

# CONFORT & DOMOTIQUE Ress-Eole-1

## DOSSIER SUR LES ÉOLIENNES

### 4ème

#### A. INTRODUCTION À L'ÉOLIENNE

L'énergie *éolienne* est l'énergie du vent. C'est une énergie plus respectueuse de l'environnement que les énergies classiques telles que les *combustibles fossiles* ou l'énergie *nucléaire*, car elle cause moins de pollution. Quoique le vent soit une source d'énergie gratuite, sa puissance varie considérablement en fonction du lieu et du moment ainsi que du climat et des saisons. Le vent ne peut assurer un apport énergétique régulier et il est difficile à contrôler. Toutefois, il est possible de prévoir la vitesse moyenne du vent, sa direction et son intensité dans certains lieux.

Les humains utilisent le vent depuis des milliers d'années. Dans l'Antiquité, ils l'utilisaient en tant que source d'*énergie mécanique* pour les bateaux à voiles vers le VIIe siècle. La première machine à avoir utilisé le vent en tant que source d'énergie fut le *moulin à vent*. Le moulin à vent fut inventé au VIIe siècle en Iran et en Afghanistan. De là, il s'est développé au Moyen-Orient, en Inde et a fini par être utilisé en Chine. Les premiers moulins servirent à *moudre* le grain pour obtenir de la farine. Ils furent aussi utilisés pour pomper l'eau des rivières afin d'*irriguer* les terres. Le moulin à vent est apparu en Europe au XIIe siècle. Un nouveau type de moulin à axe horizontal en forme de tour fut inventé : la structure tournait autour d'un pivot à la base et les *pales* étaient face au vent. Par la suite, une tour fixe fut adoptée; seule la partie supérieure, à laquelle étaient fixées les *pales*, tournait sous l'effet du vent. Au XVIIIe siècle, un *gouvernail* a été inventé pour que la partie supérieure du moulin tourne automatiquement et s'arrête lorsque les pales font face au vent.

#### TYPES D'ÉOLIENNES

Il existe deux types d'éoliennes, les unes avec un axe horizontal, parallèle au sol, et les autres avec un axe vertical, *perpendiculaire* au sol. Les plus vieux modèles d'éoliennes étaient munis de nombreuses *pales*. Les éoliennes modernes comptent en général trois pales. L'éolienne à axe horizontal tourne dans un plan vertical et doit être face au vent pour être efficace.



Éolienne à axe horizontal



Éolienne à axe vertical

L'éolienne à axe vertical a été inventée en 1925 par l'ingénieur français Georges Darrieus. Ce type d'éolienne n'a pas besoin d'être face au vent, car il est efficace quelle que soit la direction du vent. Les pales des éoliennes à axe vertical tournent dans un plan horizontal. Une sorte d'éolienne à axe vertical appelée rotor de Savonius est facile à construire et peu coûteuse.

Du point de vue de la construction, les éoliennes à axe vertical sont un peu plus simples. **Toutefois, en raison de leur meilleur rendement (productivité) les éoliennes à axe horizontal sont de loin les plus utilisées et ont fait l'objet de la plus grande avancée technologique.**

Les éoliennes modernes sont en *acier* et en matériaux *composites*. Elles sont dotées de *pales* comparables aux *hélices* des avions. Le vent fait tourner ces *pales* à grande vitesse. Cette rotation rapide sert à produire de l'électricité. Les éoliennes peuvent être installées à l'unité et couplées à d'autres moyens de faire de l'électricité pour fournir du courant à des communautés isolées, ou elles peuvent être destinées à la production en masse. Dans ce cas, elles sont regroupées en plus grand nombre dans des endroits favorables à leur implantation, c'est-à-dire suffisamment venteux.

L'éolienne est un système qui convertit l'énergie de l'air en mouvement (**énergie cinétique**) en **énergie mécanique** capable d'entraîner une génératrice électrique. Dans une génératrice, un bobinage de fil de cuivre, entraîné par l'éolienne, tourne entre les pôles d'un *électroaimant*, ce qui produit de l'électricité. Les éoliennes respectent beaucoup plus l'environnement que les autres sources d'énergie.

# CONFORT & DOMOTIQUE Ress-Eole-2

## DOSSIER SUR LES ÉOLIENNES

### 4ème

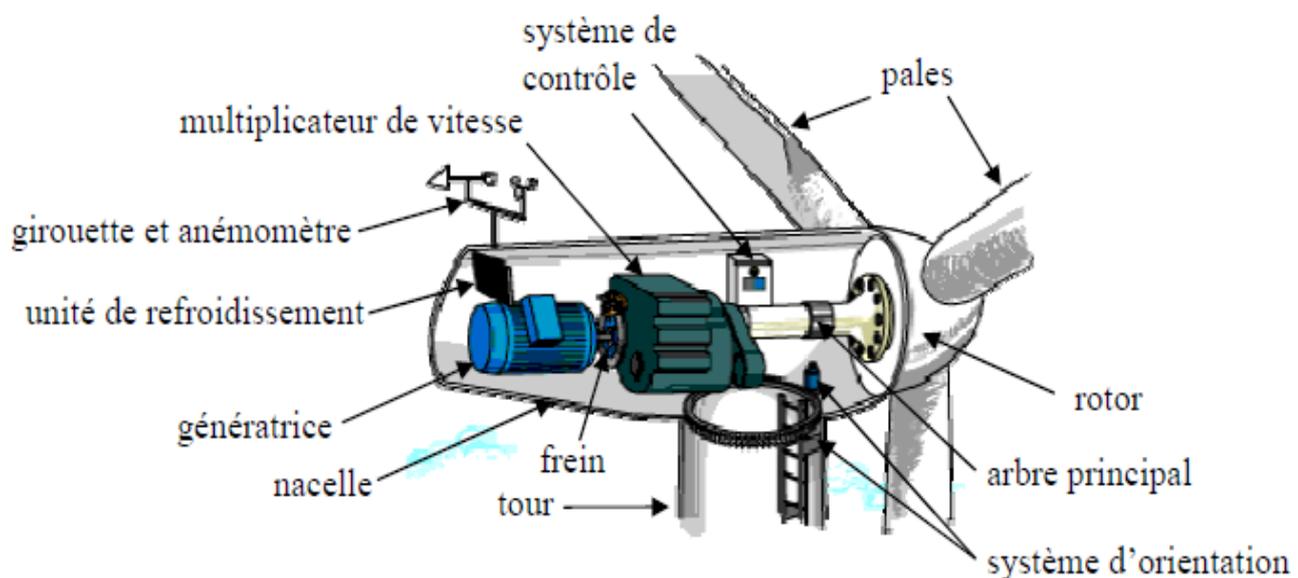
#### B. CONNAISSANCES TECHNOLOGIQUES ET SCIENTIFIQUES

- Lorsque l'éolienne est terminée, elle pourra **produire de l'électricité** pour les prochaines **20 à 25 années**.
- Il est **important** que le rotor se trouve aussi haut que possible dans le ciel. A **40 à 70 mètres d'altitude**, il vente beaucoup plus que près du sol. Plus le rotor se trouve haut dans le ciel, plus la production d'électricité est grande.

**Il y a deux raisons principales pour lesquelles le vent est créé.**

1. La rotation de la Terre
2. Les différences de température sur la Terre

#### LES 14 PRINCIPAUX COMPOSANTES DES DEUX TYPES D'ÉOLIENNES SONT LES MÊMES :



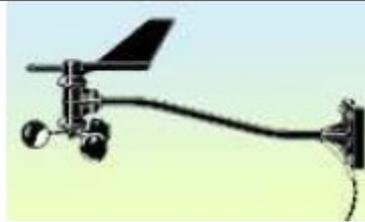
1. Les **pales** du rotor.
2. Un **rotor** à faible vitesse de rotation qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique (le *rotor* comprend les *pales* et l'*arbre principal*).
3. Un **arbre principal** qui tourne lentement et transmet une très grande force de rotation au *multiplicateur*.
4. Le **multiplicateur de vitesse** constitué d'un grand nombre de roues dentées et placées dans un engrenage. Celui-ci transforme la force lente de l'*arbre principal* en rotation rapide pour la *génératrice*.
5. Un **frein** mécanique en cas d'urgence, lorsque les freins du bout des *pales* ne fonctionnent pas ou encore pour réparer ou faire l'entretien de l'éolienne.
6. Une **génératrice** qui produit de l'électricité. À l'intérieur, on trouve des aimants et une bobine autour de laquelle est enroulé un long conducteur en cuivre. Quand l'aimant tourne, l'électricité est produite dans la bobine.
7. Une **unité de refroidissement** qui fonctionne comme un radiateur. L'eau réfrigérante refroidit la *génératrice*.
8. Une **girouette** qui informe le *système de contrôle* de la direction du vent. 9. **L'anémomètre** qui mesure la vitesse du vent et informe le *système de commande* quand le vent souffle assez fort pour produire de l'électricité de manière efficace.
10. Un **système de contrôle** pour démarrer et arrêter l'éolienne, et pour assurer le bon fonctionnement du matériel.
11. Une **nacelle** qui contient à l'intérieur toutes les composantes mentionnées ci-dessus, excepté le *rotor*.
12. Un **système d'orientation** pour assurer que l'éolienne produit autant d'électricité que possible en déplaçant le *rotor* de manière à ce qu'il soit toujours orienté face au vent. Ce système comprend un moteur et une couronne au-dessus de la tour.
13. Une **tour** qui soutient la *nacelle* et le *rotor* au-dessus du sol afin de saisir les vents à grande vitesse.
14. Une **fondation** pour empêcher l'éolienne de basculer par grands vents.

# CONFORT & DOMOTIQUE Ress-Eole-3

## DOSSIER SUR LES ÉOLIENNES

### 4ème

La vitesse du vent est mesurée par un instrument appelé **anémomètre** qui tourne d'autant plus vite que le vent est fort et qui est muni d'une girouette indiquant la direction du vent.



Anémomètres avec girouette

Les éoliennes modernes fonctionnent automatiquement. La plupart des systèmes de commande des éoliennes comprennent un anémomètre qui mesure continuellement la vitesse du vent. La puissance produite augmente rapidement à mesure que la vitesse du vent augmente. La vitesse du vent à laquelle il est possible de produire de l'énergie avec une éolienne correspond normalement à un vent de 6,5 m/s (23,4 km/h) et plus.

**Les éoliennes ont le plus souvent 3 pales, car il s'agit d'un compromis entre différents paramètres :**

- le nombre pair de pales entraîne des effets mécaniques indésirables (forces dites de "précession" trop élevées),
- le rendement décroît si le nombre de pales augmente (une pale étant perturbée par la précédente).

Ainsi, le choix de 3 pales offre à la fois des contraintes mécaniques réduites et un rendement élevé.

Les petites éoliennes ont toutefois des rotors qui ont parfois deux pales. Celles-ci sont en effet suffisamment petites pour supporter les contraintes de précession et elles peuvent alors profiter du rendement meilleur des rotors bipales par rapport aux rotors tripales.

Les rotors bipales sont de plus, plus simples à concevoir et à réaliser.

Les éoliennes n'ont pas toujours une géométrie constante. **En effet, elles doivent être capables de supporter les tempêtes et cette résistance aux vents violents peut-être obtenue par une modification de la forme du rotor.**

En effet, les pales peuvent tourner le long de leur axe principal, ce qui permet d'adapter la géométrie du rotor à la force du vent pour obtenir le meilleur rendement, mais surtout de les basculer totalement pour réduire leur prise au vent. Le rotor ne cherche alors plus à tourner et l'effort [axial](#) est réduit.

D'autres modèles possèdent des "volets". Il s'agit de l'extrémité de la pale qui est capable de tourner sur elle-même le long de son axe principal et ainsi d'opposer une force à celle due au vent sur le reste de la pale.

**Les éoliennes présentent néanmoins des inconvénients :**

□ il faut trouver le moyen de stocker de l'électricité pour les jours sans vent, le bruit causé par la rotation des pales peut être assourdissant, les signaux de télévision rebondissent sur les pales, ce qui peut entraver la diffusion, les pales des éoliennes doivent pouvoir s'adapter à la vitesse du vent, sinon les vents violents les endommageraient, des oiseaux risquent d'être tués dans les parcs éoliens où il y a plusieurs éoliennes, l'esthétique de la région environnante est touchée.

Au lieu de construire une seule grande éolienne, il est souvent moins dispendieux d'ériger une série de petites éoliennes. Un grand parc à éoliennes peut produire l'électricité nécessaire à une ville. Des câbles électriques transportent l'électricité vers les villes. Leur emplacement est étudié de sorte qu'elles soient suffisamment proches pour un captage optimal du vent, mais assez distantes pour éviter qu'elles ne se gênent.

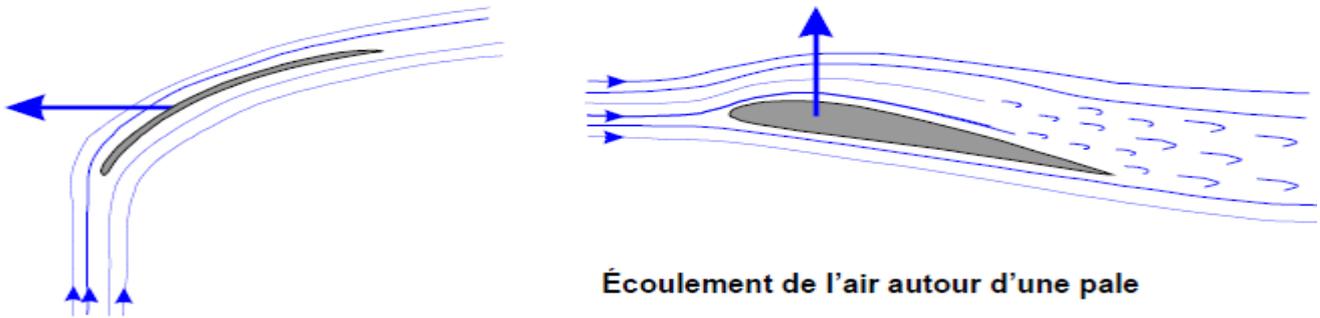
### LES PALES D'ÉOLIENNES

Une éolienne à axe horizontal est dotée de pales. Des pales en forme de voile de bateau étaient couramment utilisées pour faire tourner les moulins à vent. La forme incurvée de la voile accélère la vitesse du vent et diminue la pression de l'air devant la voile. Cette baisse de pression a pour effet de faire tourner le rotor du moulin. Ce système a l'avantage d'être efficace et simple à fabriquer.

# CONFORT & DOMOTIQUE Ress-Eole-4

## DOSSIER SUR LES EOLIENNES

### 4ème

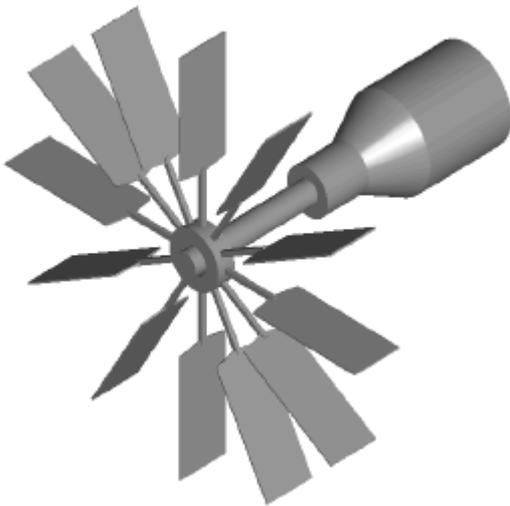


Écoulement de l'air autour d'une pale

Aujourd'hui, la forme des pales modernes est comparable à la forme des hélices d'avion. Ces pales sont planes sur un côté et profilées sur l'autre afin de tirer le maximum de profit de l'écoulement de l'air tout comme les ailes d'un avion. La courbure spéciale des surfaces des pales provoque un écoulement de l'air plus rapide sur un côté de la pale (côté courbé). Il en résulte que la pression de l'air est moindre sur le côté courbé que sur le côté plat, et cette différence de pression fait tourner les pales.

Généralement, **les éoliennes modernes ont trois pales longues** et effilées qui sont contrôlées par un ordinateur. Le vent fait tourner ces pales à grande vitesse. Les pales tournantes entraînent un système d'*engrenages* (augmentant ainsi la vitesse de rotation) qui actionne un arbre relié à une génératrice, l'appareil qui convertit cette rotation en électricité.

### Éolienne à axe horizontal



Éolienne à pales

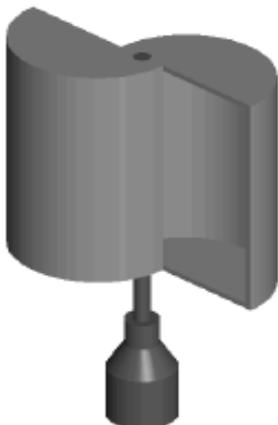


Éolienne à deux



Éolienne à trois pales

### Éoliennes à axe vertical



Éolienne de Savonius



Éolienne de Darrieus



Éolienne de Musarova

### C. TRANSMISSION DE MOUVEMENTS : LES ENGRENAGES.

Les systèmes d'engrenages peuvent faciliter un travail en rendant une charge plus facile à déplacer.

#### Voici de quelles façons :

Transférer le mouvement et la force d'un endroit à un autre.

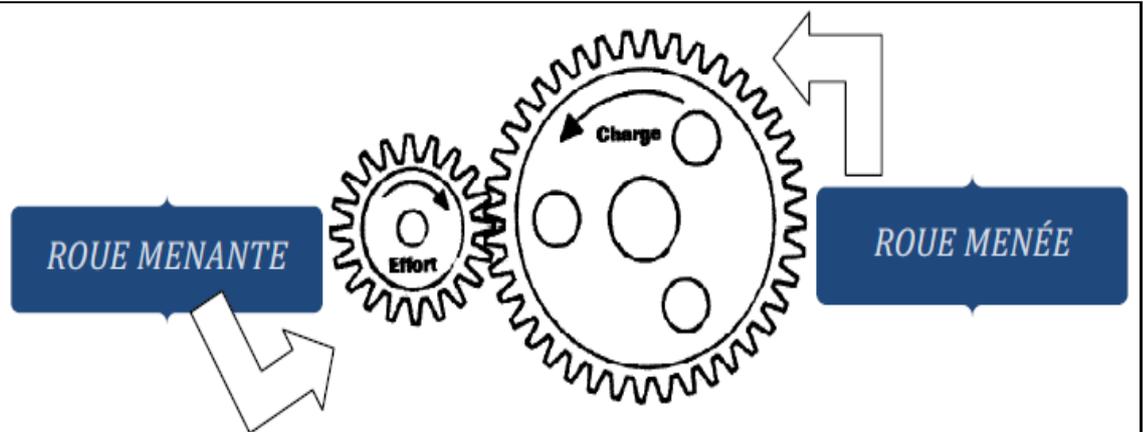
Changer la direction d'un mouvement rotatif.

#### Train d'engrenages :

Ensemble constitué de plusieurs engrenages. Lorsqu'un engrenage tourne, ses dents poussent sur les dents de l'engrenage adjacent et le fait tourner dans la **direction opposée**.

#### ROUE MENANTE ET ROUE MENÉE

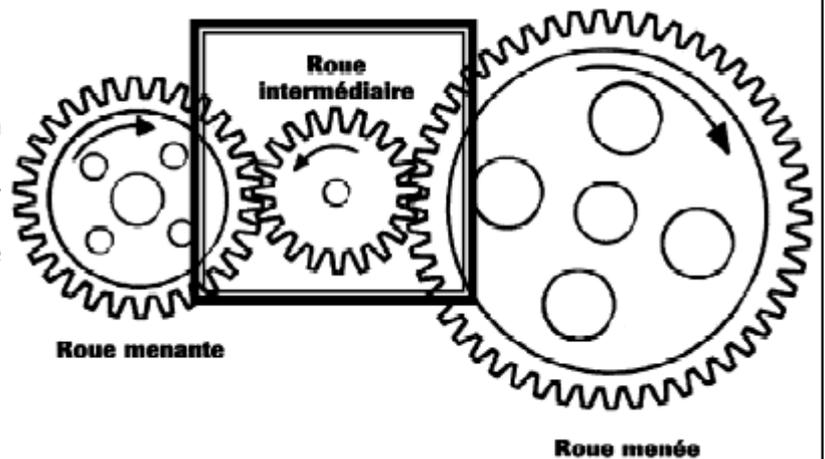
La **roue menante** est la roue sur laquelle la force est appliquée. Elle transfère l'effort à la roue suivante (dans un train d'engrenages) qui est la roue menée.



La **roue menée** est la roue qui fait bouger la charge.

**Roue intermédiaire** a comme fonction de changer la direction de la roue menée.

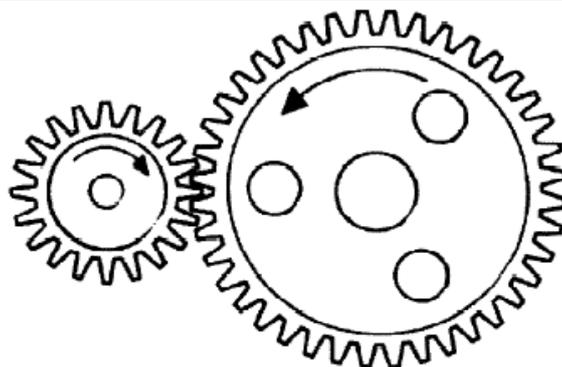
Elle fait en sorte que les roues situées de chaque côté d'elle tournent dans la même direction.



#### Multiplier la force appliquée.

En utilisant différentes tailles d'engrenages, on affecte la force de puissance de la roue menée. Un petit engrenage menant un engrenage plus grand **multiplie la force** aux dépens de la vitesse.

**Petite roue menante (rapide)**

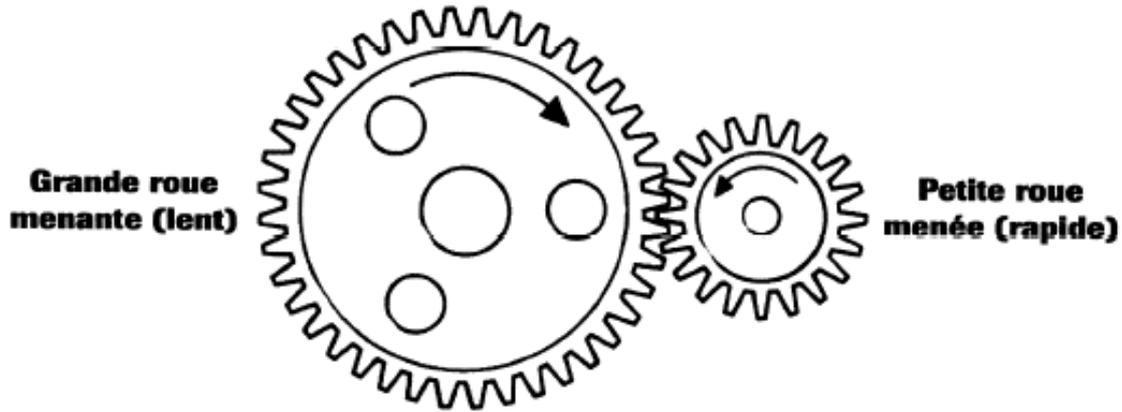


**Grande roue menée (lent)**

#### Changer la vitesse

En utilisant différentes tailles d'engrenages dans un train d'engrenages, on affecte la vitesse de la roue menée.

## LES ENGRENAGES: Changer la vitesse et la force



**Accélération :** Une **grande** roue **menante** actionnant une **roue menée** plus **petite augmente** la vitesse de rotation de l'axe de la roue menée.

**Par exemple :**

Une roue menante possédant 40 dents effectuera un tour complet pour chaque 5 tour effectué par une roue menée de 8 dents. Le rapport d'engrenage est donc de 1 :5, indiquant que la vitesse produite est 5 fois plus élevée que la vitesse de départ. C'est ce qu'on appelle l'amplification par engrenage **augmente la vitesse** de rotation mais diminue la force.

**Décélération :**

Une **petite** roue **menante** actionnant une roue **menée** plus **grande ralentit** la vitesse de rotation de l'axe de la roue menée.

**Par exemple :**

Une roue menante de 8 dents accomplit 5 tours complets pour chaque tour effectué par une roue menée de 40 dents. Le rapport d'engrenage est de 5 :1, indiquant que la vitesse fournie par la roue menante est 5 fois plus rapide que la vitesse produite par la roue menée. C'est ce qu'on appelle la **démultiplication**.

**L'EFFET MÉCANIQUE :**

Un calcul mathématique indiquant combien de fois une machine simple multiplie la force résultant de l'effort. Dans le cas de l'engrenage, l'effet mécanique se calcule ainsi :

$$\frac{\text{Nombre de dents sur la roue menée}}{\text{Nombre de dents sur la roue menante}} = \text{Effet mécanique}$$

Parce que les unités (dents) s'annulent, l'effet mécanique est toujours exprimé comme un nombre sans unité.

$$\text{Exemple : } EM = \frac{40 \text{ dents}}{8 \text{ dents}} = 5$$

**Rapport d'engrenage :**

Rapport entre la vitesse de rotation de la roue menante et celle de la roue menée. Ce rapport peut être calculé en comparant le nombre de dents de la roue menée au nombre de dents de la roue menante

$$\text{Rapport d'engrenage} = \frac{\text{Nombre de dents de la roue menée}}{\text{Nombre de dents de la roue menante}} = \frac{(40)}{(8)} = 5$$

### Le fonctionnement d'une éolienne

La fabrication d'électricité par une éolienne est réalisée par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. De nombreuses étapes sont nécessaires à cette transformation, qui fait appel à des technologies très diverses.

### La chaîne de transformation énergétique

Une éolienne transforme l'énergie du vent en énergie électrique. Cette transformation se fait en plusieurs étapes.

#### La transformation de l'énergie par les pales

Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion: la différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

#### L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur

Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1000 à 2000 tours par minute) pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur. Certains types d'éoliennes n'en sont pas équipés, leur générateur est alors beaucoup plus gros et beaucoup plus lourd.

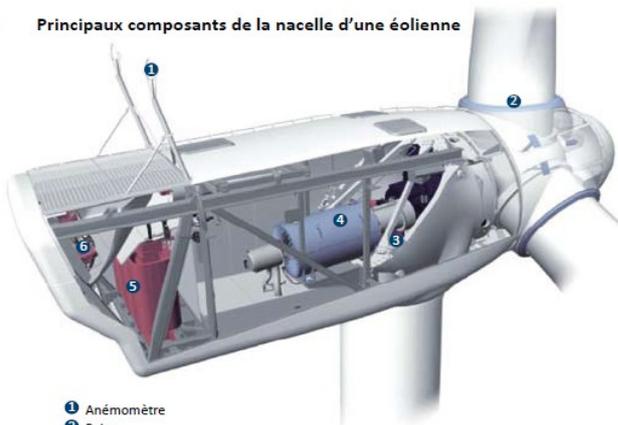
#### La production d'électricité par le générateur

L'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur. Le rotor du générateur tourne à grande vitesse et produit de l'électricité à une tension d'environ 690 volts.

#### Le traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur

Cette électricité ne peut pas être utilisée directement ; elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est augmentée à 20 000 Volts par un transformateur. L'électricité est alors acheminée à travers un câble enterré jusqu'à un poste de transformation, pour être injectée sur le réseau électrique, puis distribuée aux consommateurs les plus proches.

Principaux composants de la nacelle d'une éolienne



- 1 Anémomètre
- 2 Pales
- 3 Multiplicateur
- 4 Alternateur
- 5 Transformateur
- 6 Systèmes de refroidissement

Composants électroniques dans le mât d'une éolienne



- 1 Convertisseurs
- 2 Armoire de commande
- 3 Transformateur
- 4 Fondation de la tour

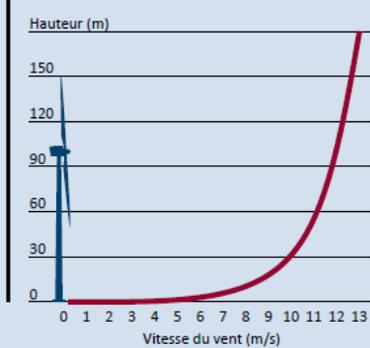
### ■ Différents facteurs de productivité

L'énergie produite par une éolienne dépend de plusieurs paramètres : la longueur des pales, la vitesse du vent et la densité de l'air. La puissance produite par une éolienne augmente avec le carré de la longueur des pales, et avec le cube de la vitesse du vent. Ainsi, une éolienne produira quatre fois plus d'énergie si la pale est deux fois plus grande et, lorsque la vitesse du vent double, la production sera multipliée par 8 ! La densité de l'air entre également en jeu : une éolienne produit 3% de plus d'électricité si, pour une même vitesse de vent, l'air est 10 degrés plus froid. Pluie ou neige n'ont, quant à elles, aucune influence.



© SHILOVE / POTOIA

Puissance du vent en fonction de l'altitude  
source : SER-FEE



### Pourquoi la plupart des éoliennes ont-elles trois pales ?

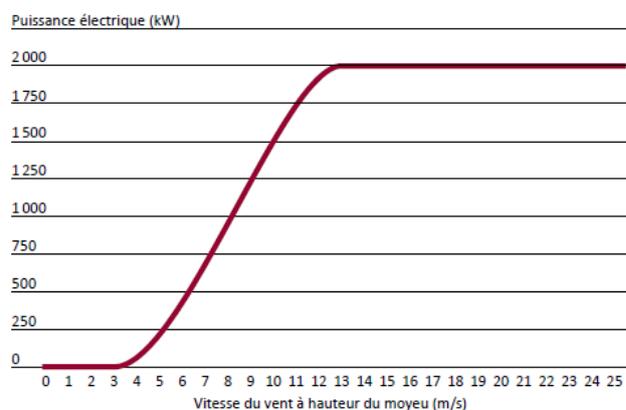
Le vent étant freiné par les obstacles au sol, la vitesse du vent augmente avec l'altitude. De ce fait, le vent en haut d'une éolienne soufflera plus fort qu'en bas du rotor. Dans le cas d'une éolienne à une ou deux pales, la variation de la force sur le moyeu est alors importante car lorsqu'une pale est au plus haut (et donc produit le plus), l'autre pale est au plus bas (et produit le moins), obligeant alors la mise en place de systèmes spécifiques. En revanche, l'installation de trois pales permet une compensation de ces différences et une moindre variation de puissance à chaque rotation du rotor.

### ■ La régulation de la puissance du vent

La production électrique varie selon la vitesse du vent :

- Lorsque le vent est inférieur à 10 km/h, l'éolienne est arrêtée car le vent est trop faible. Cela n'arrive que 15 à 20% du temps.
- Entre 10 et 36 km/h, la totalité de l'énergie du vent disponible est convertie en électricité, la production augmente très rapidement.
- À partir de 36 km/h, l'éolienne approche de sa production maximale : les pales se mettent progressivement à tourner sur elles-mêmes afin de réguler la production.
- À 45 km/h, l'éolienne produit à pleine puissance. Les pales sont orientées en fonction de la vitesse du vent. La production reste constante et maximale jusqu'à une vitesse de vent de 90 km/h.
- À partir de 90 km/h, l'éolienne est arrêtée progressivement pour des raisons de sécurité, et les pales sont mises en drapeau. Cela n'arrive que sur les sites très exposés, quelques heures par an, durant les fortes tempêtes.

Puissance d'une éolienne en fonction du vent  
source : REpower Systems AG



Une éolienne dispose de trois freins principaux (chacune des trois pales), mais est également équipée d'un frein mécanique afin d'assurer l'arrêt rapide de la machine et son immobilisation lors de la maintenance.

### Eolienne à axe vertical de type Darrieus

Encore méconnues, les éoliennes à axe vertical de type Darrieus apparaissent pourtant plus adaptées que leurs sœurs tripales dans certains secteurs comme l'intégration au bâtiment, les zones extrêmes (observatoires, refuges ...)

Possédant pour la plupart un rendement moins important que les éoliennes "classiques", ce type d'éoliennes permettent de s'affranchir des limites introduites par la taille des pales et leur vitesse de rotation.

L'encombrement total est plus faible, et dans certains cas, le moteur se situant à sa base, ce type d'éoliennes est plus économique

Le principe est celui d'un rotor d'axe vertical qui tourne au centre d'un stator à ailettes.

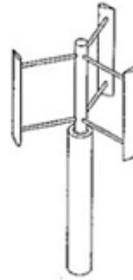
Ce type de solution réduit considérablement le bruit tout en autorisant le fonctionnement avec des vents supérieurs à 220 km/h et quelle que soit leur direction.

Le principal défaut de ce type d'éolienne est leur démarrage difficile, en effet le poids du rotor pèse sur son socle, générant des frottements.

On distingue plusieurs déclinaisons autour de ce principe, depuis le simple rotor cylindrique - deux profils disposés de part et d'autre de l'axe - jusqu'au rotor parabolique où les profils sont recourbés en troposkine et fixés au sommet et à la base de l'axe vertical.



Rotor Darrieus



Rotor Darrieus H



Rotor Hélicoïdale



**+ Avantages :**

- ▶ Génératrice pouvant placée au sol (selon les modèles)
- ▶ Moins d'encombrement qu'une éolienne "conventionnelle"
- ▶ Intégrable au bâtiment

**- Inconvénients :**

- ▶ Démarrage difficile contrairement à l'éolienne de type Savonius
- ▶ Faible rendement

### Eolienne à axe vertical de type Savonius

Bien que possédant un faible rendement par rapport aux éoliennes "classiques", l'éolienne Savonius a l'avantage d'être peu encombrante, économique et esthétique.

Cela lui permet d'être facilement intégrée aux bâtiments.

#### Principe de fonctionnement d'une éolienne de type Savonius

Cette machine a été inventée par l'ingénieur finlandais Sigurd Savonius en 1924 et a été brevetée en 1929. Elle est constituée schématiquement d'un minimum de deux demi-cylindres légèrement désaxés.



**+ Avantages :**

- ▶ Faible encombrement
- ▶ Intégrable au bâtiment, esthétique
- ▶ Démarre à de faible vitesse de vent contrairement à l'éolienne de type Darrieus
- ▶ Système peu bruyant
- ▶ Pas de contraintes sur la direction du vent

**- Inconvénients :**

- ▶ Faible rendement
- ▶ Masse non négligeable

