

# FLUCTUATIONS DE PUISSANCE D'UNE TURBINE HYDROLIENNE EN RELATION AVEC L'INTERMITTENCE DE LA TURBULENCE

François G. Schmitt

Directeur de Recherche au CNRS  
Directeur du LOG,

Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, Wimereux, France

avec: Olmo Duran Medina (UMR LOG), Rudy Calif (LARGE,  
Université des Antilles) et Gregory Germain, Benoit Gaurier  
(Ifremer, Boulogne, LCSM)



Journée GDR EMR, Journée Hydrolien, Caen, 28 mars 2017





# Une critique récurrente: l'intermittence

## Intermittence des énergies renouvelables (France)

La production d'électricité par le soleil et le vent se fait de gaz à effet de serre. Toutefois, l'électricité dans le réseau électrique doit compenser les variations de la puissance.

## Un épouvantail à la française : l'"intermittence" des énergies renouvelables



Pour affronter les enjeux écologiques et énergétiques majeurs de notre siècle, la France se doit d'accepter une utopie mobilisatrice : viser une production d'énergie reposant à



## Les énergies renouvelables sont-elles intermittentes ?

Pour certains, les énergies renouvelables ne peuvent ni ne doivent faire l'objet d'un développement ambitieux car, étant intermittentes, elles ne peuvent pas répondre à la demande de consommation d'électricité. Elles devraient donc rester marginales, à côté des centrales à gaz ou à charbon - émettrices de gaz à effet de serre - et des centrales à panneaux de production, en l'absence de vent et de soleil. Mais, pour d'autres, l'intermittence des énergies renouvelables, et posent-elles

## Voilà la solution à l'intermittence des énergies renouvelables !

Par La chaîne Energie  
mardi 22 mai 2012

J'aime 36 Tweeter Share 2 Pin it G+1 0

30 commentaire(s)

Une centrale « hybride », associant deux énergies renouvelables (géothermie et solaire), a été inaugurée au Nevada. La permanence de l'énergie fournie par la terre compense

# Une critique récurrente: l'intermittence

Le mot intermittent ici veut dire “non stationnaire”: en raison de la variabilité de la ressource turbulente, l'énergie produite peut avoir des statistiques (moyenne, variance, etc.) très variables dans le temps.

Dans les domaines éolien et photovoltaïque, collaboration avec Rudy Calif pour caractériser la variabilité de la ressource, en relation avec la puissance produite

Calif, R. and 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. [doi: [10.1016/j.jweia.2012.06.002](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.06.002)]

Calif, R., F.G. Schmitt, Y. Huang, Characterization of wind energy fluctuations using arbitrary-order Hilbert spectral analysis, *Physica A*, 392, 4106-4120, 2013. [doi: [10.1016/j.physa.2013.04.038](https://doi.org/10.1016/j.physa.2013.04.038)]

Calif, R. and F.G. Schmitt, Yongxiang Huang, Intermittency study of high frequency global solar radiation sequences under tropical climate, *Solar Energy* 98, 349-365, 2013. [doi: [10.1016/j.solener.2013.09.018](https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.09.018)]

Calif, R. and F.G. Schmitt, Multiscaling and joint multiscaling description of the atmospheric wind speed and the aggregate output power from a wind farm, *Nonlinear Processes in Geophysics* 21, 379-392, 2014. [doi: [10.5194/npg-21-379-2014](https://doi.org/10.5194/npg-21-379-2014)]

Calif, R. and F.G. Schmitt, Taylor law in wind energy data, *Resources* 4, 787-795, 2015. [doi: [10.3390/resources4040787](https://doi.org/10.3390/resources4040787)]

Duran Medina, O., Schmitt F.G., Calif R., Multiscale analysis of wind velocity, power output and torque of a windmill, *Energy Procedia*, 76, 193-199, 2015. [doi: [10.1016/j.egypro.2015.07.897](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.897)]

Calif, R., F.G. Schmitt, Y. Huang, Study of local correlations of the simultaneous wind speed-irradiance measurements using the time dependent intrinsic correlation method, *Journal of Applied Nonlinear Dynamics*, 5(4), 373-390, 2016. [doi: [10.5890/JAND.2016.12.001](https://doi.org/10.5890/JAND.2016.12.001)]

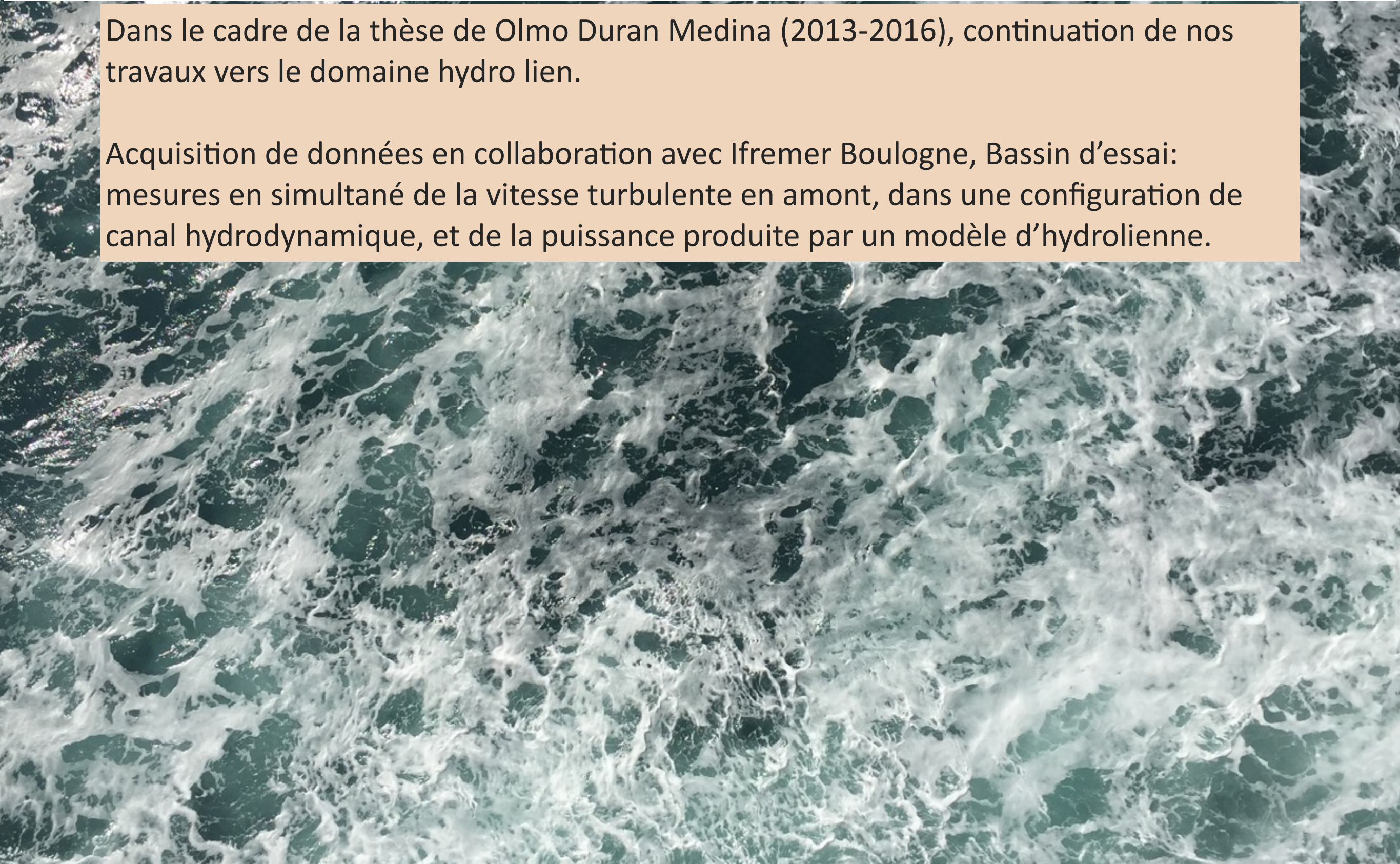




# Fluctuations et intermittence dans la production d'une hydrolienne

Dans le cadre de la thèse de Olmo Duran Medina (2013-2016), continuation de nos travaux vers le domaine hydro lien.

Acquisition de données en collaboration avec Ifremer Boulogne, Bassin d'essai: mesures en simultané de la vitesse turbulente en amont, dans une configuration de canal hydrodynamique, et de la puissance produite par un modèle d'hydrolienne.





Ecole Doctorale Sciences de la Matière, du  
Rayonnement et de l'Environnement  
Spécialité Géosciences, Ecologie, Paléontologie, Océanographie

Université de Lille

Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences  
UMR LOG 8187  
Equipe Télédétection et Hydrodynamique

Etude expérimentale et modélisation  
stochastique des fluctuations de la vitesse (vent  
et courant) et de la puissance électrique.

Thèse de doctorat présentée par **Olmo DURÁN MEDINA**

Soutenue publiquement le 5 décembre 2016 devant le jury composé de :

Directeur de thèse	François SCHMITT	DR CNRS
Co-directeur de thèse	Rudy CALIF	MCF HDR Université des Antilles
Rapporteurs	Elie RIVOALEN	PR INSA Rouen
	Daniel SCHERTZER	PR Ecole des Ponts ParisTech
Examineurs	Luminita DANAILA	PR Université de Rouen
	Grégory GERMAIN	Cadre Ifremer HDR
	Alexei SENTCHEV	PR ULCO
	Enrico CALZAVARINI	MCF Université de Lille

# ence dans la production drolienne

edina (2013-2016), continuation de nos

ec Ifremer Boulogne, Bassin d'essai:  
te en amont, dans une configuration de  
roduite par un modèle d'hydrolienne.

Turbulence analysis and multiscale correlations between  
synchronized flow velocity and marine turbine power  
production

Olmo Durán Medina<sup>a</sup>, François G. Schmitt<sup>a,\*</sup>, Rudy Calif<sup>b</sup>, Grégory  
Germain<sup>c</sup>, Benoît Gaurier<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Cote d'Opale,  
UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences,  
F 62930 Wimereux, France

<sup>b</sup>E.A. 4935, LARGE laboratoire en Géosciences et Énergies,  
Université des Antilles,  
Fouillole 97170 P-à-P, France

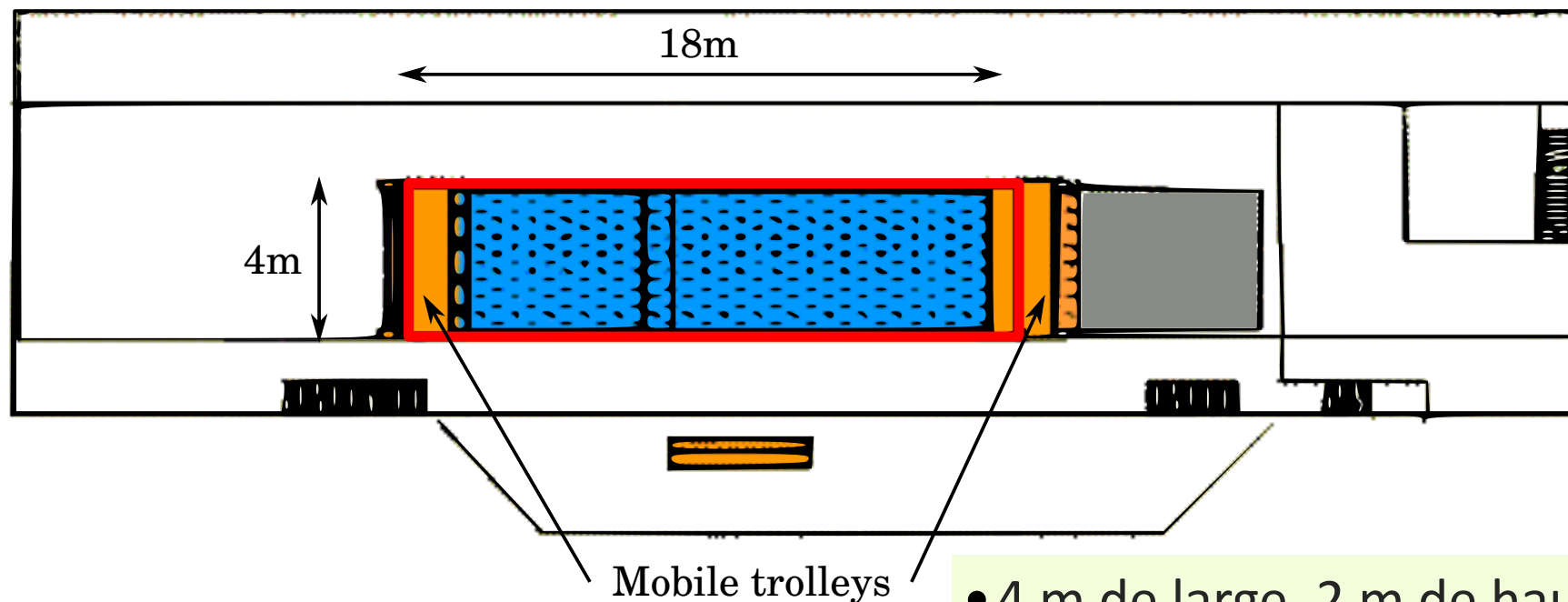
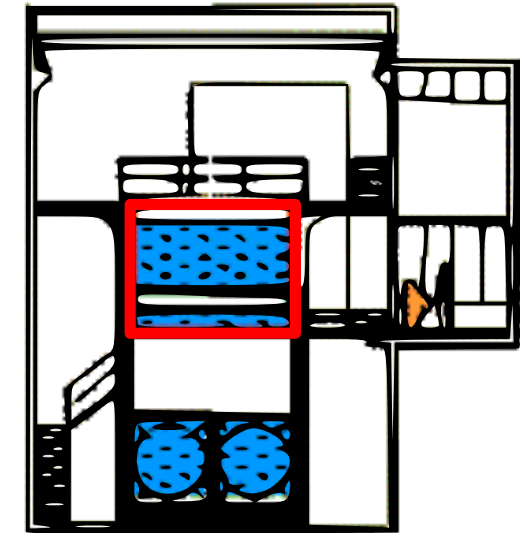
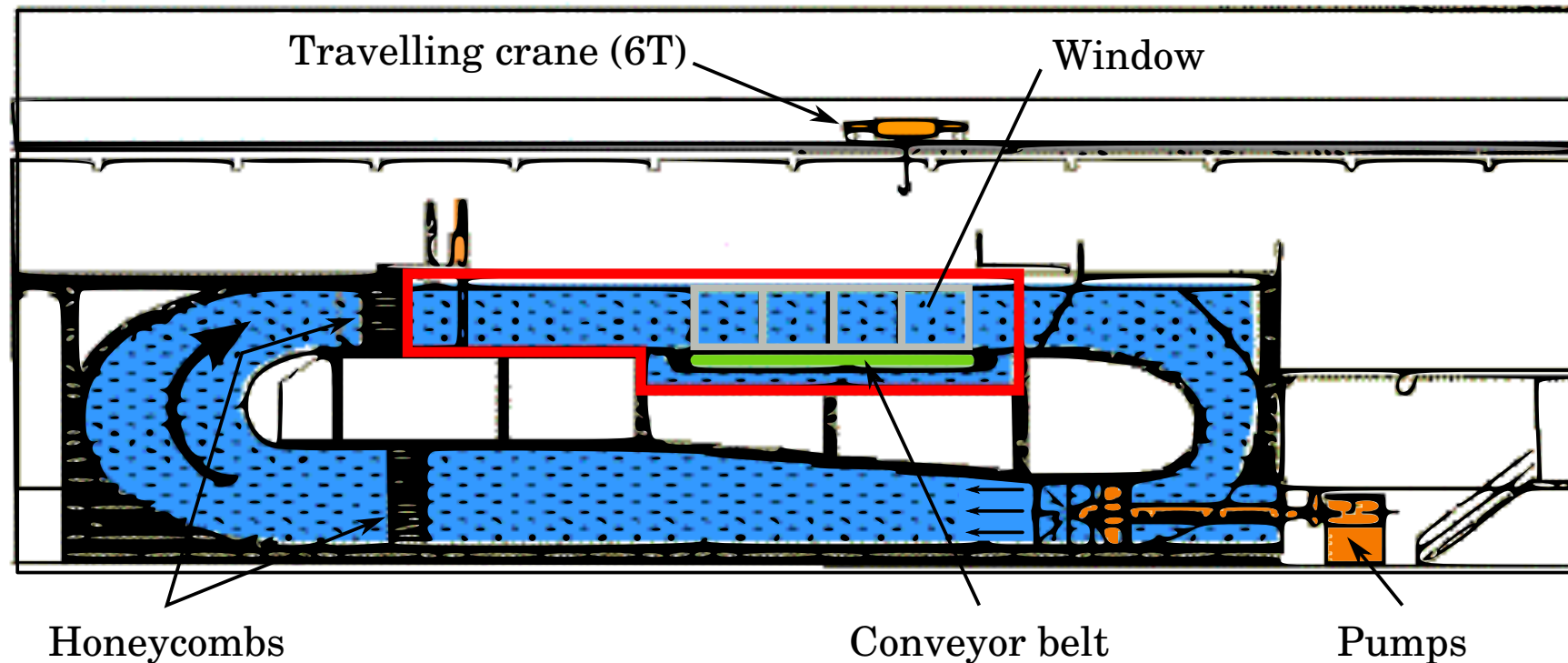
<sup>c</sup>IFREMER, Marine Structures Laboratory,  
150, quai Gambetta, BP 699,  
F 62321 Boulogne-Sur-Mer, France.

Soumis à *Renewable Energy* (quasi accepté)



# Bassin d'essai à houle et courant de l'Iframer

Boulogne-sur-mer



Working section:

Length: 18m

Width: 4m

Height: 2m

Capacity: 700m<sup>3</sup>

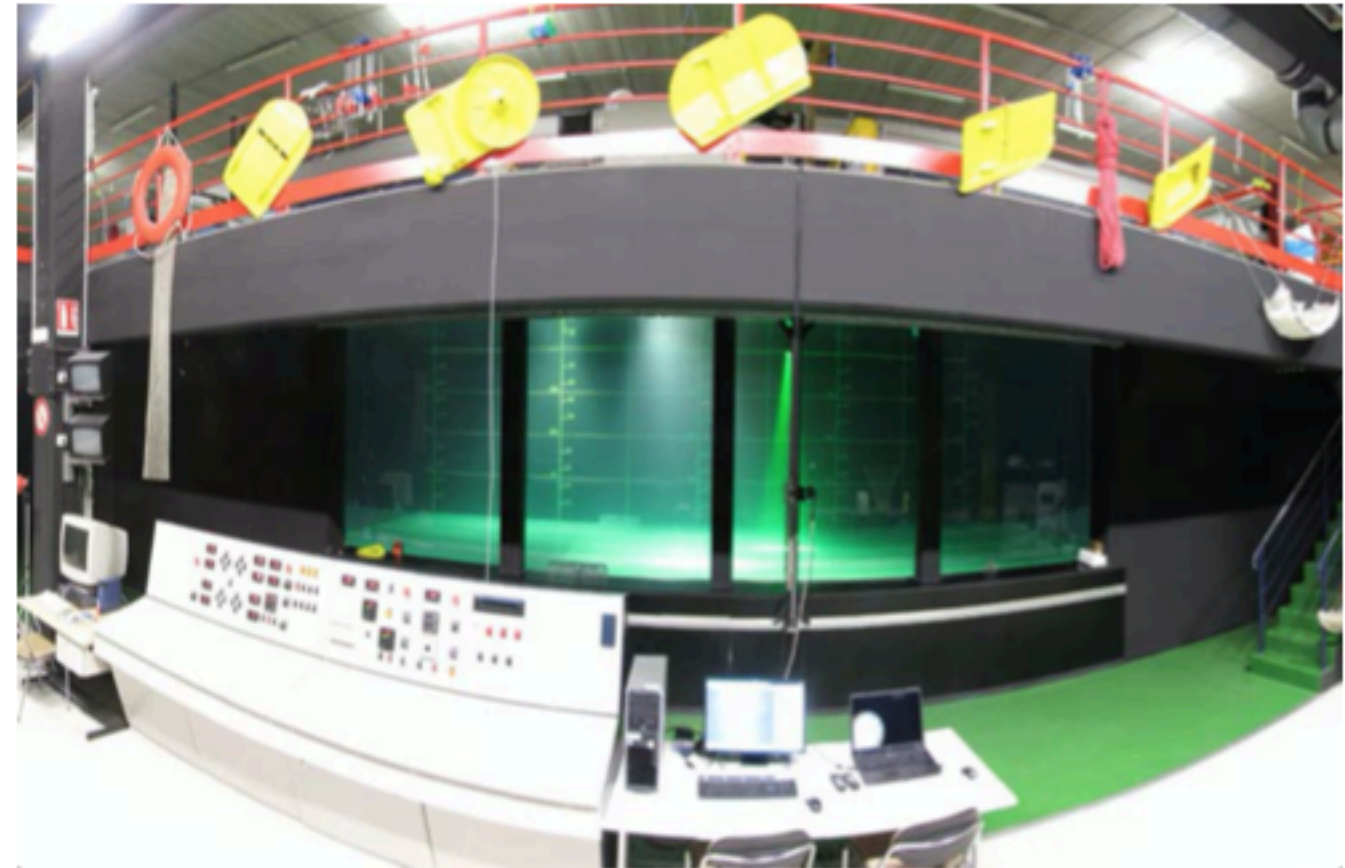
Fluid velocity: 0.1 to 2.2m/s

- 4 m de large, 2 m de haut, vitesse en amont possible de 0.1 à 2.2 m/s
- Vitesse amont imposée à 0.8 m/s
- Taux de turbulence modulé avec un nid d'abeille (3 et 15 %)



# Bassin d'essai à houle et courant de l'Ifremer

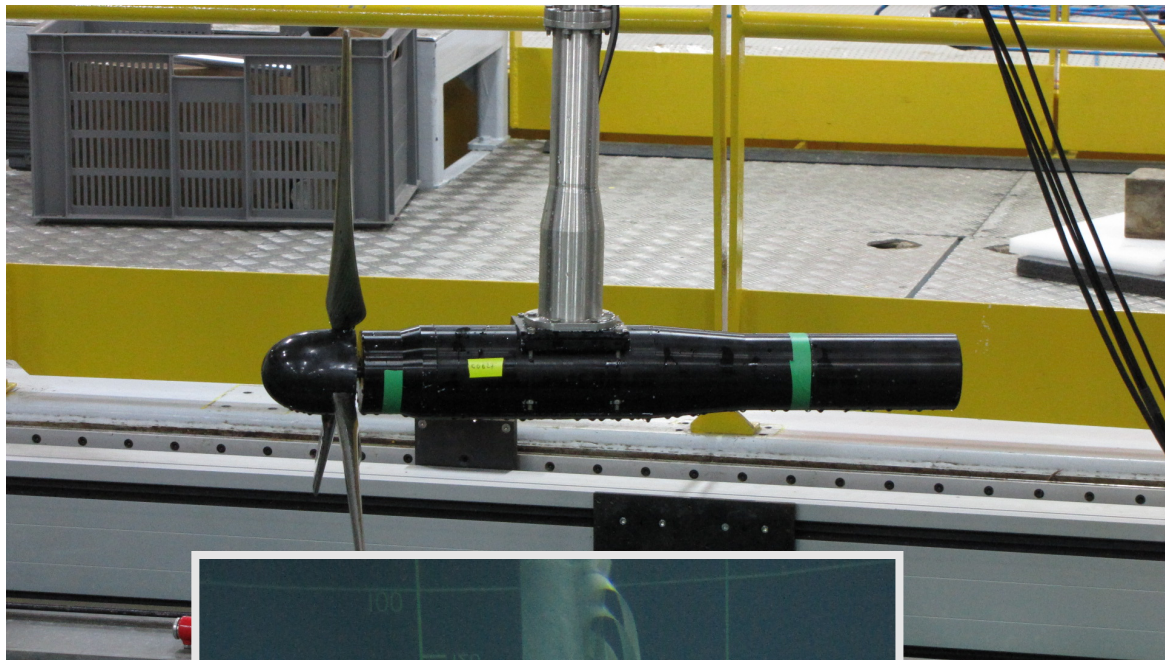
Boulogne-sur-mer



- 4 m de large, 2 m de haut, vitesse en amont possible de 0.1 à 2.2 m/s
- Vitesse amont imposée à 0.8 m/s
- Taux de turbulence modulé avec un nid d'abeille (3 et 15 %)



# Modèle d'hydrolienne



Hydrolienne à axe horizontal (diamètre 0.7m, échelle 1/20)

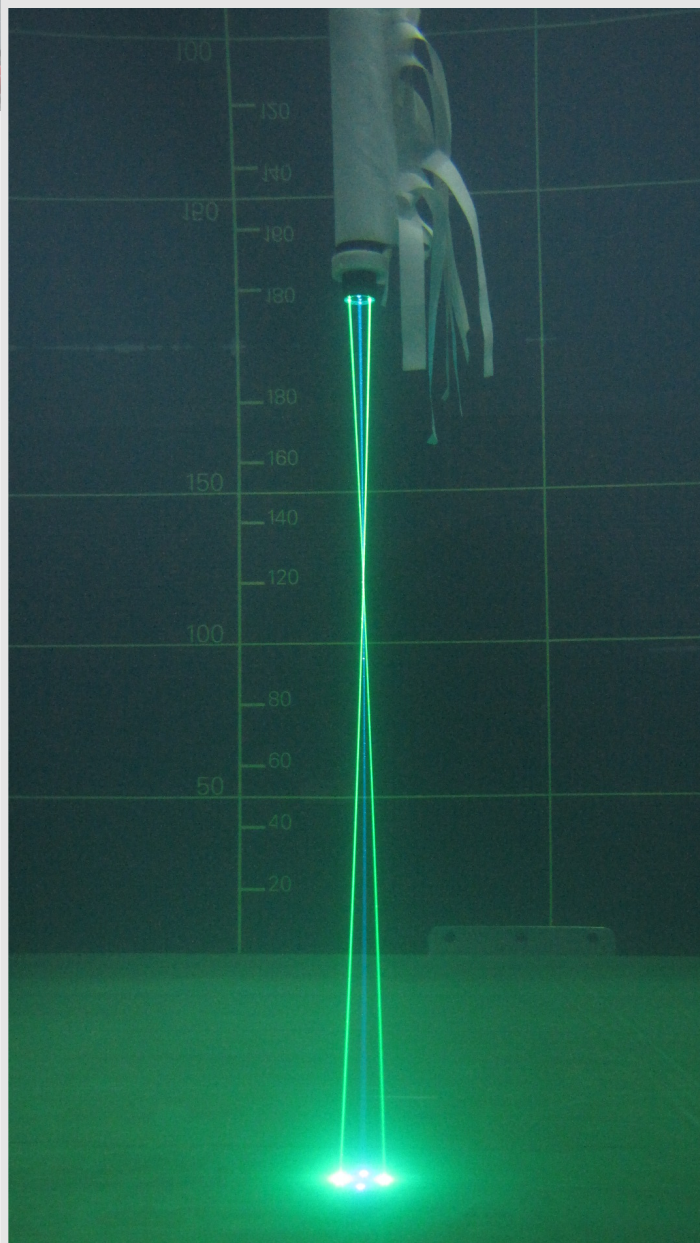
2 points de fonctionnement machine (TSR=4 et TSR=2.5)

Système à boute de vitesse (Gearbox), temps de réponse <0.1 s.

Acquisition de la puissance théorique fournie à 100 Hz: mesure

$$TSR = \frac{|\Omega_x| r}{U_\infty}$$

$$P = M_x \Omega_x$$

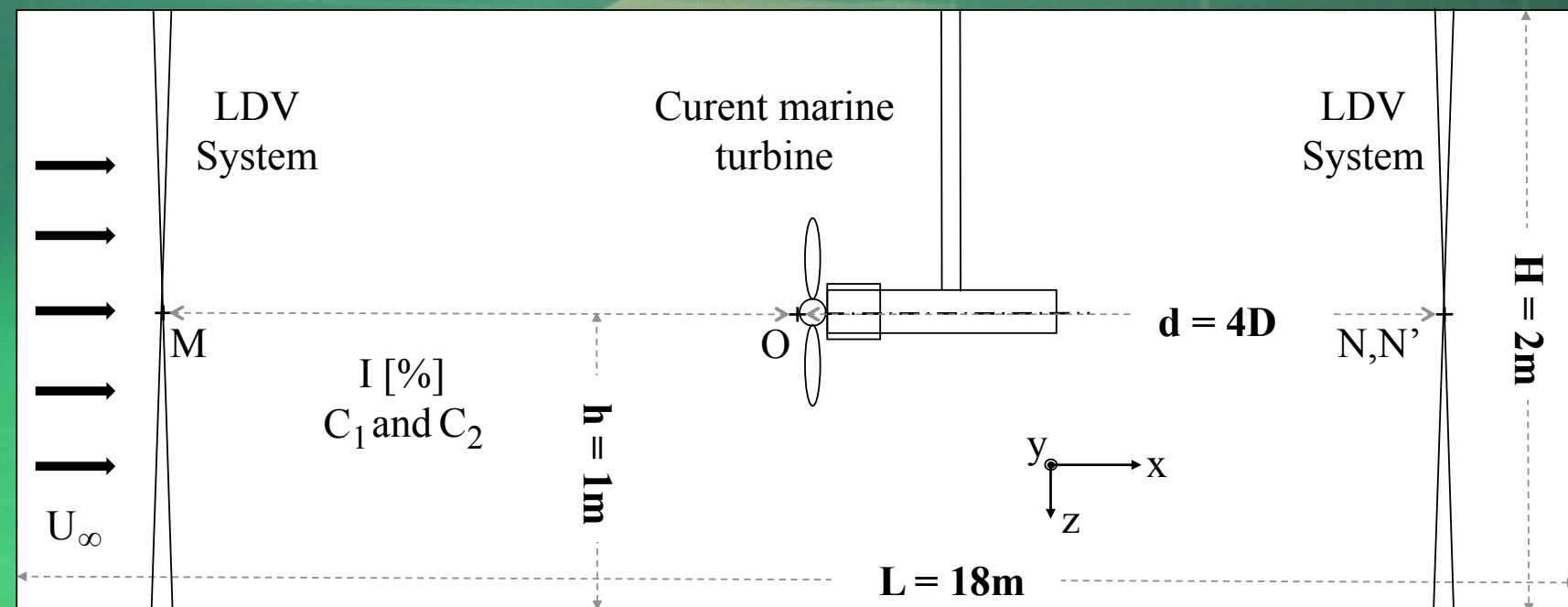


Mesures LDV

Fréquence d'acquisition variable mais maxi 800-900 Hz

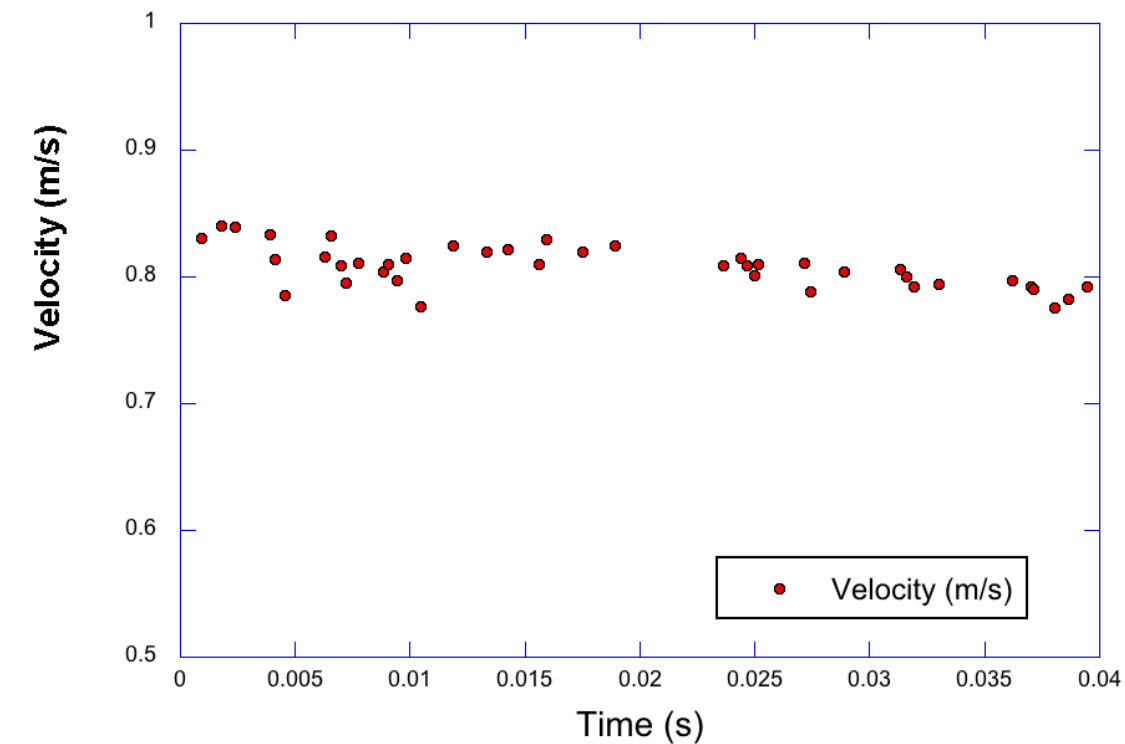


# Modèle d'hydrolienne

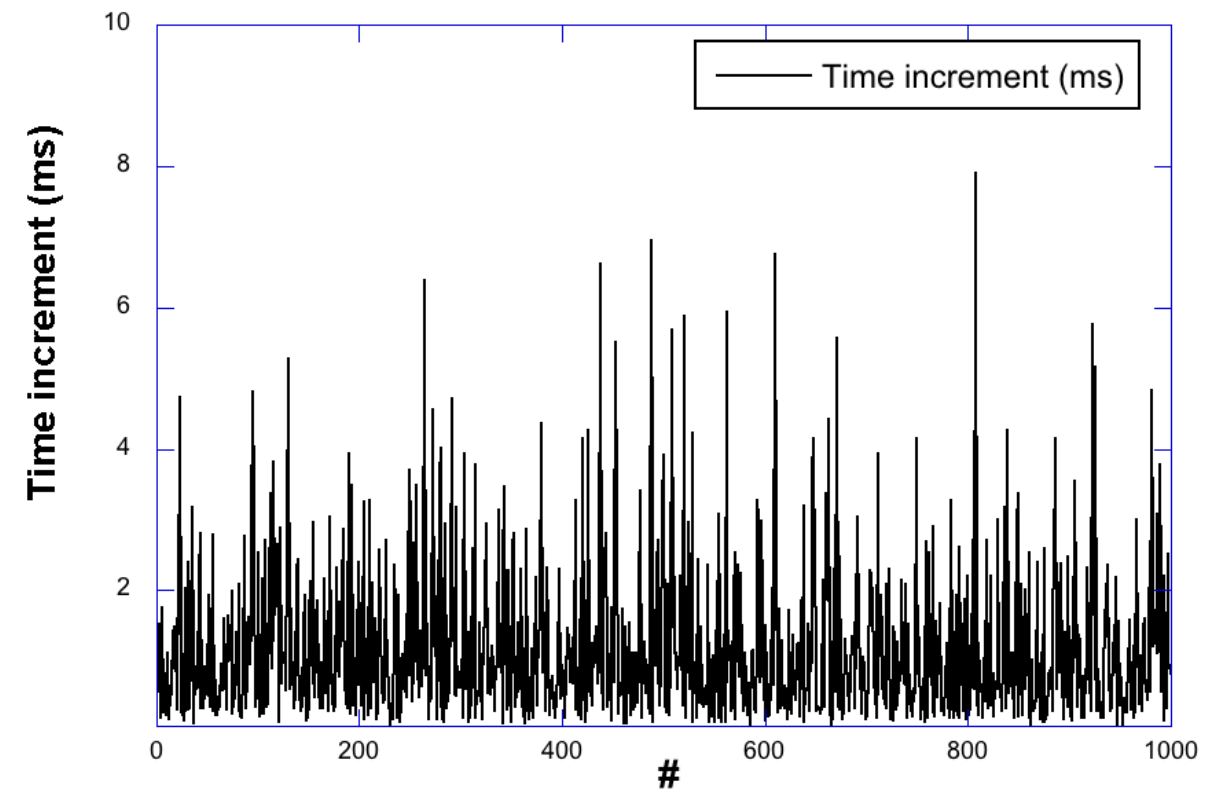
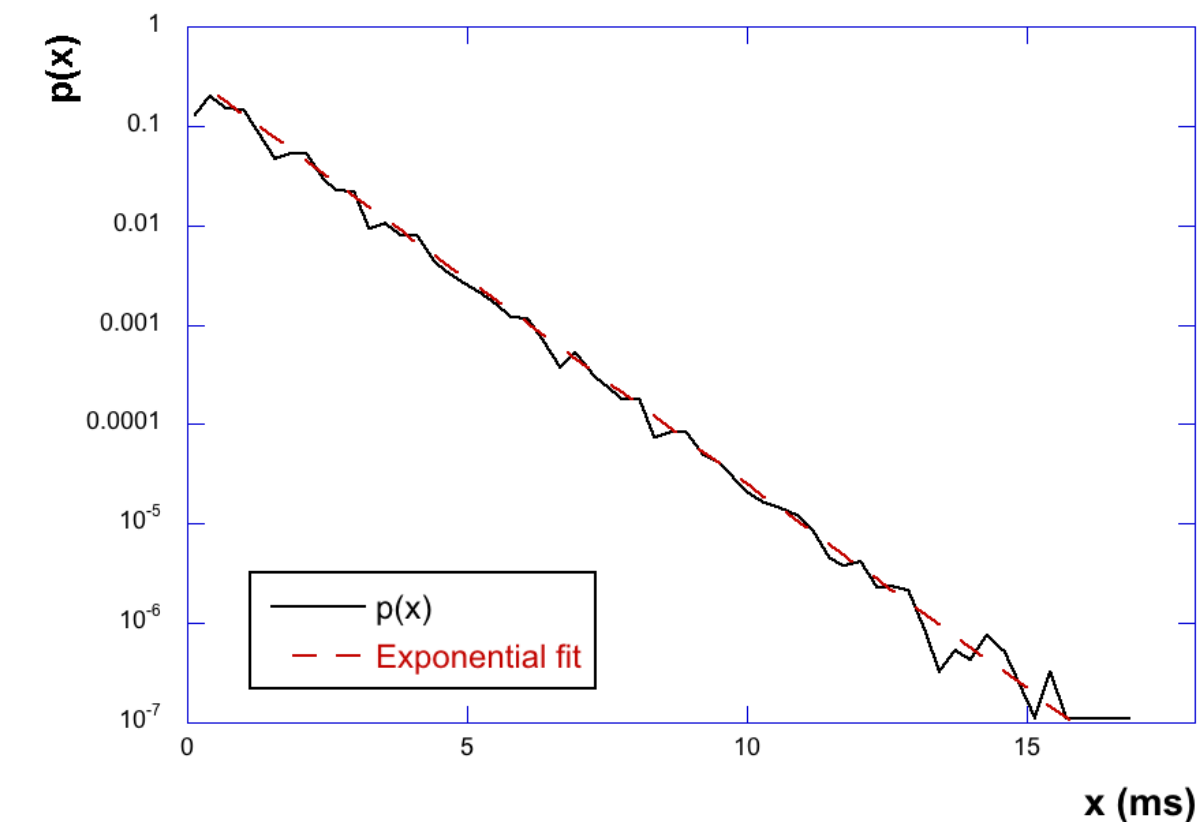




# Mesures de vitesse

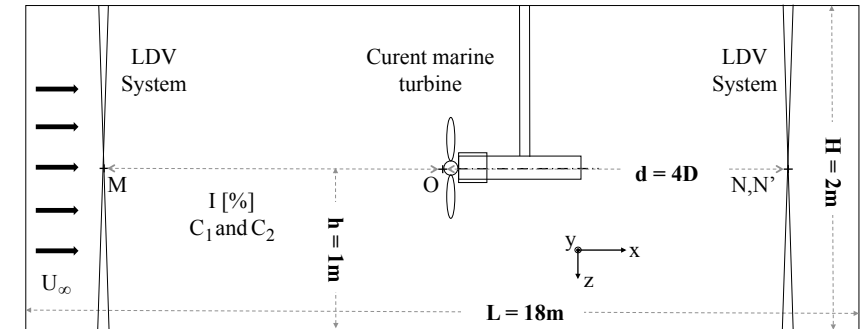
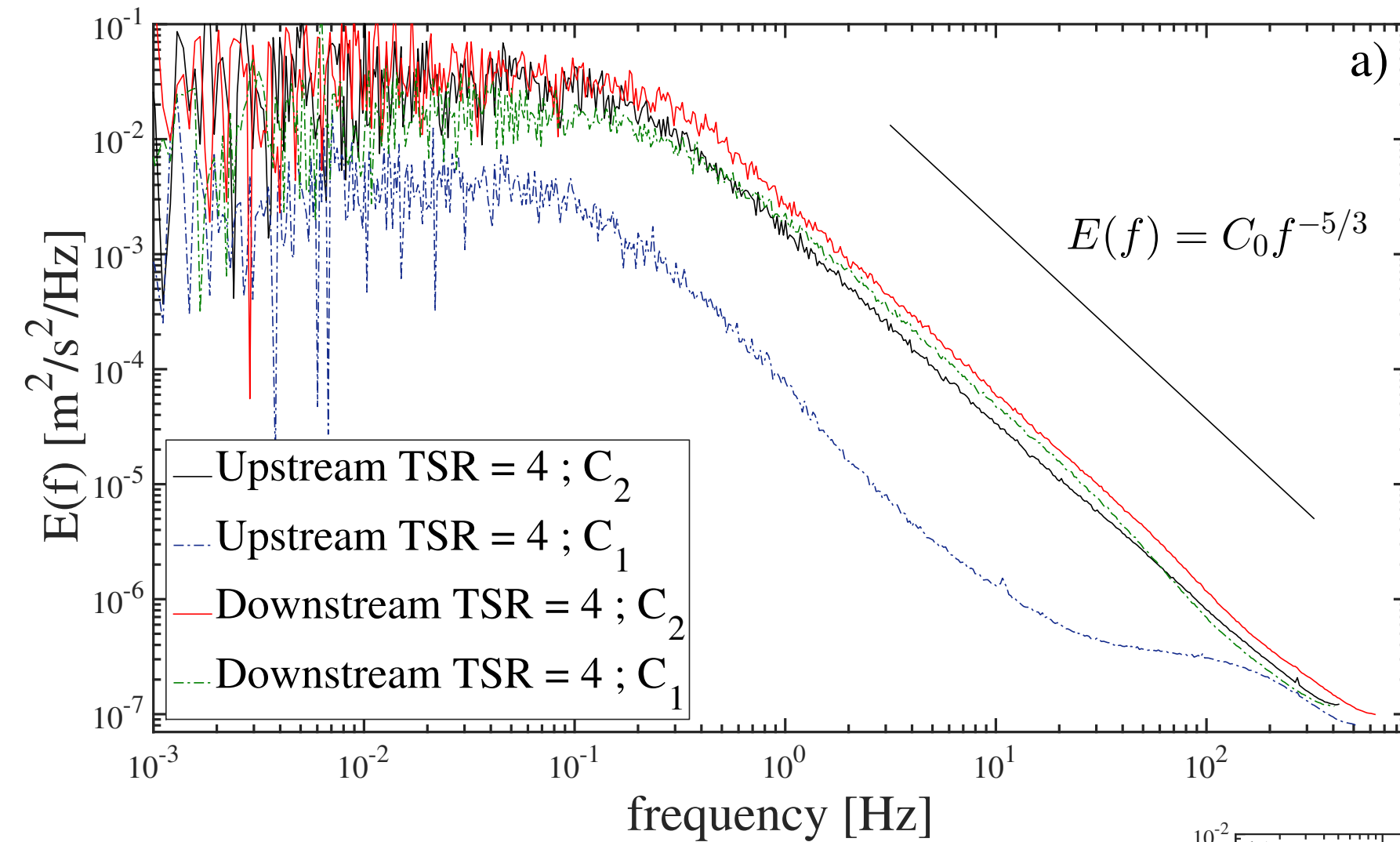


Temps irrégulier entre 2 mesures  
Processus de Poisson: PDF exponentielle pour les intervalles de temps  
A été ré-échantillonné pour certaines analyses

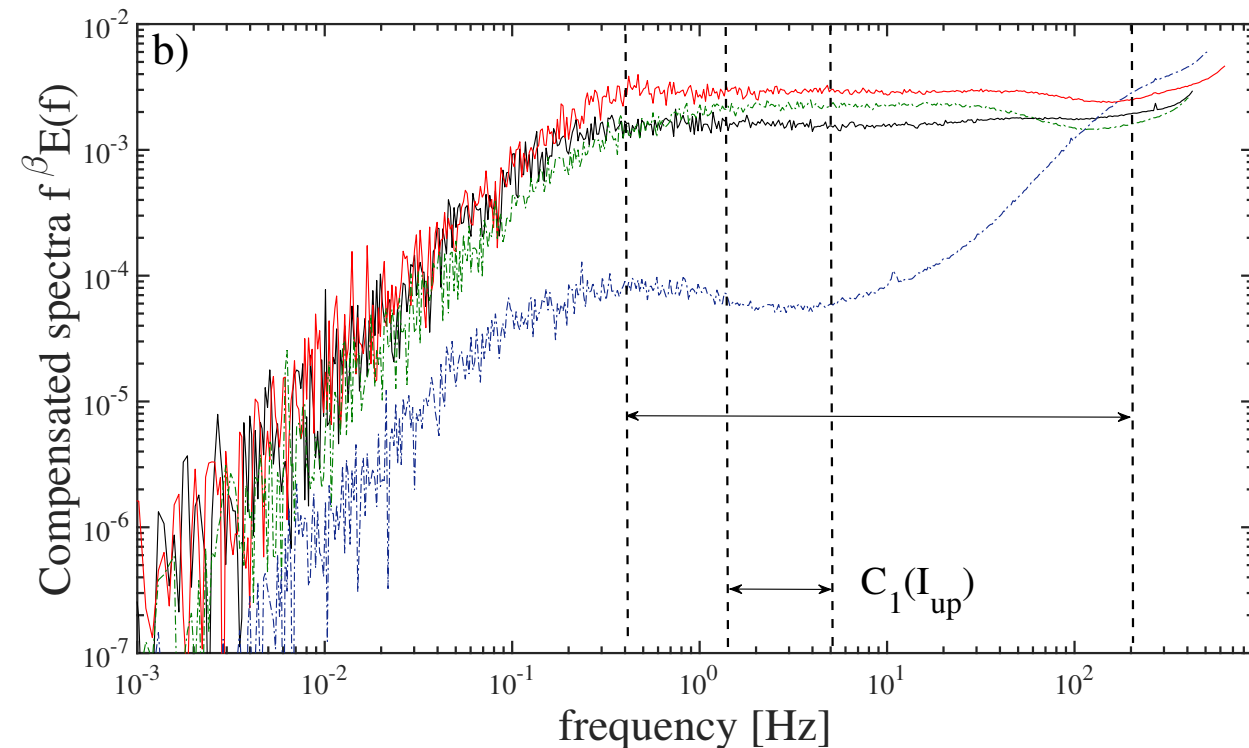




# Turbulence homogène et isotrope

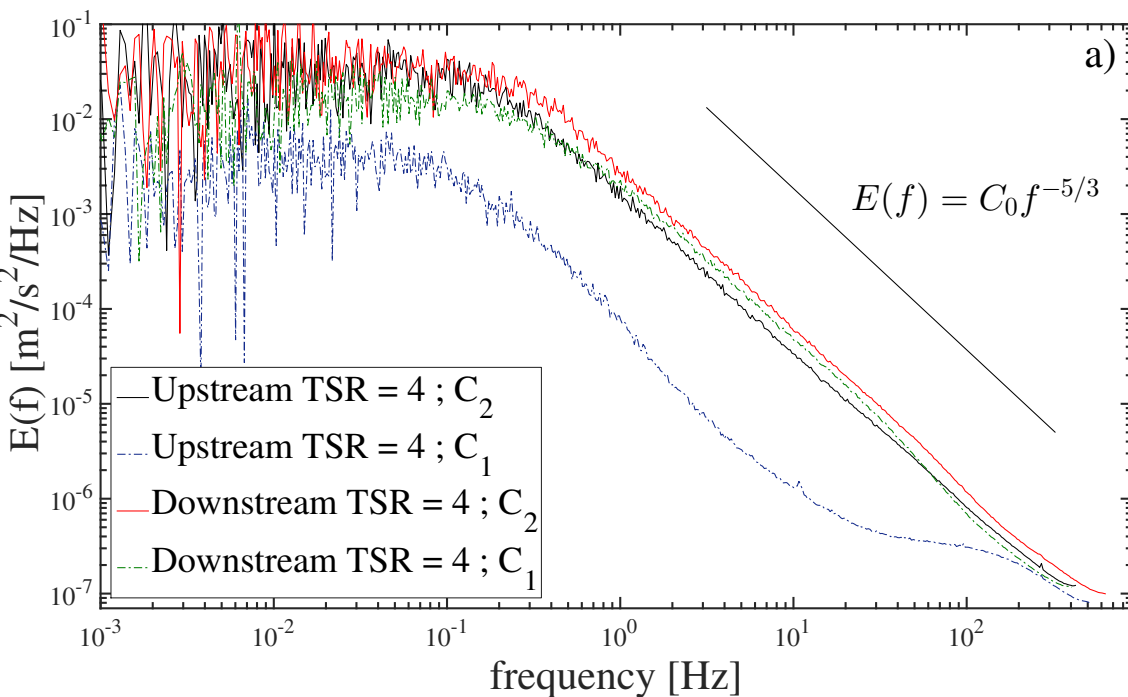


- Cascade d'énergie en “-5/3” très visible pour le cas 15% amont et aval, et le cas 3% aval
- Zone inertielle: entre 0.4 et 200 Hz





# Turbulence homogène et isotrope



$$E(k) = C \epsilon^{2/3} k^{-5/3}; \quad C \simeq 1.5$$

$$k = \frac{2\pi}{\ell}; \quad \ell = V_0 t = \frac{V_0}{f}$$

$$k = \frac{2\pi f}{V_0} \quad \text{donne} \quad E(f) = C \epsilon^{2/3} \left( \frac{2\pi f}{V_0} \right)^{-5/3}$$

Ceci permet d'estimer la dissipation à partir de la valeur de l'intercept, puis la valeur des autres quantités qui caractérisent la turbulence

Scaling flow properties

	$U_\infty [m/s]$	$I_{up} [\%]$	$TSR$	$\epsilon [m^2 s^{-3}]$	$\ell [m]$	$T [s]$	$\eta [mm]$	$Re_\lambda$
$C_1$	0.80	3.98	4	$5.01 \cdot 10^{-5}$	0.654	0.81	0.457	492
$C_2$	0.79	14.04	4	$5.68 \cdot 10^{-3}$	0.244	0.31	0.140	561
$C_1$	0.79	4.05	2.5	$5.19 \cdot 10^{-5}$	0.671	0.83	0.453	502
$C_2$	0.80	13.96	2.5	$5.74 \cdot 10^{-3}$	0.240	0.30	0.139	556

$$L = \frac{u'^3}{\epsilon}$$

$$\ell = \sqrt{\frac{15 \cdot v}{\epsilon}} u'$$

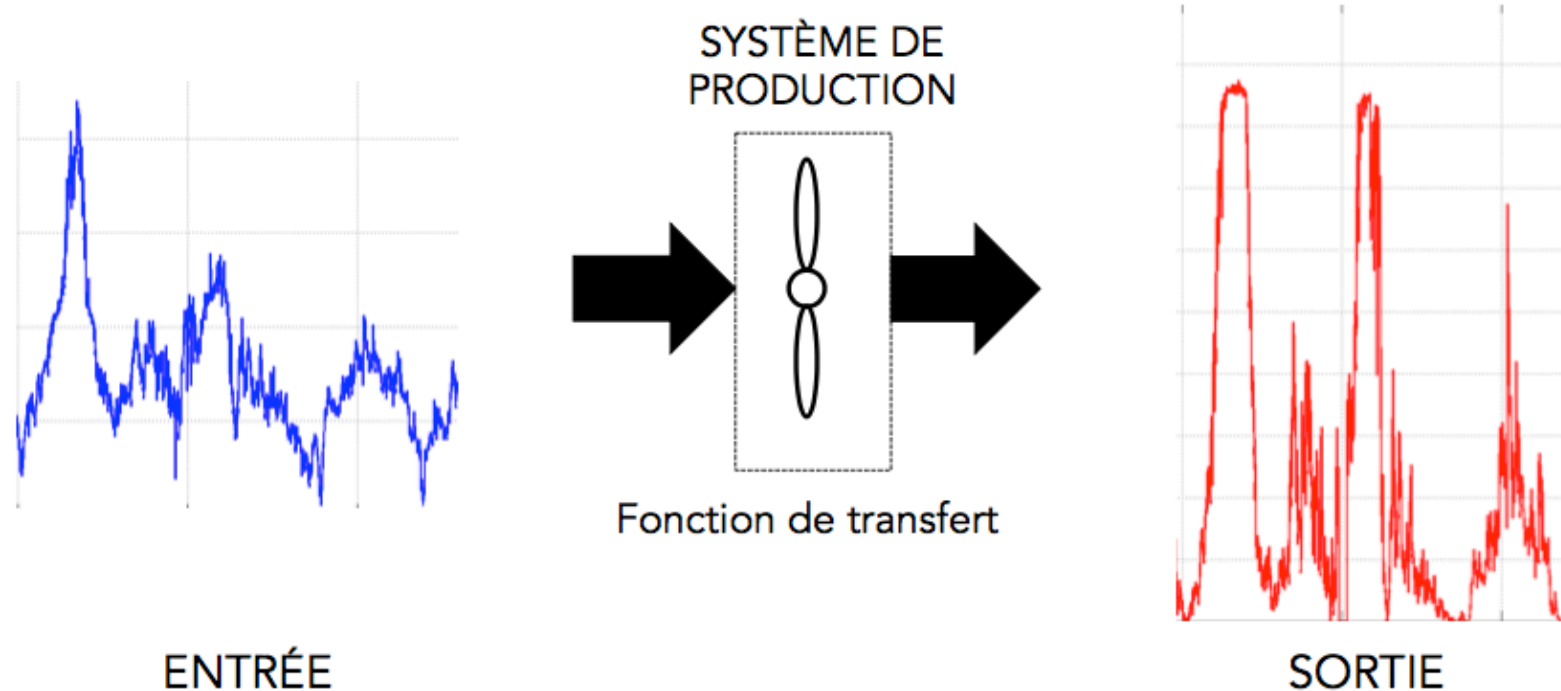
$$\eta = \left( \frac{v^3}{\epsilon} \right)^{1/4}$$

$$\tau_\eta = \sqrt{\frac{v}{\epsilon}}$$

$$R_\lambda = \frac{u' \lambda}{v}$$



# Fluctuations de puissance (éoliennes)



## WPD

Enercon E-82 E2  
Puissance: 2000 kW  
Hauteur nacelle: 85 m  
Diamètre rotor: 82 m  
Surface balayée: 5281 m<sup>2</sup>  
Générateur Direct Drive  
Type de Vent IEC/EN IIA  
Fréquence  $f_e = 1/10$  min.



## InnoVent

Enercon E-44  
Puissance: 900 kW  
Hauteur nacelle: 45 m  
Diamètre rotor: 44 m  
Surface balayée: 1521 m<sup>2</sup>  
Générateur Direct Drive  
Type de Vent IEC/NVN IA  
Fréquence  $f_e = 1/10$  min.

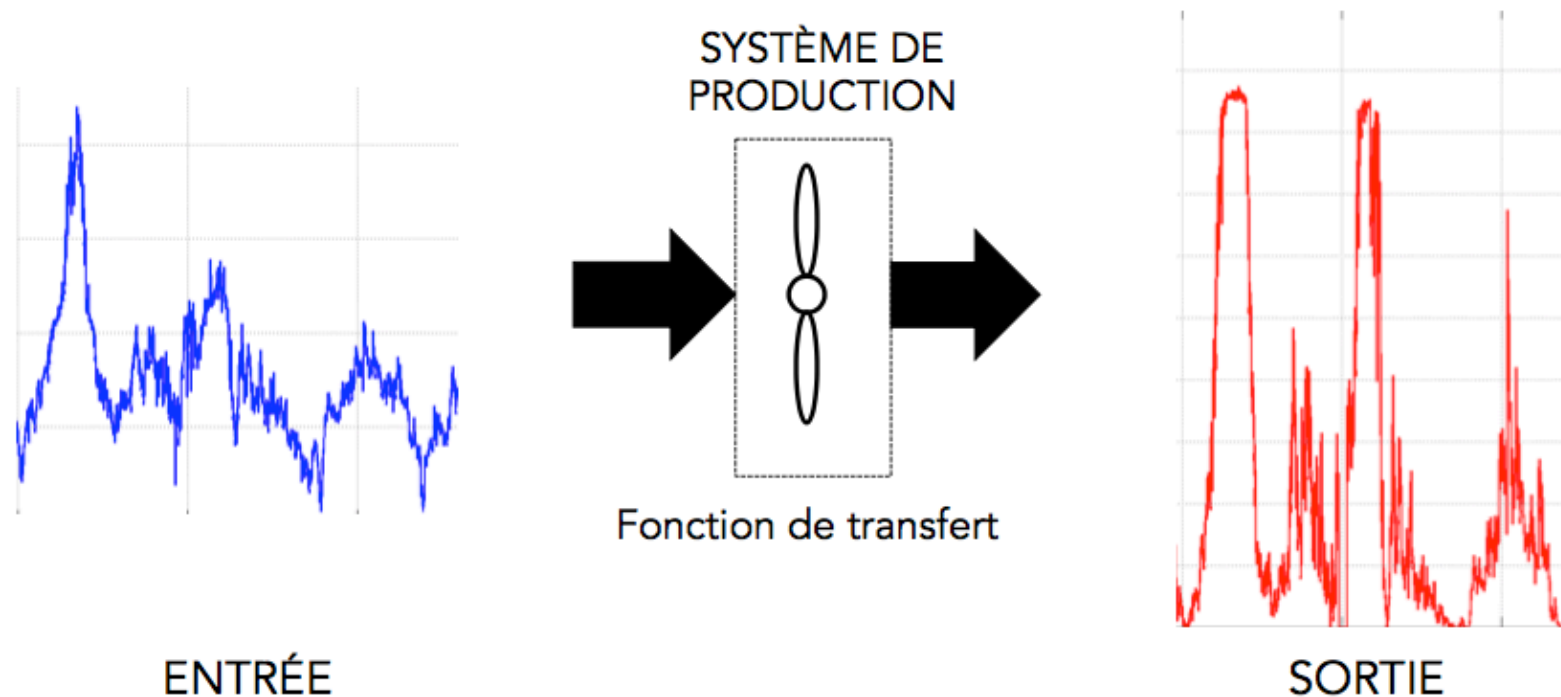


## Nordtank

NTK 500/41  
Puissance: 500 kW  
Hauteur nacelle: 33,8 m  
Diamètre rotor: 41,1 m  
Surface balayée: 1320,3 m<sup>2</sup>  
Générateur ASYNC 690 V  
Vitesse de démarrage: 4 m/s  
Vitesse de coupure: 25 m/s  
Fréquence  $f_e = 37,5$  Hz



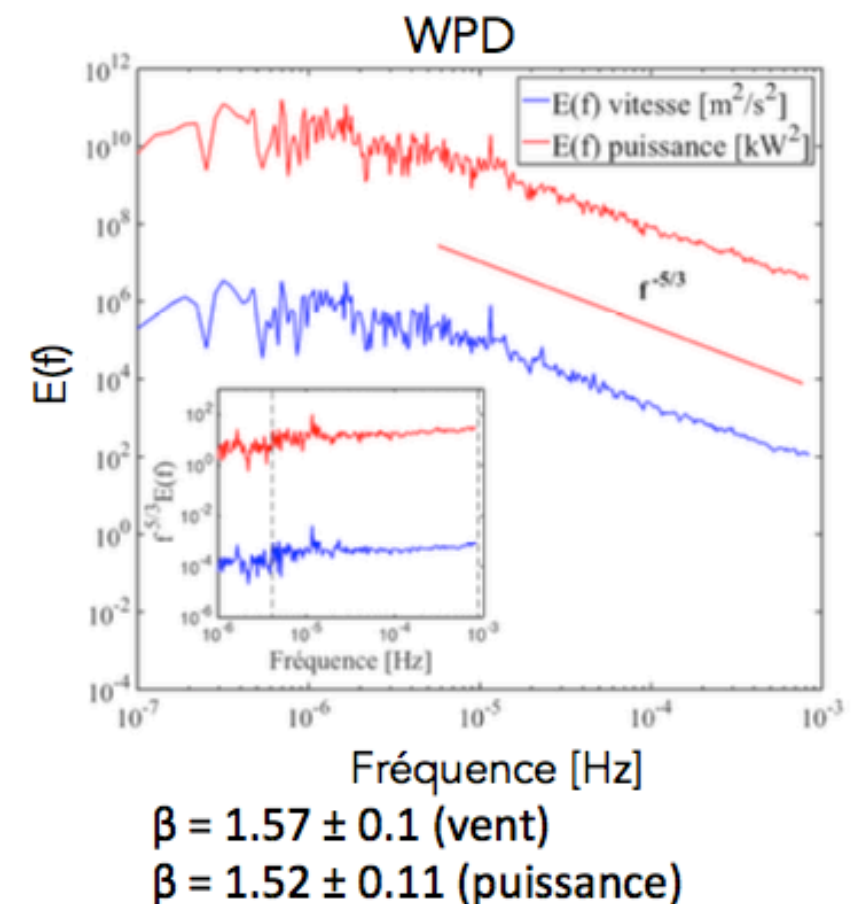
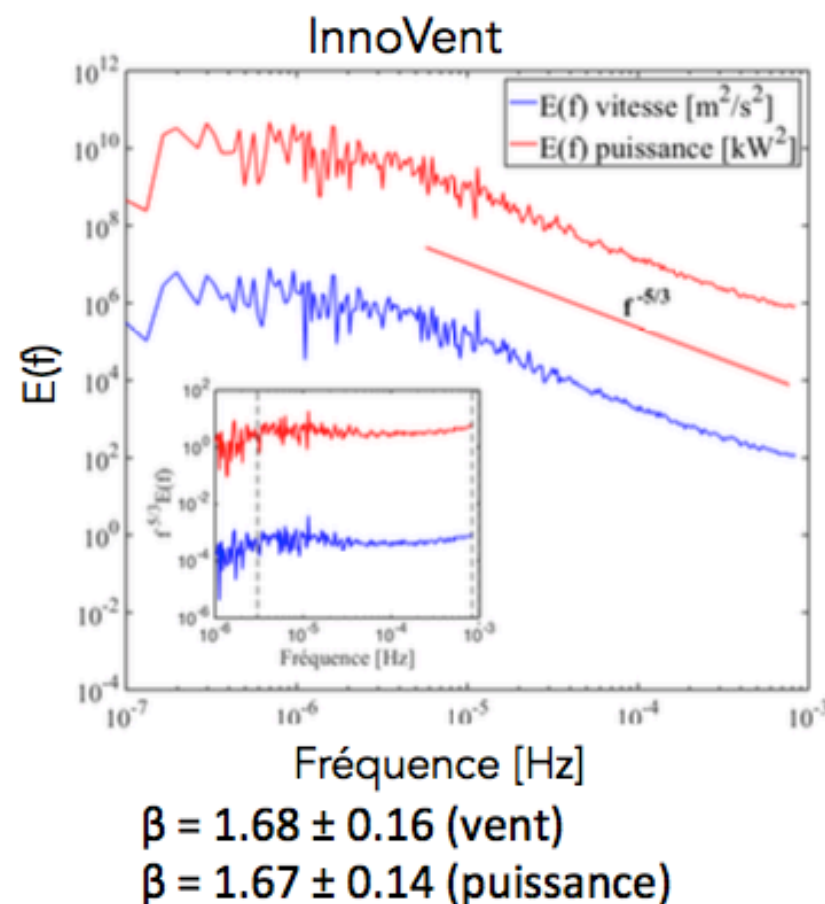
# Fluctuations de puissance (éoliennes)



## Exemple des éoliennes

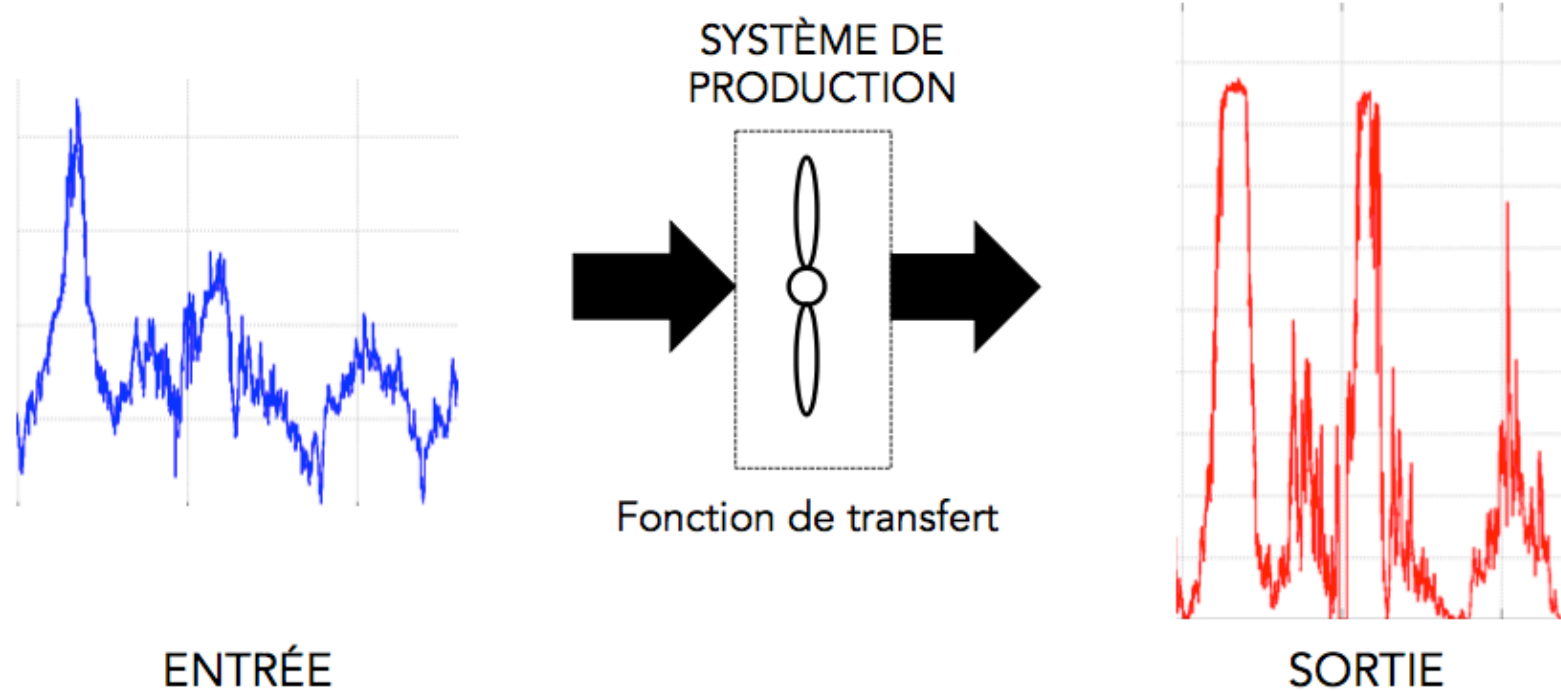
Les fluctuations entre entrée (turbulence du vent) et sortie (puissance produite) ont des spectres **similaires**

Systèmes à entraînement direct (Direct Drive)





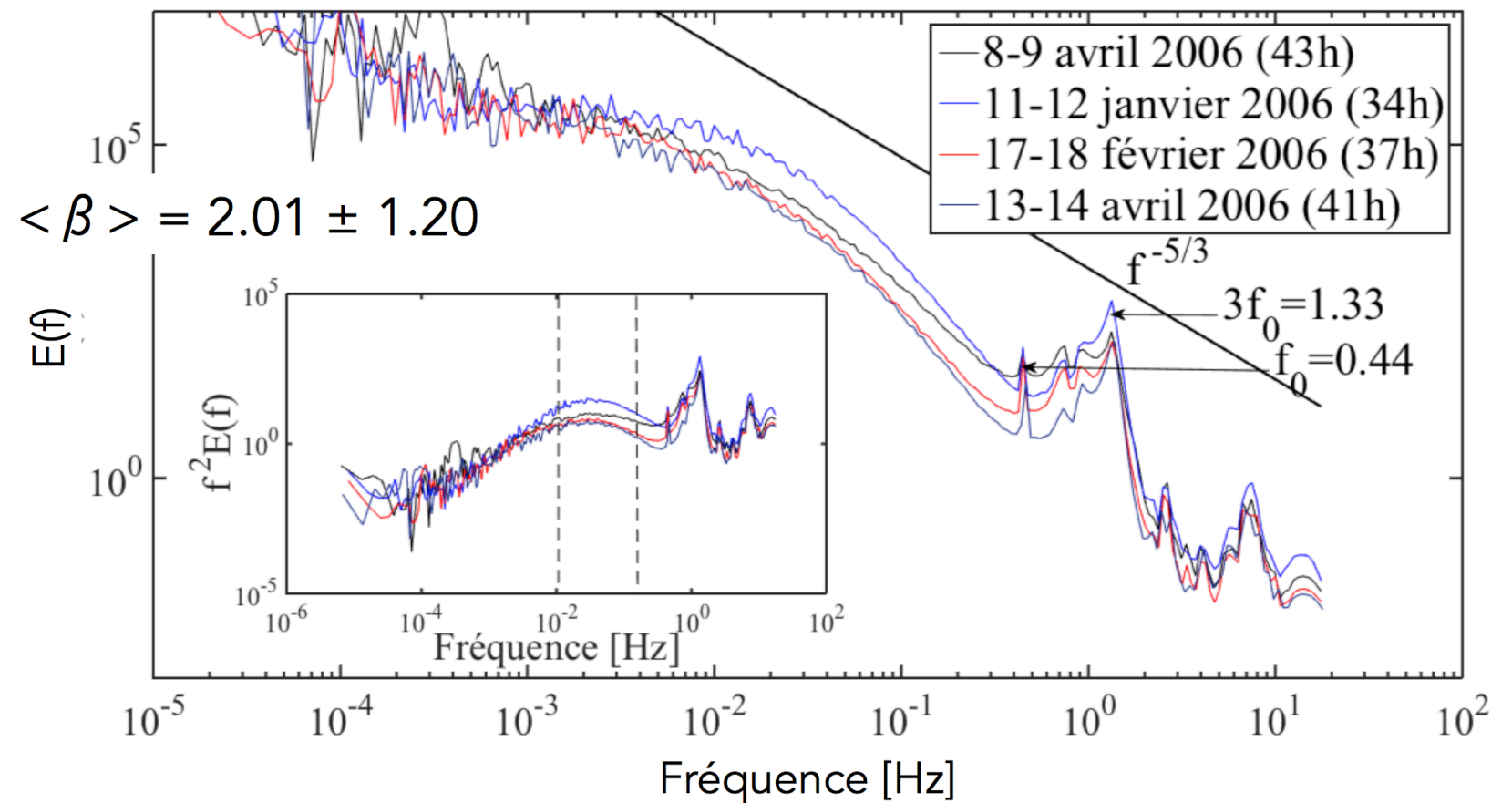
# Fluctuations de puissance (éoliennes)



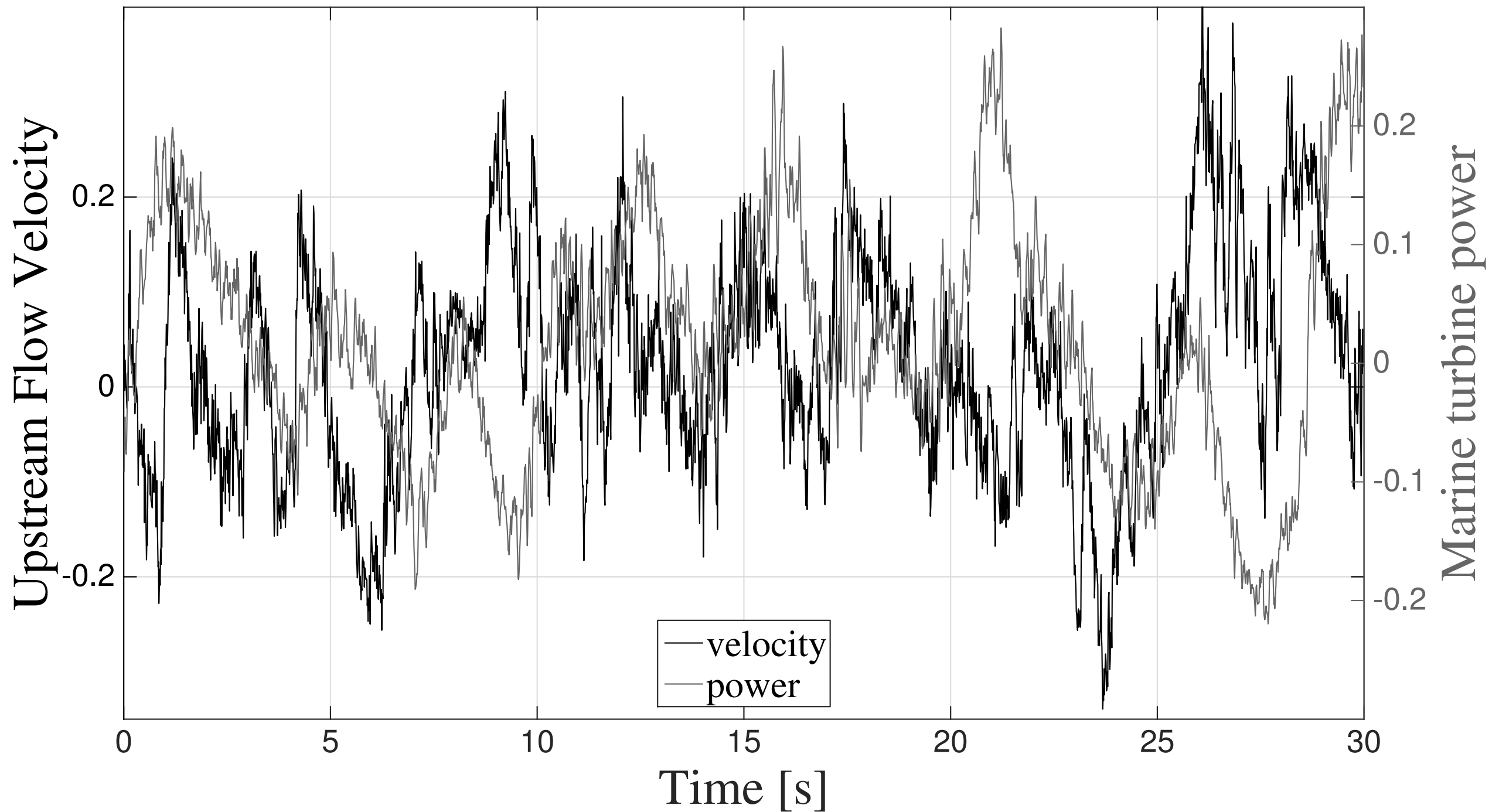
## Exemple des éoliennes

Apparition de pics  
autour d'une fréquence  
caractéristique

Systèmes à boute de  
vitesses (Gearbox) ->  
recherche d'une vitesse  
de rotation stabilisée

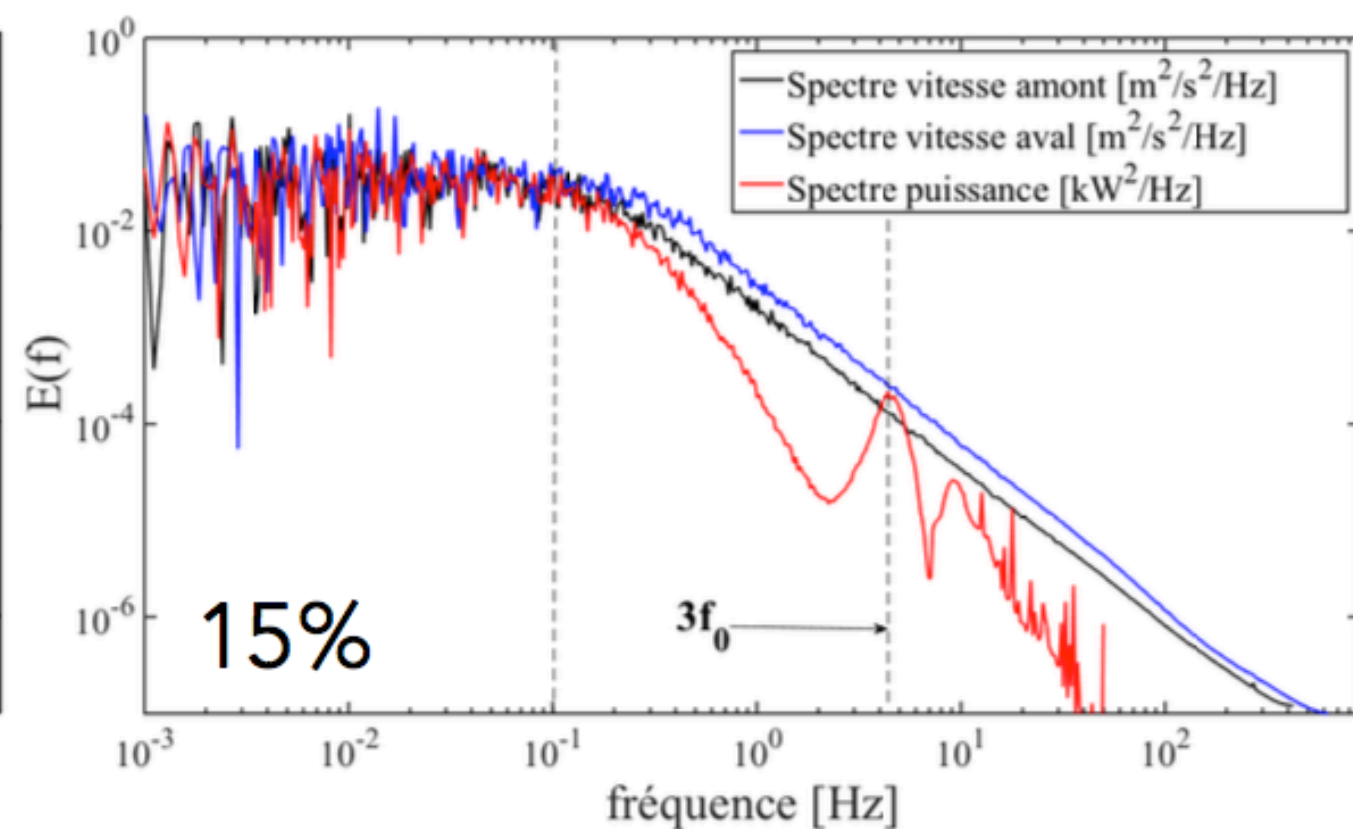
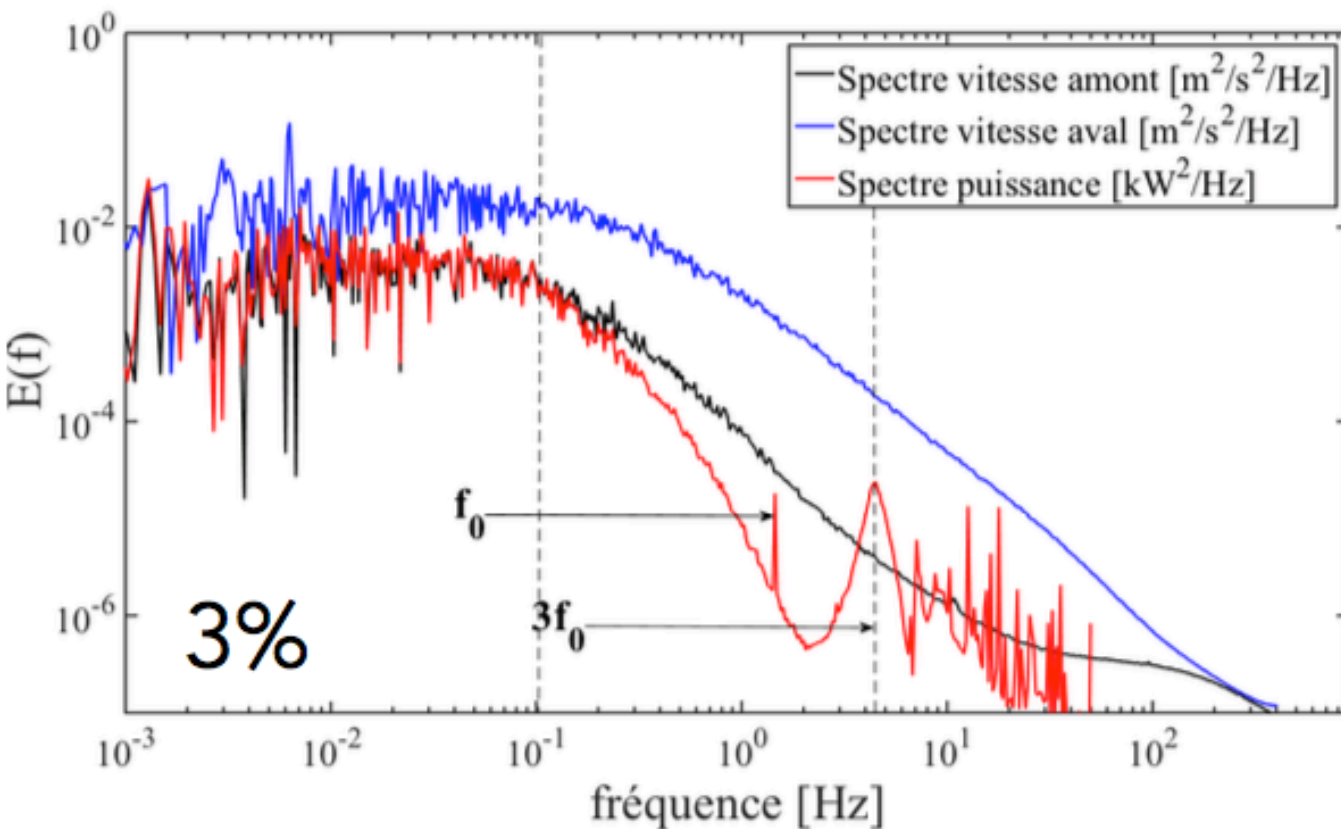


# Fluctuations de puissance pour le modèle d'hydrolienne





# Fluctuations de puissance pour le modèle d'hydrolienne

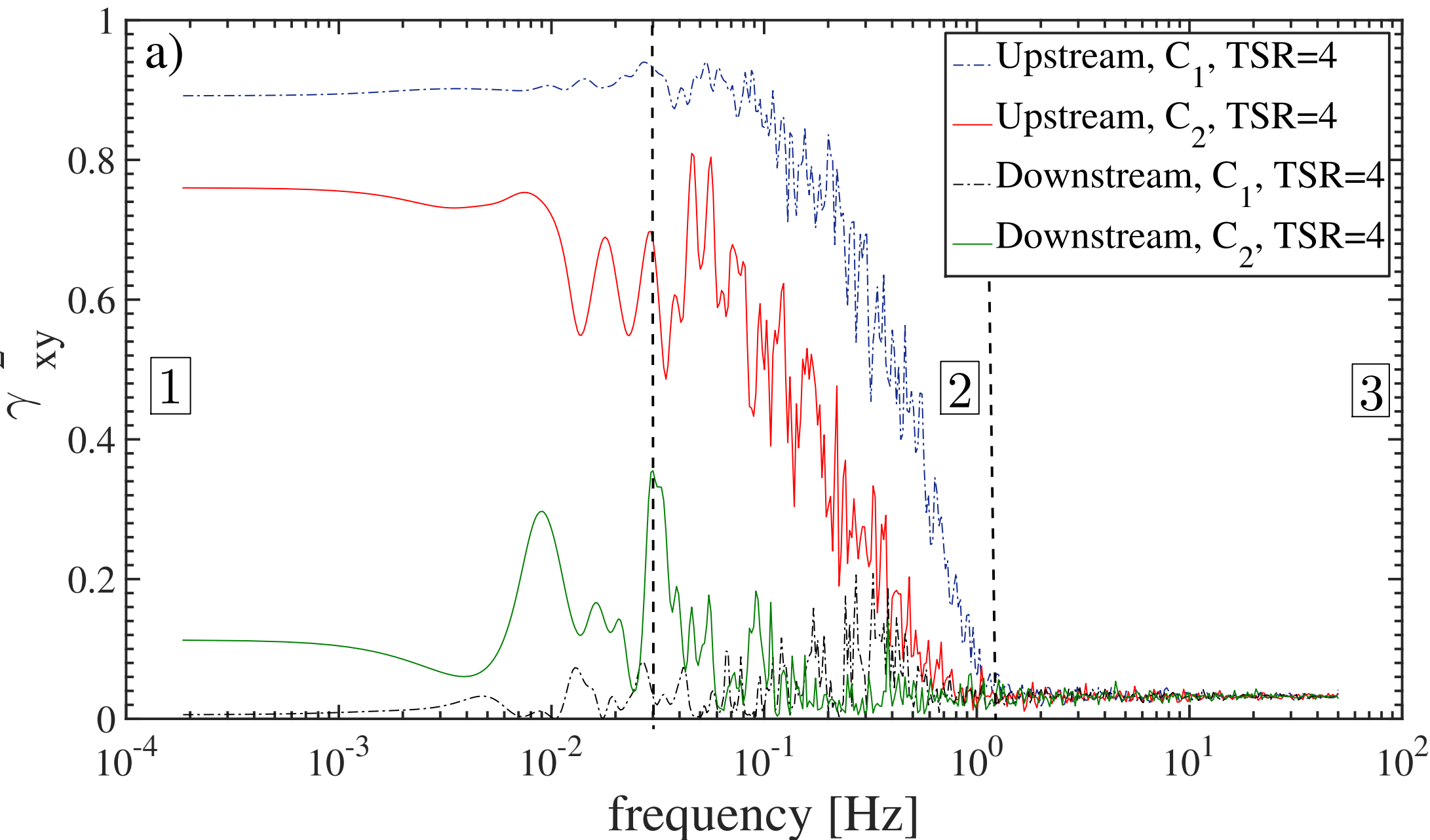


- Fortes corrélations pour  $f < 0.3$  Hz (avant la cascade)
- Pas de loi d'échelle pour la puissance fournie
- Signature de la fréquence caractéristique de rotation



# Fluctuations de puissance pour le modèle d'hydrolienne

$$\gamma_{xy}^2 = \frac{|E_{xy}(f)|^2}{E_{xx}(f) E_{yy}(f)} \leq 1$$

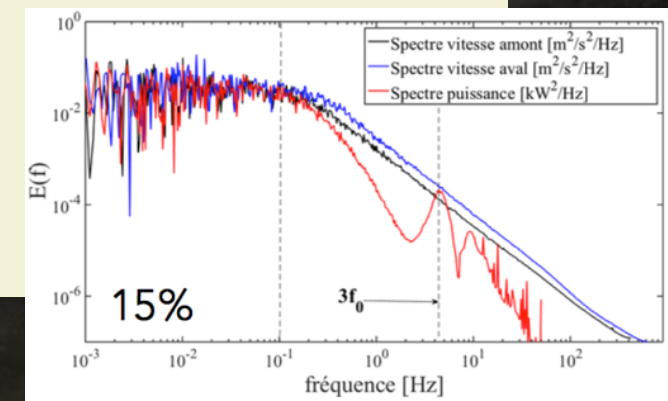


- Perte de corrélation au-delà de 1 Hz
- Forte corrélation entre vitesse amont et puissance produite, au delà de 20 s
- Corrélation visible avec la vitesse en amont
- Perte de corrélation avec la vitesse en aval



# Conclusion

- Etude de l'“intermittence” de la puissance produite par une hydrolienne, en relation avec la turbulence du courant fournie en entrée.
- Fluctuations de la puissance produite par une hydrolienne dans un écoulement contrôlé, dont la turbulence est bien caractérisée.
- Contrairement aux éoliennes à entraînement direct, pas de loi d'échelle dans les fluctuations de puissance.
- Pas de corrélation en dessous de 1s; forte corrélation entre puissance et fluctuations amont de la turbulence, au-dessus de 20s: donc fortes fluctuations à ces échelles, dans la puissance produite
- Perspectives: mesures similaires in situ





It is the end...

More info: [www.fg-schmitt.fr](http://www.fg-schmitt.fr)

François G. Schmitt  
and Yongxiang Huang

# STOCHASTIC ANALYSIS OF SCALING TIME SERIES

From Turbulence Theory to Applications

Cambridge University Press (2016)