

1. Caractéristiques du vent – Météorologie, distribution et variation de la vitesse du vent

Le vent est une manifestation complexe de la circulation atmosphérique, à la fois source d'énergie et défi pour l'ingénieur. Contrairement à la ressource solaire ou hydraulique, le vent est une grandeur intrinsèquement variable : en direction, en intensité, en altitude et dans le temps. Comprendre sa nature météorologique, savoir mesurer et modéliser cette variabilité, est le premier acte de toute étude éolienne. Ce chapitre déroule, étape par étape, les bases physiques, les outils statistiques, l'histoire de la connaissance du vent et les méthodes modernes d'évaluation de la ressource.

1. Météorologie du vent

a) Génèse du vent et circulation générale

Le vent est un mouvement de l'air atmosphérique provoqué par des gradients de pression. Ces gradients résultent de l'inégal chauffage solaire de la surface terrestre. L'équateur reçoit un rayonnement plus intense que les pôles ; l'air chaud, moins dense, s'y élève, créant une zone de basses pressions, tandis qu'aux pôles l'air froid descend et engendre des hautes pressions. L'air s'écoule des hautes vers les basses pressions, mais la force de Coriolis, due à la rotation de la Terre, dévie ce flux : vers la droite dans l'hémisphère nord, vers la gauche dans l'hémisphère sud. Ce couplage génère la circulation générale de l'atmosphère, organisée en cellules de Hadley, Ferrel et polaires.

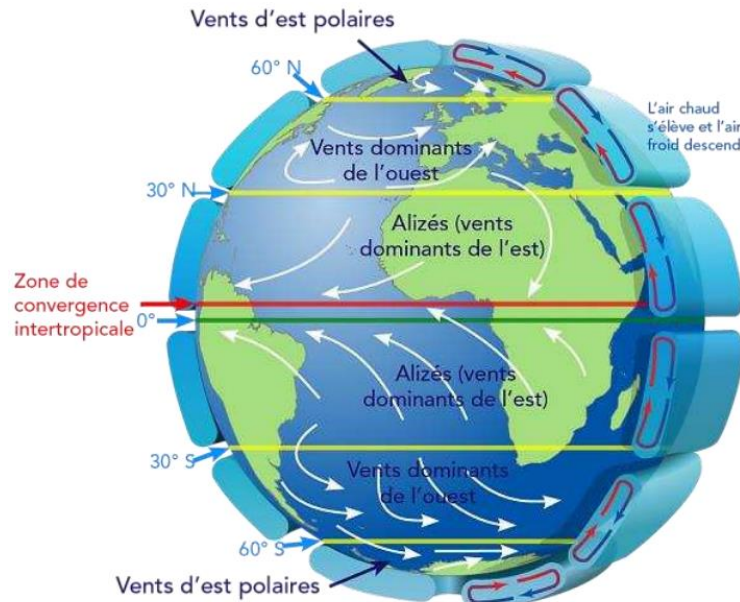


Fig 1: Les types des vents dans le monde

Cette dynamique a été perçue très tôt par les civilisations maritimes. Les Égyptiens de l’Ancien Empire (vers 2600 av. J.-C.) utilisaient déjà le vent dominant du nord (le shamal) pour remonter le Nil à la voile. Les Phéniciens, puis les Grecs, ont nommé les vents cardinaux et observaient leur influence sur la navigation et le climat. L’œuvre la plus emblématique de cette météorologie primitive est la Tour des Vents à Athènes (I^{er} siècle av. J.-C.). Édifice octogonal en marbre, chaque face est ornée d’un bas-relief représentant un vent dominant (Borée, Zéphyr, Notos, etc.), et le toit portait une girouette en forme de triton indiquant la direction du vent. Ce monument prouve que la relation entre direction, saison et force du vent était déjà formalisée.



Fig 1 : La Tour des Vents à Athènes (source : gravure ancienne ou photographie). Chaque panneau figure un dieu-vent ailé, les attributs symbolisant la saison correspondante.

b) Brises thermiques locales : mécanisme et importance pour l'éolien

Au-delà de la circulation planétaire, les contrastes thermiques locaux entre surfaces terrestres et aquatiques, ou entre vallées et montagnes, produisent des vents périodiques appelés brises. Ce phénomène qui gouverne la production de nombreux parcs côtiers.

c) Physique du phénomène :

La capacité thermique massique de l'eau ($C \approx 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) est environ quatre fois supérieure à celle des sols (0,8 à 1,2). Ainsi, sous un même ensoleillement, la surface terrestre se réchauffe plus vite que la surface marine.

- **Le jour :** la température de l'air au-dessus du sol augmente, sa densité diminue, la pression s'abaisse en surface. L'air plus frais et plus dense situé au-dessus de la mer s'écoule vers la

terre : c'est la **brise de mer**. Elle atteint généralement 5 à 10 m/s, et pénètre jusqu'à 30 km à l'intérieur des terres.

- **La nuit** : le sol se refroidit plus rapidement que l'eau. L'air marin, relativement plus chaud, s'élève ; l'air froid continental glisse vers la mer : **brise de terre**, généralement plus faible (2 à 4 m/s).

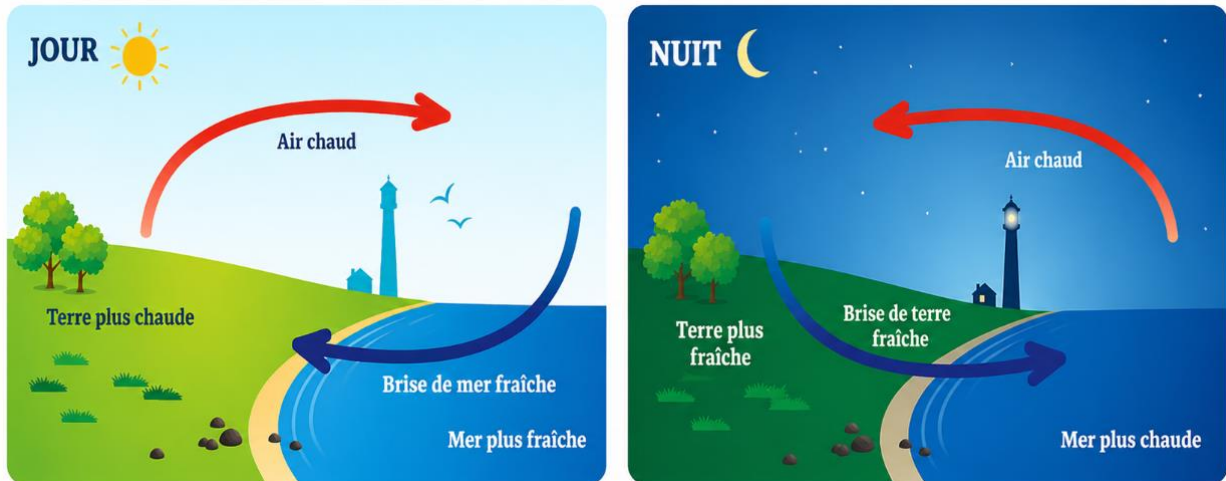
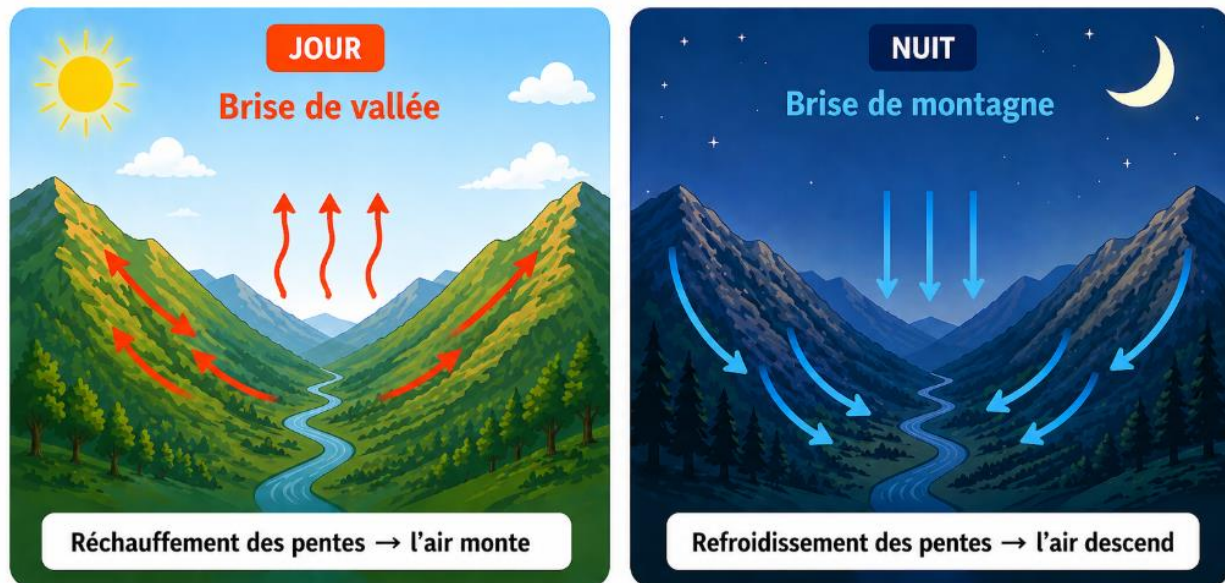


Fig 2 : Schéma de la brise de mer et de terre.

Ces brises se superposent au vent synoptique et peuvent soit le renforcer, soit le contrarier. Sur les côtes de la mer, la brise de mer estivale se combine avec les alizés pour produire des vents soutenus et réguliers en journée. L'ingénieur qui dimensionne un parc côtier doit donc analyser le cycle diurne pour anticiper les pointes de production.



Des phénomènes analogues existent en relief : **la brise de vallée** (ascendance diurne le long des pentes) et **la brise de montagne** (katabatique nocturne). Les grands parcs de montagne, comme ceux de Tarifa en Espagne ou d'Alta en Norvège, exploitent ces circulations.

2. Jalons historiques de la connaissance du vent

L'exploitation millénaire du vent s'est faite sans compréhension théorique profonde. Ce n'est qu'à partir du XVII^e siècle que l'on cherche à quantifier le vent.

a) De l'anémométrie primitive à la mécanique des fluides :

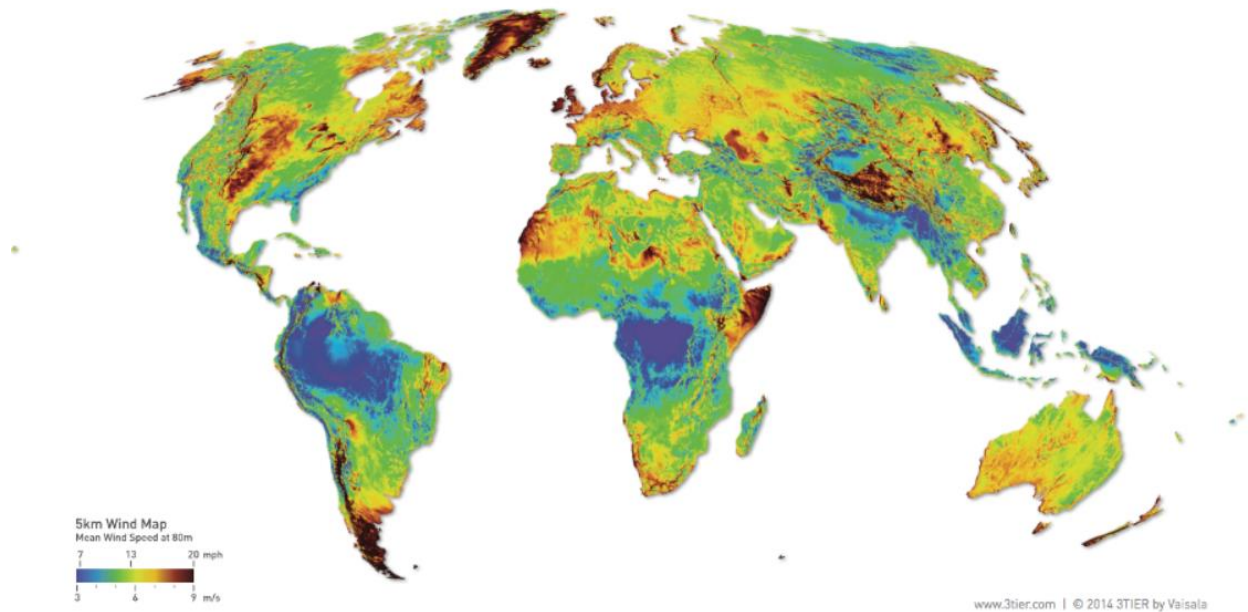
- 1664: Robert Hooke invente un anémomètre à plaque oscillante, où la déviation d'une plaque donne une indication de la force du vent.
- 1846 : l'astronome irlandais Thomas R. Robinson conçoit l'anémomètre à coupelles (3 ou 4 demi-sphères montées sur un axe vertical). Sa simplicité et sa robustesse le rendent encore aujourd'hui l'instrument de référence.
- 1892 : William H. Dines met au point l'anémomètre à tube de pression (Pitot-statique), qui mesure la pression dynamique du vent et permet des enregistrements précis et continus.

- Début du XX^e siècle: les premières études statistiques de la vitesse du vent apparaissent, notamment sous l'impulsion de météorologues danois comme Poul la Cour, pionnier de l'éolien moderne, qui installe des mâts de mesure au Danemark.

b) La révolution des atlas éoliens et la distribution de Weibull :

Après le choc pétrolier de 1973, le besoin de cartographier la ressource devient stratégique. Le laboratoire Riso au Danemark (aujourd'hui DTU Wind Energy) produit en 1989 le European Wind Atlas (Troen & Petersen), qui pose les fondements méthodologiques : modélisation de l'écoulement en terrain complexe à l'aide de la loi logarithmique, classification de la rugosité, et usage de la distribution de Weibull pour caractériser la variabilité. La loi de Weibull, initialement développée pour la fatigue des matériaux, est appliquée à la vitesse du vent par N. L. Johnson et S. Kotz ; elle s'impose rapidement comme l'outil universel de l'ingénieur éolien.

Aujourd'hui, les réanalyses météorologiques (ERA5 du CEPMMT, MERRA-2 de la NASA) fournissent des séries temporelles mondiales sur plus de trente ans, qui, couplées à des campagnes de mesure locales, permettent un « repowering » des données statistiques sans précédent.



c) L'exemple Algérie :

L'Algérie possède un gisement éolien considérable, concentré dans le Sahara, où l'Atlas éolien national élaboré par l'ONM a permis d'identifier les sites clés, au premier rang desquels figure Adrar (sud-ouest), meilleur site du pays avec une vitesse moyenne de 7,20 m/s à 10 m et une densité de puissance de 646,91 W/m² à 50 m, suivi d'autres localités sahariennes prometteuses comme In Amenas, In Salah, Tindouf, Ghardaïa et Tamanrasset, tandis que le littoral méditerranéen, à l'exemple de Skikda, s'avère bien moins venté. Ce potentiel, scientifiquement documenté par des études portant sur 57 années de données, a permis d'identifier des solutions optimales telles que les systèmes hybrides photovoltaïque/éolien/diesel pour Adrar et Tindouf, et s'inscrit dans un programme national ambitieux visant 15 GW de capacités renouvelables à l'horizon 2035. L'Algérie stagne à moins de 20 MW, freinée par sa dépendance historique aux hydrocarbures et un cadre réglementaire inadapté.

c (*paramètre d'échelle, m/s*): proportionnel à la vitesse moyenne. Plus c est grand, plus le vent moyen est fort.

k (*paramètre de forme, sans dimension*): décrit la régularité du vent. Un k élevé ($>2,5$) indique un vent concentré autour de la moyenne (vents alizés, sites côtiers bien exposés). Un k faible ($1,5-2$) est typique de sites continentaux à forte variabilité.

La fonction de répartition correspondante est :

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

Estimation des paramètres :

Plusieurs méthodes existent. La plus simple est la méthode des moments, qui utilise les deux premiers moments statistiques de l'échantillon. Si v est la vitesse moyenne et c l'écart-type, on estime k en résolvant :

$$\left(\frac{\sigma}{v} \right)^2 = \frac{\Gamma(1 + 2/k)}{[\Gamma(1 + 1/k)]^2} - 1$$

où σ est la fonction Γ . Ensuite, $c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1+1/k)}$.

Distribution de Rayleigh :

Lorsque $k = 2$, la distribution de Weibull se réduit à la distribution de Rayleigh. C'est une approximation acceptable pour de nombreux sites en l'absence de relevés complets, car elle n'exige que la connaissance de la vitesse moyenne $c = \frac{2\bar{v}}{\sqrt{\pi}} \approx 1.128 \times v$.

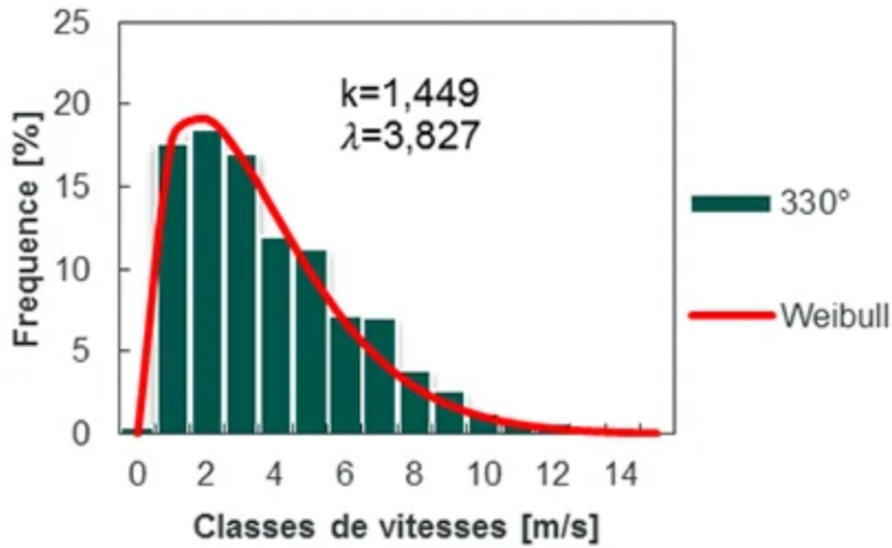


Fig 3 : Histogramme des fréquences de vitesse mesurées (barres) et courbe de Weibull ajustée (ligne pleine).

4. Densité de puissance et vitesse la plus probable

La puissance disponible dans le vent par unité de surface balayée est proportionnelle à la densité de l'air ρ et au cube de la vitesse.

$$P(v) = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

La densité de probabilité de la puissance s'obtient par transformation de variable. La vitesse la plus fréquente (mode) est $v_{mp} = c \left(\frac{k-1}{k} \right)^{1/k}$. La vitesse qui maximise l'énergie (celle qui transporte le plus de puissance) est $v_{E,max} = c \left(\frac{k+2}{k} \right)^{1/k}$, toujours supérieure à v_{mp} .

1.3.3 Fonction de distribution cumulative et durée de dépassement

La fonction de répartition $F(v)$ donne la probabilité que le vent soit inférieur ou égal à une vitesse v .

Son complément $F(v) = P(V \leq v) = \int_0^v f(u)du = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]$ est utilisé pour construire la courbe de durée du vent, qui exprime le nombre d'heures par an pendant lesquelles la vitesse dépasse un seuil donné. Couplée à la courbe de puissance d'une turbine, cette courbe permet le calcul direct du productible annuel.

5. La rose des vents

La direction du vent est une variable angulaire. La rose des vents est la représentation polaire conjointe de la fréquence des directions et de l'intensité moyenne associée. On divise l'horizon en 8, 12 ou 16 secteurs (par exemple 30° chacun). Pour chaque secteur, on calcule :

- Fréquence d'occurrence (longueur de la branche),
- Vitesse moyenne (souvent codée en couleurs).

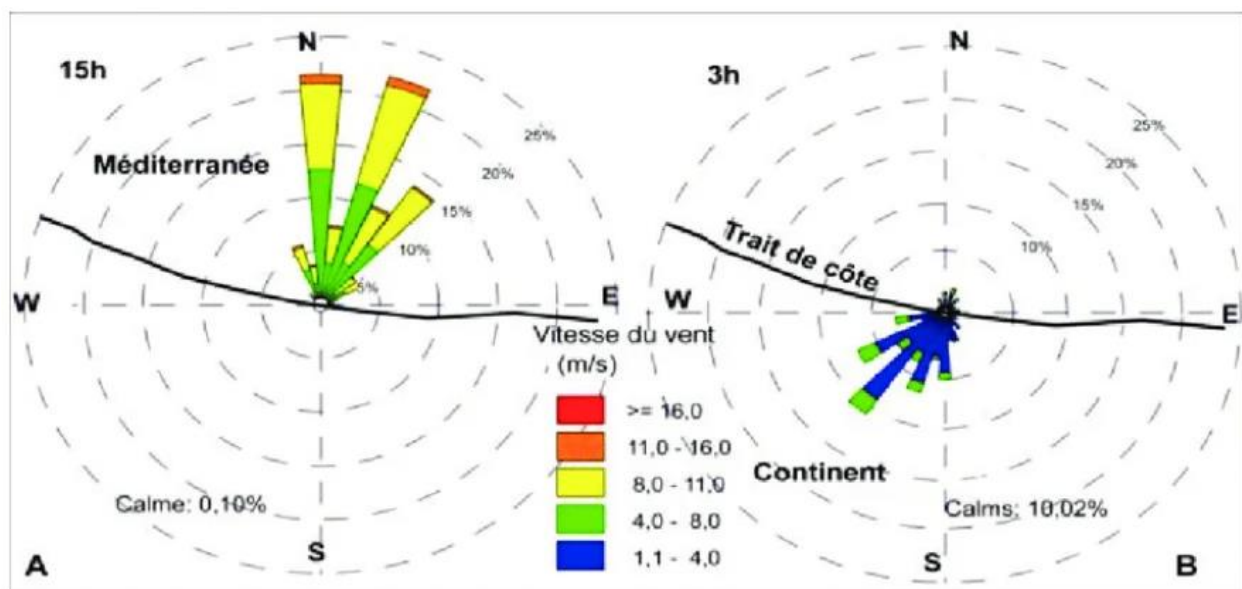


Fig 4 : Roses de vent enregistrées à 15h (A) et 3h (B) à l'aérodrome d'Annaba durant la saison chaude (juin à septembre) (données NOAA 1970-2016)

Cette rose est essentielle pour disposer les éoliennes perpendiculairement à la direction dominante, afin de minimiser les pertes par sillages. Des parcs mal alignés peuvent perdre 5 à 15% de production.

2. Variation spatiale et temporelle de la vitesse du vent

1. Variation verticale : profil de vent dans la couche limite

Près du sol, la vitesse du vent est freinée par la rugosité de la surface. La couche où cet effet s'exerce s'appelle la couche limite atmosphérique (CLP). En conditions neutres (sans gradient thermique significatif), le profil vertical est logarithmique :

$$v(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{pour } z \gg z_0$$

Dans la loi logarithmique du profil de vent, k la constante de von Kármán ($k \approx 0,40$) est universelle, la vitesse de frottement (u_*) traduit l'intensité de la turbulence mécanique près du sol, et la longueur de rugosité (z_0) représente la hauteur théorique où la vitesse extrapolée s'annule, intégrant l'effet de traînée de tous les éléments de surface.

Classification des rugosités :

Classe de rugosité	Type de surface	z_0 (m)
0	Mer calme, lacs, surfaces d'eau libres	0,0001 – 0,001
1	Terrain découvert, herbe rase, aéroports, désert plat	0,01 – 0,05
2	Zones agricoles avec haies basses et buissons épars	0,05 – 0,20

3	Zones suburbaines, forêts clairsemées, bocages denses	0,30 – 0,70
4	Centres urbains, forêts denses, zones de gratte-ciels	1,00 – 2,00

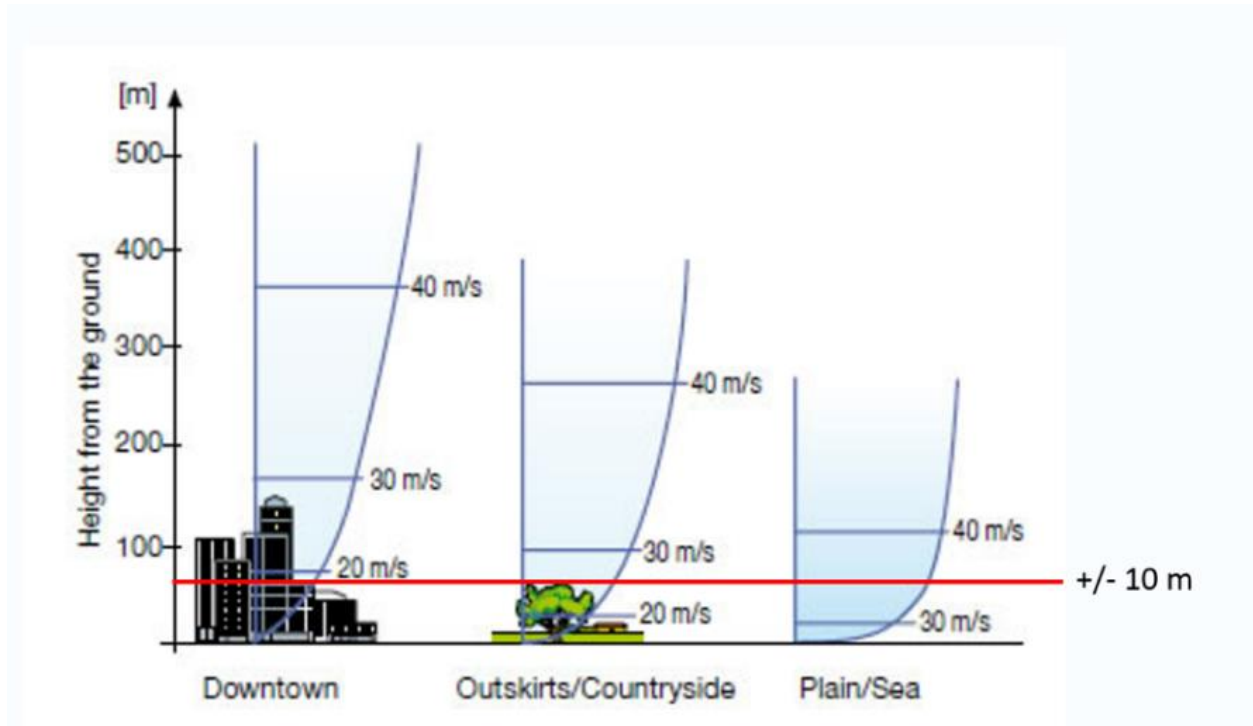


Fig 5: Profils verticaux pour les classes 0, 1 et 3, depuis 10 m jusqu'à 200 m. La mer (classe 0) présente le gradient le plus faible ; à 100 m, la vitesse y est nettement supérieure.

L'ingénieur utilise souvent **la loi de puissance empirique**, plus maniable :

$$v_2 = v_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha$$

L'exposant α est choisi en fonction de la rugosité et de la stabilité atmosphérique. Toutefois, la loi logarithmique doit être préférée pour les extrapolations importantes, car elle intègre mieux la physique.

Stabilité atmosphérique :

Le profil logarithmique n'est valable que pour une atmosphère neutre. En conditions stables (nuit claire, sol froid), l'air près du sol est plus froid et l'écoulement est laminaire ; le cisaillement vertical est plus fort. En conditions instables (journée ensoleillée, convection), le brassage thermique homogénéise la vitesse sur l'épaisseur de la CLP. **La longueur de Monin-Obukhov L** permet d'affiner le profil : $v(z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) + \psi_m \left(\frac{z}{L} \right) \right]$

Les parcs en mer, où la rugosité est faible et la stabilité souvent neutre, sont particulièrement favorables à cause de ces profils « raides ».

2. Effet des obstacles

Un obstacle (bâtiment, bosquet) perturbe l'écoulement en créant une zone de sillage turbulent. La perturbation s'étend verticalement jusqu'à 3 fois la hauteur H de l'obstacle, et horizontalement jusqu'à 30–40 fois H . La réduction de vitesse peut être modélisée par un facteur de perte :

$$v_{pert} = v_{libre} \cdot \left[1 - (1 - \sqrt{1 - C_t}) \left(\frac{R}{R + D} \right)^2 \right]$$

où C_t est le coefficient de traînée de l'obstacle, R son rayon équivalent, et D la distance derrière l'obstacle.

> **[IMAGE 6]** Schéma de sillage : bâtiment rectangulaire, cône de recirculation, courbe de déficit de vitesse à différentes distances. La zone de mesure valide est clairement à l'extérieur.

L'implantation d'un mât de mesure, et a **fortiori** d'une éolienne, doit impérativement se faire hors de cette zone perturbée.

3. Effet du relief

Collines, crêtes et falaises peuvent accélérer localement le vent. Le phénomène est décrit par la théorie des écoulements potentiels. Pour une colline gaussienne bidimensionnelle de hauteur H et demi-largeur L , le facteur d'accélération maximal au sommet est :

$$\Delta S_{max} \approx \frac{\Delta v}{v_0} \approx 0.5 \frac{H}{L}$$

Des augmentations allant jusqu'à 80 %, mais cela correspond à des pentes très raides ; des valeurs de 20 à 40 % sont plus courantes pour des sites bien choisis. La réduction en aval peut atteindre 30–40 %, assortie de fortes turbulences.

4. Variation temporelle

Cycles diurnes :

Comme vu avec les brises, le vent suit un cycle de 24 heures. Sur les continents, la vitesse est généralement plus élevée l'après-midi (convection) et plus faible la nuit (inversion). Les parcs éoliens continentaux produisent donc davantage en journée.

a) Variations saisonnières en Algérie :

Les travaux de réactualisation de l'Atlas éolien de l'Algérie, montrent que le printemps constitue la période la mieux ventée sur l'ensemble du territoire algérien, tandis que l'été est la saison où le vent est le plus constant (régularité maximale), et l'hiver présente la densité énergétique la plus importante.

Concernant le site d'Adrar, qui demeure le meilleur gisement éolien du pays avec une densité de puissance atteignant $646,91 \text{ W/m}^2$ à 50 mètres, les vitesses de vent mensuelles sont relativement homogènes sur l'année, oscillant généralement entre 5 et 8 km/h selon les mois.

Pour la région d'In Salah, située dans un couloir naturel entre le plateau du Tadmait et l'Adrar N'Ahnet, la saison des vents de sable s'installe dès janvier pour se prolonger jusqu'en février et au-delà, avec des vents provenant généralement du Nord-Est et de l'Est qui caractérisent également le mois de juillet. Les vitesses enregistrées y sont considérables, comprises entre 40,03 km/h (11,1 m/s) et 57,60 km/h (16 m/s).

Cette variation saisonnière est à mettre en relation avec la situation géographique et la topographie des sites sahariens, où les effets de couloir entre les reliefs accentuent considérablement l'activité éolienne.

b) Variations interannuelles :

L'oscillation nord-atlantique (NAO) ou El Niño affectent les régimes de vent à l'échelle décennale. Une campagne de mesure d'un an, même bien corrélée à des réanalyses long terme, comporte une incertitude sur le productible à long terme de l'ordre de ± 5 à 10 %.

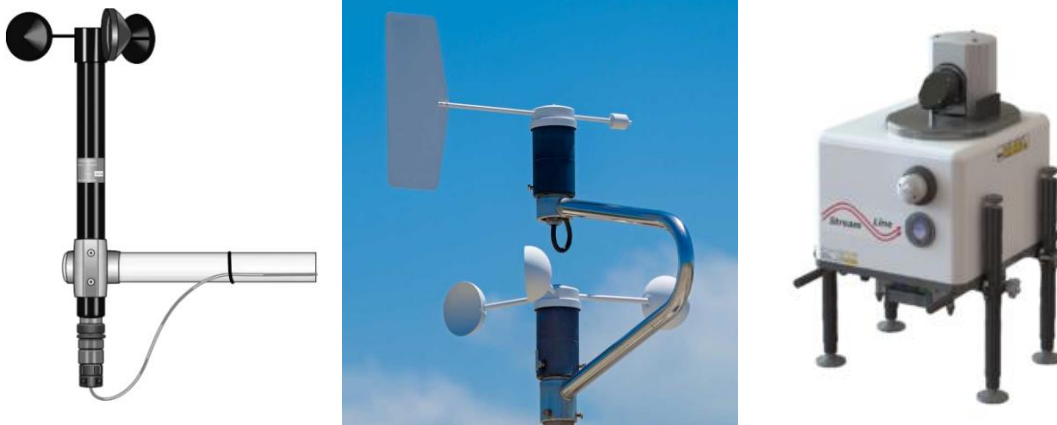
3. Mesure et évaluation de la ressource

1. Instruments de mesure

La norme IEC 61400-12-1 régit les mesures de performance. Les instruments fondamentaux sont:

- **Anémomètre à coupelles** : 3 ou 4 coupelles hémisphériques, montées sur un axe vertical. La vitesse de rotation est proportionnelle à la vitesse du vent. Il doit être calibré en soufflerie et monté sur un mât suffisamment rigide.

- **Girouette** : mesure la direction du vent par alignement aérodynamique. Elle est placée à proximité de l'anémomètre, en évitant les interférences.
- **Sodar et Lidar** : depuis les années 2000, ces instruments de télédétection permettent de mesurer le profil de vent jusqu'à 200 m sans mât physique. Le Lidar (détection par laser) est désormais accepté pour les campagnes de mesure en vue du financement de projets, sous réserve de validation croisée.



2. Traitement des données et corrélation à long terme

Les données brutes sont enregistrées sous forme de moyennes sur 10 minutes (norme IEC). Après filtrage (valeurs aberrantes, givre, seuil de démarrage), on les met en relation avec des séries de référence longues (stations météorologiques proches ou grilles de réanalyse). La méthode MCP (Measure-Correlate-Predict) est classique : une régression linéaire ou matricielle entre les vitesses du site de mesure et celles de la référence sur la période commune permet de reconstituer une série longue virtuelle pour le site. On calcule ensuite les paramètres de Weibull, la rose des vents et la courbe de durée.

Incertitude :

L'estimation du productible annuel est entachée d'incertitudes : mesure instrumentale ($\pm 2 \%$), corrélation à long terme ($\pm 3 \%$), extrapolation verticale (± 2 à 4% selon la complexité),

modélisation du sillage ($\pm 2\%$). L'incertitude globale peut atteindre 10 % ; les banques exigent des analyses de sensibilité.