

2. La ressource éolienne

2.2 Mécanique des vents dans l'atmosphère



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

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Caractéristiques de la couche limite atmosphérique
- Variation spatiale des vents
- Effets de la topographie
- Variation temporelle des vents
- Conclusion

Plan de cette présentation

- ***Introduction et objectifs***
- Caractéristiques de la couche limite atmosphérique
- Variation spatiale des vents
- Effets de la topographie
- Variation temporelle des vents
- Conclusion

Introduction et objectifs

- Le vent est la source primaire de la ressource éolienne.
- Il est aléatoire et intermittent en raison de ses variations spatiales et temporelles.
 - Variation spatiale du vent :
 - Circulation atmosphérique globale
 - Effets locaux, relief, rugosité, *etc.*
 - Variations temporelle du vent :
 - Variations annuelle et saisonnière
 - Variations synoptique et diurne
 - Turbulence
 - rafales et vitesses extrêmes

Introduction et objectifs

- Une grande partie de ces variations ont lieu dans la couche limite atmosphérique.
- Après avoir caractérisé la couche limite atmosphérique, cette présentation aura pour objectif d'étudier ces variations spatiales et temporelles.
- La topographie du terrain a un rôle très important dans la génération de ces variations.
- La variation spatiale du vent est notamment requise pour l'emplacement des parcs éoliens et des turbines éoliennes dans un parc.

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- ***Caractéristiques de la couche limite atmosphérique***
- Variation spatiale des vents
- Effets de la topographie
- Variation temporelle des vents
- Conclusion

Question

- Quelles sont les trois couches constituant la couche limite atmosphérique ?
 - A. La stratosphère
 - B. La sous-couche rugueuse
 - C. L'atmosphère libre
 - D. La couche limite de surface
 - E. La couche d'Ekman

Caractéristiques de la couche limite atmosphérique

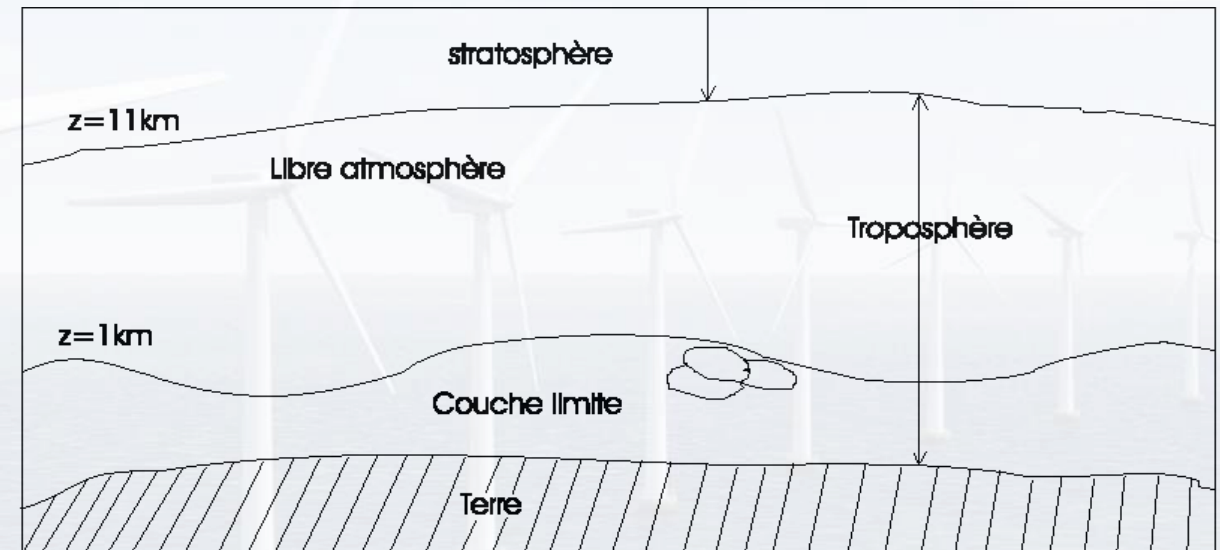
- L'atmosphère se divise en 2 régions séparées par la tropopause.

➤ Stratosphère

- $11 \text{ km} < z < 32 \text{ km}$
- Peu de mouvement d'air
- Humidité relative $\sim 1 \%$

➤ Troposphère

- $0 < z < 11 \text{ km}$
- Région où se produit tous les phénomènes météorologiques
- Contient entre 80 et 85 % de la masse totale de l'atmosphère
- Contient presque toute l'eau de l'atmosphère



- Seuls 2 % de la masse de la Terre se trouve au-delà ($z > 32 \text{ km}$).

Caractéristiques de la couche limite atmosphérique

- La troposphère se divise en deux régions dont l'interface se situe à 1 km au-dessus du sol (1 km AGL pour « above ground level » distinct de la hauteur absolue, au-dessus du niveau de la mer ASL pour « above sea level »).

- **Atmosphère libre ($z > 1$ km AGL)**

- Grandes perturbations météorologiques (précipitations)
- Écoulement quasi-géostrophique (courant, jet stream)
- Pas de contrainte visqueuse créée par la surface terrestre

- **Couche limite atmosphérique ($0 < z < 1$ km AGL)**

- Région où les contraintes visqueuses sont fortes
- Variations verticales de vitesse, température, turbulence, humidité
- Variations temporelles produites par le soleil, les nuages
- Hauteur variable selon la période de la journée, le type de recouvrement au sol, la situation atmosphérique ... (minimum le matin).

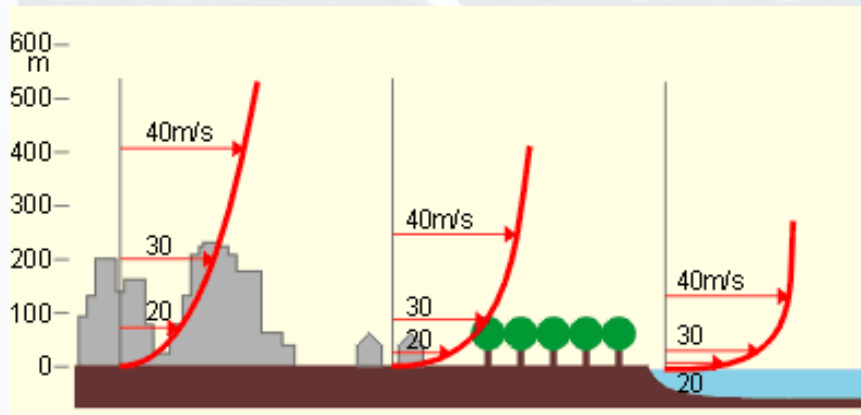
Caractéristiques de la couche limite atmosphérique

- La vitesse du vent varie sur la verticale à différentes échelles de temps (basse et haute fréquence). Ces phénomènes sont étudiés par la suite.
- Il est possible de relier la variation de pression à la hauteur :

$$dp_z = -\rho g dz$$

avec ρ la densité de l'air ($1,225 \text{ kg/m}^3$ dans les conditions standard) et g l'accélération gravitationnelle ($9,81 \text{ m/s}^2$)

- Condition de stabilité de la couche limite atmosphérique :



$$\frac{dT(z)}{dz} \leq \left(\frac{dT(z)}{dz} \right)_{\text{adiabatique}}$$

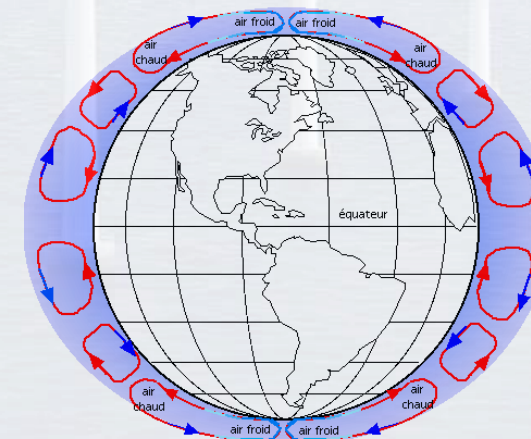
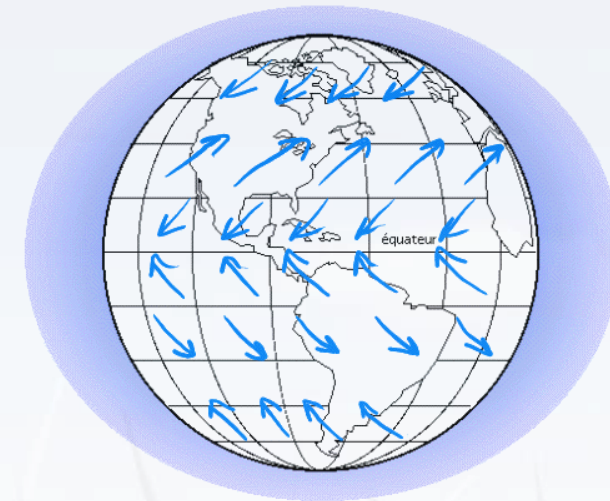
avec $T(z)$ la température à l'altitude z

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Caractéristiques de la couche limite atmosphérique
- ***Variation spatiale des vents***
- Effets de la topographie
- Variation temporelle des vents
- Conclusion

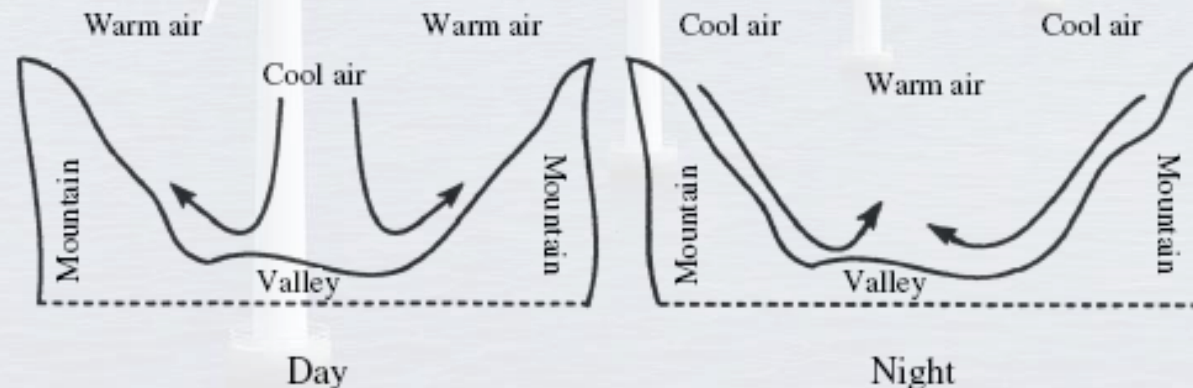
Variation spatiale des vents

- **Circulation atmosphérique globale :**
 - L'ensoleillement diffère selon les zones terrestres
 - La force de Coriolis
- **Circulation atmosphérique secondaire (réchauffement ou refroidissement de la basse atmosphère) :**
 - Circulation des moussons
 - Cyclones extra tropicaux
 - Ouragans



Variation spatiale des vents

- **Circulation atmosphérique locale** (tertiaire) (caractère « chaotique » dû à la complexité des phénomènes) :
 - Distribution des masses de terre et d'eau (brises de mer ou de terre)
 - Accélération du vent sur les collines et les montagnes
 - Effets thermiques locaux (les zones littorales et les zones alpines sont plus venteuses)
 - Tornades, tempêtes



Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Caractéristiques de la couche limite atmosphérique
- Variation spatiale des vents
- ***Effet de la topographie***
- Variation temporelle des vents
- Conclusion

Effets de la topographie

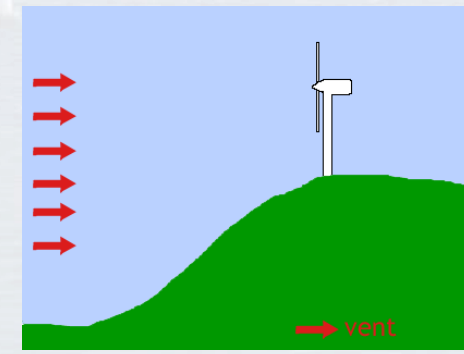
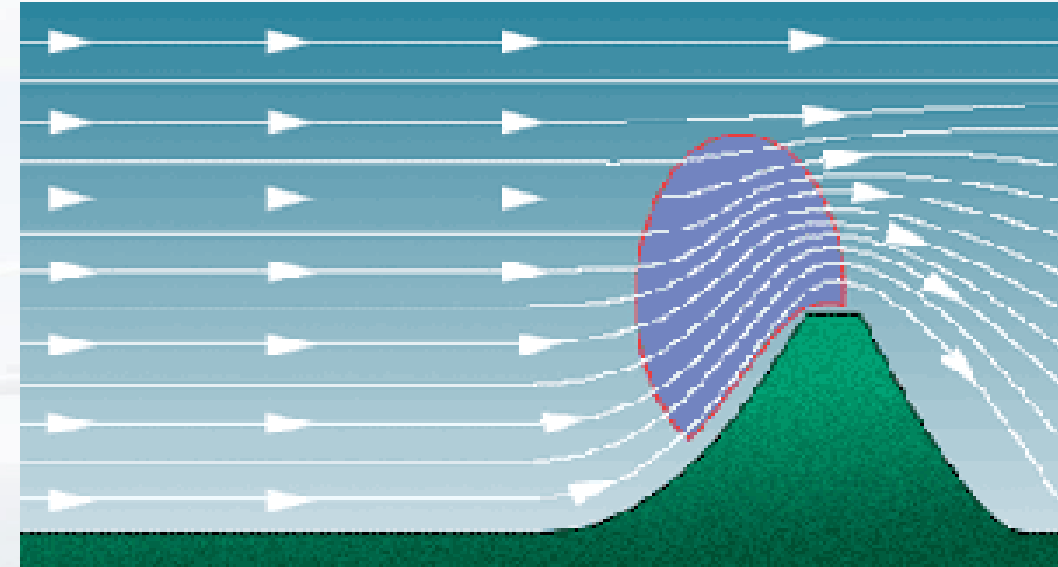
- La **topographie** a une influence non négligeable sur les variations spatiales rencontrées dans la couche limite atmosphérique.
- Ces phénomènes constituent ce qui a été appelé plus tôt, les circulations atmosphériques locales (tertiaire).
- Les causes de ces circulations atmosphériques locales sont nombreuses. La suite de cette présentation dresse une liste non exhaustive de ces dernières.

Question

- Lesquels de ces effets topographiques peuvent être responsables de variations spatiales du vent ?
 - A. L'effet de colline
 - B. L'effet de parc
 - C. L'effet de tunnel
 - D. L'effet aviaire
 - E. L'effet de sillage

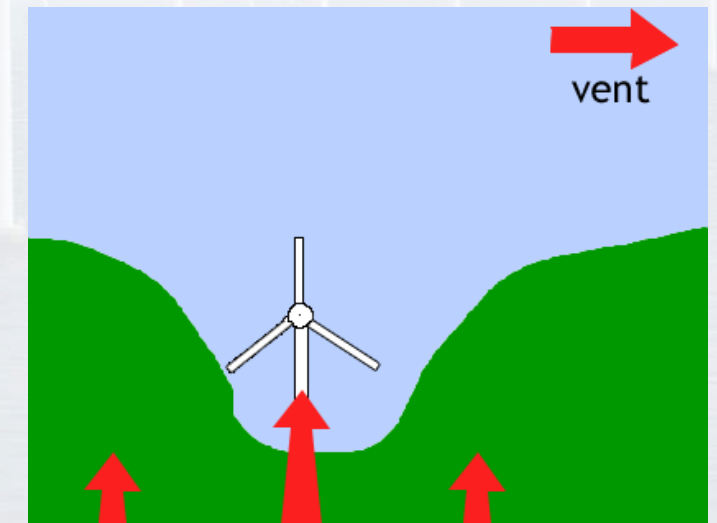
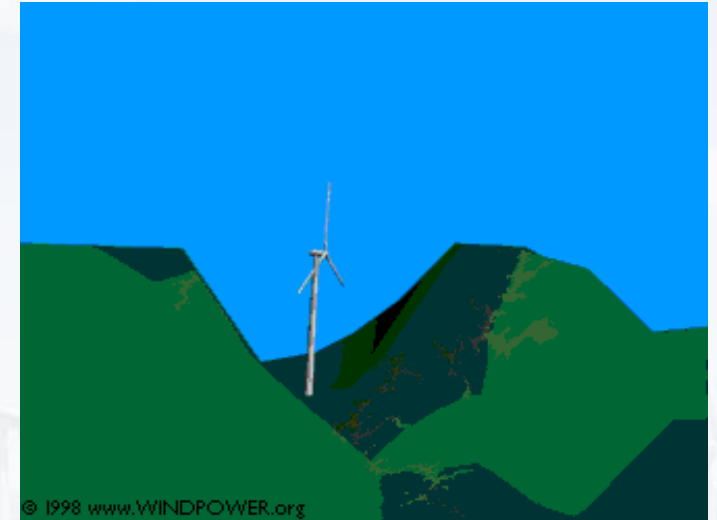
Effets de la topographie : Effet de colline

- On cherche à installer les éoliennes sur une colline ou une chaîne de hauteur qui sont plus élevées que le paysage environnant.
- La différence de pression existant à l'avant et à l'arrière des collines provoque des vitesses de vent accélérées.
- Le vent commence à dévier avant qu'il n'arrive à la colline. Ce phénomène est dû à l'étendue de la zone de haute pression qui se trouve à l'avant de la colline.
- Une colline accidentée ou à pentes raides peut provoquer de fortes turbulences risquant d'annuler une accélération de la vitesse.



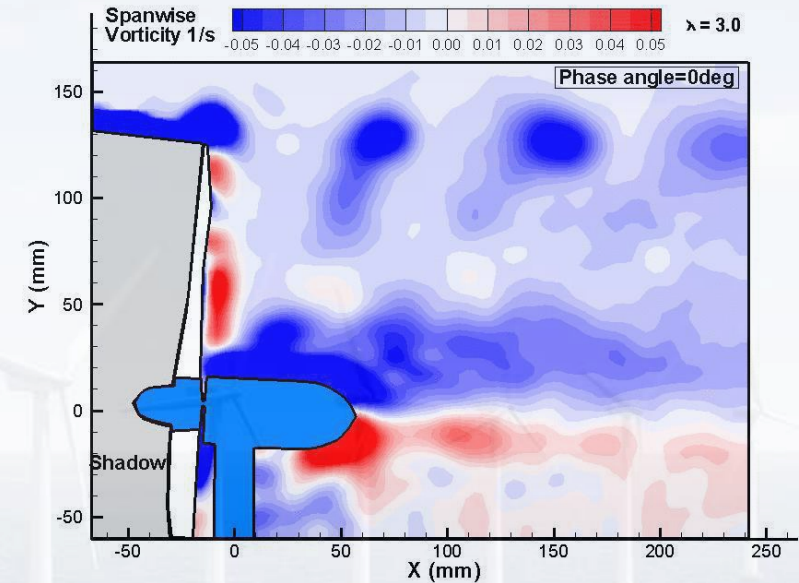
Effets de la topographie : Effet de tunnel

- Le vent est comprimé sur le côté d'un bâtiment ou le flanc de la montagne, ce qui fait accélérer considérablement sa vitesse entre les obstacles.
- L'installation d'une éolienne dans un tel tunnel est donc une façon d'obtenir une vitesse de vent supérieure à celle de la zone ambiante.
- Le tunnel doit être enclavé de pentes douces non rugueuses.
- Trop de turbulence risque d'annuler une vitesse de vent accélérée et d'augmenter l'usure sur l'éolienne.



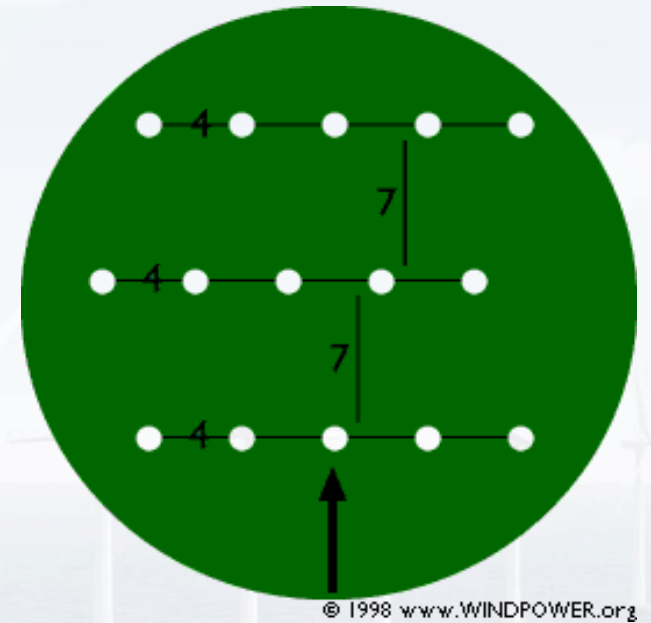
Effets de la topographie : Effet de sillage

- Le vent abandonnant le rotor a une capacité énergétique plus basse que le vent arrivant à l'éolienne.
- Il y aura toujours un sillage derrière l'éolienne, c'est-à-dire une longue traînée de vent qui est bien plus turbulente et ralentie que le vent devant le rotor.
- La turbulence engendrée derrière chaque éolienne affecte la production énergétique des éoliennes situées plus en aval.
- On espace en général les éoliennes d'une distance équivalente à trois fois le diamètre du rotor au minimum.
- La distance entre les éoliennes est souvent encore plus grande dans la direction des vents dominants.



Effets de la topographie : Effet de parc

- Les coûts du terrain et du raccordement des éoliennes au réseau électrique parlent en faveur d'un moindre espacement des éoliennes.
- Entre 3 et 9 diamètres de rotor dans la direction des vents dominants.
- Entre 3 et 5 diamètres de rotor dans la direction perpendiculaire à celle des vents dominants.
- Éviter les obstacles se trouvant dans la direction des vents dominants à moins de 700 m de l'emplacement prévu de l'éolienne.
- Perte d'énergie moyenne due à l'effet de parc d'environ 5%.

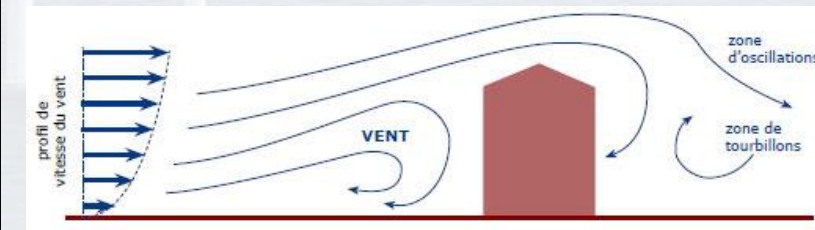
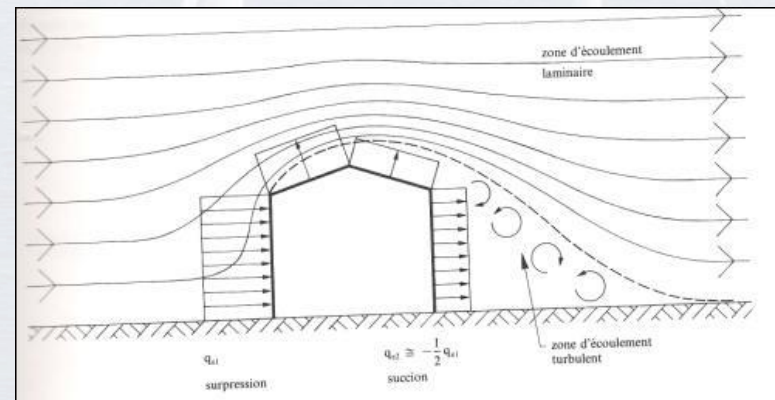
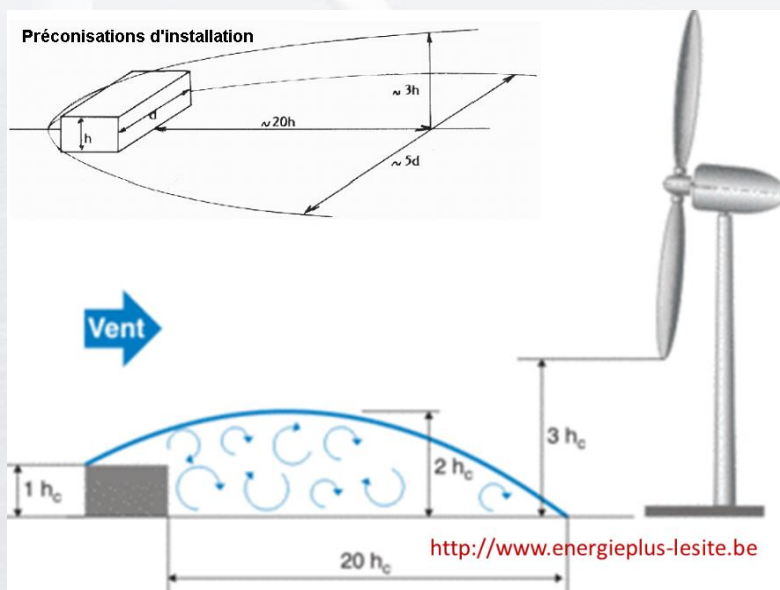


© 1998 www.WINDPOWER.org



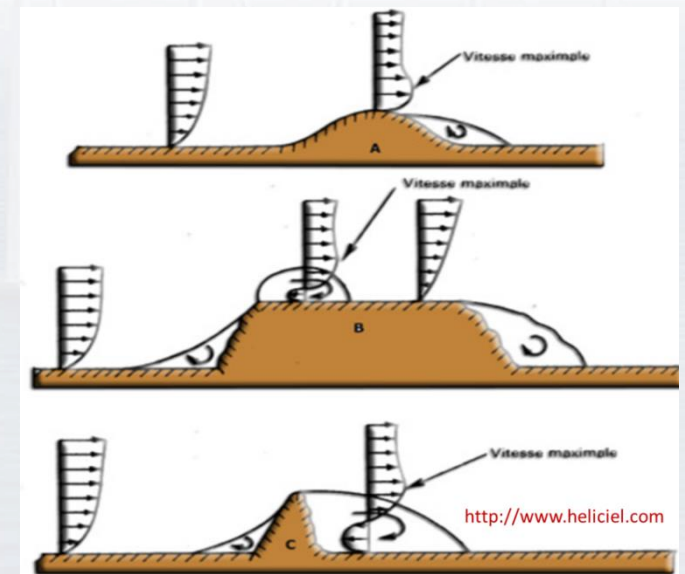
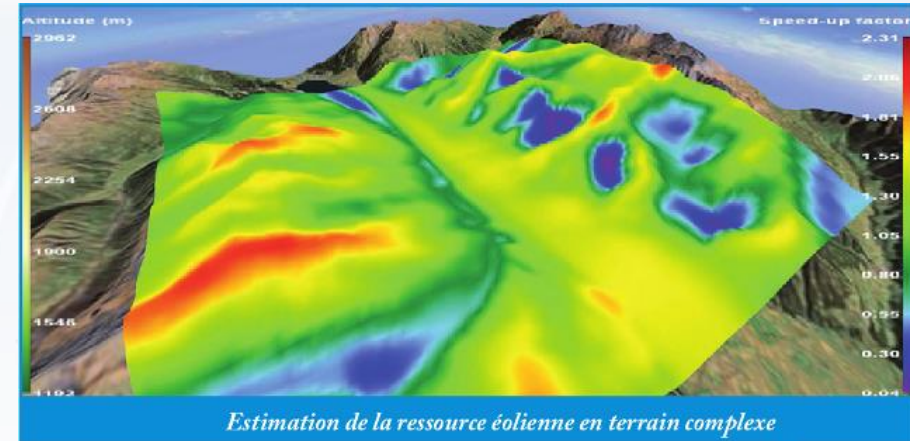
Effets de la topographie : Effet d'obstacles

- Un obstacle est un objet dont la zone d'influence sur l'écoulement (en d'autres termes, la région qu'il perturbe) rentre en contact avec l'éolienne.
- La zone perturbée se développe à une hauteur typiquement deux fois plus importante que l'obstacle et une longueur de vingt fois sa hauteur.
- On doit situer les éoliennes à l'extérieur de la zone d'influence d'un objet.



Effets de la topographie : Rugosité du terrain

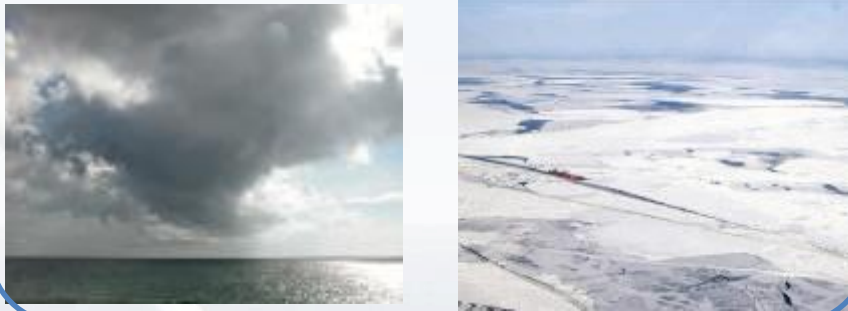
- Une rugosité importante freine considérablement la vitesse du vent.
- La friction entre la surface du terrain et les couches d'air influe beaucoup sur la vitesse du vent.
- Forêts et les grandes villes (forte rugosité classes 3-4)
- L'herbe longue, les buissons et les arbrisseaux (rugosité moindre mais considérable)
- Une piste d'atterrissage (faible rugosité classe 0,5)
- La mer (très peu de rugosité, classe 0)
- Le terme « longueur de rugosité » désigne la hauteur au-dessus du sol à laquelle la vitesse moyenne du vent en théorie serait égale à zéro.



Effets de la topographie : Rugosité du terrain

❖ Types de terrain

Terrain peu rugueux



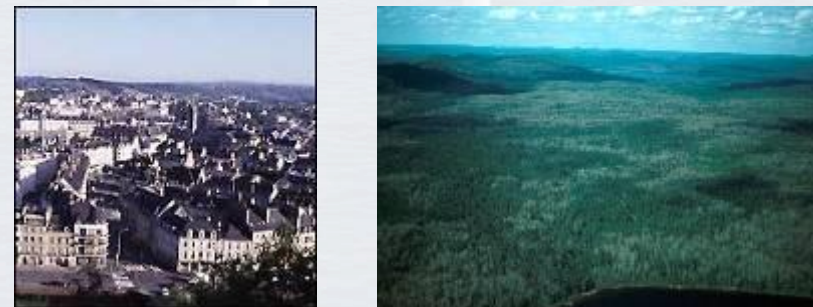
Terrain modérément rugueux



Terrain rugueux



Terrain très rugueux



Effets de la topographie : Rugosité du terrain

❖ Types de terrain : Cas extrême



- Les terrains peu rugueux (mer, glace) sont privilégiés
 - Profil de vitesse plat \Rightarrow rendement optimal
 - Turbulence plus faible \Rightarrow moins de fatigue structurelle (moins de vibration)

Effets de la topographie : Rugosité du terrain

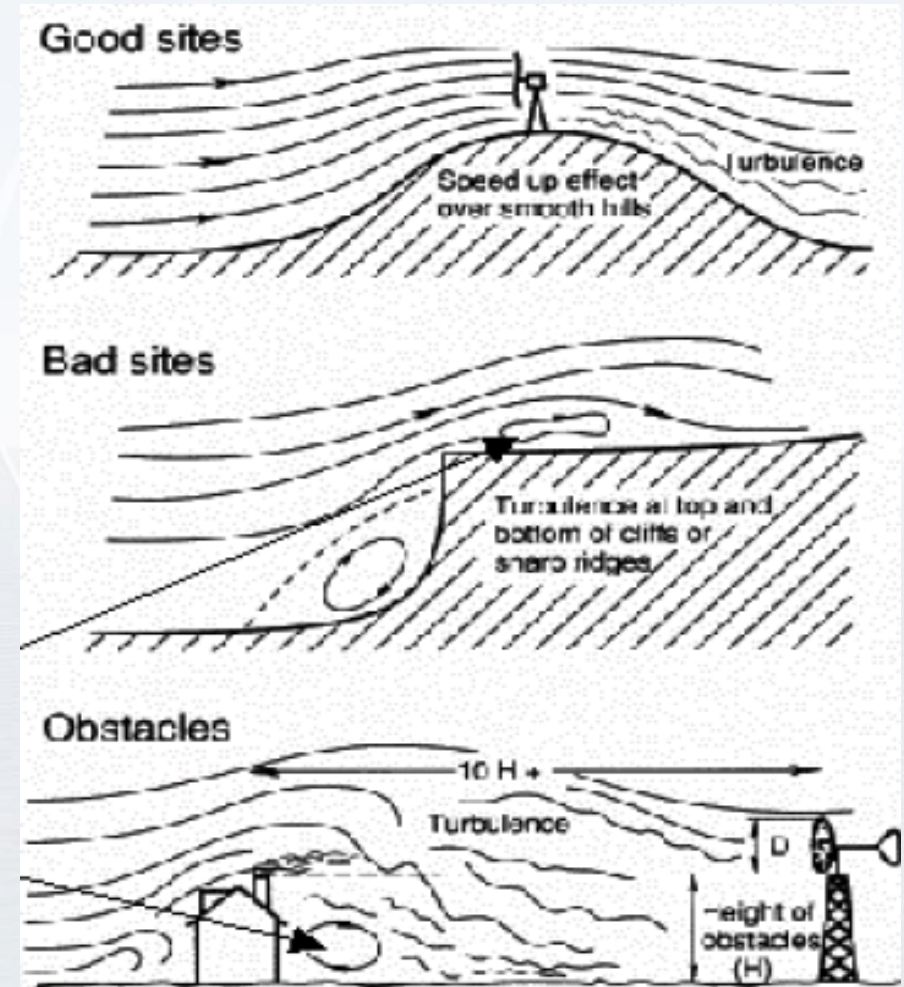
❖ Variabilité verticale :

- Loi logarithmique (classes de rugosité)

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)}$$

- Loi de puissance

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha$$



Effets de la topographie : Rugosité du terrain

| Classe de rugosité | rugosité typique en m | index énergétique % | Type de paysage |
|--------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|
|--------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|

| | | |
|---|--------|-----|
| 0 | 0.0002 | 100 |
|---|--------|-----|

plan d'eau

| | | |
|-----|--------|----|
| 0.5 | 0.0024 | 73 |
|-----|--------|----|

**Terrain plat :
piste aéroport
prairies herbe coupée**

| | | |
|---|------|----|
| 1 | 0.03 | 52 |
|---|------|----|

**Relief très léger :
champs découverts
habitat très dispersé**

| | | |
|-----|-------|----|
| 1.5 | 0.055 | 45 |
|-----|-------|----|

**Zone rurale avec
constructions ou haies
de moins de 8 m de haut
espacées d'au
moins 1250 m**

| | | |
|---|-----|----|
| 2 | 0.1 | 39 |
|---|-----|----|

**Zone rurale avec
constructions ou haies
de moins de 8 m de haut
espacées d'au
moins 500 m**

| Classe de rugosité | rugosité typique en m | index énergétique % | Type de paysage |
|--------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|
|--------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|

| | | |
|-----|-----|----|
| 2.5 | 0.2 | 31 |
|-----|-----|----|

**Zone rurale avec
constructions ou haies
de moins de 8 m de haut
espacées d'au
moins 250 m**

| | | |
|---|-----|----|
| 3 | 0.4 | 24 |
|---|-----|----|

**Zone habitée (village
petite ville) avec
constructions,
forêts,
terrains accidentés**

| | | |
|-----|-----|----|
| 3.5 | 0.8 | 18 |
|-----|-----|----|

**Grande ville avec
immeubles hauts**

| | | |
|---|-----|----|
| 4 | 1.6 | 13 |
|---|-----|----|

**Très grande ville avec
tours et gratte-ciels**

www.windpower.dk

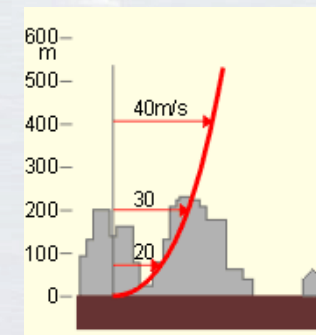
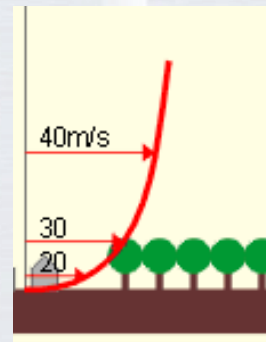
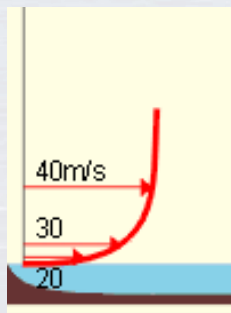
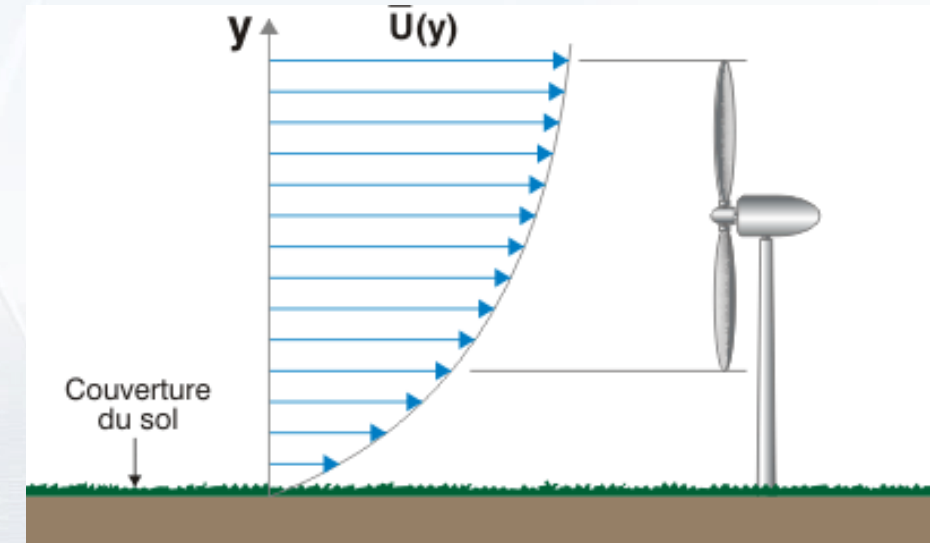
Effets de la topographie : Rugosité du terrain

| Terrain | Exposant de cisaillement du vent, α |
|-----------------------------------|--|
| Glace | 0.07 |
| Neige sur terrain plat | 0.09 |
| Mer calme | 0.09 |
| Gazon coupé | 0.14 |
| Gazon court type prairie | 0.16 |
| Gazon long type cultures céréales | 0.19 |
| Haies | 0.21 |
| Arbres et haies clairsemés | 0.24 |
| Arbres et haies plus denses | 0.29 |
| Banlieue | 0.31 |
| Forêt | 0.43 |

Effets de la topographie : Rugosité du terrain

❖ Cisaillement du vent

- Le cisaillement du vent désigne la variation de la vitesse du vent en fonction de la distance à la surface de la terre.
- Le cisaillement du vent est pris en considération pour vérifier les forces agissant sur les pales lorsqu'elles sont en position haute ou basse.



Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Caractéristiques de la couche limite atmosphérique
- Variation spatiale des vents
- Effets de la topographie
- ***Variation temporelle des vents***
- Conclusion

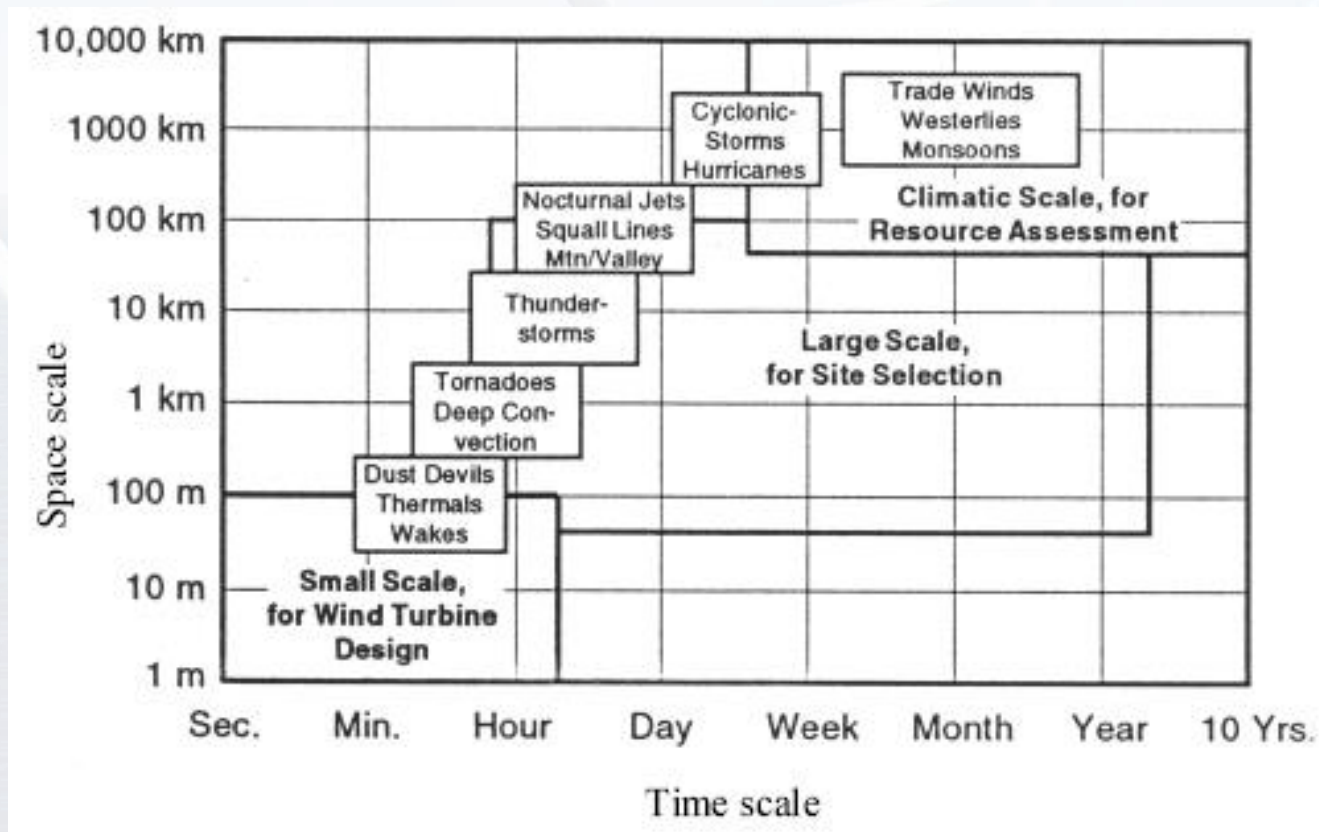
Question

- Parmi ces propositions, lesquelles peuvent expliquer les variations saisonnières de la puissance éolienne ?
 - A. Le changement de masse volumique de l'air
 - B. La variation de la surface balayée par l'éolienne
 - C. La variation du coefficient de performance de l'éolienne
 - D. La variation de la vitesse du vent
 - E. L'effet migratoire des oiseaux

Variation temporelle des vents

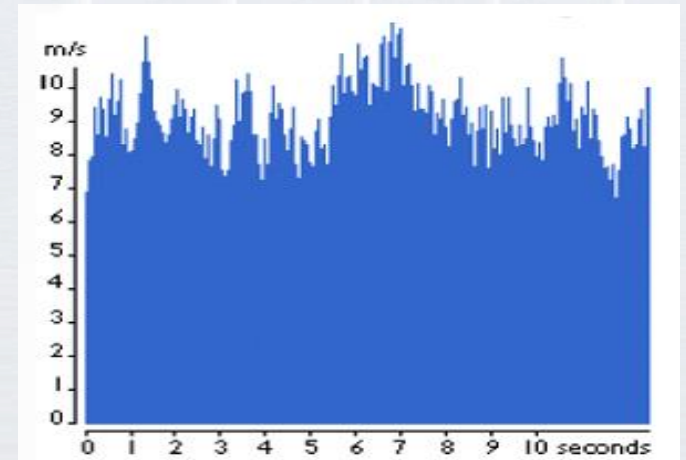
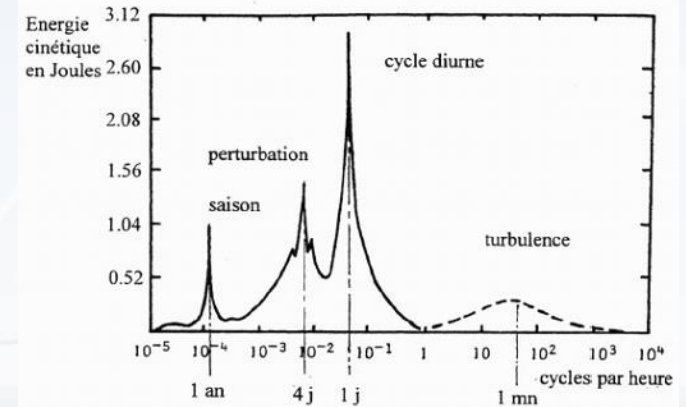
❖ Variation spatio-temporelle du vent

- Échelles spatio-temporelles de la variation du vent (applications)



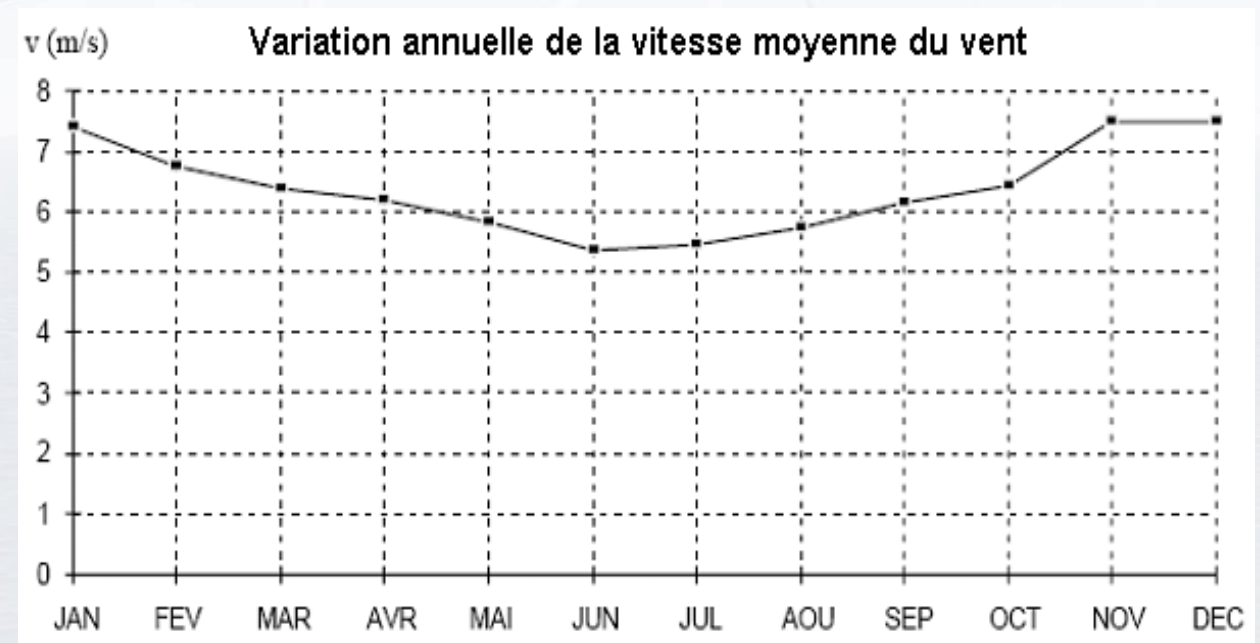
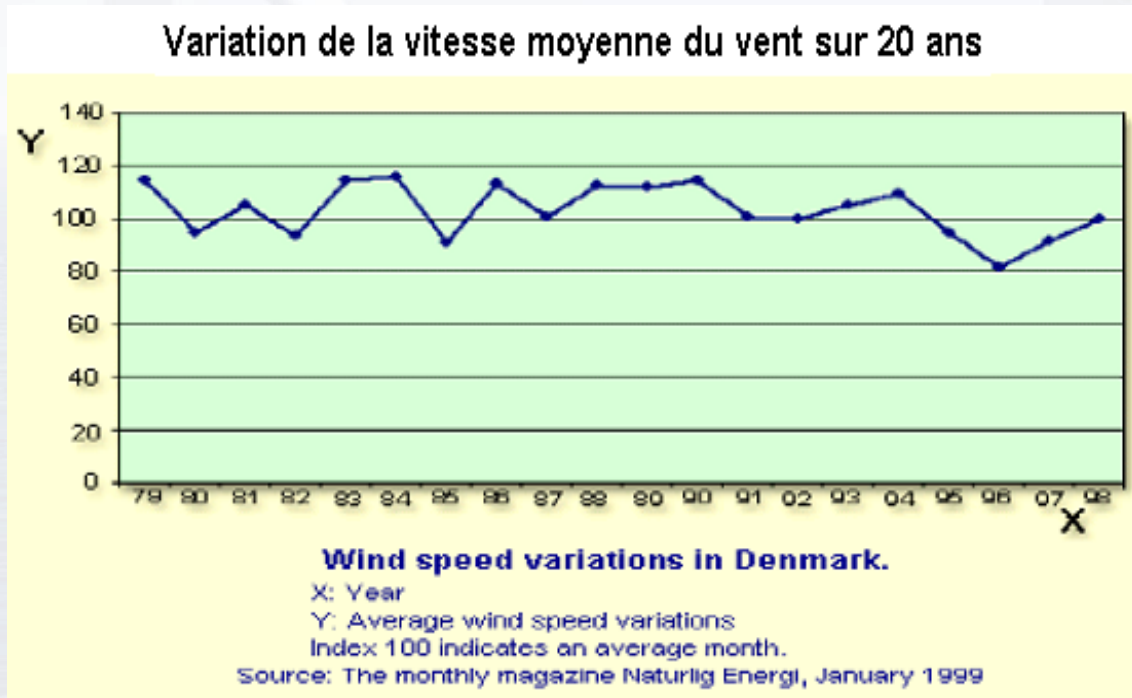
Variation temporelle des vents

- Basse fréquence
 - Variations à grande échelle temporelle (décennies ou plus longues périodes)
 - Variations annuelles et saisonnières (importance des données multi-annuelles sur des sites des fermes éoliennes)
- Haute fréquence (van des Hoven – 1957)
 - Variations synoptiques (de l'ordre de 4 à 6 jours)
 - Variations diurnes (entre différentes périodes de la journée)
 - Turbulence du vent (fréquence de l'ordre des minutes ou même des secondes)



Variation temporelle des vents

- ❖ Variation à basse fréquence de la vitesse du vent
- Variations interannuelles et annuelles de la vitesse du vent

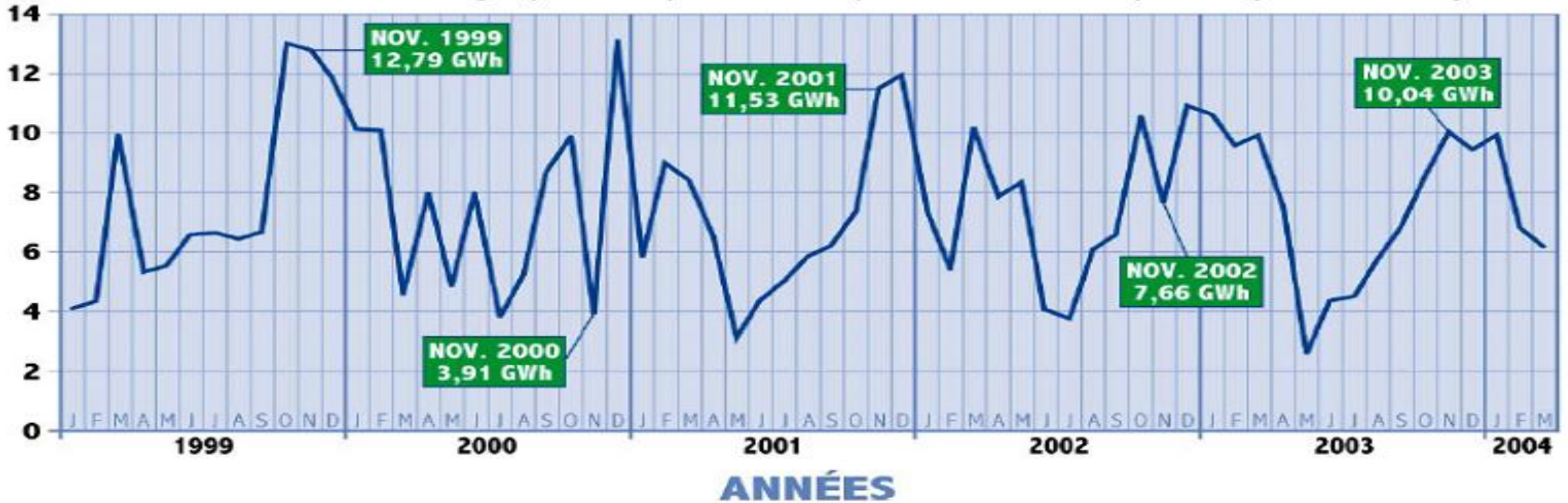


Variation temporelle des vents

- ❖ Variation à basse fréquence de la vitesse du vent

ÉNERGIE (GWh)

Quantités d'énergie produite par mois au parc éolien de Cap-Chat (76 éoliennes)



Variation temporelle des vents

❖ Variation à basse fréquence de la vitesse du vent

• Variations saisonnières de la vitesse du vent

$$P = \frac{1}{2} C_P \rho_{air} \left(\frac{\pi}{4} \right) D^2 V^3$$

Cube de la vitesse du vent

$$\rho_{air} = 1.368 \text{ kg / m}^3 \text{ à } -15^\circ \text{C}$$

$$\rho_{air} = 1.225 \text{ kg / m}^3 \text{ à } 15^\circ \text{C}$$

- La densité de l'air change selon les saisons
 - Variation de la puissance de l'éolienne de l'ordre de 10 %
- Le régime des vents change selon les saisons
 - Un changement de 10 % de la vitesse du vent se traduit par une variation de 30 % de la puissance de l'éolienne.
 - En hiver, des « surpuissances » peuvent dépasser 50 % de la capacité nominale de l'éolienne.

Masse volumique :
 $\cong 1,2 \text{ kg/m}^3$

| Température ° Celsius | Densité de l'air sec kg/m ³ | Teneur en eau kg/m ³ |
|--------------------------|--|---------------------------------------|
| -25 | 1.423 | |
| -20 | 1.395 | |
| -15 | 1.368 | |
| -10 | 1.342 | |
| -5 | 1.317 | |
| 0 | 1.292 | 0.005 |
| 5 | 1.269 | 0.007 |
| 10 | 1.247 | 0.009 |
| 15 | 1.225 *) | 0.013 |
| 20 | 1.204 | 0.017 |
| 25 | 1.184 | 0.023 |
| 30 | 1.165 | 0.030 |
| 35 | 1.146 | 0.039 |
| 40 | 1.127 | 0.051 |

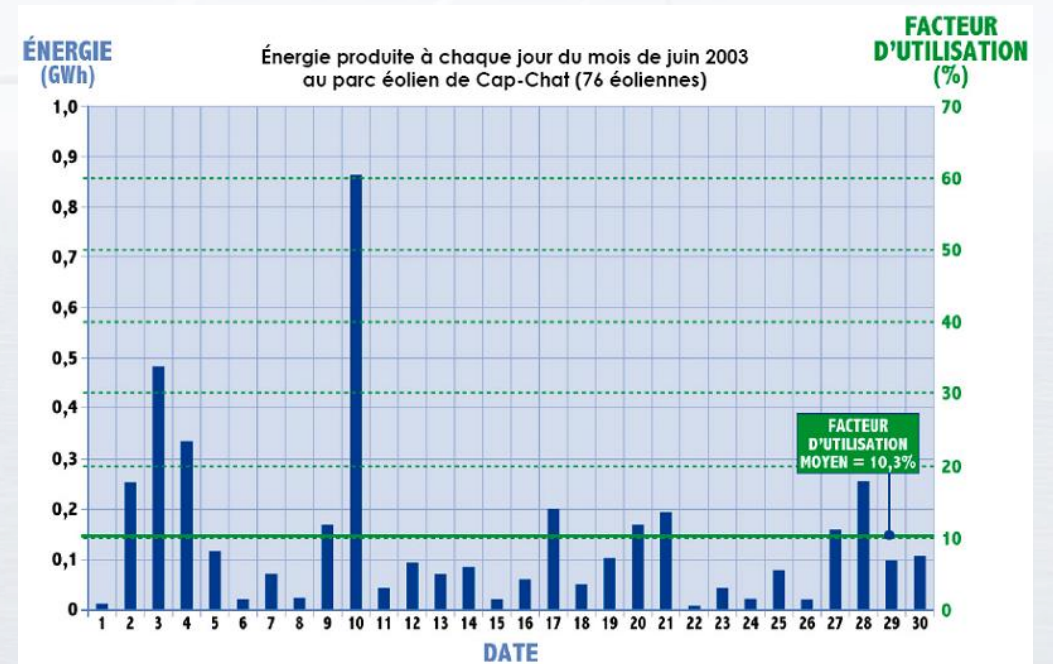
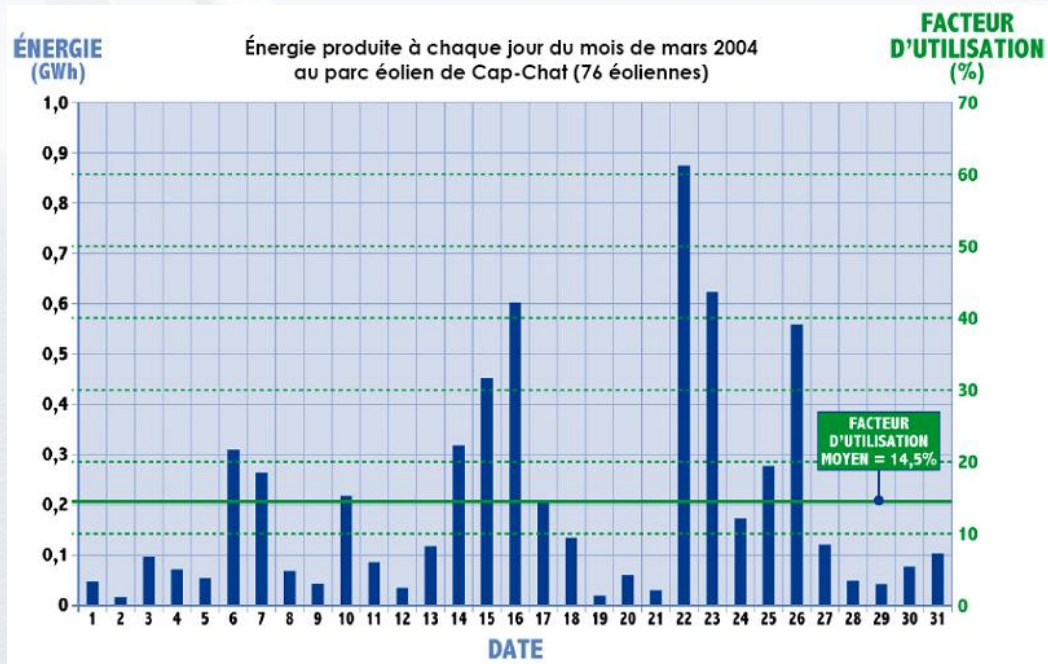
Variation temporelle des vents

- ❖ Variation à basse fréquence de la vitesse du vent
- Variations saisonnières de la vitesse du vent



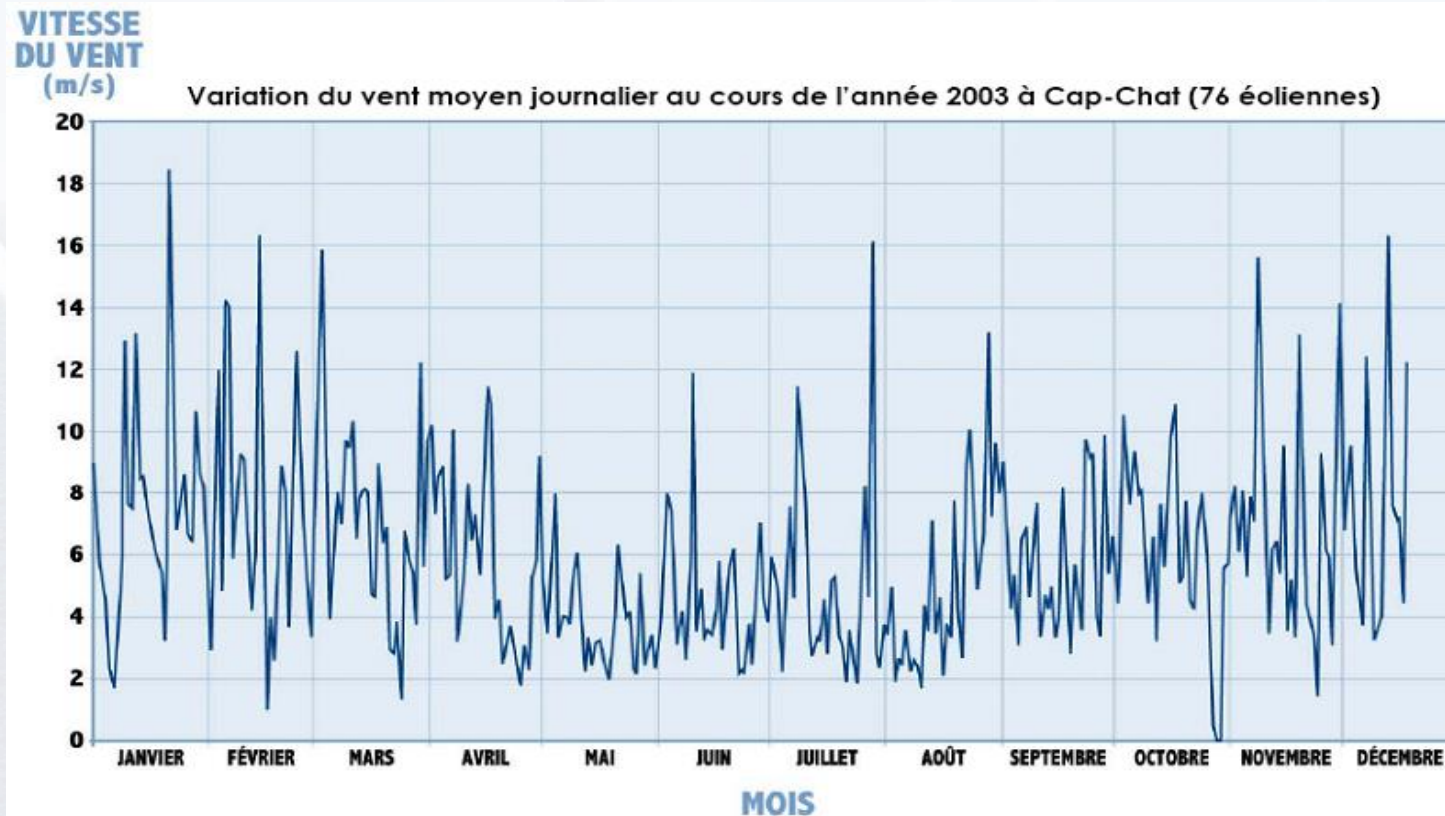
Variation temporelle des vents

- ❖ Variation à basse fréquence de la vitesse du vent
- Variations saisonnières de la vitesse du vent



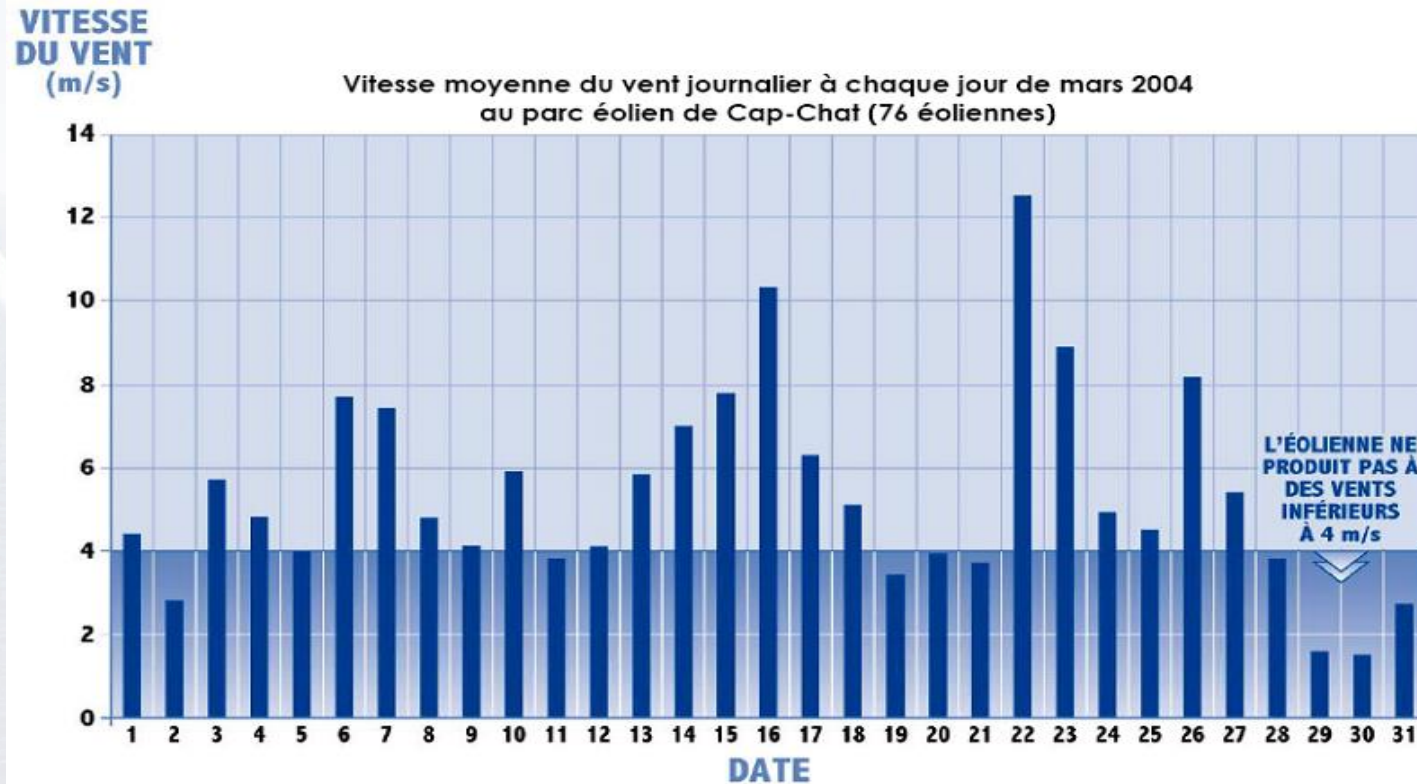
Variation temporelle des vents

- ❖ Variation à haute fréquence de la vitesse du vent
- Variations diurnes de la vitesse du vent



Variation temporelle des vents

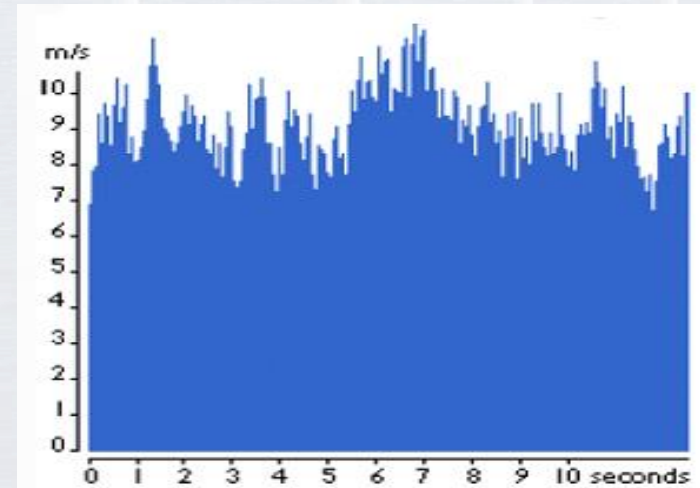
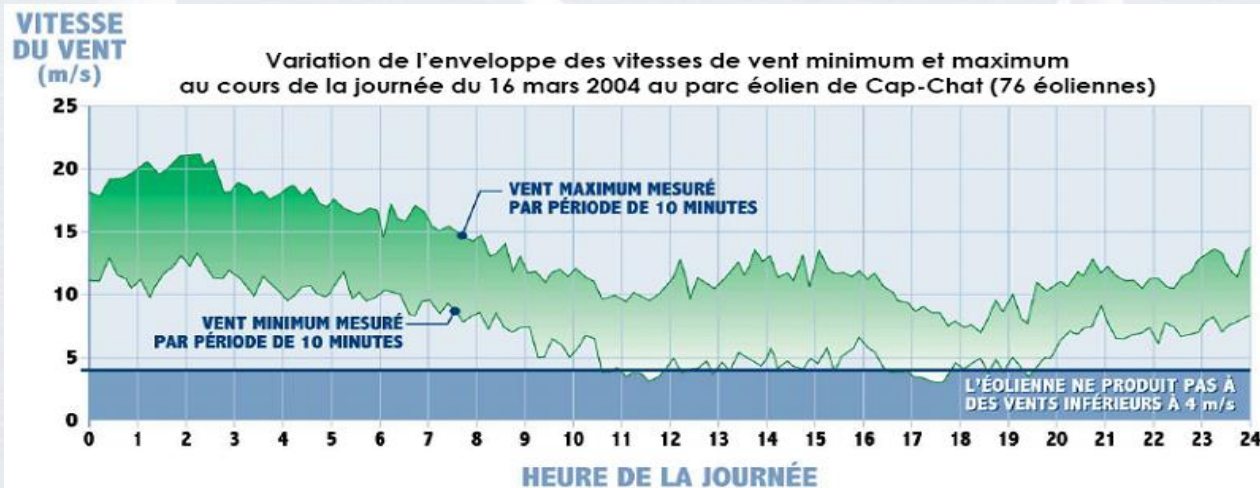
- ❖ Variation à haute fréquence de la vitesse du vent
- Variations diurnes de la vitesse du vent



Variation temporelle des vents

❖ Variation à haute fréquence de la vitesse du vent

- Turbulence du vent



Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Caractéristiques de la couche limite atmosphérique
- Variation spatiale des vents
- Effets de la topographie
- Variation temporelle des vents
- ***Conclusion***

Conclusion

- Les topographies des sites choisis pour accueillir les parcs éoliens peuvent être responsables de variations spatiales de l'intensité et de la direction des vents. Ces derniers doivent donc être étudiés avec précaution.
- Les vents ne sont pas stationnaires et varient spatialement et temporellement, ce qui rend difficile leur prévision.
- Il existe toutefois des méthodes d'estimation des ressources éoliennes. Ces dernières sont étudiées dans la présentation 2.4.

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