

2. La ressource éolienne

2.4 Estimation de la ressource éolienne



Hussein Ibrahim, Ph.D. - Antoine Brégaint, M.Sc.A.

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Estimation du potentiel éolien
- Collecte des données
- Exploitation des données brutes
- Densité de probabilité de la vitesse du vent
- Calcul de l'énergie produite
- Méthode MCP
- Conclusion

Plan de cette présentation

- ***Introduction et objectifs***
- Estimation du potentiel éolien
- Collecte des données
- Exploitation des données brutes
- Densité de probabilité de la vitesse du vent
- Calcul de l'énergie produite
- Méthode MCP
- Conclusion

Introduction et objectifs

- La vitesse moyenne et le degré de turbulence du vent sont importants pour la conception des turbines éoliennes.
- La ressource éolienne (vitesse moyenne, distribution) est requise pour déterminer la production d'énergie sur un site et elle est déterminante pour la viabilité économique d'un projet éolien.
- Cette présentation a pour but de mettre en avant les différentes méthodologies utilisées pour déterminer la ressource éolienne d'un site donné.

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- ***Estimation du potentiel éolien***
- Collecte des données
- Exploitation des données brutes
- Densité de probabilité de la vitesse du vent
- Calcul de l'énergie produite
- Méthode MCP
- Conclusion

Question

- De quoi dépend directement la puissance disponible dans l'air ?
 - A. La masse volumique de l'air
 - B. Le carré de la vitesse du vent
 - C. Le cube de la vitesse du vent
 - D. Le diamètre du rotor
 - E. La hauteur de l'éolienne

Estimation du potentiel éolien

- Puissance éolienne disponible dans l'air :

$$P_{disponible} = \frac{1}{2} \rho_{air} \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) U^3$$

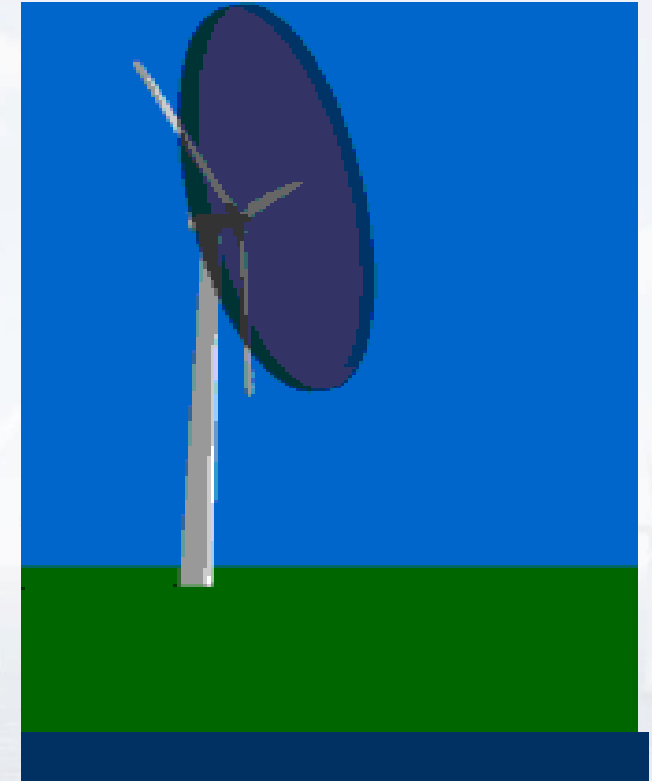
ρ_{air} : Masse volumique de l'air $\left(\frac{kg}{m^3} \right)$; U : Vitesse du vent $\left(\frac{m}{s} \right)$

$\frac{\pi D^2}{4}$: Surface balayée par le rotor (m^2)

- Puissance extractible par l'éolienne :

$$P_{ext} = \frac{1}{2} \rho_{air} C_p \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) U^3$$

C_p : Coefficient de puissance de l'éolienne (rendement aérodynamique)



Estimation du potentiel éolien

- Notion de coefficient de puissance du rotor C_p :

$$C_p = \frac{\text{Puissance rotor}}{\text{Puissance éolienne}} = \frac{P_{\text{rotor}}}{P_{\text{wind}}} = \frac{P_{\text{rotor}}}{\frac{1}{2} \rho_{\text{ref}} U^3 A_{\text{rotor}}}$$

- La valeur maximale de ce coefficient est déterminée par la limite de Betz :

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} = 59,3 \%$$

- Puissance maximale extractible par l'éolienne :

$$P_{\text{ext maximale}} = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} C_{pmax} \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) U^3$$

Estimation du potentiel éolien

- La puissance extractible par les éoliennes dépend donc du cube de la vitesse du vent.
- Dans le but d'estimer la production éolienne d'un site donné, il est donc primordial de connaître la distribution des vents à cet endroit.
- Pour ce faire, des méthodes statistiques sont utilisées et font l'objet de la suite de cette présentation.

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Estimation du potentiel éolien
- ***Collecte des données***
- Exploitation des données brutes
- Densité de probabilité de la vitesse du vent
- Calcul de l'énergie produite
- Méthode MCP
- Conclusion

Collecte des données

- Les différentes normes relatives à la collecte des données sont régies par International Electrotechnical Commission (IEC) <http://www.iec.ch/>
- La fréquence d'échantillonnage doit être d'au minimum 1 Hz, ce qui correspond à un Δt inférieur à 1 seconde.
- La moyenne des données doit être faite toutes les minutes ou toutes les 10 minutes. Cette moyenne est faite sur les N_{data} enregistrements collectés pendant cette période. En fonction de cette période, N_{data} varie typiquement de 30 à 600.
- Les séries ne sont pas archivées, seules les moyennes le sont (possiblement écart-type).
- Les stations de type « météo » ne sont pas régies par IEC (gouvernements). Un rapport est fait toutes les heures.

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Estimation du potentiel éolien
- Collecte des données
- ***Exploitation des données brutes***
- Densité de probabilité de la vitesse du vent
- Calcul de l'énergie produite
- Méthode MCP
- Conclusion

Exploitation des données brutes

- Il est possible d'utiliser directement les données brutes collectées. En notant N le nombre d'échantillons de durée Δ_t et U_i les vitesses moyennes obtenues pour chacun des N échantillons, les données statistiques se calculent de cette façon :

- Vitesse moyenne :

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i$$

- Ecart-type de la vitesse :

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left\{ \sum_{i=1}^N U_i^2 - N\bar{U}^2 \right\}}$$

Exploitation des données brutes

- Il est alors possible de déterminer la puissance et l'énergie éolienne disponible par unité de surface :
 - Densité de puissance éolienne (par unité de surface) :

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i^3$$

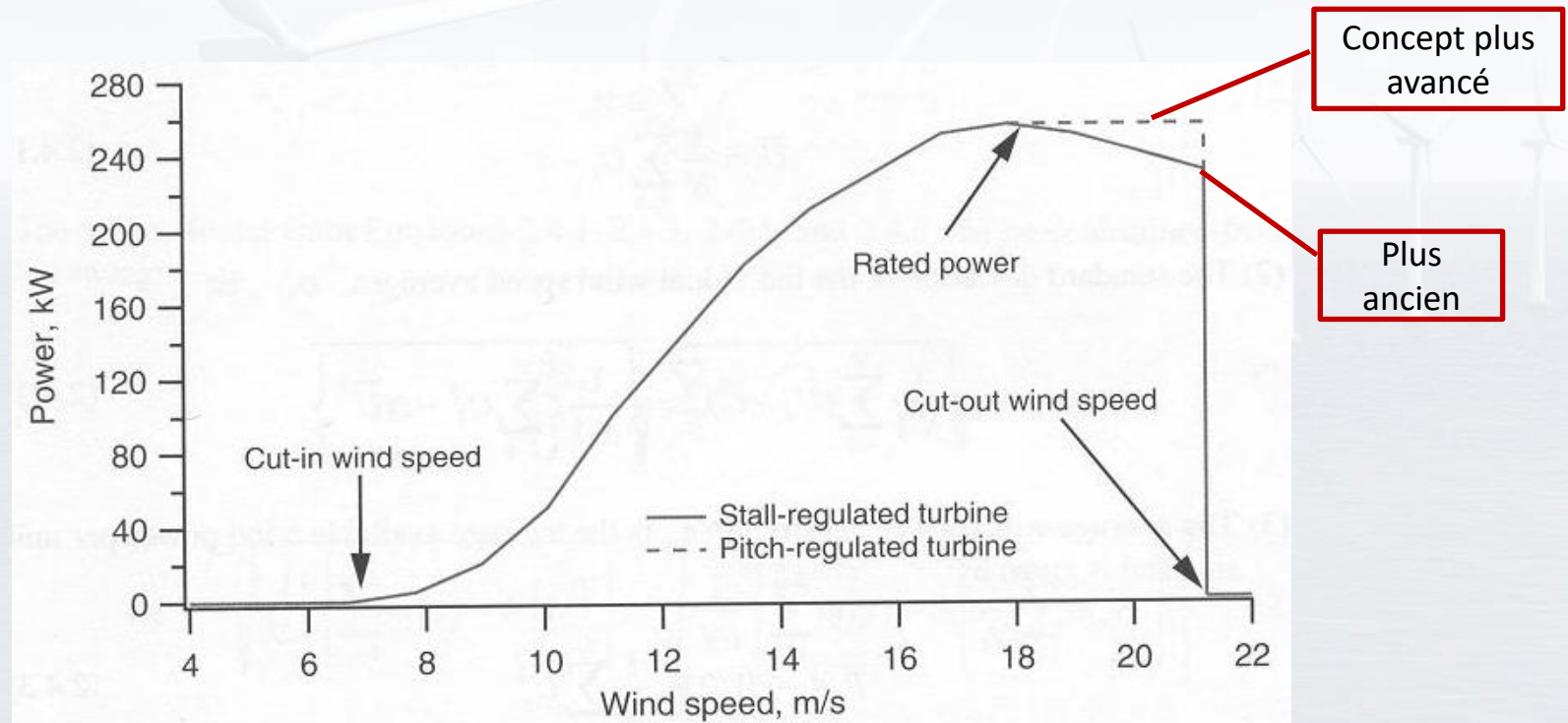
- Densité d'énergie éolienne (par unité de surface) :

$$\frac{\bar{E}}{A} = \frac{1}{2} \rho \Delta_t \sum_{i=1}^N U_i^3 = \frac{\bar{P}}{A} (N \Delta_t)$$

Exploitation des données brutes

- Si la courbe de puissance de l'éolienne est connue, il est alors possible de déterminer la puissance fournie par l'éolienne en fonction d'une vitesse de vent donnée. Cette courbe de puissance est de la forme suivante :

P_w est la puissance issue de l'éolienne. Elle diffère donc de P , la puissance éolienne issue de l'énergie mécanique du vent.



Exploitation des données brutes

- Dans le cas où la courbe de puissance normalisée $P_w^n(U^n)$ est donnée pour une densité de référence différente de la densité des conditions d'utilisation, il est nécessaire d'appliquer un ratio de densité pour déterminer la puissance réellement disponible.

- Ratio de densité :
$$\delta = \left(\frac{\rho_i}{\rho_{ref}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

- Si la machine est à contrôle par décrochage, il suffit d'appliquer ce ratio :

$$P_w^{corr}(U^n) = P_w^n(U^n) \delta^3 \text{ et } U^{corr} = U^n = U_i$$

- Si elle est à contrôle actif, il faut tout de même utiliser la courbe de puissance normalisée mais avec une vitesse corrigée :

$$U^{corr} = \frac{U_i}{\delta} \text{ et } P_w^{corr}(U_i) = P_w^n(U^{corr})$$

- Dans tous les cas, il est nécessaire d'évaluer la courbe de puissance normalisée à la vitesse corrigée U_{corr} pour obtenir la puissance éolienne corrigée correspondant à la vitesse mesurée U_i .

Exploitation des données brutes

- Une fois la courbe de puissance établie aux conditions d'utilisation, il est possible de déterminer la puissance moyenne et l'énergie issue de l'éolienne :

- Puissance moyenne issue de l'éolienne :

$$\overline{P}_w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_w^{corr}(U_i)$$

- Énergie issue de l'éolienne :

$$E_w = \sum_{i=1}^N P_w^{corr}(U_i)(\Delta t)$$

Exploitation des données brutes

- Puissance moyenne annuelle de l'éolienne :

$$[\overline{P_w}]_{1an} = \frac{1}{N_{1an}} \sum_{i=1}^{N_{1an}} P_w^{corr}(U_i)$$

- Facteur d'utilisation :

$$FU = \frac{[\overline{P_w}]_{1an}}{P_w(nominal)}$$

- Production énergétique annuelle de l'éolienne :

$$[\overline{E_w}]_{1an} = \sum_{i=1}^{N_{1an}} P_w^{corr}(U_i) N \Delta_t = [\overline{P_w}]_{1an} N_{1an} N \Delta_t$$

Avec $N_{1an} N \Delta_t = 8760$ heures

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Estimation du potentiel éolien
- Collecte des données
- Exploitation des données brutes
- ***Densité de probabilité de la vitesse du vent***
- Calcul de l'énergie produite
- Méthode MCP
- Conclusion

Question

- Quels paramètres doivent être connus pour déterminer une loi de probabilité de distribution de la vitesse du vent ?
 - A. Le jour de l'année
 - B. La moyenne de la vitesse du vent
 - C. La vitesse maximale de la vitesse du vent
 - D. La vitesse minimale de la vitesse du vent
 - E. L'écart type de la vitesse du vent

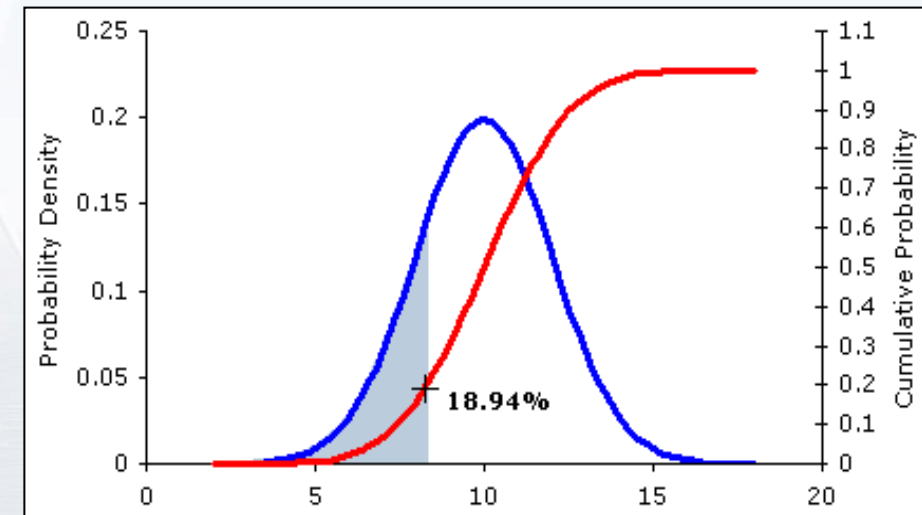
Densité de probabilité de la vitesse du vent

- La densité de probabilité (bleu) définit la probabilité d'obtenir des vitesses de vent comprises entre U_a et U_b :

$$p(U_a \leq U \leq U_b) = \int_{U_a}^{U_b} p(U) dU \text{ où } \int_0^{\infty} p(U) dU = 1$$

- La fonction de distribution cumulative (rouge) représente quant à elle la probabilité d'obtenir une vitesse de vent inférieur ou égal à une vitesse de référence :

$$F(U) = p(U' \leq U) = \int_0^U p(U') dU' \text{ et } p(U) = \frac{dF(U)}{dU}$$



Densité de probabilité de la vitesse du vent

- Si $p(U)$ est connue, les paramètres suivants peuvent être déterminés :

- Vitesse moyenne :

$$\bar{U} = \int_0^{\infty} U p(U) dU \text{ et } \bar{U}^3 = \int_0^{\infty} U^3 p(U) dU$$

- Ecart type de la vitesse :

$$\sigma_U = \sqrt{\int_0^{\infty} (U - \bar{U})^2 p(U) dU}$$

- Moyenne du potentiel éolien (par unité de surface) :

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} U^3 p(U) dU = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^3$$

Densité de probabilité de la vitesse du vent

- Facteur de forme de l'énergie :

$$K_e = \frac{\overline{U^3}}{\overline{U}^3}$$

- Puissance moyenne de l'éolienne réelle :

$$\overline{P_w} = \int_0^{\infty} P_w(U) p(U) dU = \int_0^{\infty} P_w(U) dF(U)$$

- Puissance moyenne d'une éolienne avec C_p constant :

$$\overline{P_w} = \frac{1}{2} \bar{\rho} A C_p \overline{U}^3 K_e$$

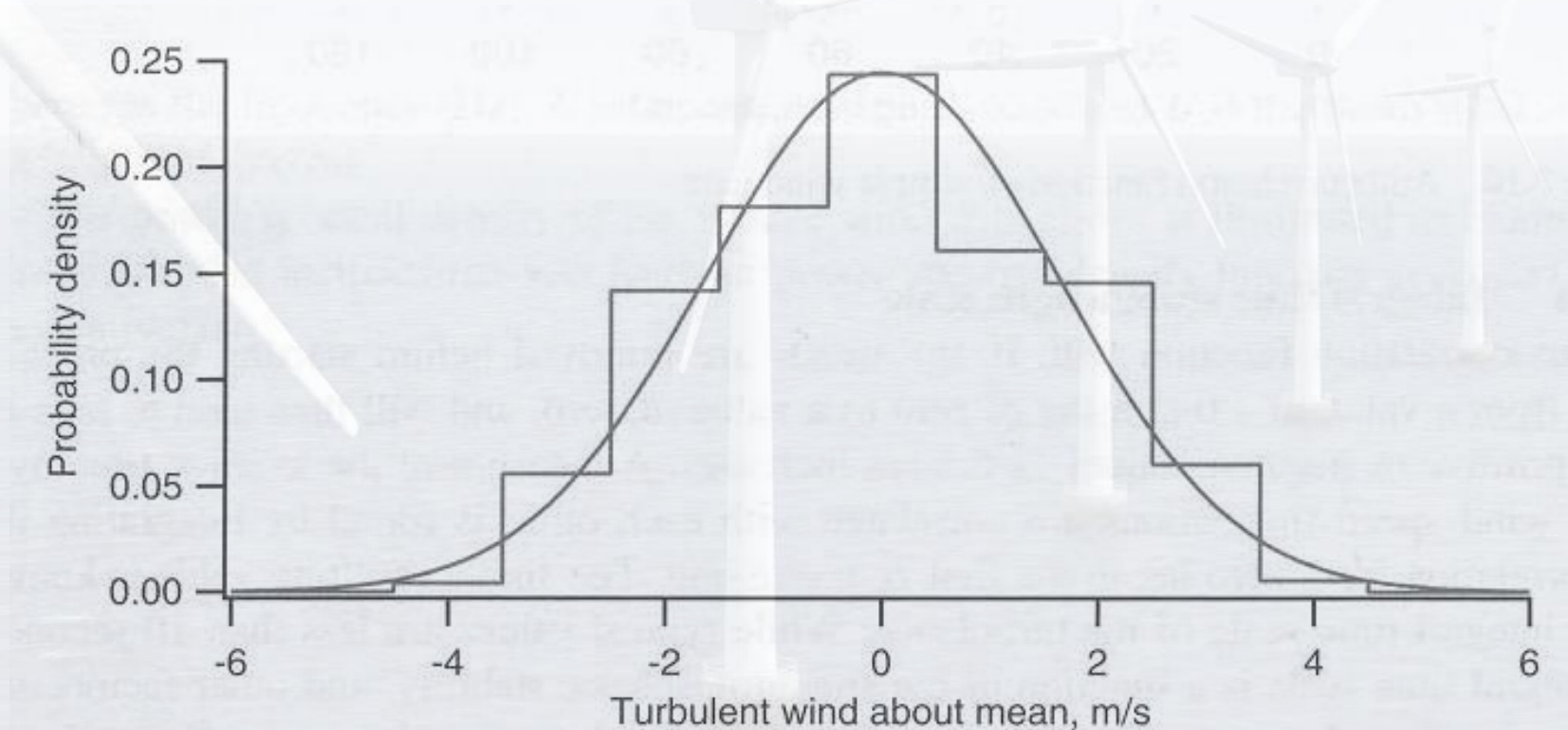
Densité de probabilité de la vitesse du vent

- Tous ces paramètres peuvent être déterminés lorsque $p(U)$ est connue. Il existe pour cela différents outils appelés « probabilité de distribution ».
- Les plus répandues et utilisées sont celles gaussienne, de Rayleigh et de Weibull.
- La connaissance des paramètres caractéristiques des vents (moyenne, écart type) est toutefois nécessaire pour établir ces lois de probabilité.

Densité de probabilité de la vitesse du vent

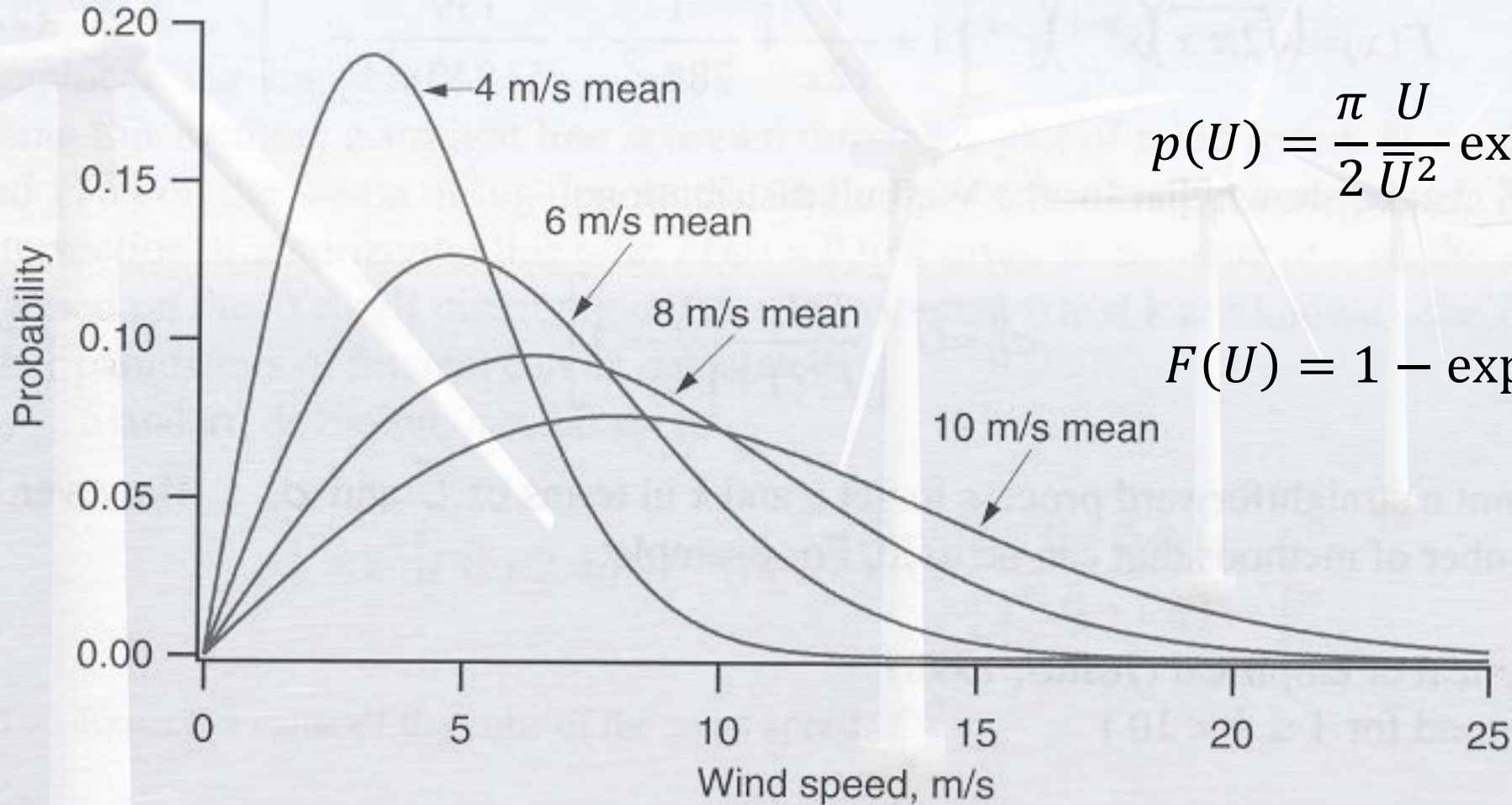
- ❖ Distribution gaussienne (court terme : $N\Delta_t = 1$ ou 10 minutes \rightarrow Turbulences)

$$p(U) = \frac{1}{\sigma_U \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{U - \bar{U}}{\sigma_U}\right)^2\right)$$



Densité de probabilité de la vitesse du vent

❖ Distribution de Rayleigh (long terme : $N\Delta_t = 8760$ heures)

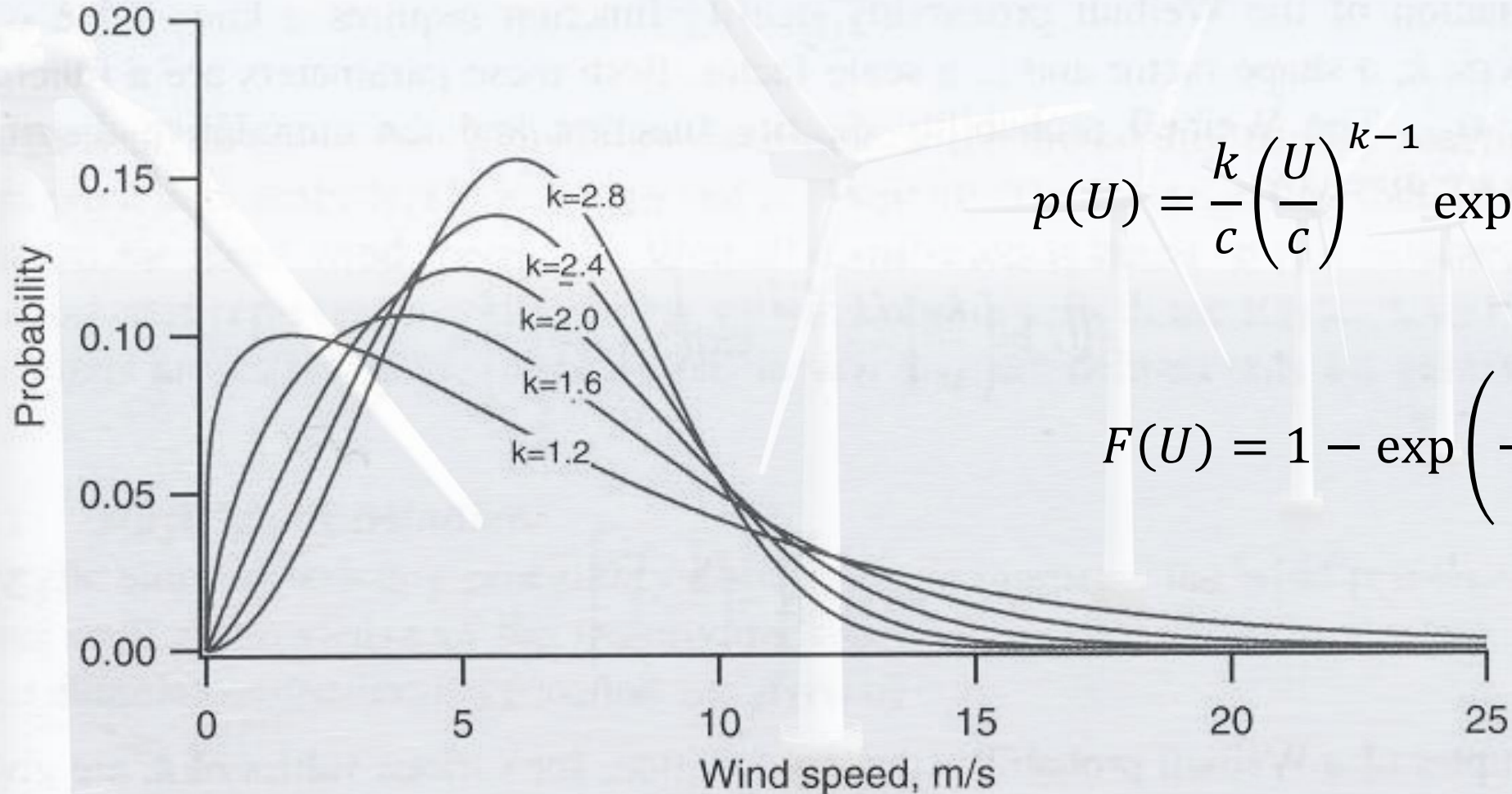


$$p(U) = \frac{\pi U}{2 \bar{U}^2} \exp\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}}\right)^2\right)$$

$$F(U) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}}\right)^2\right)$$

Densité de probabilité de la vitesse du vent

- ❖ Distribution de Weibull – inclut Rayleigh pour $k=2$ (long terme : $N\Delta_t = 8760$ heures)



$$p(U) = \frac{k}{c} \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right)$$

$$F(U) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right)$$

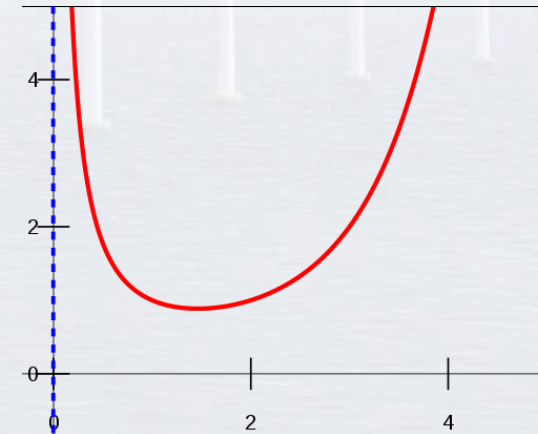
Densité de probabilité de la vitesse du vent

- ❖ Distribution de Weibull – inclut Rayleigh pour $k=2$ (long terme : $N\Delta_t = 8760$ heures)
- k (facteur de forme) et c (facteur d'échelle) sont des facteurs dépendants de \bar{U} et de σ_U .

$$\bar{U} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \text{ et } \sigma_U^2 = \bar{U}^2 \left(\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - 1 \right)$$

- $\Gamma(x)$ est la fonction gamma hypergéométrique :

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt$$



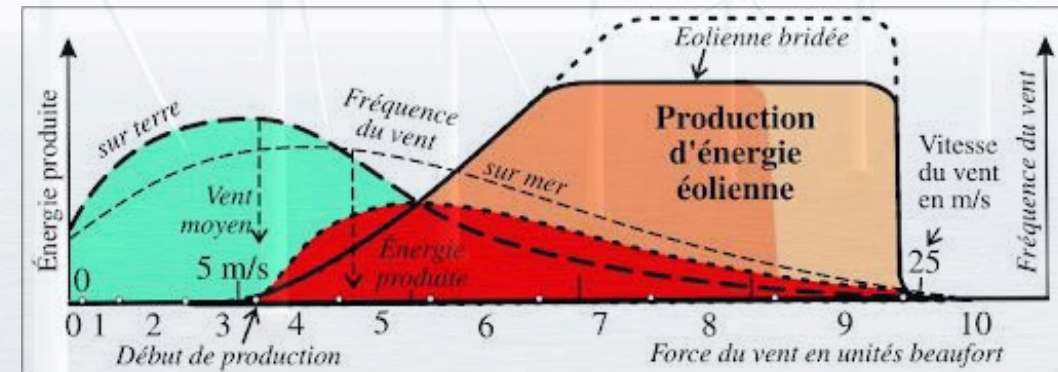
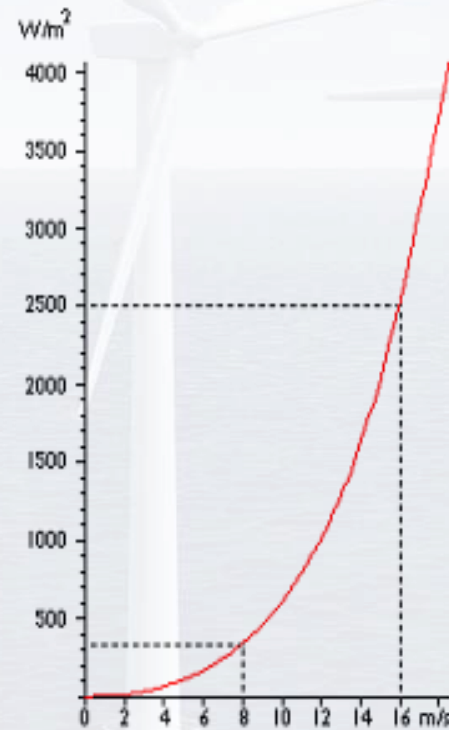
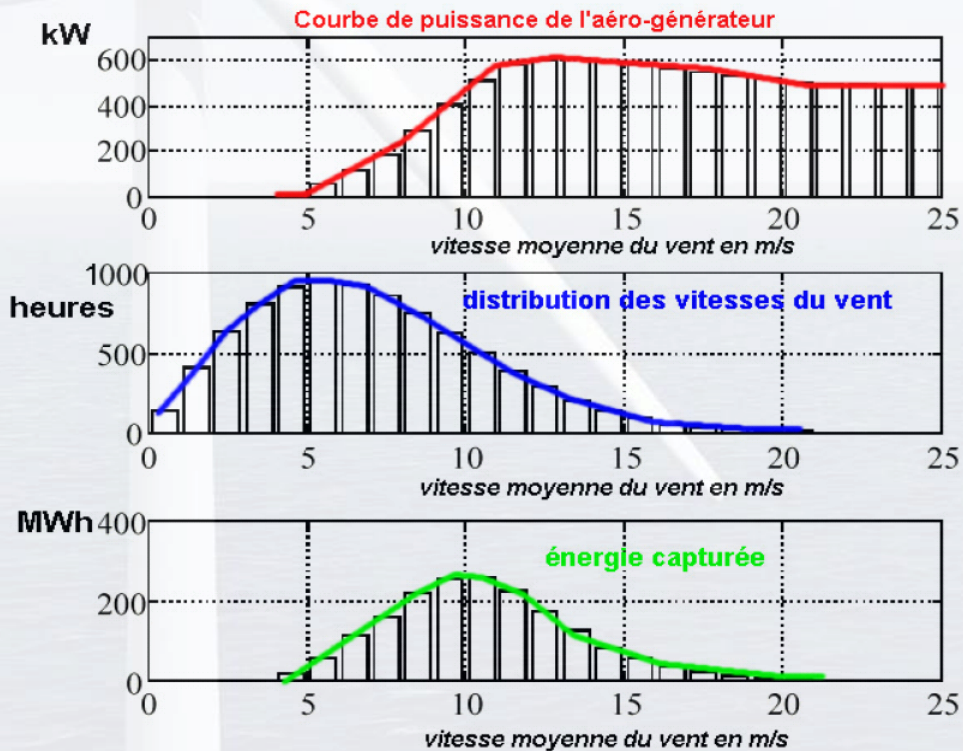
Pour plus d'informations , cf. Chapitre 2 du livre de référence : *Wind Energy Explained : Theory, Design and Application*

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Estimation du potentiel éolien
- Collecte des données
- Exploitation des données brutes
- Densité de probabilité de la vitesse du vent
- ***Calcul de l'énergie produite***
- Méthode MCP
- Conclusion

Calcul de l'énergie produite

- La connaissance de la courbe de puissance de la turbine éolienne et de la distribution du vent permet d'en déduire l'énergie capturée par l'éolienne :



Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Estimation du potentiel éolien
- Collecte des données
- Exploitation des données brutes
- Densité de probabilité de la vitesse du vent
- Calcul de l'énergie produite
- ***Méthode MCP***
- Conclusion

Méthode MCP

- Plusieurs techniques d'estimation de la ressource éolienne existent pour construire les atlas éoliens (Module 2.5) :
 - Expérimentale :
 - Instruments et mesure de la vitesse du vent (Module 2.3)
 - Analyse des données du vent (Module 2.4)
 - **Estimation du potentiel éolien (méthode MCP)**
 - Modélisation par ordinateur :
 - WasP (Riso National Laboratory)
 - ARIA (France)
 - WEST (Environnement Canada) - Anémoscope

Méthode MCP

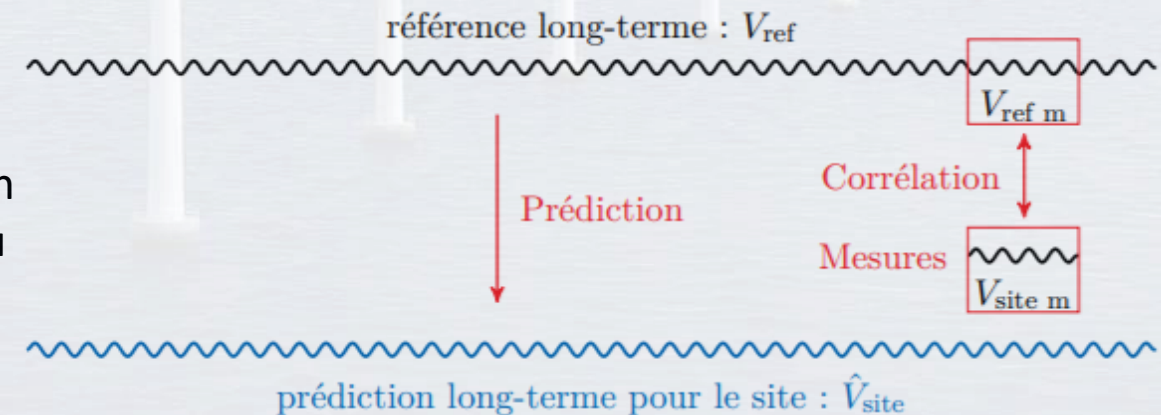
- Les mesures expérimentales (décrites dans le Module 2.3) ont certes des avantages mais les limitations sont nombreuses :
 - Avantages :
 - Résultats véritables en fonction du temps
 - Possibilité d'avoir l'influence dynamique et thermique sur l'air à l'endroit voulu
 - Inconvénients :
 - Résultats valides à un seul endroit
 - Méthode coûteuse et incertaine (besoin de placer les mâts à des endroits isolés)
 - Impossible d'obtenir une carte des vents

 **Méthode M.C.P**

Méthode MCP

- Installation de mâts de mesure avec anémomètre et vanne de direction (préférentiellement à deux hauteurs différentes ou à la même hauteur que les éoliennes prévues d'être installées).
- Corrélation (linéaire) entre les vitesses sur le site (V_{site}) et les données à long terme (V_{ref}) pour chacune des directions du vent.
- Durée minimale de 6 mois de mesure.

Source : Bénédicte Jourdir. Ressource éolienne en France métropolitaine : méthodes d'évaluation du potentiel, variabilité et tendances. Climatologie. Ecole Doctorale Polytechnique, 2015.



Méthode MCP

- Inconvénients de la méthode MCP :
 - Les mâts de mesure installés à la hauteur de la nacelle sont suffisamment hauts pour requérir des permis particuliers.
 - Absence de stations météorologiques avec des données multi-annuelles dans un rayon acceptable de 50 – 100 km.
 - L'analyse des données peut être très laborieuse si les données de la station de référence ne sont pas de bonne qualité.
 - La méthode est basée sur l'hypothèse que les données précédentes fournissent une bonne indication du potentiel éolien futur.

Méthode MCP

- Simulation sur ordinateur :
 - Permet de calculer des cartes de vents à partir d'une initialisation, soit par des données d'un mât (expérimental), soit par les données synoptiques (données de réanalyse des courants à hautes altitudes).
 - Moindre coût.
 - Permet d'évaluer des grands territoires.
 - Peu précis pour des sites particuliers.
 - Non reconnus par financiers.

Méthode MCP

- Autres aspects :
 - Simplification de la méthode MCP pour des petits projets.
 - Plus le projet est coûteux plus l'estimation doit être exacte.
 - La mesure pendant 12 mois est exigée pour les grands projets.

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Estimation du potentiel éolien
- Collecte des données
- Exploitation des données brutes
- Densité de probabilité de la vitesse du vent
- Calcul de l'énergie produite
- Méthode MCP
- ***Conclusion***

Conclusion

- Les méthodologies présentées sont de bons outils pour connaître le potentiel éolien existant sur un site donné.
- Ces outils sont toutefois statistiques et les potentiels réellement exploitables peuvent être différent des prévisions.
- Ces méthodes peuvent être utilisées pour construire les atlas éoliens. Ces derniers font l'objet de la présentation suivante.

MERCI POUR VOTRE ATTENTION !



MERCI



Questions ?

Hussein IBRAHIM, Ph.D
Tél: 418-962-9848 # 340
cc-hussein.ibrahim@etsmtl.ca
Hussein_ibrahim01@uqar.ca
Hussein.ibrahim@itmi.ca