

1.3

Évaluation du potentiel Énergétique Éolien d'Un Site

Caractérisation d'un site

Pour l'application éolienne, la principale étape consiste à connaître localement la nature des vents du site où l'on souhaite implanter des machines. Les machines éoliennes doivent être adaptées aux caractéristiques de potentiel éolien de la zone de fonctionnement. Parmi les différents courbes (données) et moyennes relevés sur un site, on utilise particulièrement.

1.3.1

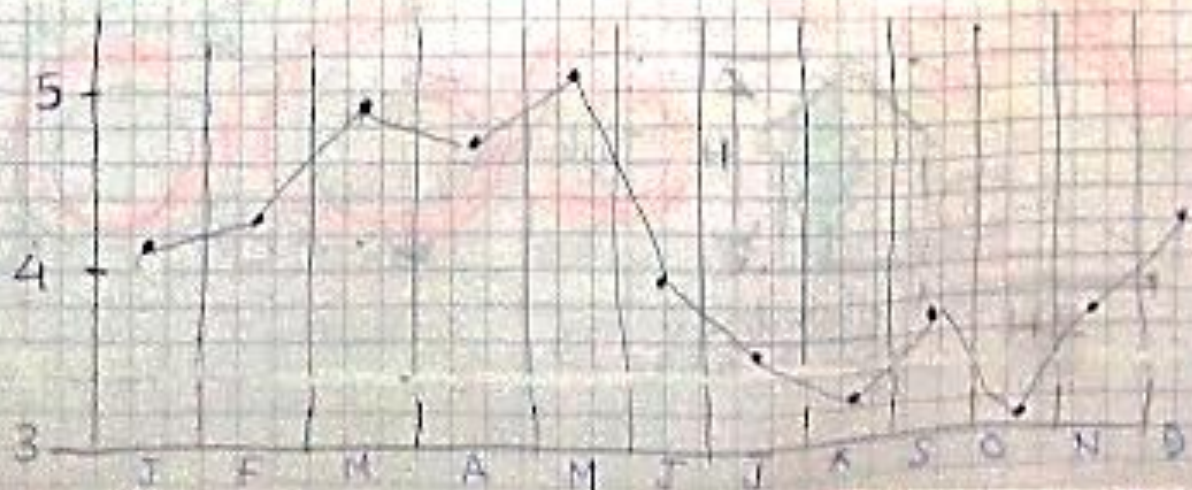
Courbes moyennes mensuelles de la vitesse

C'est la répartition annuelle des vitesses moyennes sur un site pour une période donnée. Comme la plupart des éoliennes ne démarrent à une vitesse supérieure à 3 m/s à titre d'exemple,

On remarque sur la figure ^{et Tab.} ci-dessous que l'exploitation de l'énergie éolienne est favorable pour le site de M'Sila, car les moyennes mensuelles du vent restent supérieures à 3 m/s.

Par ailleurs, la vitesse du vent est plus importante en hiver et au printemps que pendant en été.

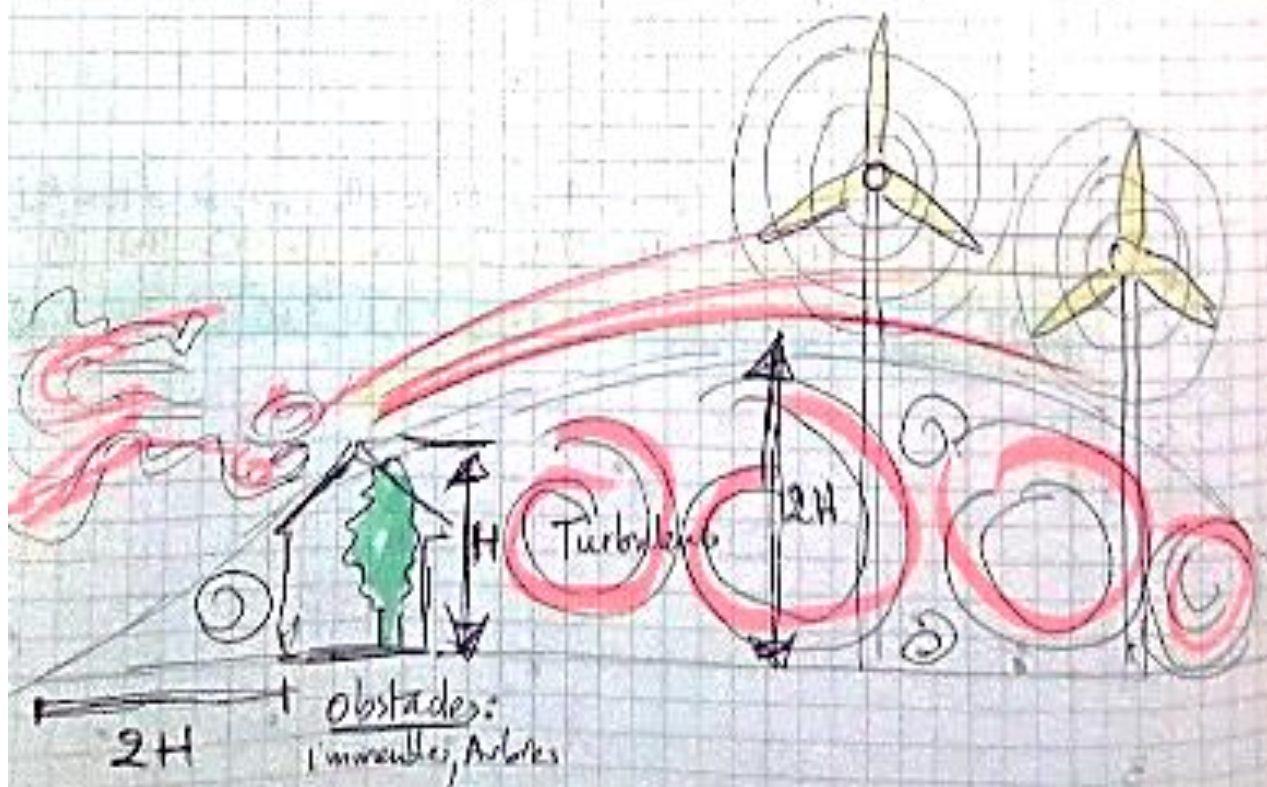
| Vitesse Moy Mensuelle mesurée à 10m/Alt | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| J | F | Mar | A | Mai | Juin | J | A | S | O | N | D |
| 4,12 | 4,31 | 4,97 | 4,70 | 5,14 | 3,97 | 3,48 | 3,24 | 3,69 | 3,10 | 3,73 | 4,22 |



1.3.2

Profils des vents (Caract. vitane-Alt)

Au sol, le vent est fortement freiné par des obstacles et des accidents de terrain. A une certaine hauteur, dans les couches géostrophiques (à en 5 km de hauteur), le vent ne subit plus l'influence de la surface du sol (influence nulle). Entre les deux, la vitesse du vent varie en fonction de la hauteur. Ce phénomène est connu sous la désignation de cisaillement du vent.



Au dessus d'un terrain plat, le profil du vent peut être obtenu en utilisant les 2 formules suivantes :

$$V_2 = V_1 \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)}$$

eq 1

ou encore

$$V_2 = V_1 \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^n$$

eq 2

Gipe 1995

La vitesse de référence V_1 est mesurée à la hauteur h_1 et V_2 est la vitesse du vent à la hauteur h_2 et z_0 est la longueur de rugosité

L'exposant n dépend de la configuration de terrain et varie de 0,08 à 0,4 (voir tableau ci-dessous)

| Nature du terrain | Exposant n |
|--|--------------|
| <u>Plat</u> : glace, neige | 0,08 ÷ 0,12 |
| <u>Peu accidenté</u> : culture, pâturage | 0,13 ÷ 0,16 |
| <u>Accidenté</u> : zone peu habitée | 0,2 ÷ 0,23 |
| <u>Très accidenté</u> : villes | 0,25 ÷ 0,4 |

Si $N \rightarrow \infty$ et $\Delta v \rightarrow dv$, la fréquence f_i et la fréquence cumulée F_i tendent respectivement vers la fonction de densité $f(v)$ et la fonction de répartition $F(v)$ de probabilité.

$F(v)$ est la probabilité que la vitesse du vent soit inférieure à une certaine valeur v

et $f(v)$ est la dérivée de $F(v)$

$$f(v) = \frac{dF(v)}{dv}$$

Parmi les distributions les plus utiles dans les modèles statistiques, la distribution de Weibull qui demeure la plus appropriée pour la description des propriétés statistiques du vent.

La fonction de répartition de Weibull, à deux paramètres c et k s'écrit :

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

où

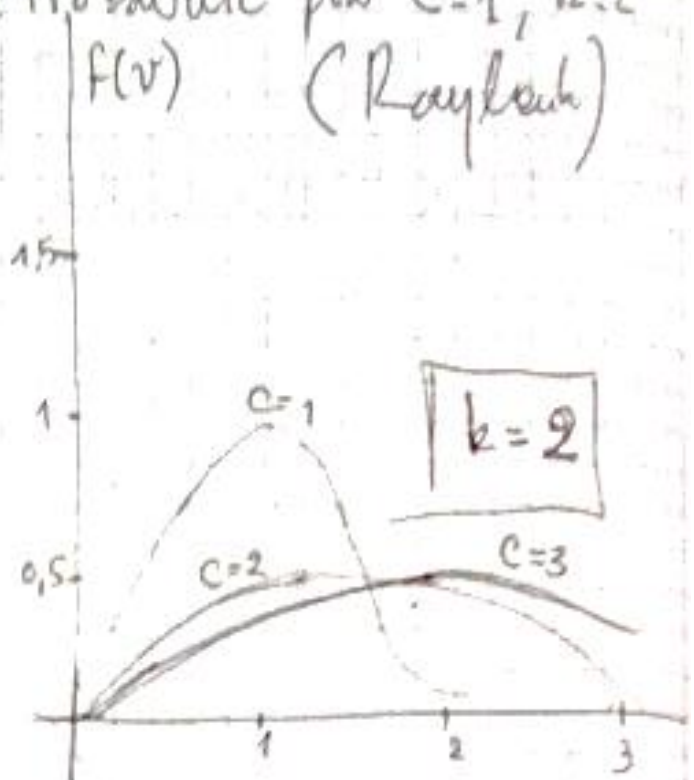
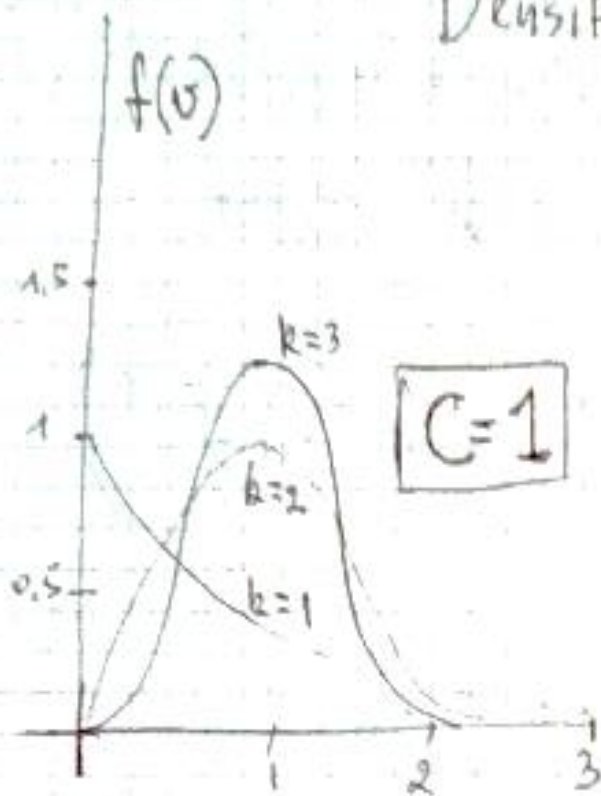
c : est le facteur d'échelle de Weibull exprimé en m/s il permet d'exprimer la chronologie d'une vitesse caractéristique. Il est proportionnel à la vitesse moy de vent.

k est le facteur de forme de Weibull. Il donne la forme de distribution $k = 1 + s$. Une valeur très faible impliquerait un vent très faible alors qu'un vent constant impliquerait une valeur de k plus élevée. Il caractérise l'asymétrie de la distribution.

En utilisant la relation $f(v) = \frac{dF(v)}{dv}$, il résulte la fonction de la densité de probabilité :

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

Densité de probabilité pour $C=1, k=2$
(Rayleigh)



NOTE : — Pour une vitesse moyenne donnée, un faible facteur de forme C indique que la distribution des vitesses du vent est relativement large de part et d'autre de la moyenne, alors qu'un facteur de forme élevé indique que la distribution des vitesses du vent est relativement étroite de part et d'autre de la moyenne.

Pour une vitesse moyenne, un faible facteur de forme conduit à une production d'énergie plus élevée.

Détermination des Paramètres de Weibull

Il existe de nombreuses méthodes pour calculer les facteurs k et c à partir d'une distribution de vent donnée.

1) Méthode graphique :

C'est une méthode basée sur la fonction cumulative de Weibull, en la transformant en une forme linéaire en adoptant des échelles logarithmiques.

L'expression de la distribution cumulée de la vitesse

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

peut être réécrite sous la forme suivante :

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

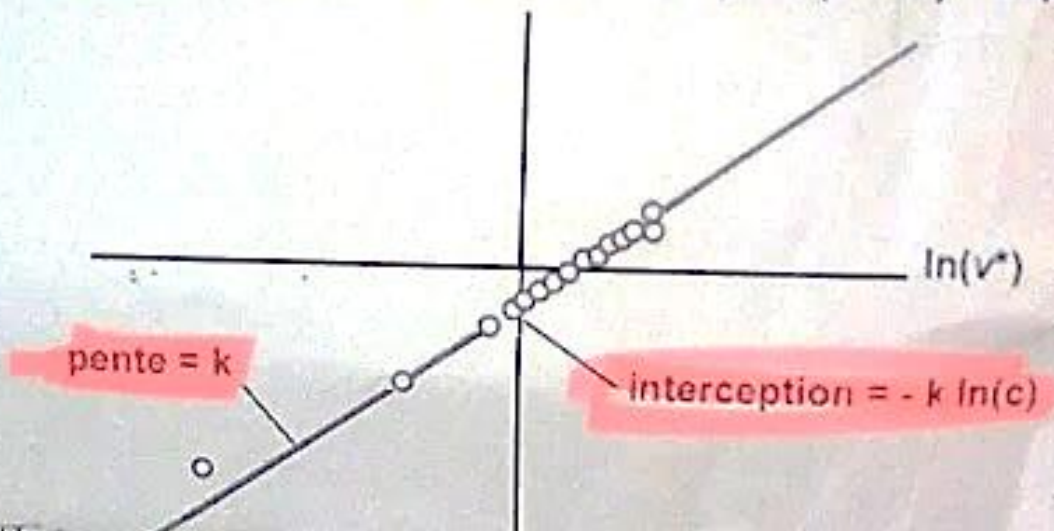
En traçant la droite qui représente le log. népérien de la fonction cumulative en fonction du log. népérien de la vitesse on obtient

$$\ln \left\{ -\ln[1-F(v)] \right\} = k \ln(v_i) - k \ln(c)$$

Le facteur k représente la pente de la droite
 Le produit $-k \ln(c)$ représente l'ordonnée
 à l'origine.

Distribution de Weibull, estimation des paramètres

$$\ln[-\ln(Q)] = k \ln(v^*) - k \ln(c) \quad \leftarrow Q = \text{prob}(v > v^*) = \exp[-(v^*/c)^k]$$



NoB. Cette transformation logarithmique est la base de la méthode graphique et son application exige que les données de vitesses du vent soient en forme de fréquence de distribution cumulative.

2 - Méthode de Maximal de vraisemblance

C'est une méthode itérative de détermination des paramètres de Weibull, où k et c sont données par les relations suivantes.

$$k = \left(\frac{\sum_{c=1}^N v_c^k \ln(v_c)}{\sum_{c=1}^N v_c^k} \right) - \left(\frac{\sum_{c=1}^N \ln(v_c)}{N} \right)$$

$$c = \left(\frac{1}{N} \sum_{c=1}^N v_c^k \right)^{1/k}$$

où v_c vitesse non nulle du vent à un instant c et N est le nombre de vitesses non nulle.

N.B: Cette méthode utilise une équation non linéaire nécessitant une solution itérative.

3 - Autres méthodes

Les 2 paramètres k et c peuvent être obtenus en utilisant les 2 expressions suivantes:

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_{\text{maj}}} \right)^{-1,086} \quad \text{et} \quad c = \frac{v_{\text{maj}}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}$$

1.3.5

Production énergétique

Potentiel Énergétique éolien

(a) Puissance éolienne (Densité de puissance)
la puissance par une vitesse donnée s'est

$$P_i = \frac{1}{2} \rho S v_i^3$$

la puissance moyenne est donnée par
la vitesse moyenne $v_{\text{moy}} = \sum v_i \cdot f(v_i)$ s'est

$$P_{v_{\text{moy}}} = \frac{1}{2} \rho S v_{\text{moy}}^3$$

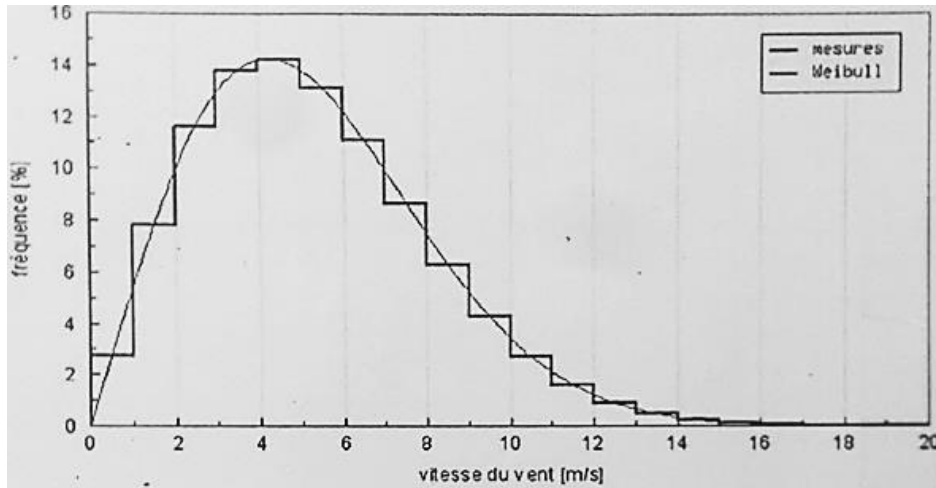
(b) Énergie éolienne

$$E_i = 8760 \cdot \sum_i P_i \cdot f(v_i)$$

EXERCICES CORRIGES

EXERCICE 1 :

La répartition sur **une année** de la vitesse du vent d'un site répond à la courbe de la figure ci-dessous (fonction de Weibull avec $c = 6$ et $k = 2$)



| | | | | | | | | | | |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Classe (m/s) | 0 - 1 | 1 - 2 | 2 - 3 | 3 - 4 | 4 - 5 | 5 - 6 | 6 - 7 | 7 - 8 | 8 - 9 | 9 - 10 |
| Fréquence(%) | 2.75 | 7.80 | 11.64 | 13.79 | 14.20 | 13.15 | 11.14 | 8.72 | 6.34 | 4.30 |
| Classe (m/s) | 10-11 | 11-12 | 12-13 | 13-14 | 14-15 | 15-16 | 16-17 | 17-18 | 18-19 | 19-20 |
| Fréquence(%) | 2.73 | 1.62 | 0.91 | 0.48 | 0.24 | 0.11 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.00 |

1. Calculer la vitesse moyenne du vent.
2. Une certaine vitesse du vent se calcule en utilisant la formule suivante : $c(\ln 2)^{1/k}$, Calculer cette vitesse. Que signifie-t-elle ?
3. Déterminer la classe de vitesse contenant la valeur modale. Que signifie-t-elle ?
4. Calculer le nombre d'heure/an où le vent souffle à une vitesse comprise entre 4

CORRIGE

1.

$$\begin{aligned}\bar{v} &= \sum_i f_i v_i \\ &= (0,5 * 2,75 + 1,5 * 7,8 + 2,5 * 11,64 + 3,5 * 13,79 + 4,5 * 14,20 + 5,5 * 13,15 + 6,5 * 11,14 + 7,5 * 8,72 + 8,5 * 6,34 \\ &\quad + 9,5 * 4,3 + 10,5 * 2,73 + 11,5 * 1,62 + 12,5 * 0,91 + 13,5 * 0,48 + 14,5 * 0,24 + 15,5 * 0,11 + 16,5 * 0,05 + \\ &\quad 17,5 * 0,02 + 18,5 * 0,01 + 19,5 * 0) = 5,31 \text{ m/s}\end{aligned}$$

2.

$$\text{Med}(v_i) = c(\ln 2)^{1/k} \cong 5 \frac{m}{s} \quad (c=6, \quad k=2)$$

Si $v = \text{Med}(v_i)$, on dit que le vent souffle la moitié du temps à moins de $\text{Med}(v_i)$ et plus de $\text{Med}(v_i)$ pendant l'autre moitié.

3.

Mod(v_i) représente la valeur de la vitesse la plus fréquente, i.e. qui correspond la fréquence la plus élevée. D'après les données du tableau la classe contenant Mod(v_i) est]4 ;5]

4.

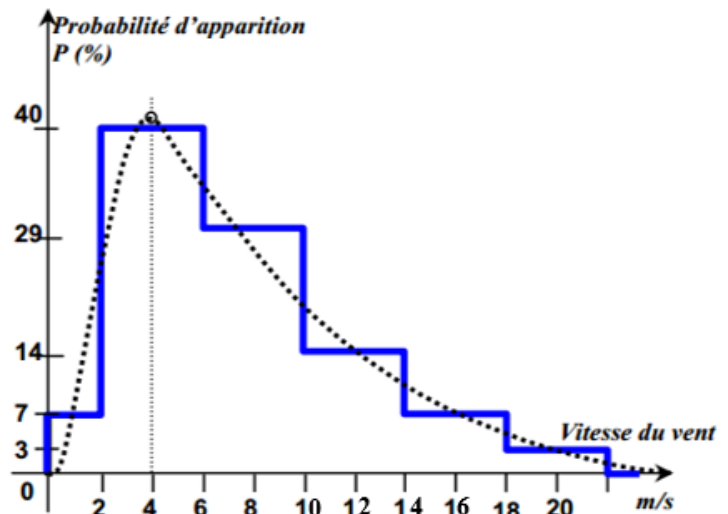
Le nombre d'heures/an où $v \in]4 ; 6]$ est égal à : $(14,20+13,15)8760/100 = 2396$ heures

5.

Le nombre d'heures/an où $v > 14 \text{ m/s}$ est égal à : $(0,24+0,11+0,05+0,02+0,01)8760/100 = 37,6$ heures

EXERCICE 2 :

La répartition sur **une année** de la vitesse du vent d'un site répond à la courbe de la figure ci-dessous



(fonction de Weibull avec $c=8.5$ et $k=2$)

- 1.- Que représentent les deux paramètres de la fonction de Weibull ?
- 2.- Calculer la vitesse moyenne du vent.
3. La médiane de la distribution se calcule en utilisant une des formules suivante : a) $c(\ln 2)^{1/k}$ b) $c(\ln 2)^k$ c) $k(\ln 2)^{1/c}$ laquelle ? Calculer cette vitesse.
4. Déterminer la classe de vitesses contenant la valeur modale.
5. Calculer le nombre d'heure/an où le vent souffle à une vitesse comprise entre 4 et 12m/s.
6. Compléter le tableau ci-dessous tout en donnant les formules de calcul.

| Vitesse (m/s) | Probabilité (%) | Durée (heures) | Puissance (W) | C_p | Puissance récupérable (W) | Energie du vent (Wh) | Energie récupérable (Wh) |
|------------------|--------------------|-------------------|------------------|-------|------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 0 | 7 | ... | ... | 0 | 0 | ... | ... |
| 4 | ... | ... | 277 | 0 | 0 | ... | ... |
| 8 | 29 | ... | 2217 | 0,4 | ... | 5632 | ... |
| 12 | 14 | 1226,4 | ... | ... | 3217 | 9176 | 3946 |
| 16 | ... | ... | ... | 0,24 | ... | ... | ... |
| 20 | 3 | 262,8 | 34636 | 0,18 | ... | ... | ... |
| Total | 100 | ... | | | | | |

7. Calculer la puissance cinétique moyenne (en W).
8. Calculer l'énergie du vent en 1 an (en kWh et en MJ)
9. Calculer l'énergie récupérable par l'éolienne en 1 an (en kWh et en MJ)

CORRIGE :

1.

C : est le facteur d'échelle de Weibull exprimé en m/s. Il permet d'exprimer la chronologie d'une vitesse caractéristique. Il est proportionnel à la vitesse moyenne du vent.

k : est le facteur de forme de Weibull. Il donne la forme de distribution (k=1÷3). Il caractérise l'asymétrie de la distribution.

3.

$$\bar{V} = \sum_i f_i v_i = (1 * 7 + 4 * 40 + 8 * 29 + 12 * 14 + 16 * 7 + 20 * 3) / 100 = 7.39 \text{ m/s}$$

4.

$$Med(v_i) = c(\ln 2)^{1/k}$$

$$Med(v_i) = 8.5(\ln 2)^{\frac{1}{2}} = 7.07 \text{ m/s}$$

7.07m/s est la médiane de la distribution de Weibull. On dit que le vent souffle la moitié du temps à moins de 7.07m/s et plus de 7.07m/s pendant l'autre.

4.

Mod(v_i) correspond à la classe]2, 6]

]2, 6] est la classe la plus fréquente, i.e. celle qui correspond à la fréquence maximale (40%) dans la distribution de Weibull.

5.

$$\text{Nombre d'heures/an où } v \in]4, 12] = \frac{(40 + 29 + 14) * 8760}{100} = 7270,8$$

6.

| Vitesse | Probabilité | Durée | Puissance | C _p | Puissance récupérable | Energie du vent | Energie récupérable |
|--------------|-------------|---------------|--------------|----------------|-----------------------|-----------------|---------------------|
| (m/s) | (%) | (heures) | (W) | | (W) | (Wh) | (Wh) |
| 0 | 7 | 613,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 40 | 3504 | 277 | 0 | 0 | 971 | 0 |
| 8 | 29 | 2540,4 | 2217 | 0,4 | 887 | 5632 | 2253 |
| 12 | 14 | 1226,4 | 7481 | 0,43 | 3217 | 9176 | 3946 |
| 16 | 7 | 613,2 | 17734 | 0,24 | 4256 | 10876 | 2610 |
| 20 | 3 | 262,8 | 34636 | 0,18 | 6234 | 9102 | 1638 |
| Total | 100 | 8760 | | | | | |

7.

$$\bar{P} = 0.5 * 1,225 * \pi (1,5)^2 (7,32)^3 = 1698 \text{ W}$$

8.

$$E_{vent/an} = 8760 [\sum_i P_i v_i] = 35756 \text{ kWh} = 128,7 \text{ MJ}$$

9.

$$E_{éolienne/an} = 8760 [\sum_i P_{récupérable,i} v_i] = 10447 \text{ Wh} = 37,60 \text{ MJ}$$