, l'échelle de Taylor λ permet d'estimer le nombre de Reynolds de Taylor qui s'écrit :

$$R_\lambda = \frac{u' \lambda}{\nu} \quad (13)$$

D'autre part, on peut également estimer le nombre de Reynolds classique :

$$R_L = \frac{V_0 L}{\nu} \quad (14)$$

Pour ces différentes formules, on peut se référer à un ouvrage sur la turbulence, comme Pope (2000) ou Tennekes & Lumley (1973).

III – 3 Méthode EMD.

Nous avons rappelé précédemment que l'irrégularité du temps d'acquisition reste une contrainte majeure des mesures LDV. Même si une interpolation des données, sur la vitesse du courant permet d'effectuer une FFT, des approximations peuvent en découler. On considère à présent la méthode de décomposition « Empirical Mode Decomposition (EMD) » [3,4].

La décomposition en modes empiriques et la transformée d'Hilbert-Huang appartiennent à une même méthode qui a été introduit il y a 15 ans par Norden Huang servant à décomposer les séries temporelles non-linéaires, non-stationnaires en somme de modes différents, chacun ayant une fréquence caractéristique. Cette méthode a été appliquée dans des nombreux domaines et a été utilisée et citée dans des milliers d'articles scientifiques. Après la décomposition, la série temporelle est décomposée en somme de modes, chacun étant localisé en fréquence. La Transformée de Hilbert-Huang est ensuite appliquée à chaque série temporelle de modes séparément. De cette façon, la loi de puissance spectrale dans l'espace de Hilbert est estimée, celle-ci est similaires aux spectres de puissance de Fourier [3,4,11].

Grâce à la méthode EMD, d'autres type de résultats peuvent être obtenus qui ne sont pas disponibles par la transformée de Fourier. La méthode EMD combinée à la transformée de Hilbert-Huang (EMD-HHT), permet d'accéder à une représentation temps-fréquence amplitude des fluctuations de la série temporelle. Nous pouvons appliquer cette approche à la turbulence pleinement développée, la turbulence marine dans la zone côtière, et des séries temporelles hydrologiques.

Dans ce travail, cette méthode permet d'obtenir le spectre directement des données LDV acquises à haute fréquence malgré l'irrégularité du temps d'acquisition. Ceci permettra, comme pour la FFT, d'étudier le spectre d'énergie et de caractériser l'écoulement.

La figure 4 montre la comparaison entre les méthodes FFT et EMD-HHT. On peut remarquer que l'allure des courbes est très analogue dans les deux cas. On peut donc obtenir les mêmes coefficients C_0 utilisés dans l'équation (6). La méthode EMD-HHT propose une alternative à l'interpolation et confirme les résultats obtenus par le biais de la FFT.

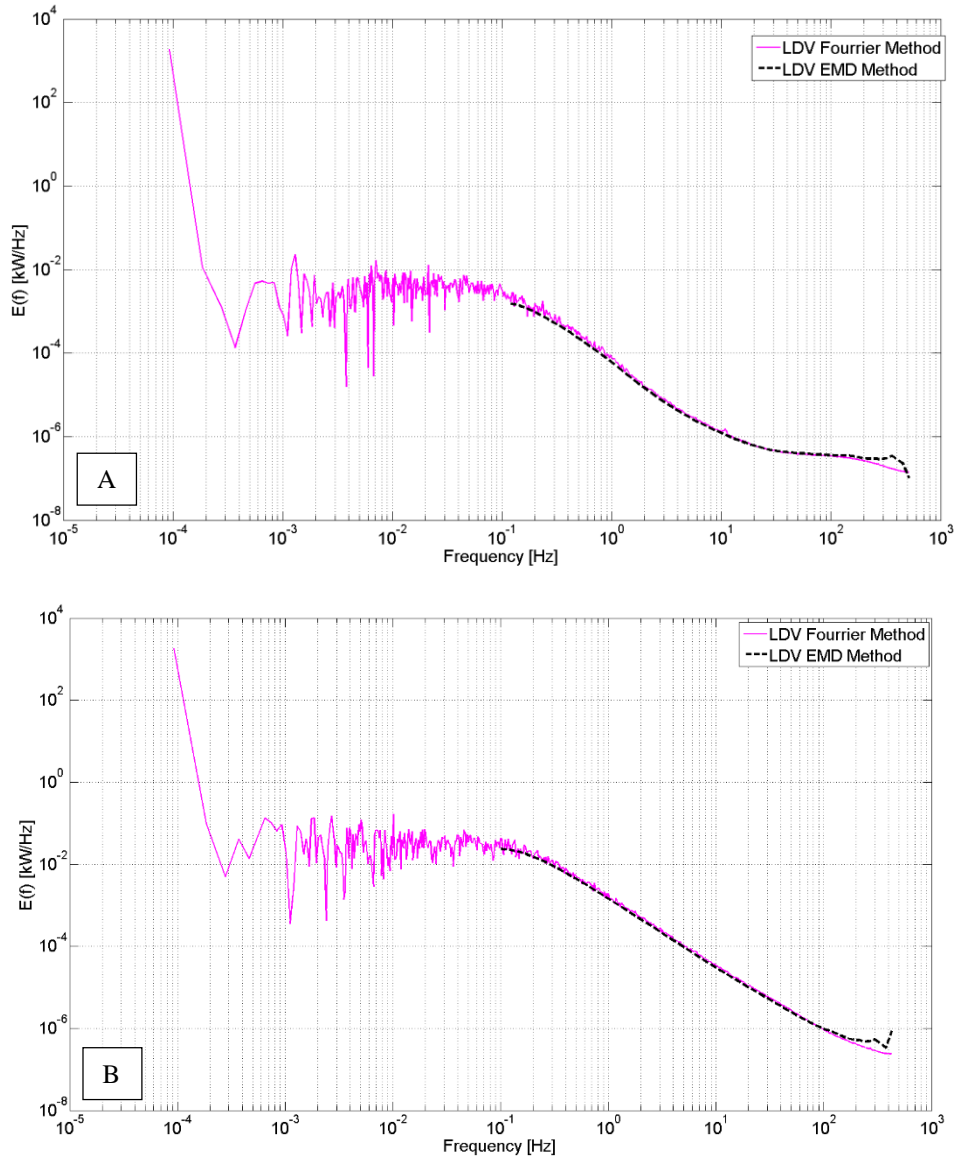


Figure 5: Superposition des spectres FFT et EMD pour le cas (A) 3% et (B) les données à 15%.

Le spectre de Fourier et le spectre issu de la méthode EMD-HHT sont des moments statistiques de deuxième ordre permettant d'estimer la dépendance fréquentielle des fluctuations moyennes. L'analyse spectrale d'Hilbert des moments d'ordre arbitraire q ($q > 0$) est une généralisation de la méthode EMD-HHT ($q=2$). Cette méthode d'analyse multifractale permet l'étude du comportement à l'échelle d'un processus non-linéaire compte tenu de l'ensemble des fluctuations à petite, moyenne et grande échelle [3].

III – 4 Caractérisation de l'écoulement incident

Les différentes formules présentées précédemment permettent de calculer les paramètres de l'écoulement turbulent présentés table 1.

Table 1 : Estimation des différents paramètres de l'écoulement

	ε (m^2s^{-3})	u' (m/s)	I (%)	η (mm)	τ_η (s)	L (m)	λ (cm)	R_λ	R_L	L/ η	λ/η
3%	5,23e-05	0,0319	3,97	0,452	0,157	0,624	1,951	479	386200	1380	43
15%	6,59e-03	0,1109	13,94	0,135	0,014	0,207	0,603	514	126600	1532	45

L'échelle intégrale ou échelle d'injection (L) est de l'ordre de 20 ou 60 cm. Cette échelle correspond à la taille de plus grands tourbillons dans le bassin à houle et courant. Cette échelle spatiale est associée à une échelle temporelle $T=L/V_\infty$, qui vaut 0,25 et 0,78 s pour 15% et 3% respectivement. On trouve paradoxalement que le temps T des structures à 15% est plus faible qu'à 3%, ce dernier obtenu avec un nid d'abeille placé en amont du courant. On peut interpréter ceci par le fait que la turbulence élevée détruit ces grands tourbillons.

Ces structures ne dépendent pas de la viscosité du fluide, elles portent la majorité de l'énergie cinétique contenue dans le courant. Elle est cependant liée à la dissipation puisque la grandeur ε (équation 10) indique la vitesse à laquelle ces grandes structures sont détruites pour en former des plus petites. Pour un taux de 3%, l'échelle « L » est approximativement le triple que pour 15%. On peut comprendre donc que l'installation du nid d'abeille augmente notablement la valeur de l'échelle d'injection, mais en contrepartie, ceci génère une dissipation plus faible.

Le nombre de Kolmogorov basé sur l'échelle de Taylor R_λ est de l'ordre de 479 pour 3% de turbulence et 514 pour 15%. Il s'agit de taux de turbulence assez élevés, proche des valeurs les plus importantes trouvées dans le milieu marin.

L'échelle de Kolmogorov (η) est de 0,1 à 0,4mm, elle diminue avec le degré de turbulence. Elle est de l'ordre de grandeur de ce qu'on obtient dans le milieu marin.

La valeur de ε pour le taux 15% ($\varepsilon = 6,59.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^3$) est assez élevée. On constate une dissipation 100 fois plus faible ($5,23.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$) pour le taux de 3%. Pour 15%, on a une dissipation typique d'une zone côtière et pour 3% cela correspond aux mouvements plus au large. Une étude portant sur la dissipation avec deux méthodes d'acquisition de mesures LDV et PIV [6] montre le même ordre de grandeurs pour la dissipation ε variant entre 10^{-3} et $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$ (cas 15% et 3% respectivement dans notre étude), ainsi que l'échelle de Kolmogorov η située entre 0,3 et 0,9 mm.

Enfin, nous trouvons les taux de 3,9% et 14%, donc assez proches de ceux qui sont annoncés.

III – Corrélation entre fluctuations de puissance et fluctuations de l'écoulement

Une fois que l'écoulement du bassin d'essai a pu être caractérisé après une estimation de la dissipation, nous nous intéressons à présent à corréler les fluctuations de puissance d'une hydrolienne tri-pale à axe horizontal dans l'écoulement incident présenté précédemment.

Sur la figure 6, on expose l'allure des données de puissance obtenues par cette hydrolienne, il s'agit des 10.000 premiers points de notre série temporelle. La fréquence d'acquisition est régulière et acquises en simultanée avec les mesures LDV afin de pouvoir réaliser une comparaison spectrale.

En superposant les deux spectres sur la figure 7, on peut apercevoir dans un premier temps que la stationnarité des deux spectres de puissance du moteur et mesures de vitesse LDV débute aux alentours de 0.1Hz (10s). En effet, on retrouve un bruit blanc dont la pente est nulle similaire dans les basses fréquences, possédant des fortes fluctuations d'énergie. Mise à part cette similitude, la loi d'échelle présente sur l'équation (4) correspondant au régime inertiel de la turbulence, ne transparait pas sur les données de puissance et on ne peut pas donner des conclusions sur les corrélations entre ces deux séries temporelles. Une possible explication est que l'hydrolienne soumise aux conditions de l'écoulement turbulent est asservie en vitesse de rotation, cette contrainte pourrait contribuer à atténuer les fluctuations turbulentes de la vitesse.

On peut constater cependant sur le spectre du moteur (en rouge), un pic de puissance aux alentours de 4,3 Hz. Ce pic correspond à la fréquence de rotation des 3 pales. On retrouve également la fréquence de rotation de la turbine sur le spectre correspondant au taux de turbulence de 3%, le premier pic placé aux alentours de 1,4 Hz, la fréquence de rotation des 3 pales correspond en effet à 3 fois la valeur de la fréquence de rotation.

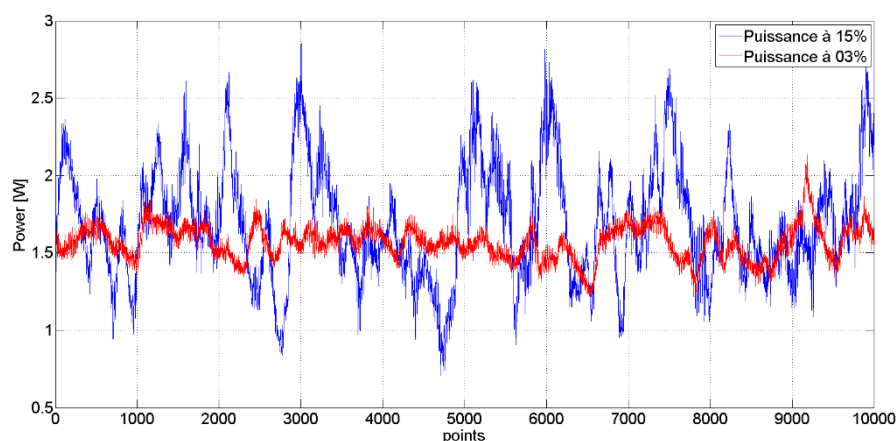


Figure 6: Les 10.000 premiers points de la puissance produite par l'hydrolienne. On obtient la puissance grâce à la relation $P = Mx \cdot \omega$ où Mx est le couple de l'hydrolienne et ω la vitesse de rotation maintenue constante.

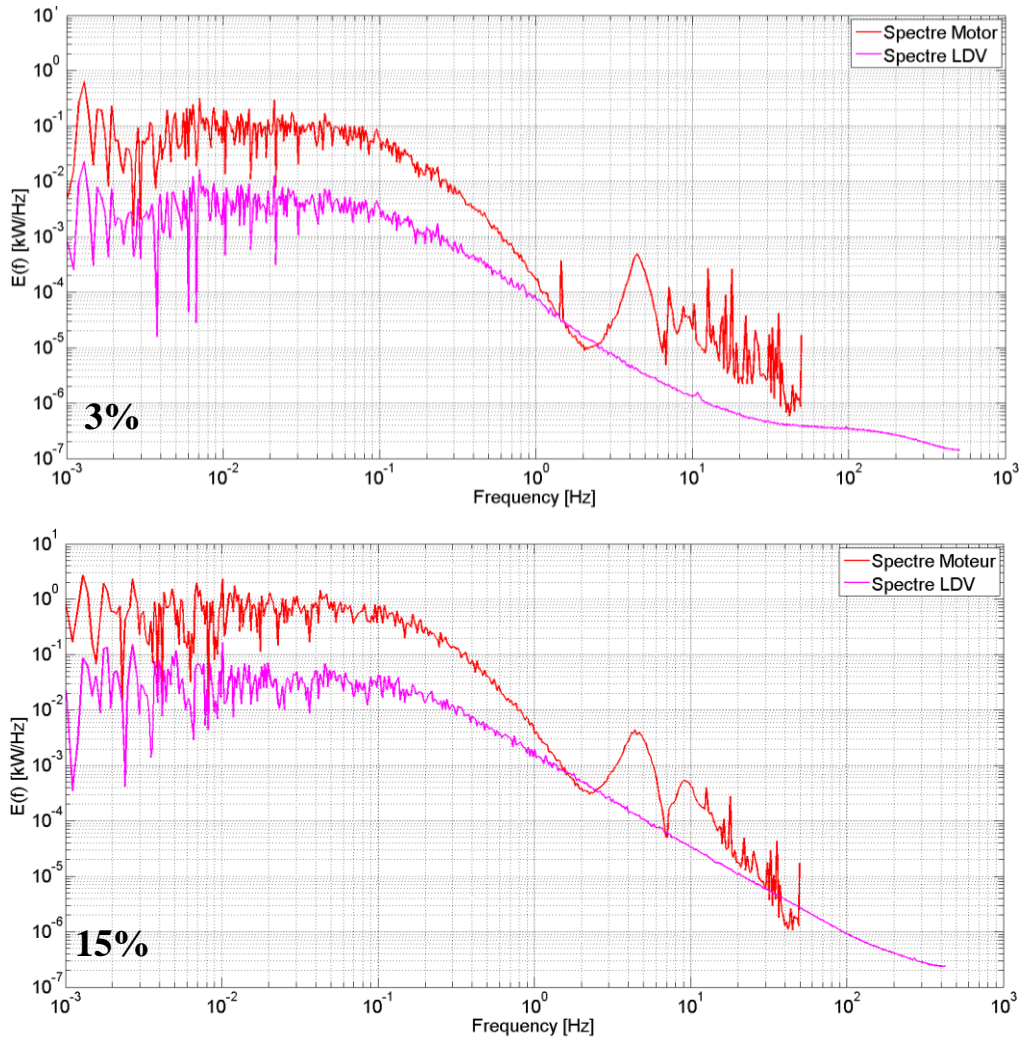


Figure 7: Superposition des spectres de puissance de l'hydrolienne et des mesures LDV. En haut cas « 3% », en bas cas « 15% ».

IV – Conclusion

Une des caractéristiques de l'énergie éolienne est la forte intermittence des productions associées. Cette propriété, avec des fortes chutes pouvant subvenir sur des très courtes périodes de temps, est souvent mise en avant par les critiques de ce mode de production d'énergie renouvelable. Les résultats préliminaires obtenus ici à partir d'une hydrolienne en conditions turbulentes semblent montrer que ce n'est pas le cas pour les énergies marines.

En disposant également des données à un deuxième régime de fonctionnement $TSR=2.5$ et des séries temporelles de vitesse LDV dans le sillage de l'hydrolienne, on pourra conclure par l'analyse de ces données sur la pertinence des résultats déjà obtenus. On pourrait s'avancer sur la fiabilité des caractéristiques de l'écoulement à un taux de turbulence de 3% en raison de la pente qui n'est pas bien définie comme c'est le cas pour 15%. En plus, l'étude de l'intermittence par le biais de la méthode EMD permettra également de corrélérer d'avantage d'information sur les mesures de vitesse de courant et de puissance produite par l'hydrolienne.

Enfin, une étude d'hydrolienne in situ en cours de réalisation, nous permettra de comparer les résultats obtenus dans les conditions contrôlées du bassin d'essai d'IFREMER et celles issues dans les conditions réelles dans un environnement naturelle.

Références

- [1] Stephen B. Pope, *Turbulent Flows*, Cambridge University Press 2000.
- [2] R. Renosh, François G. Schmitt, Hubert Loisel, Alexei Sentchev, Xavier Mériaux. *High frequency variability of particle size distribution and its dependency on turbulence over the sea bottom during re-suspension processes*. Continental Shelf Research 77 (2014) 51-60 2014.
- [3] Huang Y., F. G. Schmitt, Z. Lu, Y. Liu, *An amplitude-frequency study of turbulent scaling intermittency using Hilbert spectral analysis*, EPL 84, 40010, 2008.
- [4] Huang, Y., F.G. Schmitt, J.-P. Hermand, Y. Gagne, Z. M. Lu, Y.L. Liu, *Arbitrary order Hilbert spectral analysis for time series possessing scaling statistics: a comparison study with detrended fluctuation analysis and wavelet leaders*, Physical Review E 84, 016208, 2011.
- [5] P. Mycek, G. Germain, B. Gaurier, G. Pinon, E. Rivoalen, *Experimental Study of the Turbulence Intensity Effects on Marine Current Turbines Behaviour, Part I: One Single Turbine*, Renewable Energy (0960-1481) Vol. 66, P. 729-746. 2014.
- [6] Amer Al-Homoud, Miki Hondzo. *Energy dissipation estimates in oscillating grid setup: LDV and PIV measurements*. Springer Environ Fluid Mech 7:143-158 January 2007.
- [7] R. Calif, F.G. Schmitt, *Modeling of atmospheric wind speed sequence using a lognormal continuous stochastic equation*. Journal of Wind Engineering and industrial Aerodynamics 109 1–8, 2012.
- [8] R. Calif, F.G. Schmitt, *Multiscaling and joint multiscaling description of the atmospheric wind speed and the aggregate power output from a wind farm*. Nonlin Processes Geophys. 21, 379-392, 2014.
- [9] F. Manganga, G.Germain, J.King G. Pinon, E. Rivoalen. *Experimental characterisation of flow effects on marine current turbine behaviour and on its wake properties*. IET Renewable Power Generation, 4 (6):498 2010.
- [10] T. Blackmore, W.M.J. Batten and A.S. Bahaj, *Influence of turbulence on the wake of a marine current turbine simulator*. Proc. R. Soc. A 2014 470, 20140331 August 2014
- [11] Rudy Calif, François G. Schmitt, Yongxiang Huang. *Multifractal description of wind power fluctuations using arbitrary order Hilbert spectral analysis*. Physica A 392 4106–4120 2013.