

Table des matières

Introduction :	2
Partie 1 : Le vent	2
I. Son origine	2
II. La force de Coriolis	3
III. La force de friction	4
IV. Les vents globaux	4
1. Le réchauffement inégal de la Terre	4
2. Le développement des vents globaux	5
3. Quand la Terre tourne	6
4. Les grandes zones de hautes et basses pressions	6
V. Les vents locaux	7
1. La brise de mer et la brise de terre	7
2. La brise de vallée	8
VI. La mesure de la vitesse et de la direction du vent	8
Partie 2 : L'éolienne	10
I . Les composants d'une éolienne	10
1. La nacelle	10
2. Les pales du rotor	11
3. Le mat	12
II . Les différents types d'éoliennes	13
1. Le nombre de pales	13
2. Les différents axes des éoliennes	14
3. La taille des éoliennes	16
III. Le choix d'un site	17
1. Les obstacles du vent	17
2. Les sites idéals	19
Partie 3 : Transformation de l'énergie du vent en énergie électrique	22
I. L'énergie cinétique du vent et la puissance récupérable	22
II. Le multiplicateur et la transmission de l'énergie mécanique	24
III. La transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique	27
Conclusion :	30
Lexique	31
Bibliographie	33

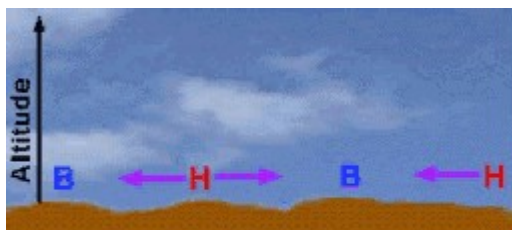
Introduction :

Dans le cadre des Travaux Personnels Encadrés, nous avons choisi le thème de « l'environnement et du progrès ». Aujourd'hui afin de limiter notre impact sur la terre et son climat, les sociétés tentent d'utiliser des énergies renouvelables. La production d'électricité dans le monde ne cesse d'augmenter. Un projet intéressant serait alors de changer nos technologies et d'utiliser des énergies renouvelables afin de répondre à nos besoins électriques. L'énergie éolienne est l'une des énergies renouvelables et non polluantes que l'on peut développer. Dans ce dossier nous verrons comment transformer l'énergie du vent en énergie électrique ? Mais avant cela nous expliquerons d'où vient le vent (ayant l'énergie que l'on va transformer) et ce que sont les éoliennes.

Partie 1 : Le vent

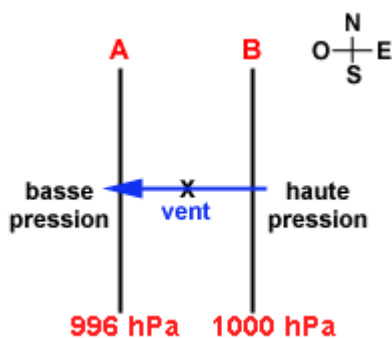
I. Son origine

Le vent est un déplacement horizontal d'air. Ce déplacement d'air est produit par une différence de **pression***. Lorsque deux points de l'espace ont des pressions différentes, l'air circule de l'endroit où la pression est la plus élevée vers celui où la pression est la plus basse.



Dans l'atmosphère, la force de pression atmosphérique pousse l'air de l'endroit où la pression au sol est la plus forte vers l'endroit où elle est la plus faible.

Il se produit donc un déplacement d'air des zones de haute pression (**H**) vers les zones de basse pression (**B**).



Sur la figure ci-contre, on distingue une différence de pression entre les deux **isobares*** A et B. Il existe une force appelée « **force de gradient de pression** » qui se développe entre **A** et **B**, et qui pousse l'air de **B**, où la pression est la plus forte (1000 hPa) vers **A** où la pression est la plus faible (996 hPa). Un observateur situé au milieu (en **X**) sentira alors un vent allant de **B** vers **A**.

Lorsque l'on caractérise la pression atmosphérique sur la surface de la terre, on appelle le système de haute pression : l'**anticyclone***, et le système de basse pression : la **dépression***.

Tous les vents résultent donc de différences de pression. On peut alors se demander par quoi sont causées ces variations de pression. La réponse se trouve dans l'étude de la température sur la surface de la Terre car les variations de pression proviennent en fait du réchauffement inégal de la surface de notre planète par les rayons provenant du soleil.

Cela sera vu dans la partie **IV**.

II. La force de Coriolis

La rotation de la Terre n'est pas sans conséquences sur les vents.



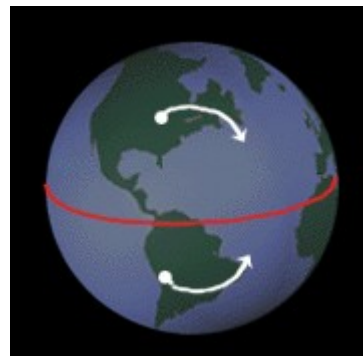
Supposez que vous regardez une sphère qui tourne sur elle-même dans le même sens que la Terre (comme sur l'image ci-contre). Une flèche est dessinée sur la longitude 6 donc quand la sphère tourne la flèche aussi. Pour un observateur qui se trouverait sur la sphère, la flèche ne bougerait pas et pointerait toujours la même direction. Mais pour vous, la flèche a tourné autour d'un axe.

Vous pouvez imaginer que la sphère est la Terre et que la flèche représente votre ville. Celle-ci tourne autour d'un axe imaginaire puisque la Terre tourne.

Cette rotation a par conséquent un effet sur ce qui se déplace sur Terre, dont les vents. En prenant l'exemple des vents, cet effet donne l'impression qu'ils sont déviés de leur trajectoire. C'est ce qu'on appelle la **force de Coriolis***.

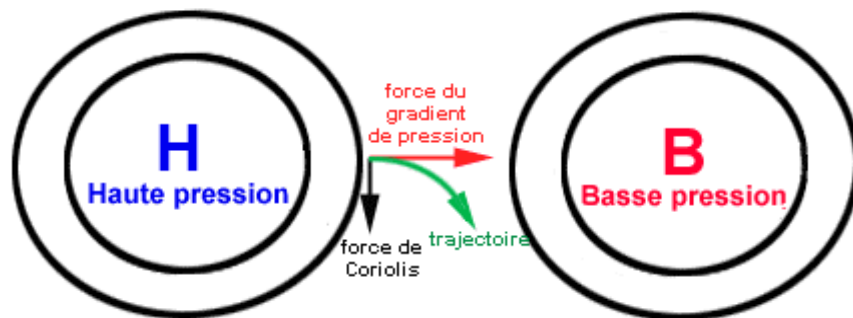
Puisque nous vivons dans un référentiel tournant, tous les corps qui se déplacent au-dessus de la Terre semblent être déviés vers la droite dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud.

Ainsi lorsque l'air est mis en mouvement par la force de gradient de pression, il subit une déviation sur la droite (dans l'hémisphère Nord).



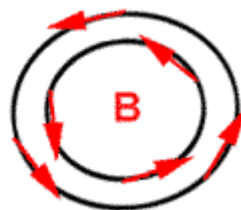
La trajectoire du vent entre deux systèmes de pression n'est donc plus une droite qui va directement de l'anticyclone vers la dépression mais une courbe.

L'influence de la force de Coriolis

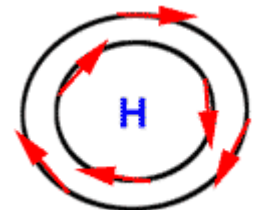


Aussi, lorsque la force du gradient de pression et la force de Coriolis sont équilibrées, le vent devient parallèle aux isobares et leur reste parallèle

Dans une dépression, le vent circule dans le sens antihoraire (dans l'hémisphère Nord).



Dans un anticyclone, le vent circule dans le sens horaire (dans l'hémisphère Nord).

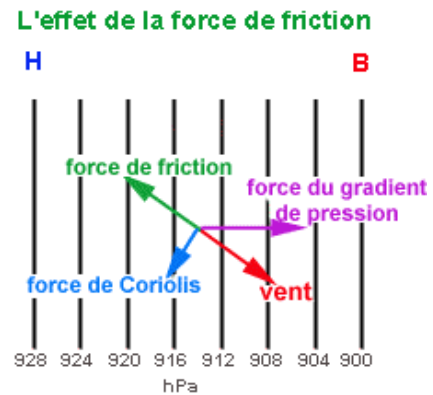


III. La force de friction

La force de Coriolis oblige donc les vents à être parallèles aux isobares. En altitude, le vent est effectivement parallèle aux isobares. Mais au sol une autre force agit sur le vent. C'est la **force de friction*** qui est produite par l'effet de friction entre le vent et le sol.

Il se crée alors au sol un équilibre entre toutes les forces tel que le vent n'est plus parallèle aux isobares mais les coupe vers les basses pressions.

Ainsi le vent coupe les isobares vers l'intérieur dans les dépressions en circulant dans le sens antihoraire au Nord et dans le sens horaire au Sud et coupe les isobares vers l'extérieur dans les anticyclones en circulant dans le sens horaire au Nord et dans le sens antihoraire au Sud.

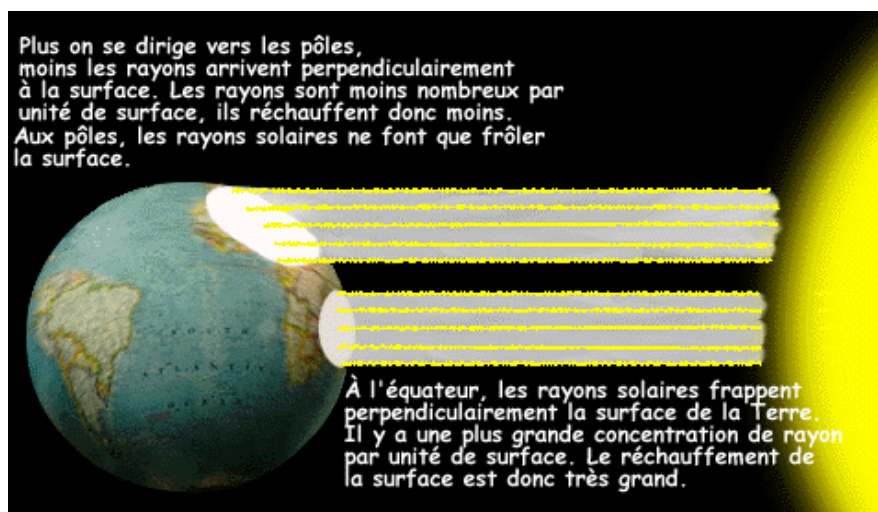


IV. Les vents globaux

1. Le réchauffement inégal de la Terre

Le soleil éclaire en permanence la Terre par ses rayons parallèles. Mais la Terre n'est pas éclairée par ceux-là uniformément. Plusieurs facteurs en sont la cause.

- Le premier est que la Terre est sphérique.



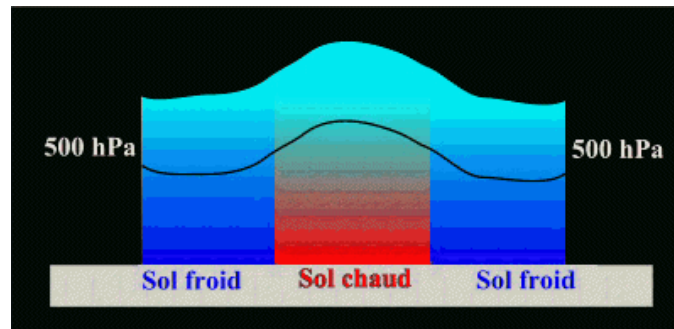
- Le second est que la Terre tourne sur elle-même. Par conséquent lorsqu'une face est exposée aux rayons du soleil, l'autre face refroidit : il se crée donc une différence de température entre ces deux faces.



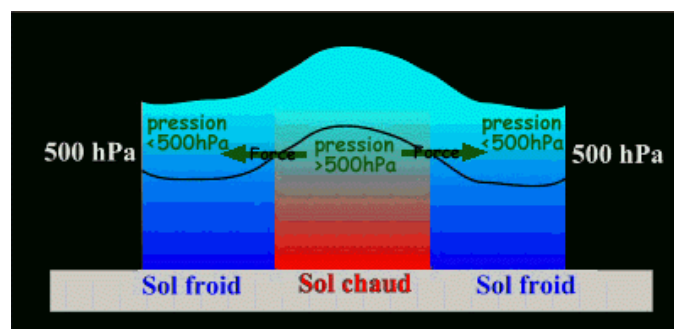
- Le troisième est que la Terre ne présente pas une surface homogène; en effet on y trouve aussi bien des océans que des continents. Or l'eau et la terre ne réfléchissent pas de la même manière la lumière qu'elles reçoivent. Il y a donc un réchauffement inégal de l'air au-dessus des océans et des continents.

2. Le développement des vents globaux

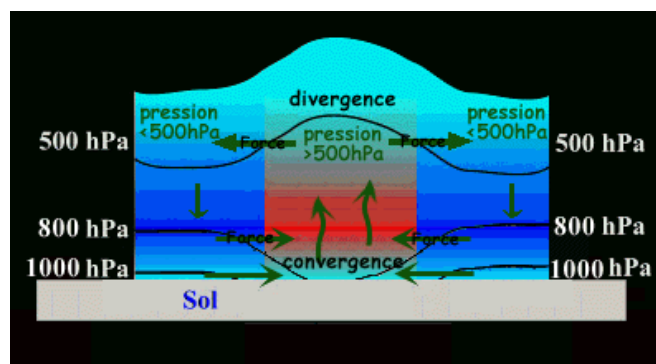
On distingue donc des zones où le sol est plus chaud qu'ailleurs. Ce sol chauffe l'air qui l'entoure directement et par conséquent l'air chaud se dilate. Tandis qu'un air refroidi se contracte. Ainsi le **niveau de pression** s'élève là où l'air est chaud et s'abaisse là où il est froid. Il y a donc un lien direct entre température et pression.



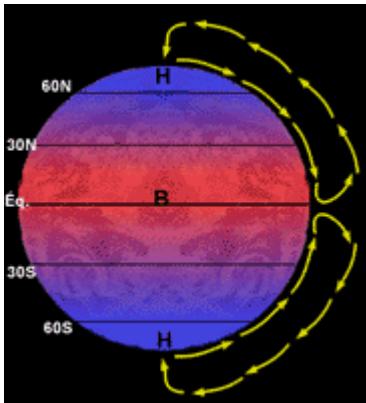
On observe donc une différence de pression en altitude. Il se crée alors une force en altitude qui pousse l'air de l'endroit où la pression est la plus forte vers l'endroit où elle est la plus faible. Ainsi de l'air passe de la colonne située au-dessus du sol chaud, colonne « chaude », vers les colonnes situées au-dessus du sol froid, colonnes « froides ».



Comme de l'air a été ajouté dans les colonnes « froides », la pression au niveau du sol froid augmente. A l'inverse, la pression au sol chaud diminue car de l'air a été retiré de la colonne « chaude ». Ainsi il se crée de nouveau une force mais cette fois-ci, elle pousse l'air des colonnes « froides » vers la colonne « chaude » au-niveau du sol. Ensuite la convergence des vents au sols oblige l'air à monter en altitude.



Ainsi se crée une circulation de l'air comme le montre l'image ci-dessus entre deux systèmes de haute pression où le sol est froid et un système de basse pression où le sol est chaud. En appliquant ce schéma à la Terre, on peut considérer les deux pôles comme deux anticyclones et l'équateur comme une dépression.



On pourrait donc supposer l'existence d'une circulation d'air qui irait des pôles vers l'équateur au sol et de l'équateur vers les pôles en altitude, représentée sur l'image ci-contre.

Cela se produirait si la Terre ne tournait pas. Or la Terre tourne sur elle-même, ce qui complique un peu les choses.

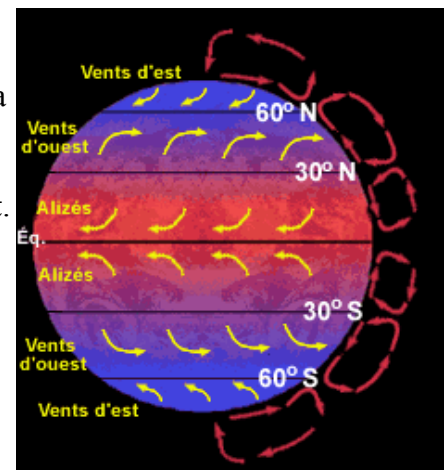
3. Quand la Terre tourne

L'air s'élève donc à l'équateur et se dirige vers le Nord et le Sud dans la haute atmosphère. Mais la force de Coriolis empêche cet air d'aller beaucoup plus loin que 30° de latitude. La grande cellule de circulation ne peut donc pas exister. En réalité, il existe trois cellules dans chaque hémisphère bien que la réalité soit plus complexe et pas toujours bien comprise.

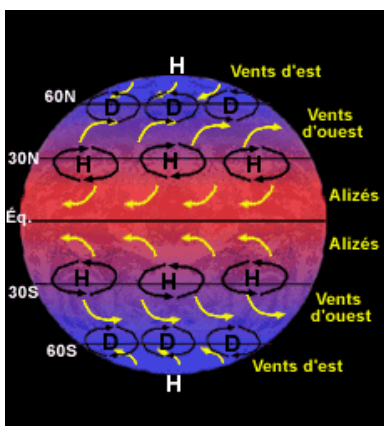
L'air qui quitte les pôles est dévié vers la droite dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud, par la force de Coriolis. Cela produit les **vents d'est**.

De la même façon, l'air se déplaçant des latitudes de 30° vers les latitudes de 60° est dévié pour produire les **vents d'ouest**.

Pour finir, l'air se dirigeant des latitudes 30° vers l'équateur est dévié. Cela produit près du sol les vents nommés **alizés** qui se rencontrent à l'équateur.



4. Les grandes zones de hautes et basses pressions



Au niveau des latitudes de 30° nord et sud, on retrouve une ceinture de hautes pressions symbolisées par la lettre **H** sur la figure à gauche. Ce sont les **hautes pressions subtropicales**. Dans ces régions, le mouvement vertical de l'air est généralement descendant et c'est à ces latitudes que se trouve les grands déserts du monde.

Aux latitudes de 60° nord et sud et à l'équateur, on retrouve des ceintures de basses pressions symbolisées par la lettre **D** sur la figure. La ceinture de basses pressions située de part et d'autre de l'équateur est nommé « **zone de convergence intertropicale** » et une bande de nuage y est présente toute l'année.

V. Les vents locaux

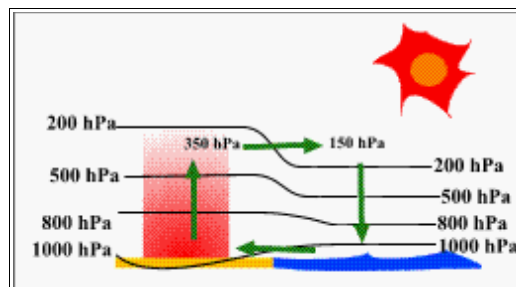
Tous les vents ne sont pas des vents globaux. Il existe aussi des vents pouvant être produit par des caractéristiques géographiques locales. Ce sont des vents qui agissent sur de petites étendues. Ce sont des **vents locaux**.

1. La brise de mer et la brise de terre

Les brises de mer et de terre sont des vents locaux qui se produisent sur les régions côtières. Elles résultent de la différence de température entre la surface de la terre et la surface de la mer. En effet, pendant une journée ensoleillée, le sol se réchauffe beaucoup plus vite que la mer qui par brassage transporte l'eau chaude vers les profondeurs. Celle-ci a par conséquent une plus grande capacité calorifique.

- La **brise de mer** :

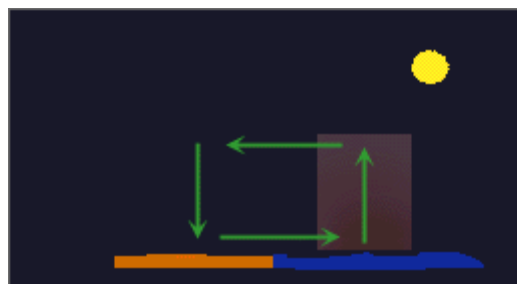
Pendant la journée, la terre se réchauffe plus vite que la mer donc l'air est plus chaud sur la terre que sur la mer. L'air chaud prend de l'expansion à la verticale. Les niveaux de pression vont donc s'élever au dessus de la terre. Il se crée une circulation d'air entre terre et mer. C'est la **brise de mer**, un vent qui se dirige de la mer vers la terre au sol et de la terre vers la mer en altitude.



- La **brise de terre** :

La nuit venue, la terre se refroidit aussi vite qu'elle a chauffé. Par contre, la mer, qui a emmagasiné beaucoup d'énergie perd lentement de la chaleur durant la nuit. L'air est donc légèrement plus chaud au dessus de la mer. Suivant le même mécanisme, il se produit un vent qui se dirige de la terre vers la mer au sol et de la mer vers la terre en altitude, la circulation inverse de la brise de mer.

C'est la **brise de terre**.

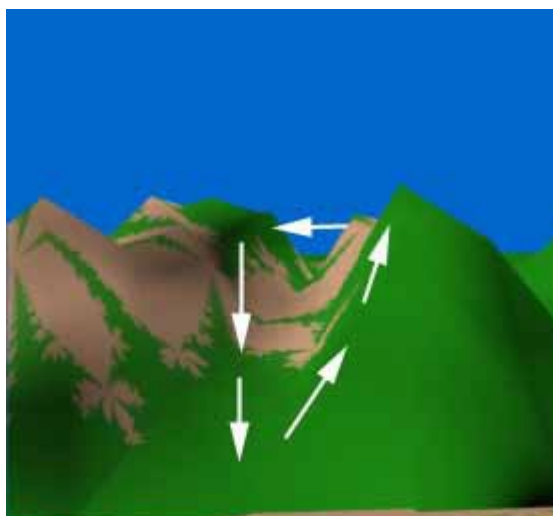


2. La brise de vallée

Les régions montagneuses donnent naissance à de nombreux phénomènes climatologiques. La brise de vallée en est un exemple. Elle se produit sur les versants exposés au soleil (exposés au sud dans l'hémisphère nord et au nord dans l'hémisphère sud).

Chauffé par le soleil, le versant chauffe l'air. Cela va produire un courant d'air ascendant sur le versant. La nuit, le phénomène s'inverse, on observe alors un vent descendant sur le versant. Les vents s'écoulant le long des versants des montagnes peuvent être très violents. Comme exemple, on peut citer le phénomène de Foehn que l'on trouve dans les Alpes.

Il existe d'autres types de vents de montagnes. Par exemple, le Mistral est un vent local qui pénètre dans la vallée du Rhône pour s'étendre ensuite vers la mer Méditerranée.



VI. La mesure de la vitesse et de la direction du vent

Le vent est caractérisé par sa vitesse et sa direction.

La vitesse du vent peut être exprimée par différentes unités :

- Mètre par seconde $m \cdot s^{-1}$
- Kilomètre par heure $km \cdot h^{-1}$
- Noeud Kt

Le noeud est utilisé en météorologie car longtemps utilisé en marine puis en aviation. Il vaut un mille marin (1 852 m) par heure soit $0,514 m \cdot s^{-1}$.

La vitesse du vent est mesurée par un **anémomètre***.

On peut aussi évaluer la vitesse du vent par des échelles.

Une des plus souvent utilisées est l'échelle de **Beaufort***, qui permet d'estimer la vitesse du vent selon ses effets sur l'environnement.

ÉCHELLE DE BEAUFORT

Degré de l'échelle	Appellation	Effets produits par le vent	Vitesse (km/h)	Vitesse (noeuds)
0	Calme	Calme, la fumée s'élève verticalement.	0 à 1	0 à 0,54
1	Brise très légère	La direction du vent est révélée par le sens de la fumée, mais non par la girouette.	1 à 5	0,54 à 2,7
2	Brise légère	On sent le vent sur la figure. La girouette est mise en mouvement. Les feuilles bougent.	5 à 11	2,7 à 5,9
3	Petite brise	Feuilles et petites branches constamment agitées. Le vent déploie les drapeaux légers.	11 à 19	5,9 à 10,2
4	Jolie brise	Soulève la poussière et les papiers, fait mouvoir les petites branches.	19 à 28	10,2 à 15
5	Bonne brise	Les arbustes en feuilles balancent. Des vaguelettes se forment sur les lacs ou étangs.	28 à 38	15 à 20,5
6	Vent frais	Les grandes branches bougent. Les fils électriques bougent. L'usage des parapluies devient difficile.	38 à 50	20,5 à 27
7	Grand vent	Les arbres entiers sont agités. Il est pénible de marcher contre le vent.	50 à 61	27 à 33
8	Coup de vent	Brise les petites branches des arbres.	62 à 74	33 à 40
9	Fort coup de vent	Domages aux constructions légères, cheminées et tuiles emportées.	75 à 88	40 à 47,5
10	Tempête	Arbres déracinés. Graves dégâts aux constructions.	89 à 102	47,5 à 55
11	Violente tempête	Ravages étendus.	103 à 117	55 à 63
12	Ouragan	Destructions considérables.	118 et plus	63 et plus

En ce qui concerne la direction du vent, elle est toujours donnée par la direction d'origine. On parlera par exemple d'un vent du nord lorsque le vent souffle du nord vers le sud. Pour déterminer cette direction, on utilise la girouette.

Nous savons maintenant d'où vient le vent. L'énergie de ce fluide présent sur la Terre est-elle exploitable afin de l'utiliser pour satisfaire nos besoins ? Il se trouve que cette énergie est bien exploitable, notamment par les aérogénérateurs comme l'éolienne. Qu'est qu'une éolienne ?

Partie 2 : L'éolienne

I . Les composants d'une éolienne

Elle se compose d'un grand nombre d'éléments que l'on peut regrouper en trois parties bien distinctes telles que :

1. La nacelle

La nacelle comprend tous les éléments mécaniques qui permettent de transformer l'énergie mécanique produite par les pales en énergie électrique. Fixés à la nacelle nous trouvons le rotor qui est composé de plusieurs pales entraînées par l'énergie du vent, c'est le moyeu. Un anémomètre et une girouette sont également fixés à la nacelle et généralement du côté opposé à celui du moyeu.

L'anémomètre servant à mesurer la **vitesse** et la **pression** du vent et la girouette servant de référence pour l'orientation de l'éolienne en fonction de la direction du vent, ces composants jouent un rôle fondamental pour l'utilisation de l'éolienne. Ils prennent les mesures entre deux passages de pales et établissent une moyenne.

A l'intérieur de la nacelle, du côté du moyeu, se trouve tout d'abord l'**arbre*** lent entraîné par les pales et relié au **multiplicateur***. A l'extrémité de cet arbre lent se trouve le frein qui permet le freinage ou l'arrêt total du rotor en cas de vents trop forts. Le multiplicateur, très complexe, consiste à multiplier la vitesse de rotation très lente de l'arbre lent pour aboutir à une vitesse extrêmement plus rapide (près de 1500 tours/min). Le multiplicateur, lui, est relié au **générateur** par l'arbre rapide qui est comme son nom l'indique la continuité de l'arbre lent mais doté d'une vitesse de rotation nettement supérieure au précédent permettant d'obtenir plus d'énergie mécanique. Le générateur transforme donc l'énergie mécanique en énergie électrique. (Les détails seront vus en Partie 3)

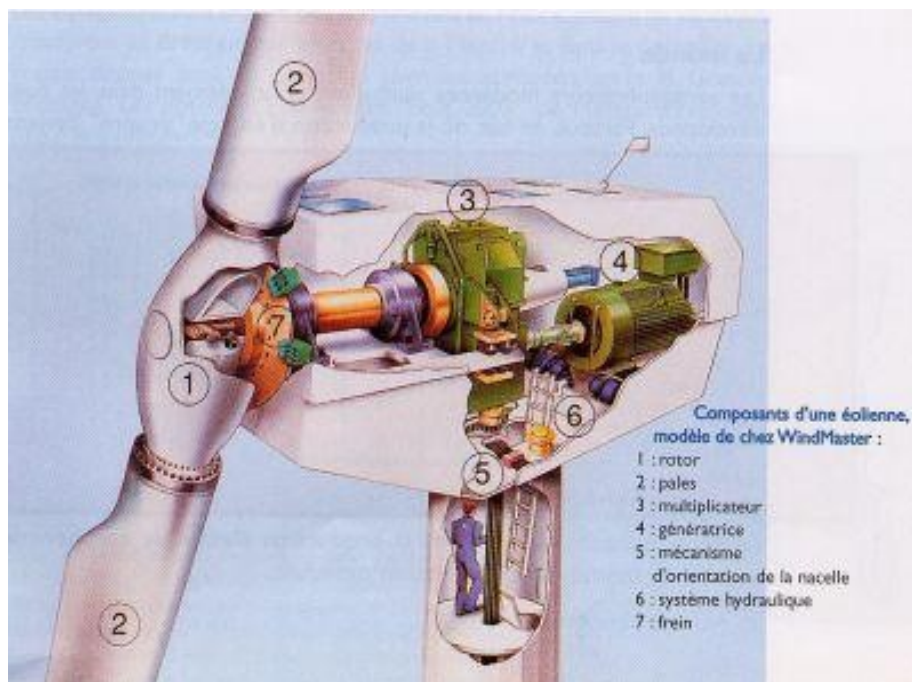


Schéma d'une nacelle

2. Les pales du rotor

Les pales d'une éolienne tournent grâce au vent (trente tours par minute en moyenne et généralement dans le sens des aiguilles d'une montre), elles sont donc constamment en contact avec le vent. Mais il ne s'agit pas simplement de molécules d'air frappant le bord d'attaque des pales qui font tourner ainsi l'éolienne.

Les pales d'une éolienne ont un peu près la même forme que les ailes d'un avion, mais ont tout de même leurs propres particularités, étant donné que le changement fréquent de la vitesse et de la direction du vent dans la couche d'air où doivent opérer les éoliennes, crée des conditions de fonctionnement qui sont assez différentes de celles des avions. Les pales d'une éolienne sont donc vrillées (ou torsadées).

Le vent frappant la pale avec un certain angle d'incidence, ce dernier sera moins grand si la pale est légèrement arrondie. Un angle d'incidence trop vif empêche la pale d'être entraînée par le vent.



Sur ces schémas, nous avons représenté différentes pales d'un même rotor. En effet, les pales ne sont pas inclinées de la même manière. Cette inclinaison est appelée le « pas » de la pale. Elle va permettre de faire varier la surface en contact avec le vent et donc l'angle d'incidence du vent.

Sur le premier schéma, le pas de la pale est de 90° , c'est-à-dire que la pale ne constitue pas un obstacle au vent si celui-ci arrive de face, la pale ne peut donc pas tourner.

Sur le schéma numéro 2, la pale a un grand pas, l'angle d'incidence du vent sera donc très faible (entre 1° et 89° mais plus près de 1°). Ce pas de pale est très efficace si le vent est fort.

Sur le dernier schéma, le pas de la pale est petit, la surface face au vent sera grande, l'angle d'incidence du vent sera compris entre 1° et 89° mais plus près de 89° , la pale pourra donc tourner.

Mais si le pas de la pale est à 0° c'est-à-dire que la pale n'est pas du tout inclinée, l'angle d'incidence du vent sera alors de 90° , la pale fait une obstruction totale au vent et ne peut pas tourner (l'angle est trop vif).

Nous pouvons donc constater l'influence du pas sur l'angle d'incidence du vent. Plus le pas est petit, plus l'angle sera grand et inversement. C'est pourquoi, les constructeurs font des éoliennes avec des pales vrillées, de manière à avoir un pas compris entre 1° et 89° (l'angle idéal dépend de nombreux facteurs comme par exemple le site {voir III}).

3. Le mat

La fonction première du mat est de soutenir la nacelle. Il est constitué de trois parties constituant une tour généralement conique et en acier afin d'optimiser la résistance face à des vents forts ou du givre par exemple. Elle est obligatoirement blanche pour des raisons esthétiques.

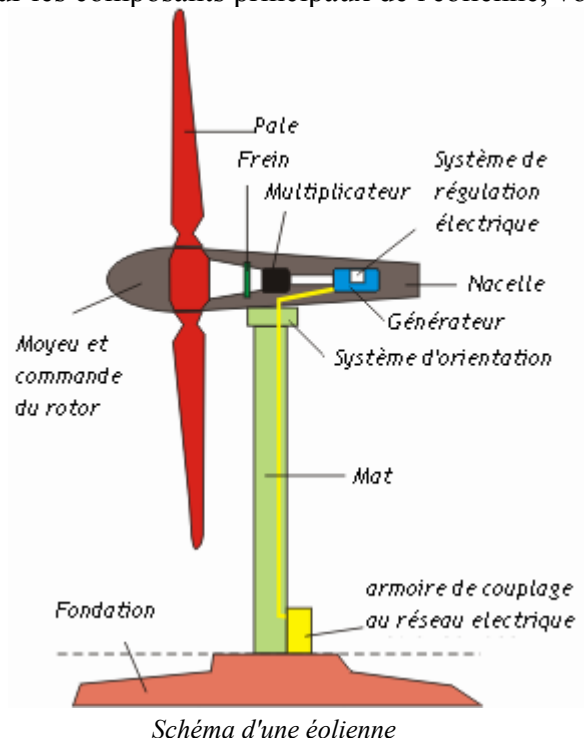
Le mat est relié à la nacelle par le pivot d'orientation qui permet à la machine de présenter l'hélice face au vent quelque soit sa direction (3e partie).

La seconde fonction du mat est de protéger les câbles reliés depuis le générateur jusqu'à l'armoire de couplage située à la base du mat (1ere partie). Cette première partie du mat contient un ordinateur (armoire de couplage) qui permet de contrôler le fonctionnement de l'éolienne. C'est cet ordinateur qui, grâce aux informations prélevées par l'anémomètre et la girouette, dit à l'éolienne de freiner ou d'arrêter ses pales si le vent est trop fort ou encore de bien orienter le rotor face au vent.

Il arrive parfois que la nacelle pivote dans le même sens pendant une longue durée et donc que les câbles à l'intérieur du mat se torsadent, ceci favorisant ainsi leur détérioration. Pour éviter cela, un compteur de torsion est présent dans la première partie du mat. Il n'est donc pas impossible de voir un rotor d'éolienne pivoter plusieurs fois dans le même sens afin de rétablir une torsion minimale des fils.

Une autre partie importante de l'éolienne constitue les fondations. Elles sont en béton armé et composées de blocs d'environ 100 tonnes voire plus, enterrés à 5 à 6 mètres de profondeur. Au dessus de ces fondations, une autre dalle est coulée afin de fixer la première partie du mat.

Pour résumer cette étude sur les composants principaux de l'éolienne, voici un schéma récapitulatif :



Il est évident que les éoliennes ne sont pas toutes identiques car il existe une multitude de types d'éoliennes. Que sont ces types ?

II . Les différents types d'éoliennes

1. Le nombre de pales

Les éoliennes se différencient par leur nombre de pales. C'est pourquoi il existe des éoliennes dites tripales (éolienne à trois pales) , bipales (avec deux pales) et monopoles (une pale).



De nombreuses éoliennes possèdent également quatre pales voire beaucoup plus mais elles sont plutôt destinées à un usage privé. En effet, les éoliennes sont construites pour capter l'énergie cinétique du vent. Il est donc étonnant de ne pas voir les éoliennes modernes avec une multitude de pales comme les anciens moulins à vent. Si les éoliennes ne sont pas conçues ainsi, c'est parce qu'une éolienne avec un grand nombre de pales ou bien de pales très larges, et donc un rotor très solide, sera exposée à des forces très importantes lorsque le vent souffle à grande vitesse. Les pales tourneraient trop vite ce qui pourrait avoir des conséquences dangereuses. Elles sont donc plutôt utilisées à usage personnel pour un ou deux foyers par exemple.

Afin de limiter l'impact des vents extrêmes sur la structure, les fabricants optent en général pour des rotors avec un nombre restreint de pales. C'est pourquoi, l'éolienne tripale est la plus répandue.

Néanmoins, le grand avantage des éoliennes bipales par rapport aux tripales est le fait qu'elles permettent d'économiser le coût d'une pale de rotor. D'autre part, pour les éoliennes avec un nombre pair de pales, celles-ci sont alignées deux à deux.

Les éoliennes bipales ont cependant eu certaines difficultés à pénétrer le marché, entre autres parce qu'il leur faudra une vitesse de rotation bien plus élevée pour produire la même quantité d'énergie qu'une éolienne tripale.

Les éoliennes à conception monopale permettent d'économiser le coût d'une pale de plus. Le grand inconvénient de ce type d'éolienne est que pour équilibrer le rotor, il faudra munir l'éolienne d'un balancier du côté du moyeu opposé à la pale (voir schéma ci-dessous).



Schéma d'un rotor d'éolienne monopale avec son balancier

Les éoliennes bipales et monopales ne sont pas beaucoup utilisées, d'autant plus qu'il faut munir l'éolienne d'un rotor basculant pour éviter que l'éolienne ne reçoive des chocs trop importants chaque fois qu'une pale passe devant la tour (les pales ont tendance à reculer en tournant rapidement car le sens de la portance est dirigé vers le rotor).

2. Les différents axes des éoliennes

Il existe deux grandes familles d'éoliennes ayant chacune leurs spécificités :

- Les éoliennes à axe horizontal :

Une éolienne à axe horizontal est une éolienne dont le rotor du type hélice est monté sur un axe horizontal, c'est-à-dire un arbre principal horizontal.

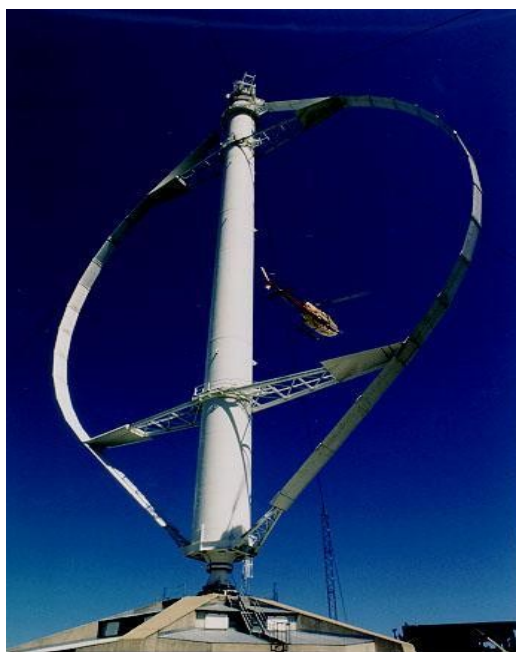
Toutes les éoliennes commerciales raccordées au réseau sont aujourd'hui construites avec un rotor du type hélice, monté sur un axe horizontal (tous les schémas d'éoliennes ci-dessus sont des éoliennes à axe horizontal).

- Les éoliennes à axe vertical :

Une éolienne à axe vertical est une éolienne dont le rotor est monté sur un axe vertical (tout le contraire de l'axe horizontal ...).

Certaines éoliennes à axe vertical pourraient également fonctionner avec un axe horizontal, mais il est peu probable qu'elles soient aussi efficaces qu'une éolienne munie d'un rotor du type hélice.

La seule éolienne à axe vertical qui ait jamais été fabriquée commercialement est l'éolienne de Darrieus, nommée d'après l'ingénieur français Georges Darrieus qui breveta la conception en 1931. L'éolienne de Darrieus est caractérisée par ses pales de rotor en forme de C qui la font ressembler un peu à un fouet à oeufs. Elle est normalement construite avec deux ou trois pales.



Photographie d'une éolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont quelques avantages par rapport à celles à axes horizontaux :

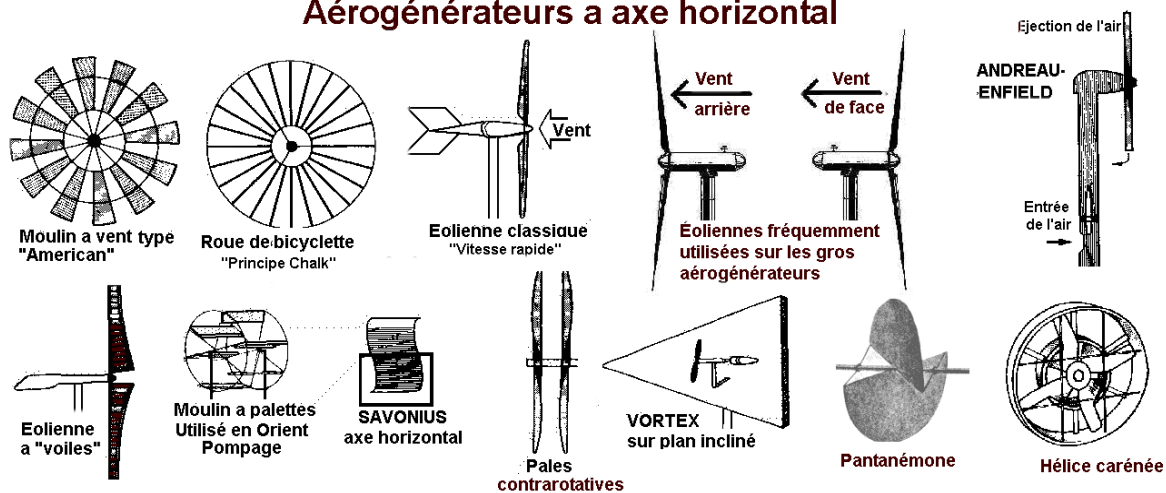
- Elles vous permettent de placer les composants présents dans la nacelle d'une éolienne à axe horizontal (voir I.1) à terre, et vous n'avez pas besoin de munir la machine d'une tour.
- Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

Les inconvénients principaux sont les suivants :

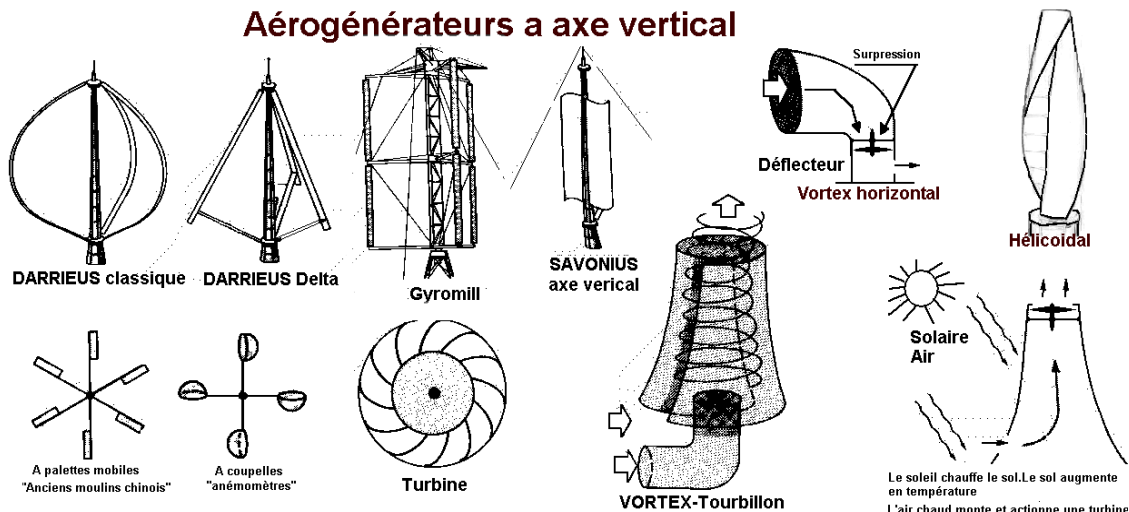
- Les vents sont assez faibles à proximité de la surface du sol et donc sur la partie inférieure de l'éolienne.
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement. (Ainsi, il faut par exemple pousser les éoliennes de Darrieus pour qu'elles démarrent. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne).
- Pour faire tenir l'éolienne, on utilise souvent des haubans ce qui est peu pratique dans des zones agricoles exploitées intensivement.
- Pour remplacer le palier principal du rotor, il faut enlever tout le rotor. Ceci vaut tant pour les éoliennes à axe vertical que pour celles à axe horizontal, mais dans le cas des premières, cela implique un véritable démontage de l'éolienne entière.

Il existe un très grand nombre de types d'éoliennes. Ces éoliennes sont surtout utilisées pour les particuliers, on les appelle aérogénérateurs, voici quelques-une d'entre elles:

Aérogénérateurs a axe horizontal



Aérogénérateurs a axe vertical



3. La taille des éoliennes

La taille d'une éolienne dépend surtout de la taille de son mat. Il existe donc plusieurs types de mats, chacun ayant leurs propres spécificités.

- La tour tubulaire d'acier :

Elles sont en forme de tube conique afin de résister aux vents forts, ce qui explique qu'elles soient très utilisées sur le marché mondial des grandes éoliennes.



- La tour en treillis :

Elle est composée d'une multitude de fibres d'acier. Son atout principal est son prix, celle-ci ne requérant que la moitié du matériau utilisé pour une tour tubulaire. Pour des raisons esthétiques, on n'utilise pratiquement plus les tours en treillis pour les grandes éoliennes.



- Le mat haubané :

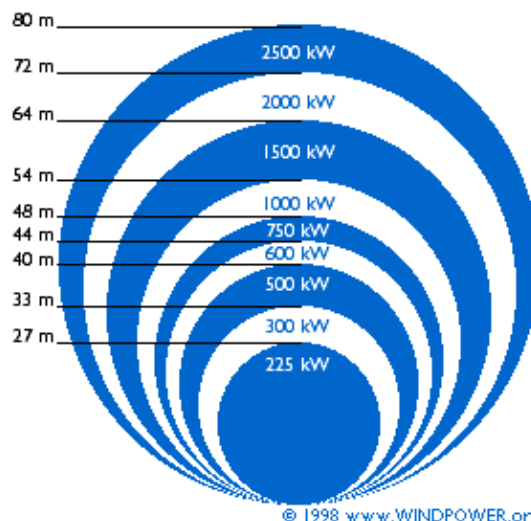
Un grand nombre de petites éoliennes sont construites avec des mâts étroits supportés par des haubans. En utilisant ce type de tour, on gagne surtout l'avantage d'une réduction du poids et donc du coût de la tour mais les haubans sont gênants dans zones agricoles exploitées intensivement par exemple.

Le prix de la tour d'une éolienne représente en général environ 20 % du prix total de l'éolienne. Un rallongement d'un mètre de la tour coûtera environ 1500 euros.



Les constructeurs d'éoliennes vendent souvent des éoliennes dont la hauteur de la tour correspond au diamètre du rotor car la surface balayée (un disque en l'occurrence) par les pales détermine la **puissance*** récupérable (quantité d'énergie que l'éolienne est susceptible de capter) par l'éolienne.

On dit que la puissance (en kilowatt, noté kW) de sortie augmente avec la surface balayée par le rotor (Les pales d'une éolienne balayent en moyenne 48 tonnes d'air à la seconde, l'équivalent de 10 éléphants)-voir l'image ci-dessous :



L'image donne une idée des diamètres généraux du rotor, valables pour les différentes tailles d'éoliennes. Si un constructeur double le diamètre du rotor, il obtiendra une surface qui est quatre fois plus grande (l'unité de surface étant le m^2 : $2^2 = 4$). Cela signifie également une augmentation de quatre fois de la puissance de sortie du rotor

Les diamètres de rotor peuvent varier un peu par rapport aux chiffres indiqués sur l'image, étant donné qu'une grande partie des fabricants cherchent à optimiser leurs éoliennes aux conditions locales (plus de vent signifie plus de puissance à récupérer).

L'éolienne la plus utilisée en ce moment est une éolienne de 1000 kW (ou 1MW) avec un diamètre de rotor de quelque 54 mètres et donc d'une hauteur de moyeu (ou encore d'une taille de mat) d'environ 60 mètres sachant que le prix moyen d'une éolienne est de 1000 euros par kilowatt installé.

La production annuelle d'une éolienne s'exprime en **Mégawattheures*** (noté Mwh); pour une éolienne d'une puissance de 2 MW par exemple, sa production annuelle est de quelque 4400 Mwh, soit la consommation électrique (hors chauffage) d'environ 2000 foyers français.

Une éolienne est conçue pour fonctionner sous tous les climats (dans le désert, en Arctique et même en mer) pendant environ 120 000 heures sur ses 20 années de durée de vie (environ 80%). Elle produit de l'**électricité** lorsque la vitesse du vent se situe entre 3 mètres par seconde (force suffisante pour entraîner la rotation des pales) et 25 mètres par seconde. Lorsque ce dernier seuil de vitesse est atteint, un dispositif présent dans la nacelle se met alors en marche, celui-ci actionne le frein du rotor et donc l'arrêt de la machine tant que le vent ne faiblit pas.

Les constructeurs cherchent à optimiser leurs éoliennes de sorte qu'elles produisent de l'électricité au moindre coût possible en les plaçant dans des sites particuliers.

III. Le choix d'un site

1. Les obstacles du vent

A des altitudes élevées, à environ 1 km au-dessus du sol, l'influence de la surface de la Terre sur l'écoulement du vent est pratiquement nulle. Par contre, dans les couches d'air plus basses, la friction contre la surface du terrain influe beaucoup sur la vitesse du vent. Dans l'industrie éolienne, on distingue entre la rugosité du terrain et l'influence exercée par les obstacles avoisinants et les contours du paysage.

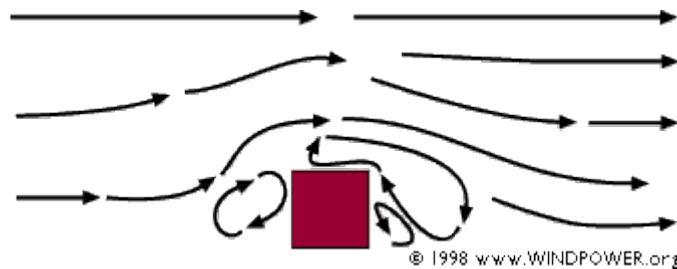
La classe de rugosité est définie à partir de la longueur de rugosité en mètres, à savoir la hauteur au-dessus du sol où la vitesse du vent en théorie est égale à zéro, par exemple les paysages avec des arbres ou des immeubles sont rattachés à la classe de rugosité 3 voire 4.

Les pistes d'atterrissage en béton ou les champs avec de l'herbe appartiennent à la classe de rugosité 0,5.

La surface de la mer est classée 0.

En règle générale, une rugosité forte freine considérablement la vitesse du vent.

Les forêts, ou les petits bâtiments constituent des obstacles très fréquents pour les éoliennes. Une éolienne située derrière ce genre d'obstacle pourrait voir une réduction de la production annuelle d'environ 15 % en moyenne car l'obstacle fait un effet d'abri.



Sur le schéma, l'obstacle crée un effet d'abri et des **turbulences** dans le vent, ce qui fait que le vent change de vitesse et de direction sans cesse et très rapidement. Une éolienne placée juste derrière cet obstacle et donc dans ces turbulences verra sa production annuelle réduite (la direction du vent n'étant jamais dans le même sens, l'éolienne ne fonctionnera que de temps en temps). Trop de turbulence risque d'augmenter l'usure sur l'éolienne. Les divers paysages modifient la trajectoire du vent, il faut donc faire varier la hauteur du moyeu afin que ces paysages n'influencent pas trop sur l'optimisation des éoliennes.

Le cisaillement du vent désigne la variation de la vitesse du vent en fonction de la distance à la surface de la terre.

Il est également pris en considération lors de la construction d'une éolienne. S'il est question d'une éolienne dont la hauteur de moyeu est de 40 m et le diamètre de rotor est de 40 m, la vitesse du vent sera égale à 9,7 m/s au point le plus haut de la surface balayée par le rotor, contre 7,7 m/s au point le plus bas. Cela signifie que les forces travaillant sur les pales sont bien plus fortes lorsque celles-ci se trouvent dans leur position la plus haute que lorsqu'elles se trouvent dans leur position la plus basse.

Une éolienne va toujours créer un effet d'abri dans la direction du vent en poupe (derrière l'éolienne). On dit qu'il y a un effet de sillage derrière l'éolienne, c'est-à-dire une longue traînée de vent qui est bien plus turbulente ralentie que le vent devant le rotor (voir la photographie ci-dessous).



Dans les parcs éoliens, on espace en général les éoliennes d'une distance équivalente à trois fois le diamètre du rotor au minimum, afin d'éviter que la turbulence engendrée derrière chaque éolienne n'affecte trop la production énergétique des éoliennes situées plus en aval.

Une éolienne freine obligatoirement le vent lorsqu'elle capte l'énergie du vent et la convertit en électricité.

Par conséquent, on cherche à espacer les éoliennes autant que possible dans la direction des vents dominants. Mais en même temps, le coût de la terre et du raccordement des éoliennes au réseau électrique parlent en faveur d'une séparation plus petite des éoliennes.

En règle générale, la distance entre les éoliennes installées dans des parcs éoliens est de 3 à 9 diamètres de rotor dans la direction des vents dominants, et de 3 à 5 diamètres dans la direction perpendiculaire à celle des vents dominants.

Les divers paysages modifient la trajectoire du vent, il faut donc placer les éoliennes dans des sites idéals afin d'optimiser leur production énergétique.

2. Les sites idéals

Les divers paysages modifient la trajectoire du vent, ils provoquent des effets comme l'effet de tunnel et de colline.

Effet de tunnel :

Cet effet se produit entre deux grands bâtiments ou encore dans un col étroit. Ex :



Le vent se trouve comprimé sur le côté exposé au vent de la montagne, ce qui fait accélérer considérablement sa vitesse entre les obstacles. On parle alors d'un "effet de tunnel".

Cela implique que, bien que la vitesse normale dans un terrain dégagé soit de, disons 6 mètres par seconde, elle atteindra facilement 9 mètres par seconde dans un couloir naturel.

L'installation d'une éolienne dans un tel tunnel est donc une façon intelligente d'obtenir une vitesse de vent supérieure à celle de la zone ambiante.

Cependant, afin d'obtenir un effet de tunnel utilisable, le tunnel doit être enclavé de pentes douces. Si les collines entourant le tunnel sont très rugueuses et accidentées, il peut y avoir beaucoup de **turbulence*** dans le vent.

Trop de turbulence risque non seulement d'annuler complètement l'avantage obtenu par une vitesse de vent accélérée, mais aussi d'augmenter l'usure sur l'éolienne.

Effet de colline :

En général, on cherche à installer les éoliennes sur une colline ou une chaîne de hauteurs qui sont plus élevées que le paysage environnant.



Si l'on rencontre souvent des vitesses de vent accélérées sur les collines, c'est à cause de la différence de pression existant à l'avant et à l'arrière de celles-ci. Ainsi, le vent se trouve comprimé par la colline à la face exposée au vent, pour s'étendre ensuite, une fois passé le sommet, vers la zone de basse pression du côté sous le vent de la colline.

Juste avant d'arriver au sommet d'une montagne, le vent est accéléré et comprimé, et lorsqu'il arrive à l'autre côté, il devient lent et faible, comme les eaux qui coulent dans l'océan à travers un canal étroit. exemples

L'altitude:

Le vent est engendré par une différence de température. Il est ralenti par les obstacles (comme par exemple des falaises) et est généralement plus fort en altitude.

La force des vents des cols de montagne est causée par la canalisation des vents de haute altitude. Dans certains cols, les vents proviennent de l'écart de température entre les deux versants. Il est aussi préférable de les éloigner des lieux dangereux, tels que les zones à glissement de terrain et éboulements...

En mer :

Pour profiter des vents plus forts et plus réguliers (car la surface de l'eau ne constitue pas un obstacle au vent et parce que la différence de température entre la terre et la mer favorise des vents thermiques), des projets sont développés pour installer des parcs éoliens dans la mer, avec la technologie **offshore** (en rappelant que la classe de rugosité de la mer est de 0).

Toutefois, à des vitesses de vent importantes, une partie de l'énergie contenue dans le vent va à la production de vagues, ce qui augmente la rugosité. Une fois les vagues formées, la rugosité décroît de nouveau. Il est donc question d'une surface de rugosité variable

Économiquement, l'installation d'éoliennes est beaucoup plus chère, les mâts doivent être conçus pour résister à la force des vagues, du courant et à la corrosion. L'implantation se fait sous l'eau, le raccordement électrique nécessite encore plus de sécurité, la moindre sortie de maintenance nécessite aussi de gros moyens.

Par contre, énergétiquement, une éolienne offshore peut fournir jusqu'à 5MW (comparée aux éoliennes onshores limitées à 3MW dans des sites bien ventés).

De plus, la rugosité de la mer étant très faible, le cisaillement du vent est lui aussi très bas, ce qui signifie que l'on n'obtiendra pas, comme c'est le cas sur la terre ferme, une augmentation significative de la vitesse du vent en accroissant la hauteur du moyeu. Par conséquent, en mer, il peut s'avérer plus économique d'utiliser des tours d'une hauteur moins élevée que sur terre, correspondant à environ 0,75 fois le diamètre du rotor (contre 1 fois sur terre ferme).

En général, le vent est moins turbulent sur mer que sur terre. La durée de vie espérée des éoliennes installées en mer est donc supérieure à celle des éoliennes terrestres.

La faible turbulence est avant tout due au fait que les variations de température entre les différentes altitudes de l'atmosphère sont moins importantes au-dessus de la mer qu'au-dessus de la terre.

Les rayons du soleil pénètrent la mer de plusieurs mètres, alors que sur la terre ferme, le rayonnement solaire ne réussit qu'à chauffer la couche supérieure du sol qui devient donc beaucoup plus chaude. Par conséquent, les écarts de température entre la surface et l'air sont moins importants au-dessus de la mer qu'au-dessus de la terre. Et c'est la raison pour laquelle la turbulence y est bien plus faible.



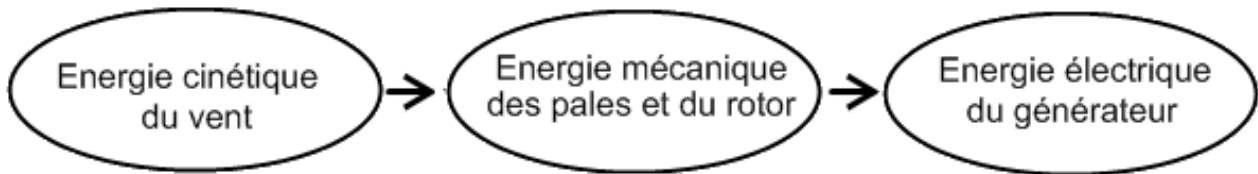
Éolienne offshore

Le choix d'un bon site est très important, il faut qu'il y ait de bonnes conditions météorologiques car le vent est à l'origine de la rotation du rotor et sans lui, l'éolienne ne fonctionnerait pas.

Mais au-delà de l'action du vent sur les pales de l'éolienne, il est fondamental de savoir quels mécanismes permettent la transformation de cette énergie cinétique en une énergie électrique.

Partie 3 : Transformation de l'énergie du vent en énergie électrique

L'énergie éolienne est l'énergie tirée du vent afin de la transformer en une autre énergie. Dans notre cas, l'énergie éolienne va servir à produire de l'électricité. Comment se déroule alors la transformation de l'énergie du vent en énergie électrique ?



I. L'énergie cinétique du vent et la puissance récupérable

Le vent est un déplacement d'air dans l'espace. Ce fluide a donc une **énergie*** liée à son mouvement appelée énergie cinétique.

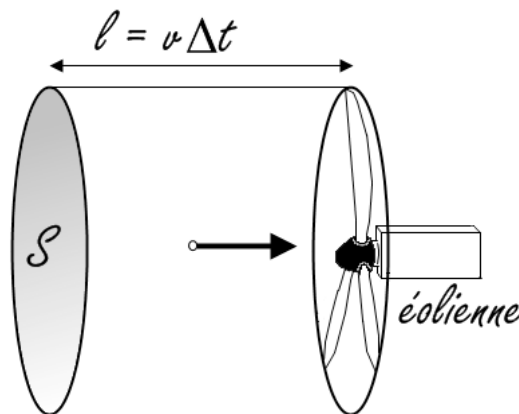
Essayons alors de calculer l'énergie contenue dans le vent. Pour cela, assimilons le volume d'air traversant les pales d'une éolienne au volume d'un cylindre de surface S et de longueur l . Rappelons la formule de l'énergie cinétique d'un corps en mouvement :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

E_c : énergie cinétique en joules (J)

m : masse du corps en kilogrammes (kg)

v : vitesse en mètres par seconde ($m.s^{-1}$)



Volume d'air balayé par l'éolienne

l : longueur en mètres (m)
 v : vitesse des particules d'air ($m.s^{-1}$)
 Δt : durée (s)

Il y a N particules d'air de masse m , dans ce cylindre, arrivant sur les pales de l'éolienne pendant une durée Δt . La masse volumique de ce cylindre est alors égal à :

$$\mu = \frac{N \cdot m}{V}$$

μ : masse volumique ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

N : nombre de particules

m : masse d'une particule (kg)

V : volume du cylindre (m^3)

$$\text{Or } V = S \cdot l = S \cdot v \cdot \Delta t$$

S : surface (m^2)

Donc nous obtenons :

$$V \cdot \mu = N \cdot m \Leftrightarrow S \cdot v \cdot \Delta t \cdot \mu = N \cdot m$$

$$\text{Donc : } N = \frac{S \cdot v \cdot \Delta t \cdot \mu}{m}$$

Puisque ces particules d'air sont en mouvement, on leur associe une énergie cinétique ainsi :

$$E_c = N \cdot \frac{1}{2} m v^2 = \frac{S \cdot v \cdot \Delta t \cdot \mu}{m} \cdot \frac{1}{2} m v^2$$

$$\text{Donc : } E_c = \frac{1}{2} \mu \cdot S \cdot v^3 \cdot \Delta t$$

Maintenant nous pouvons aborder le calcul de la **puissance*** liée à cette énergie. La puissance du vent est la quantité d'énergie fournie aux pales par unité de temps. C'est donc un débit d'énergie que nous recherchons.

Calculons la puissance **théorique** du vent :

$$P = \frac{\text{énergie reçue}}{\text{temps}}$$

Donc :

$$P_{\text{théorique}} = \frac{E_c}{\Delta t} = \frac{1}{2} \mu \cdot S \cdot v^3 \cdot \Delta t \times \frac{1}{\Delta t}$$

$$\text{Donc : } P_{\text{théorique}} = \frac{1}{2} \mu \cdot S \cdot v^3$$

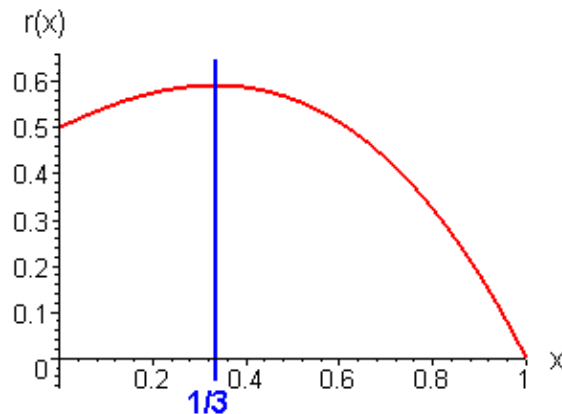
La puissance P est une valeur qui s'exprime en Watt (W). Ceci est donc la formule permettant de calculer la puissance théorique liée aux particules d'air. On peut alors remarquer que plus la surface balayée par les pales et plus la vitesse du vent sont grandes alors plus la puissance théorique est importante.

Cependant cette formule est fautive dans la pratique à cause de la loi de Betz. En effet, Betz, physicien allemand du XXe siècle travaillant entre autres sur les éoliennes, a démontré dans son livre *Wind Energy* qu'on ne pouvait récupérer au maximum que 59% (ou encore $\frac{16}{29}$) de la puissance incidente du vent : rendement maximum. Cette puissance est appelée **puissance récupérable**.

C'est-à-dire :

$$P_{\text{récupérable}} = \frac{16}{29} \cdot P_{\text{théorique}}$$

De plus, Betz affirme que cette limite est atteinte lorsqu'une éolienne freine le vent incident à $\frac{1}{3}$ de sa vitesse. Ainsi Betz a obtenu le graphique illustrant le «pourcentage de puissance récupérée» en fonction du « freinage » du vent incident sur les pales :



Il faut donc remarquer que le vent ne doit pas être freiné au-delà d'un tiers de sa vitesse incidente car sinon la puissance transmise à l'éolienne se verrait diminuer. Les ingénieurs ont alors approfondi la conception aérodynamique des pales afin de respecter la loi de Betz.

En somme, le vent exerce une force liée à son mouvement sur les pales d'une éolienne. On exprime alors l'énergie cinétique du vent. De plus on associe à cette énergie son « débit », qui nous permet de calculer la puissance théorique du vent. Ajoutée à cela, la loi de Betz nous permet de calculer la puissance récupérable par les pales d'une éolienne. Ainsi nous savons maintenant comment quantifier le transfert d'énergie entre les particules d'air et les pales.

Au contact des pales, l'énergie du vent est transformée en une énergie mécanique. Cette énergie mécanique est dite rotative. Comment cette énergie est-elle transmise au générateur de l'éolienne afin de produire de l'électricité ?

II. Le multiplicateur et la transmission de l'énergie mécanique

Au contact des particules d'air, les pales d'une éolienne tournent autour d'un axe (horizontal ou vertical). Il y a alors tout un système mécanique, formé d'**arbres*** et d'**engrenages***, qui va permettre de transmettre l'énergie obtenue du vent au générateur électrique. Le premier élément de la chaîne dynamique est l'arbre lent ou arbre primaire. C'est en fonction de cet arbre qu'une éolienne est qualifiée d'éolienne verticale ou horizontale car celui-ci est directement lié au moyeu.

Lorsque nous construisons une éolienne de grande taille, nous sommes confrontés au problème lié à la vitesse angulaire des pales. En effet, même avec des vents forts les pales d'une éolienne ne font pas plus de 10 tours par minute. Or cela est vraiment très faible si l'on veut produire de l'électricité dans le générateur électrique. Vous savez maintenant pourquoi on appelle l'arbre au contact du moyeu l'arbre lent. Comme son nom l'indique, la vitesse angulaire de l'arbre lent est faible et ne permet pas au générateur électrique de fonctionner correctement.

Alors comment les ingénieurs peuvent-ils utiliser cette vitesse de rotation, faible à première vue, afin de produire de l'électricité ?

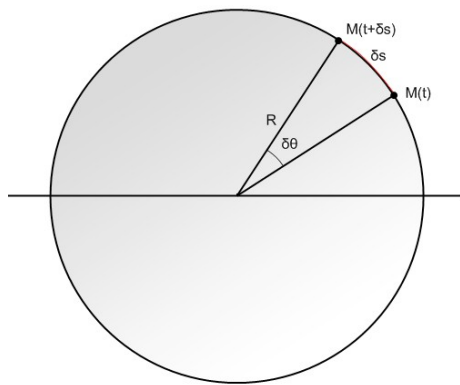
Sachant qu'il faudrait une fréquence de rotation du rotor de 1000 à 3000 tours par minute afin de produire un courant alternatif de 50 Hz.

Rappelons que la fréquence en Hz est la mesure du nombre de fois qu'un phénomène périodique se reproduit en une seconde. Dans un courant alternatif, la fréquence est la mesure du nombre de changements de polarité du courant en une seconde. 50 Hz signifie 100 changements par seconde.

Remarque : dans les éoliennes domestiques ou de petite taille, il est possible d'utiliser directement la rotation de l'arbre lent pour le générateur car les pales d'une éolienne de petite taille tournent suffisamment vite.

La démarche suivie par les ingénieurs est simple. Ils ont eu l'idée d'utiliser un **multiplicateur** dans le but d'augmenter considérablement la vitesse de rotation de l'arbre lent. Un multiplicateur est un système mécanique composé d'engrenages de roues dentées servant à la transmission d'un mouvement de rotation; dans notre cas le mouvement de rotation provoqué par l'action du vent sur les pales. Ainsi la vitesse angulaire d'entrée (c'est-à-dire la vitesse de l'arbre lent) est multipliée par un facteur k afin d'atteindre une vitesse angulaire de sortie beaucoup plus grande. Afin d'explicitier ce qui se déroule dans le multiplicateur, comprenons comment la vitesse est augmentée en étudiant le cas de deux roues dentées.

Qu'est qu'une vitesse angulaire ?



Soit $\delta\theta$ l'angle décrit pendant la durée δt

$\omega = \frac{\delta\theta}{\delta t}$ est la vitesse angulaire instantanée.

$\delta\theta$ en radians

δt en secondes

ω en rad.s^{-1}

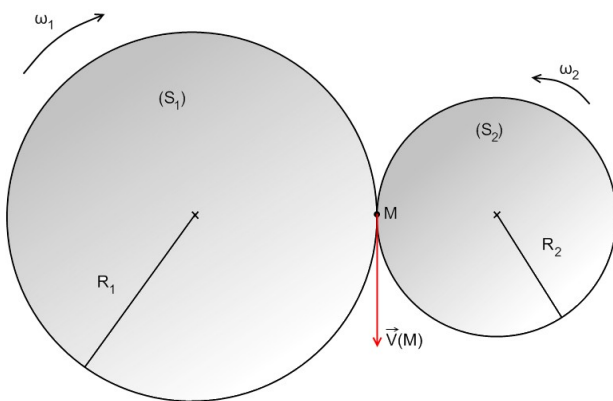
δs est la portion d'arc décrite pendant δt

$\delta s = R \cdot \delta\theta$

$$\text{Donc : } v = \frac{\delta s}{\delta t} = R \cdot \frac{\delta\theta}{\delta t} = R \cdot \omega$$

$$\text{Donc : } \omega = \frac{v}{R}$$

Étudions maintenant le rapport entre les vitesses angulaires d'un système de deux roues dentées.



$$M \in (S_1) \text{ donc } v = \omega_1 \cdot R_1$$

$$M \in (S_2) \text{ donc } v = \omega_2 \cdot R_2$$

$$\text{Donc : } \omega_1 \cdot R_1 = \omega_2 \cdot R_2$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Soit n le nombre de dents :

n est proportionnel à la circonférence $S = 2\pi R$

donc n proportionnel à R , d'où :

$$\frac{R_2}{n_2} = \frac{R_1}{n_1} \Leftrightarrow \frac{R_2}{R_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\text{Donc : } \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Engrenage de deux roues dentées

Nous obtenons alors cette relation entre la vitesse angulaire d'entrée et celle de sortie :

$$\omega_{\text{sortie}} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \omega_{\text{entrée}}$$

Si $n_1 > n_2$ alors $\omega_{\text{sortie}} > \omega_{\text{entrée}}$

Si $n_1 < n_2$ alors $\omega_{\text{sortie}} < \omega_{\text{entrée}}$

Il faut alors imaginer dans un multiplicateur d'éolienne un système beaucoup plus complexe de roues dentées et d'arbres formant une vraie chaîne dynamique. Ainsi on obtient une grande vitesse de rotation à la sortie. L'arbre sortant est appelé arbre rapide ou arbre secondaire et constitue le dernier élément avant le générateur électrique. (Il faut bien sûr garder en tête que la nacelle d'une éolienne ne contient pas seulement les éléments cités ci-dessus.)

Étudions maintenant le rendement de la puissance transmise.

Malgré une vitesse de rotation faible, l'arbre lent a une grande énergie liée à sa rotation : c'est-à-dire un **couple*** puissant. Cette énergie meut le système d'engrenages dans le multiplicateur. A l'inverse, l'arbre rapide a un moindre couple que l'arbre lent. Cependant dans un bon multiplicateur, le rendement de la transmission de la puissance est supérieur à 95%. En d'autres termes, la puissance transmise de l'arbre lent à l'arbre rapide est presque la même. Ceci est dû au fait que malgré un couple moindre, l'arbre rapide a une meilleure vitesse angulaire que l'arbre lent. En voici une démonstration simple :

Soit P_{lent} la puissance de la rotation de l'arbre lent. On a alors :

$$P_{\text{lent}} = \vec{C}_{\text{lent}} \cdot \vec{\omega}_{\text{lent}}$$

$\vec{C}_{\text{lent}}$: couple en N.m

$\vec{\omega}_{\text{lent}}$: vitesse instantanée de rotation en rad.s^{-1}

P_{lent} en Watt

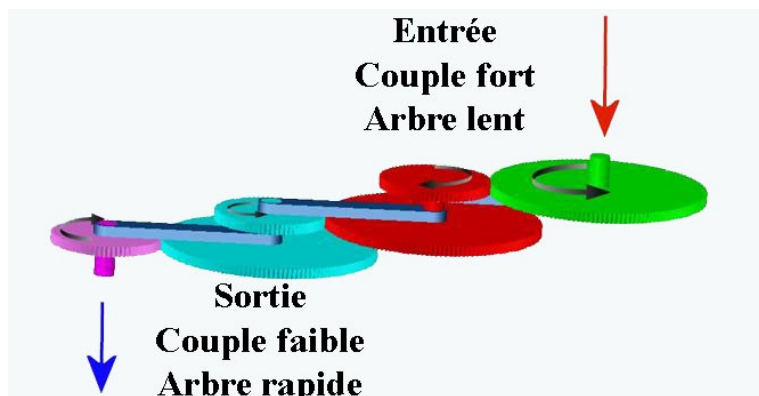
Soit P_{rapide} la puissance de la rotation de l'arbre rapide.

On sait que $\omega_{\text{rapide}} > \omega_{\text{lent}}$ donc pour que $P_{\text{lent}} = P_{\text{rapide}}$:

C_{rapide} doit être proportionnellement plus faible que C_{lent}

Le rendement se calcule alors ainsi : $\eta = \frac{P_{\text{rapide}}}{P_{\text{lent}}}$

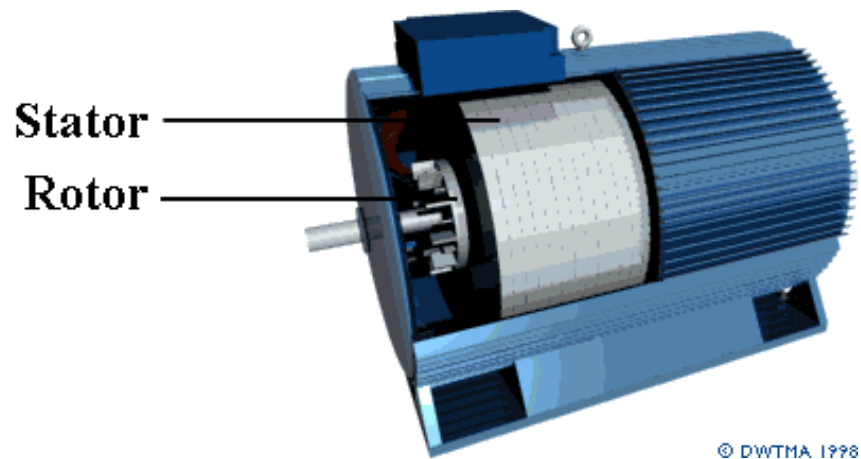
Remarque : pour un bon multiplicateur $\eta > 0,95$



Une fois que cette énergie mécanique parvient au générateur, que se déroule-t-il dans le générateur ? Comment pouvons nous utiliser une énergie mécanique pour produire de l'électricité ? Quel phénomène physique exploitons-nous pour produire de l'électricité ?

III. La transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique

Un **générateur électrique** est un appareil qui produit de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie. Dans le cas d'une éolienne, le générateur utilise l'énergie mécanique qui lui est transmise par l'arbre rapide. Cette énergie mécanique venant elle-même de l'énergie cinétique du vent.



Générateur électrique (vue éclatée)

Le générateur est constitué d'un rotor et d'un stator. Le premier est directement connecté à l'arbre rapide et il décrit un mouvement de rotation lorsque les pales de l'éolienne tournent. En général le rotor d'un générateur électrique est soit un aimant permanent très puissant soit un électroaimant alimenté en courant continu. Le but étant de générer un champ magnétique important au sein du générateur; la raison pour cela sera expliquée par la suite. En ce qui concerne le stator, il est constitué d'une paroi métallique sur laquelle sont disposés des électroaimants. Ces électroaimants ne vont pas être alimentés en courant car sinon la machine serait un moteur et non un générateur. Un électroaimant est constitué d'un bobinage et souvent d'une pièce en matériau **ferromagnétique***. C'est dans ces organes électrotechniques que le courant est produit.

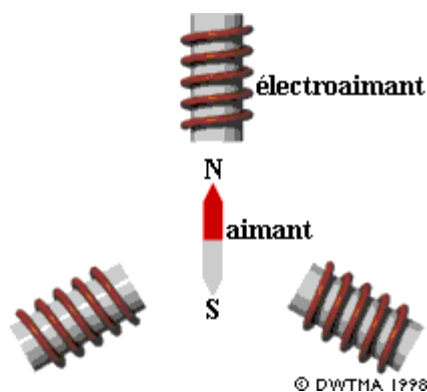


Schéma de l'intérieur d'un générateur électrique

Nous venons de visualiser le dispositif au coeur d'un générateur électrique; expliquons maintenant quel phénomène physique permet de créer du courant dans les bobines. Aujourd'hui, ce phénomène est utilisé dans beaucoup de nos machines et constitue un pilier de notre technologie.

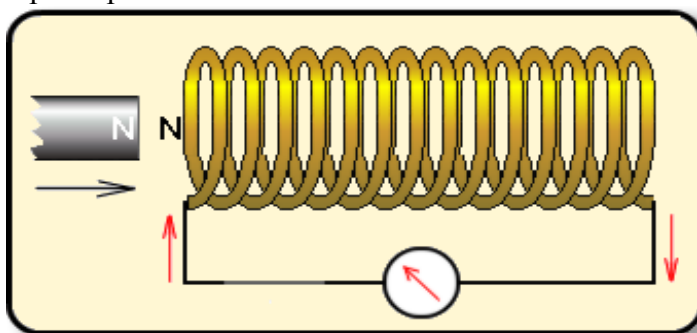
En 1832, Faraday effectue beaucoup d'expériences sur l'électricité et ses liens avec le magnétisme. Il découvre alors un phénomène tout à fait révolutionnaire pour l'époque qu'on appelle **l'induction électromagnétique**.

Quel est le principe de l'induction électromagnétique ?

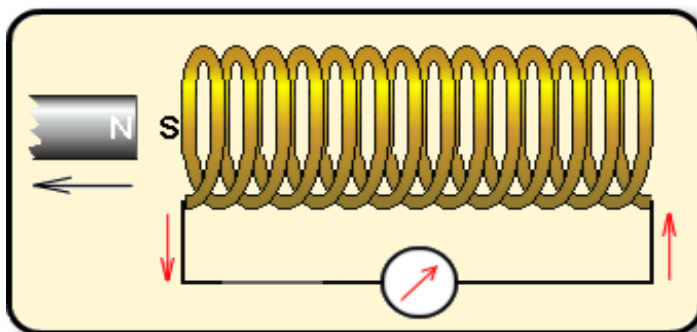
Par définition, l'induction électromagnétique est un phénomène physique qui se manifeste par la **production d'une différence de potentiel électrique*** (DDP) aux bornes d'un conducteur électrique. Lorsque celui-ci se déplace dans un **champ magnétique*** ou lorsqu'un champ magnétique se déplace autour de celui-ci. (Il est essentiel que le champ magnétique ou le conducteur électrique soit en mouvement pour que le phénomène se produise.)

En d'autres termes, l'induction électromagnétique crée une tension (exprimée en volts) aux bornes d'un conducteur et donc permet le passage d'un courant électrique. Sachant qu'un courant électrique (exprimé en ampères) est en fait le mouvement des électrons libres dans le conducteur, on dit alors que l'induction électromagnétique entraîne une « **force électromotrice** » (f.e.m). Le plus souvent le siège de cette force électromotrice est un solénoïde; c'est-à-dire une bobine de fil métallique enroulé sur un cylindre. Dans un générateur électrique les solénoïdes sont en fait les électroaimants.

Faraday et Lenz sont parmi les premiers au monde à avoir étudié et observé le phénomène d'induction électromagnétique. De ce fait, les formules et les lois décrivant ce phénomène portent leurs noms. La **loi de Faraday** décrit la façon dont on peut générer une tension tandis que la **loi de Lenz** permet de connaître dans quel sens se déplacent les électrons dans le conducteur. Illustrons la loi de Lenz par une simple expérience :



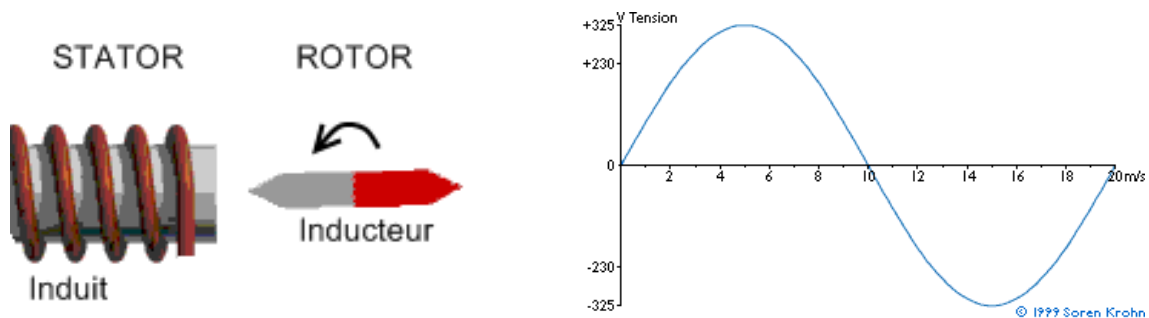
On approche le pôle nord d'un aimant permanent d'un solénoïde dont les bornes sont reliées à un **galvanomètre***. Le sens de la flèche du galvanomètre nous renseigne sur le sens du courant. La loi de Lenz dit alors que le courant induit produit un champ magnétique qui s'oppose à celui de l'aimant. C'est pourquoi il se crée un pôle nord dans le solénoïde du côté de l'aimant. Maintenant regardons ce qui se passe lorsqu'on éloigne l'aimant.



La loi de Lenz est encore observable; le sens du courant change lorsqu'on éloigne l'aimant et un pôle sud est produit.

L'expérience montre donc pourquoi un générateur électrique produit un courant alternatif.

Prenons maintenant le cas concret d'un générateur **monophasé**.* Le stator d'un générateur monophasé est constitué d'un seul électroaimant, qui est le conducteur. Il existe bien sûr des générateurs ayant plusieurs électroaimants sur leur stator mais afin de simplifier la suite nous traiterons que d'un seul électroaimant. On dit que ce générateur est monophasé car celui-ci produit un seul courant alternatif, puisqu'il n'y a qu'un seul conducteur électrique.



Le rotor est appelé **inducteur** tandis que le stator est appelé **induit**. Dans notre exemple, l'aimant permanent est bipolaire mais il existe aussi des générateurs ayant plusieurs aimants sur le rotor, disposés de tel sorte qu'il y ait plusieurs pôles sud et plusieurs pôles nord. C'est le cas dans les générateurs tétra polaires.

Le phénomène d'induction se déroule alors ainsi : grâce à la rotation de l'arbre rapide, l'aimant central décrit un mouvement de rotation. Cela va engendrer un champ magnétique tournant qui va **induire un courant électrique** alternatif dans les bobines de l'électroaimant. A cause de ce champ magnétique variable, l'électroaimant va donc être le siège d'une force électromotrice. Les électrons du conducteur se déplacent et créent alors un courant électrique.

L'électricité produite par le générateur est ensuite couplée au réseau. Cela peut se faire de deux façons : raccordement direct ou raccordement indirect. Si la fréquence du courant est stable et correspond à la fréquence du réseau, celui-ci est directement raccordé au réseau. A l'inverse si le courant est trop variable, il subit un certain nombre de transformations (ajustement de la fréquence, augmentation de la tension,...) avant d'être raccordé au réseau.

Conclusion :

Le vent est constamment présent sur notre planète. C'est la raison pour laquelle nous pouvons profiter à tout moment de l'énergie qu'il crée afin de la transformer en une autre énergie plus utile. C'est ici que l'éolienne intervient, munie de plusieurs pales soumises à l'action du vent, elles vont produire une énergie mécanique grâce à la rotation de ses pales. Tout l'intérêt des éoliennes se situe particulièrement dans sa nacelle qui va pouvoir transformer cette énergie mécanique, auparavant cinétique, en une énergie électrique. Cette transformation se fait par l'intervention d'une multitude de composants étudiés dans notre TPE, si bien que l'énergie « née » de cette alliance ingénieuse entre un élément naturel et la technologie est parfaitement écologique. Cette nouvelle énergie, appelée énergie éolienne, intègre le vaste programme des énergies dites renouvelables. L'énergie éolienne devient de plus en plus utilisée mais qu'en est-il des autres telles que l'énergie photo voltaïque ?

Lexique

Anémomètre : instrument servant à mesurer la force du vent.

Anticyclone : est une zone de circulation atmosphérique autour d'un centre de haute pression.

Arbre : axe d'une machine transmettant le mouvement.

Beaufort (Échelle de) : une échelle comportant des critères assez précis pour quantifier le vent en mer et permettre la diffusion d'informations fiables universellement comprises.

Champ magnétique : se traduit par l'existence d'une force agissant sur les charges électriques en mouvement et divers effets affectant certains matériaux.

Coriolis (Force de) : est une force inertielle agissant perpendiculairement à la direction du mouvement d'un corps en déplacement dans un milieu lui-même en rotation uniforme, tel que vu par un observateur dans le même référentiel.

Couple : correspond, en mécanique, à l'effort en rotation appliqué à un axe. On utilise le newton.mètre afin de mesurer le couple. Cela correspond donc à une mesure en joules (J).

Dépression : est une zone où la pression atmosphérique diminue horizontalement vers un centre de basse pression.

Énergie : est une capacité à transformer un état. Dans le sens commun l'énergie désigne tout ce qui permet d'effectuer un travail, fabriquer de la chaleur, de la lumière de produire un mouvement.

Electroaimant : est un organe électrotechnique produisant un champ magnétique lorsqu'il est alimenté en électricité. Il est constitué d'un bobinage et souvent d'une pièce ferromagnétique, comme le fer par exemple.

Galvanomètre : instrument pour mesurer l'intensité des courants électriques faibles.

Induction électromagnétique : se manifeste par un potentiel électrique qui apparaît aux bornes d'un conducteur qui se déplace dans un champ magnétique ou qui se trouve dans un champ magnétique en mouvement. Le mécanisme fondamental qui entre en jeu est la "*force électromotrice*" ressentie par les électrons libres dans le métal du conducteur. Unité de l'induction électromagnétique : Tesla (T)

Isobare : est une ligne, sur un graphe ou sur une carte, reliant les points d'égale pression.

Joule : est l'unité d'énergie du SI. On définit cette unité comme étant le travail produit par une force d'un newton dont le point d'application se déplace d'un mètre dans la direction de la force

$$1 J = 1 N.m = 1 kg.m^2.s^{-2}$$

Multiplicateur : est un système mécanique qui multiplie une vitesse d'entrée afin d'atteindre une vitesse de sortie bien supérieure.

Onduleur : machine électrique destinée à transformer un courant continu en courant alternatif.

Phase : désigne à la fois un décalage temporel entre des tensions ou signaux et, notamment en électrotechnique un des conducteurs de l'alimentation alternative.

Potentiel électrique : est l'une des grandeurs définissant l'état électrique d'un point de l'espace. Son unité est le volt (V).

Pression : est une grandeur intensive rapport d'une force sur une surface. Elle s'exprime en Pascal dans le système SI.

Puissance : est la quantité d'énergie par unité de temps fournie par un système à un autre. La puissance correspond donc à un débit d'énergie. La puissance s'exprime en Watt (W).

$$1\text{ W} = 1\text{ J.s}^{-1}$$

Turbulence : mouvement tourbillonnant, agitation désordonnée d'un fluide.

Vitesse angulaire : est l'angle α de rotation effectué par un objet autour d'un axe fixe pendant un temps t .

$$\omega = \frac{\alpha}{\Delta t}$$

ω : vitesse angulaire en rad.s^{-1} (1 tour = 2π radians)

α : angle de rotation en rad

Δt : durée de la rotation en secondes

Watt-heure : n'est pas une mesure de puissance comme on pourrait le croire, mais une mesure d'énergie.

$$1\text{ wattheure (Wh)} = 3\,600\text{ joules}$$

Bibliographie

° LIVRES °

- CUNTY, Guy. Éoliennes et aérogénérateurs (guide de l'énergie éolienne). Aix-en-Provence : Edisud, 2001
- Auteurs nombreux, Physique 1ère S, Nathan, 2007, Collection SIRIUS

° SITES INTERNET °

- Encyclopédie Wikipedia en ligne, URL : http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine
<http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89olienne>
- Blog sur l'écologie et les énergies renouvelables, <http://www.domsweb.org/index.php>
- Site sur les Eoliennes fait par des élèves, <http://www.tpe-eolienne.11vm-serv.net/index.html>
- Site sur la météorologie, <http://galileo.cyberscol.qc.ca/InterMet/main/education.htm>
- Site sur les éoliennes et les parcs éoliens, <http://www.thewindpower.net/>
- Vidéo sur les éoliennes, <http://www.windpower.org/movies/uabl/uablen.htm>
- Site d'une entreprise d'éoliennes, <http://www.windpower.org>
- Site sur les éoliennes, <http://www.planete-eolienne.fr/>
- Site sur la physique, <http://www.physchem.co.za/Current10/Magnetic3.htm>
- Site d'un TPE sur les éoliennes, <http://fopabile.free.fr/>