



Cours N°5: L'ENERGIE EOLIENNE

5.1 Définition

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique de l'air en mouvement sous forme de vent. Sa transformation en énergie mécanique (ou électrique) se fait au moyen d'éoliennes. Ce sont des machines destinées à transformer l'énergie du vent en énergie électrique. Elle est dite « énergie flux ». Les énergies fossiles sont dites « énergies stock ».

L'air qui constitue l'atmosphère terrestre est un mélange de gaz et de particules solides ou liquides, concentrés dans la troposphère.

Dans cette région, le déplacement de l'air, par rapport à la surface terrestre, appelé vent résulte de l'équilibre entre les forces en présence. Pour un observateur à l'arrêt par rapport au sol, il existe quatre forces majeures qui agissent sur une partie élémentaire d'air :

- A . La force gravitationnelle ;
- B . La force due au gradient de pression ;
- C . La force de Coriolis ;

5.1.1 Force gravitationnelle

Conséquence de l'attraction mutuelle des corps, cette force intervient à cause de la grande masse de la terre. Elle est dirigée vers le centre de la terre.

5.1.2 Force de pression

Dirigées des hautes pressions vers les basses pressions, ces forces sont dues au gradient de pression résultant de l'échauffement inégal de l'air suivant les latitudes, la nature des sols et la répartition des océans et des continents. Les forces de pressions sont à l'origine du déplacement des masses d'air.

5.1.3 Force de Coriolis

Cette force est le résultat de la rotation de la terre autour de son axe et est perpendiculaire à la vitesse du vent. Elle intervient dans les déplacements atmosphériques en raison de la faiblesse des forces contribuant à mettre l'air en mouvement.

5.1.4 Forces de frottement

Ces forces traduisent la friction turbulente de l'air avec le sol. Elles interviennent dans la couche limite atmosphérique. La force gravitationnelle et la force du gradient de pression sont les deux forces qui peuvent initier un mouvement de l'air. Leurs actions se font ressentir près du sol dans une zone appelée couche limite atmosphérique.

5.2 Couche limite atmosphérique

La couche limite atmosphérique, dont l'épaisseur est d'environ 1000m, est la couche qui contient 10% du recouvrement de la masse d'air totale et où le déplacement d'air est régi par le gradient de pression.

Elle est contrôlée et modifiée partiellement par le frottement aérodynamique de la surface et par l'importance de la stratification de la densité d'air qui résulte des différences de températures entre la surface du sol et l'air ambiant. Elle est fonction de plusieurs paramètres, tel que :

- la vitesse du vent ;
- la rugosité des sols ;
- et l'ensoleillement variable suivant les lieux et l'heure de la journée.

Près de la surface terrestre, la présence du sol perturbe l'écoulement de l'air et crée une forte turbulence (vent) alors que dans l'atmosphère libre, l'air sous l'action des forces de pression et de Coriolis est uniforme, horizontal et sa vitesse est constante (vent géostrophique). La couche limite atmosphérique (CLA), peut être divisée en deux sous couches, à savoir **la couche limite de surface** (CLS) et la Couche limite d'**Eckerman**.

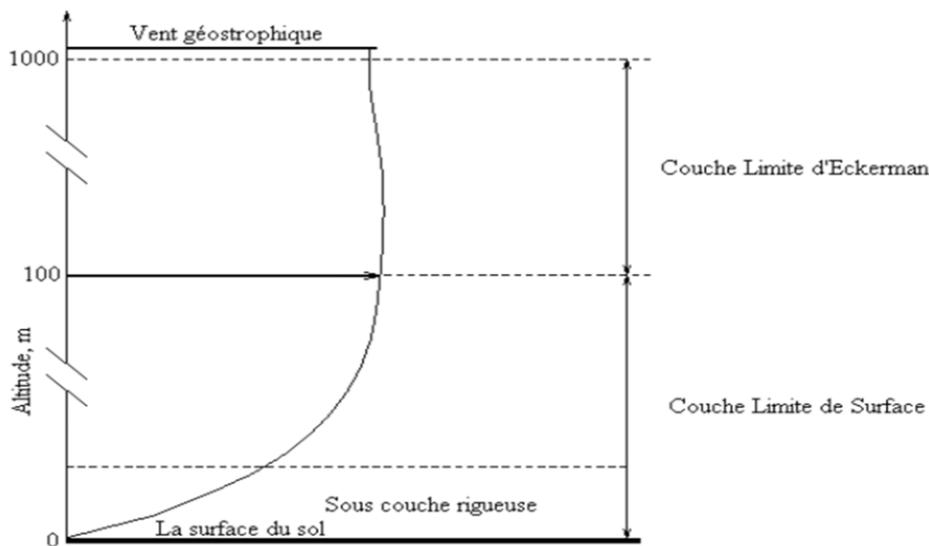


Figure 5.1 Vue schématique de la couche limite atmosphérique.

5.2.1 Couche limite de surface (CLS)

Cette couche dont l'épaisseur varie entre 50 et 100m, est la partie basse de la CLA. Elle est en contact direct avec la surface terrestre. Dans cette région, les effets de la force de Coriolis sont négligeables devant les effets dynamiques engendrés par les frottements au sol ainsi que par la stratification thermique de l'air. Elle peut être départagée en deux sous couches :

- Une sous-couche inférieure située au-dessus du sol où les forces de frottement sont prédominantes, par rapport à la stratification thermique de l'air. Dans ce cas, le mouvement de l'air est turbulent et best directement lié à la rugosité du sol.
- La seconde sous couche se situe juste au-dessus de la première. Les effets de frottement y sont négligeables devant la stratification thermique de l'air.

5.2.2 Couche limite d'Eckerman

La couche limite d'Eckerman est la partie supérieure de la couche limite atmosphérique. Le vent est alors influencé par le frottement au sol, la stratification thermique de l'air et la force de Coriolis.

Avec l'altitude, les forces de frottement deviennent négligeables devant l'effet de la force de Coriolis, jusqu'à atteindre le vent géostrophique.

5.3 Origine du vent

Du fait que la terre est ronde, le rayonnement solaire absorbé diffère aux pôles et à l'équateur. En effet, l'énergie absorbée à l'équateur est supérieure à celle absorbée aux pôles. Cette variation entraîne une différence de température en deux points qui induit des différences de densité de masse d'air provoquant leur déplacement d'une altitude à une autre.

Ces déplacements sont influencés par la force de Coriolis qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement vers l'est dans l'hémisphère nord et vers l'ouest dans l'hémisphère sud. On pourrait aisément prévoir la direction des vents dominants si elles n'étaient pas perturbées par les orages, les obstacles naturels ou les dépressions cycloniques.

5.4 Bref historique de l'énergie éolienne

Il y a plus de 3000 ans déjà, l'énergie du vent était transformée en énergie mécanique, d'une part sur terre par les moulins, d'autre part en mer, pour les bateaux. La fabrication d'électricité par ce biais a quant à elle vu le jour au XIX^{ème} (ou 19^e siècle) grâce aux contributions respectives de Brush aux Etats-Unis et de LaCour au Danemark. Malgré les progrès que connut cette technologie au cours du XX^{ème} siècle, peu d'intérêt lui fut apporté jusqu'à la crise pétrolière des années 70. C'est alors que le gouvernement américain, imité par le Royaume-Uni, l'Allemagne et la Suède, commença à financer des programmes de recherche qui permirent la construction d'une série de prototypes. C'est d'abord l'architecture simple d'une petite éolienne danoise, à trois pales et à vitesse fixe, qui fit ses preuves et fut ensuite développée à des dimensions plus grandes. Par la suite, les éoliennes à vitesse variable démontrèrent également leur efficacité. Cette industrie se développa de manière radicale au cours des années 90 où elle passa de 200 MW/an en 1990 à 5500 MW/an en 2001 (croissance moyenne annuelle de 40% sur les 5 dernières années, surtout exprimée en Europe).

5.5 Concepts de base

Le principe d'une éolienne est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique (on s'intéressera ici aux éoliennes les plus répandues dans l'industrie actuelle : les éoliennes à axe horizontal formées de trois pales). Ainsi la quantité de puissance qu'une éolienne est capable de fournir est directement dépendante de la vitesse du vent. La relation entre puissance en sortie d'une turbine et vitesse du vent au niveau du moyeu est décrite par une courbe de puissance théorique propre à l'éolienne. Ces courbes conservent sensiblement la même forme quel que soit le modèle d'éolienne. La Figure 1 illustre un exemple de cette courbe, dans le cas d'une éolienne de type "Vestas N80".

On constate que la production d'énergie est nulle en dessous d'une certaine vitesse de vent, notée "cut-in" (autour de 2 à 4 m.s⁻¹).

Elle augmente ensuite brusquement jusqu'à une certaine valeur de la vitesse dite nominale (entre 12 et 16 m.s⁻¹). C'est la relation de proportionnalité entre puissance et vitesse du vent au cube qui confère sa forme à cette partie de la courbe. En effet, la puissance du vent PV disponible en Watts est définie par la relation théorique suivante :

$$P_V = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

où ρ est la masse volumique de la masse d'air.

A est la surface décrite par les pales de l'éolienne.

V est la vitesse du vent au niveau du moyeu.

Notons que selon le critère

de Betz (résultat développé par le physicien

du même nom en 1919 et valable pour tout

type d'éolienne), une éolienne ne peut extraire

plus de 16/27 de l'énergie du vent PV.

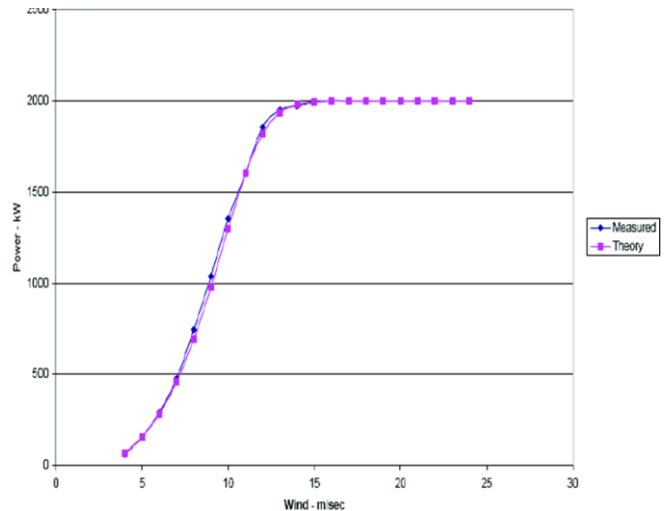


Figure 5.2: Courbe de puissance d'un modèle d'éolienne à axe horizontal de type Vestas N80.

Il donne ainsi un rendement maximal de la turbine d'environ 59%, le rendement réel ne pouvant en pratique dépasser les 20 à 30%, si l'on tient compte des pertes par frottements et lors de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique par exemple. Ce rendement maximal, appelé puissance nominale de l'éolienne, correspond à la section constante de la courbe de la figure 1, et peut être obtenu pour des vitesses comprises entre la vitesse nominale et la vitesse de coupure de l'éolienne, notée "cut-off" (entre 25 et 30 m.s⁻¹). Par sécurité, au-delà de cette vitesse de coupure, la turbine est arrêtée pour prévenir de dommages éventuels. La puissance en sortie tombe alors à zéro.

Ordre de grandeurs (valable pour une petite éolienne):

4 m/s	16,2 km/h	vitesse d'amorçage.
6 m/s	21,6 km/h	Vitesse limite inférieure permettant d'exploiter une éolienne
8 m/s	30 km/h	vitesse idéale pour installer une éolienne.
15 m/s	55 km/h	Vitesse de pleine production.
25 m/s	90 km/h	Vitesse limite supérieure (l'éolienne doit être arrêtée)
30 m/s	115 km/h	Risques considérables : perte des pales, rupture de la tour.

5.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

5.6.1 Les avantages de l'énergie éolienne sont nombreux :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.
- L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols (ni suies, ni cendres).
- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.
- Les propriétaires fonciers qui accueillent des éoliennes reçoivent souvent un paiement pour l'utilisation de leur terrain, ce qui augmente leur revenu ainsi que la valeur du terrain.
- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie: le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.
- L'énergie éolienne est l'une des sources de production d'électricité permettant de parvenir à moindre coût à la réalisation des objectifs que s'est fixée l'Union Européenne pour 2020 : 20% d'énergies renouvelables (*éolienne et autres*) dans la consommation globale d'énergie.
- L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole.
- L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut vous permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant.

5.6.2 Inconvénients

L'éolien a également quelques inconvénients qu'il ne faut pas omettre :

- Son impact visuel tout d'abord qui n'est pas encore accepté du grand public.
- Le bruit engendré par les éoliennes, quant à lui, nettement diminué.
- L'éolien serait de plus impliqué dans la mortalité des oiseaux ; sa responsabilité relative reste tout de même 19000 fois inférieure à celle des bâtiments/fenêtres. Néanmoins des efforts sont faits pour éviter leur implantation, notamment sur les parcours migratoires.
- Le principal désavantage de cette énergie est en réalité le caractère intermittent de sa ressource, le vent. La puissance obtenue dans l'équation (1) est fortement dépendante de la vitesse du vent puisque proportionnelle au cube de celle-ci et est donc elle-même hautement instable, ce qui la rend difficilement prévisible.
- Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit, d'interférences électromagnétiques.
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.

La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10 m du sol est présentée en figure (1) et à 50 m du sol d'après la figure.(2), Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. On remarque qu'à l'exception de la région côtière (moins Bejaia et Oran), du Tassili et de Beni Abbés, la vitesse de vent moyenne est supérieure à 3 m/s. En fait, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.5 m/s. Cependant, on notera l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran.

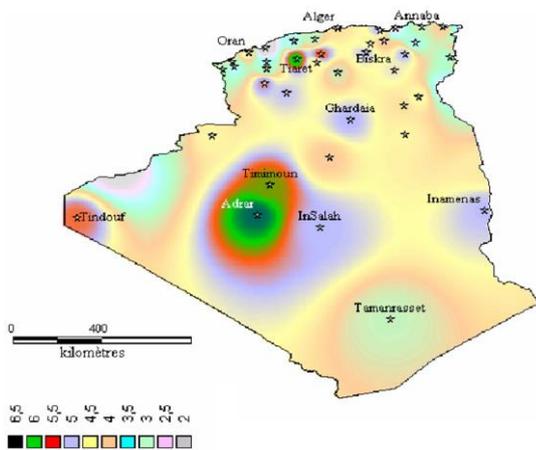


Fig. 5.3 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimé à 10 m d'altitude du sol.

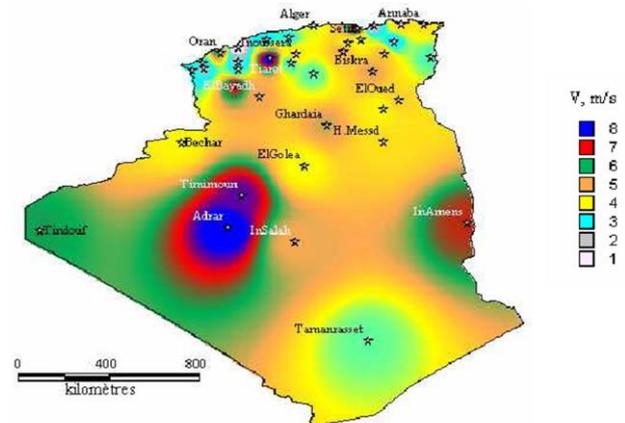


Fig.5.4 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimé à 50 m d'altitude du sol.

5.7. Etude statique de l'évaluation du potentiel éolien

5.7.1 Distributions des vitesses

Le potentiel éolien se calcule à partir des distributions de la vitesse moyenne. Comme les distributions ne sont pas toujours disponibles, on a pris l'habitude de modéliser les distributions à partir des modèles suivants :

- ✓ *Distribution de Weibull*
- ✓ *Distribution hybride de Weibull*
- ✓ *Distribution de Rayleigh*

a) Distribution de Weibull

Le modèle le plus utilisé pour caractériser la distribution des vitesses du vent est la distribution de probabilité de Weibull. La fonction de distribution de Weibull est une fonction exponentielle à deux paramètres : un paramètre d'échelle c (ms^{-1}) et un paramètre de forme k (sans unité) caractéristiques des données du vent.

Le paramètre c renseigne sur la moyenne du vent caractéristique du site, tandis que le paramètre k indique le caractère plus ou moins pointu de la distribution.

La distribution de Weibull s'exprime mathématiquement par sa fonction de densité de probabilité $f(V)$ donnée par :

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

Avec: $f(V)$ est la densité de probabilité de la vitesse V

K est le facteur de forme de la courbe (sans dimension)

C est le facteur d'échelle de la courbe en m/s.

La vitesse moyenne du vent peut être trouvée en intégrant la fonction densité de probabilité, soit donc la formule (1):

$$V_{moy} = \int V \cdot f(V) \cdot dV$$

Ainsi, la distribution de Weibull peut faciliter beaucoup de calculs rendus nécessaires par l'analyse des données du vent.

5.7.1.1 Méthodes de détermination des paramètres de Weibull

Plusieurs méthodes sont utilisées pour déterminer les paramètres de Weibull c et k à partir des données statistiques du vent (Justus et al., 1978). Parmi les plus utilisées, on peut retenir : la méthode des moindres carrés et celle utilisant l'écart type de la variation des vitesses et leur vitesse moyenne.

- ✓ Méthode des moindres carrés.
- ✓ Méthode de l'écart type et de la vitesse moyenne.

Il existe de nombreuses méthodes pour déterminer k et à partir d'une distribution de vent donnée :

$$c = \frac{1.125 V_{moy}}{(1-B)}$$

$$B = 1 - 0.81(V_{moy} - 1)^{0.089}$$

$$k = 1 + 0.483(V_{moy} - 2)^{0.51}$$

Cette fonction densité de probabilité s'appelle la distribution de Rayleigh, lorsque $k=2$.

1.1. Roses des vents

1.1.1. Roses des distributions des vitesses du vent

Les roses des distributions des vitesses du vent sont des distributions des vitesses du vent en module (en m/s) par secteur de direction donnée. La rose des vents se compose généralement de p secteurs de q degrés chacun (avec $pq=360^\circ$).

1.1.2. Roses des fréquences d'occurrence des classes de vent

Les roses des fréquences d'occurrence des classes de vent sont des distributions des vitesses du vent en fréquence d'occurrence (% de temps pendant lequel le vent souffle dans une direction). Le rayon de chacun des secteurs coniques indique la fréquence relative du vent dans cette direction.

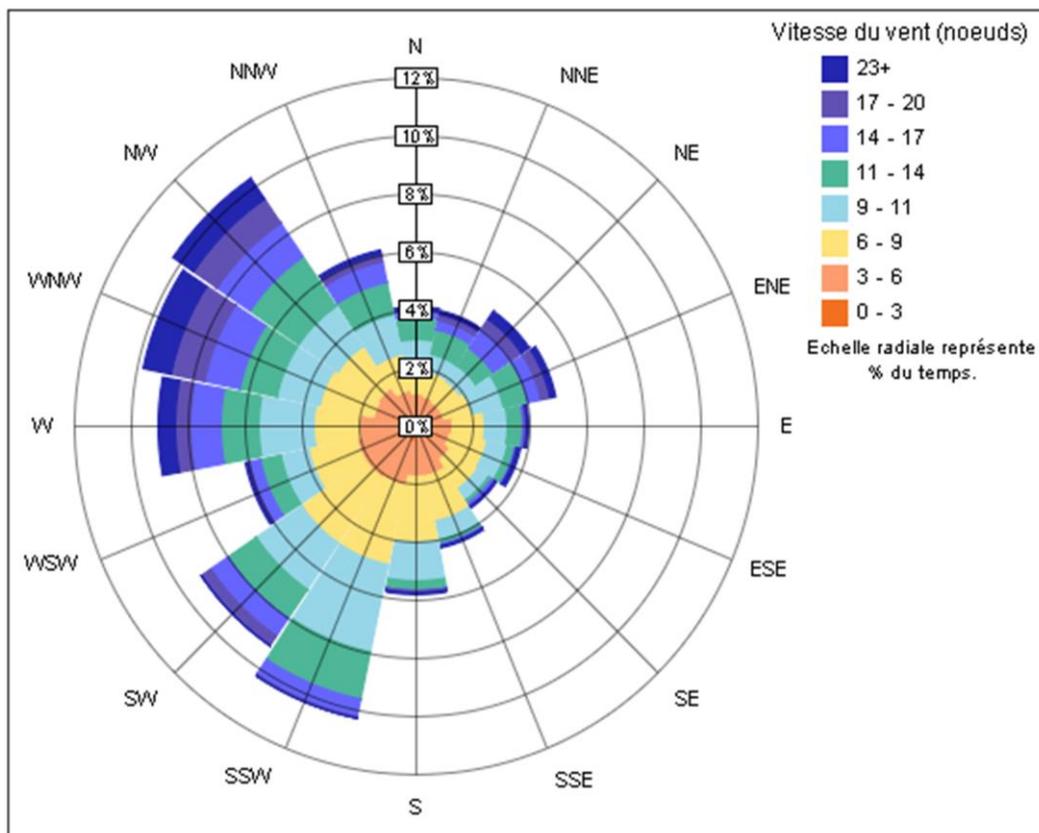


Fig.5.5. Rose des vents annuelle (distribution des vitesses)
Ce graphique montre la fréquence et la vitesse du vent soufflant dans chaque direction.

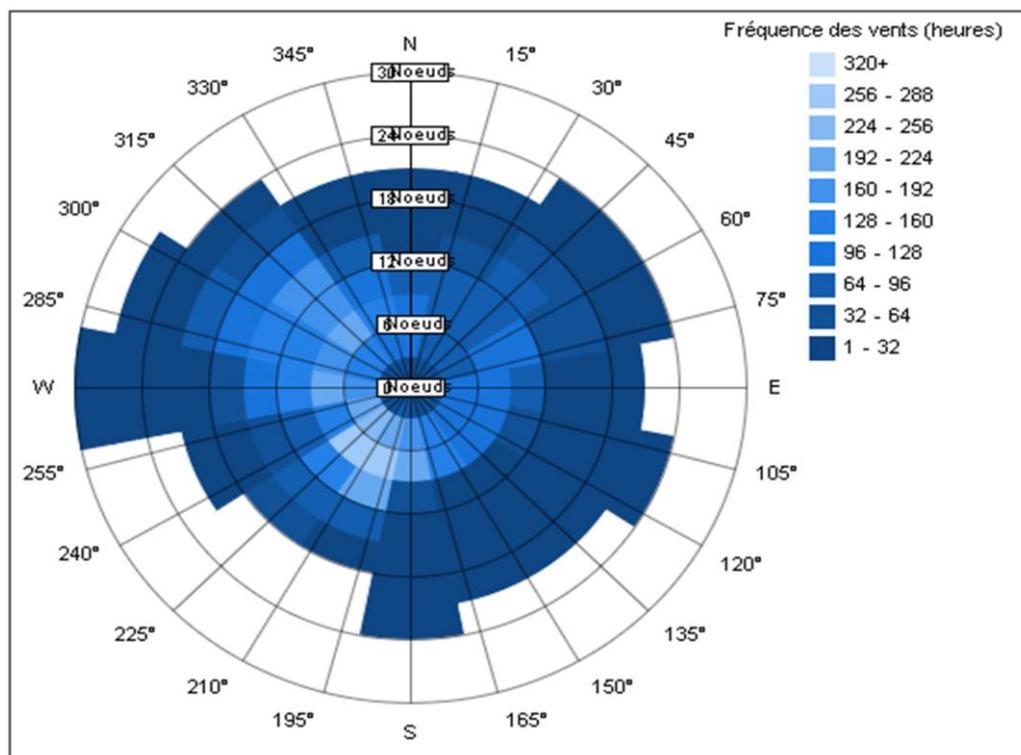


Fig. 5.6. Rose des vents annuelle (distribution des fréquences)
Cette rose des vents affiche les mêmes données que la rose des vents Distribution des vitesses, à l'exception de l'échelle radiale, qui représente maintenant la vitesse du vent au lieu du pourcentage de temps. En outre, les segments de couleur de chaque rayon représentent les heures, et non la vitesse du vent.

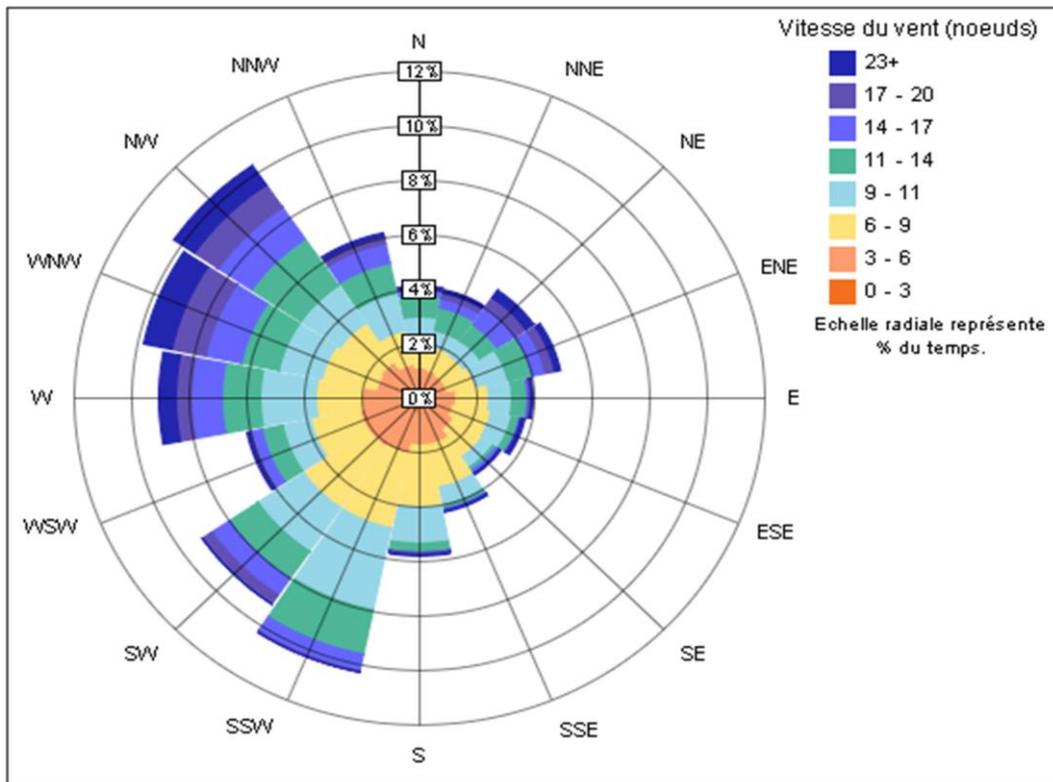


Fig. Rose des vents annuelle (distribution des vitesses)
 Ce graphique montre la fréquence et la vitesse du vent soufflant dans chaque direction.