

# Chapitre 4. Conversion d'énergie éolienne

© NASA

## 1. Introduction

### 1. Introduction

- 1.1. Rapide panorama historique
- 1.2. L'éolien dans le monde
- 1.3. L'éolien en France
- 1.4. Énergie éolienne : avantages et inconvénients

### 1.1. Rapide panorama historique

- ✓ L'énergie du vent était déjà utilisée il y a 5000 ans en Égypte pour naviguer.
- ✓ D'abord en Orient puis en Egypte, les moulins à vent produisaient une énergie mécanique pour moudre les grains et pomper l'eau pour irriguer les cultures.
- ✓ La première éolienne a été construite par l'américain Charles F. Brush à Cleveland en 1888 : elle produisait du courant pour 12 batteries, 350 lampes à filament, deux lampes à arc à charbon et trois moteurs. Haute de 17 m et composée de 144 pales en cèdre, elle avait une puissance de 12 kW.
- ✓ La première éolienne dite « industrielle » permettant de produire de l'électricité est mise au point par le Danois Poul La Cour.
- ✓ Les plus grandes éoliennes délivrent de nos jours jusqu'à 10 MW de puissance.

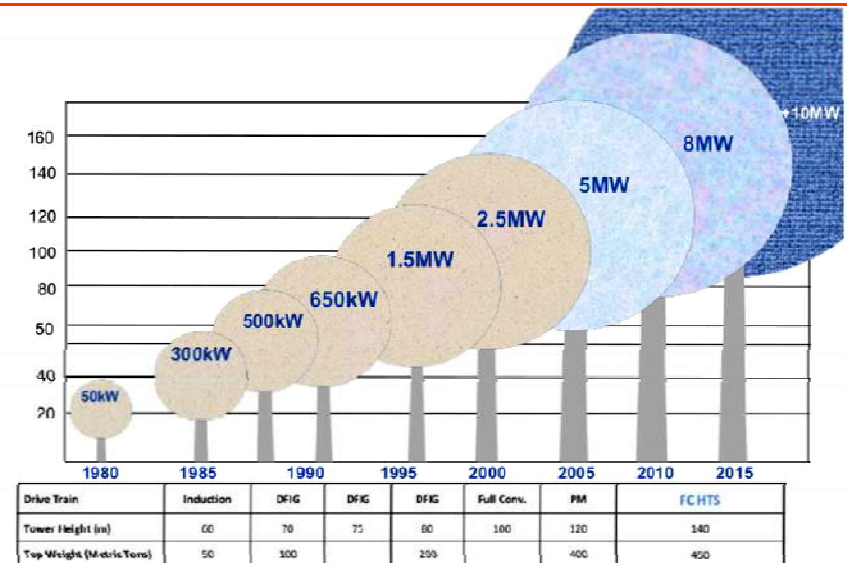


Eolienne de C. F. Brush (1888)



Eolienne de P. La Cour (1890)

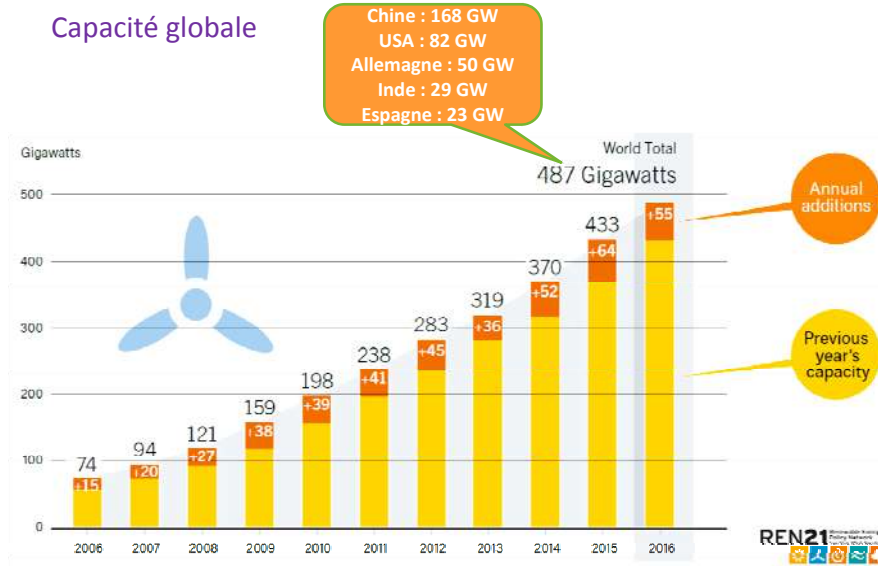
### 1.1. Rapide panorama historique



Source : D. Mc Gahn, MIT Windweek (2009)

## 1.2. L'éolien dans le monde (2016)

### Capacité globale

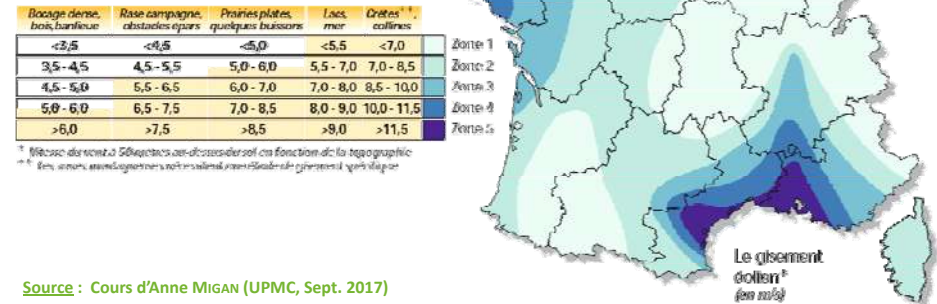


Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

## 1.3. L'éolien en France

### Le gisement éolien

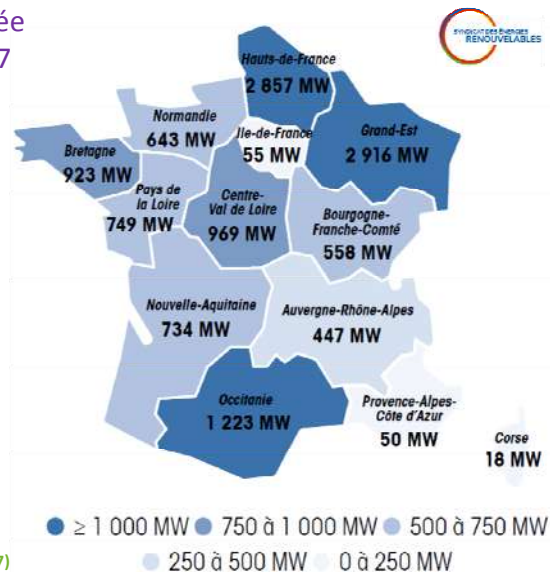
Valeurs en m/s des vitesses du vent



Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

## 1.3. L'éolien en France

### Puissance éolienne raccordée par région au 31 mars 2017



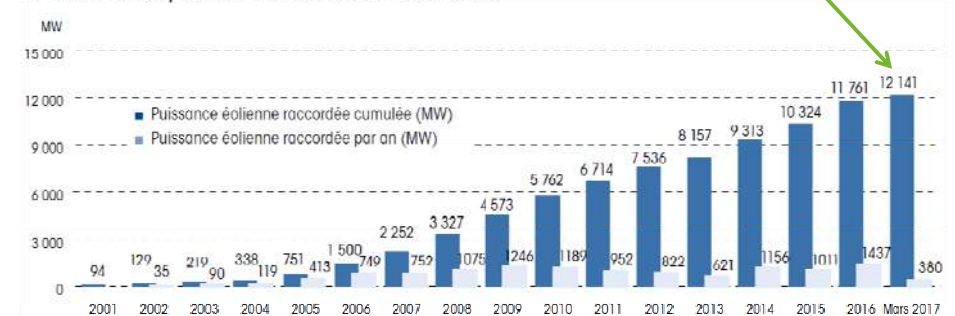
Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

## 1.3. L'éolien en France

### Parc éolien installé

Capacité : plus de 12 GW

### Evolution de la puissance éolienne raccordée (MW)



Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

### 1.3. L'éolien en France

#### Exemple 1 : Parc éolien de Fécamp (Seine-Maritime)



Mise en service en **2006**

Puissance : 4,5 MW  
5 aérogénérateurs.  
Hauteur : 49 m  
Poids : 250 t  
Longueur des segments : 26 m  
Bruit quasi inexistant

Production annuelle de 11 GWh (consommation électrique de la moitié de la population de Fécamp)

Source : Cours d'Anne MIGAN (UPMC, Sept. 2017)

### 1.3. L'éolien en France

#### Exemple 2 : Parc Éolien d'Éole-Res (Haute-Marne)



Mise en service en **2002**

Parc éolien français le plus important

Production annuelle de 1 TWh.

Source : Cours d'Anne MIGAN (UPMC, Sept. 2017)

### 1.4. Énergie éolienne : avantages & inconvénients

#### Avantages

La plus rentable des énergies alternatives

Pas d'effet de serre

Pas contaminatrice

Renouvelable

#### Inconvénients

Instabilité de la distribution électrique

Pollution visuelle –  
Pollution sonore

Conflits d'utilisation de  
l'espace terrestre / marin

Faibles perspectives de  
progrès technologiques

Source : Cours d'Anne MIGAN (UPMC, Sept. 2017)

## 2. Le vent

### 2. Le vent

2.1. D'où vient-il ?

2.2. Influence du terrain sur la vitesse du vent

2.3. Variabilité du vent

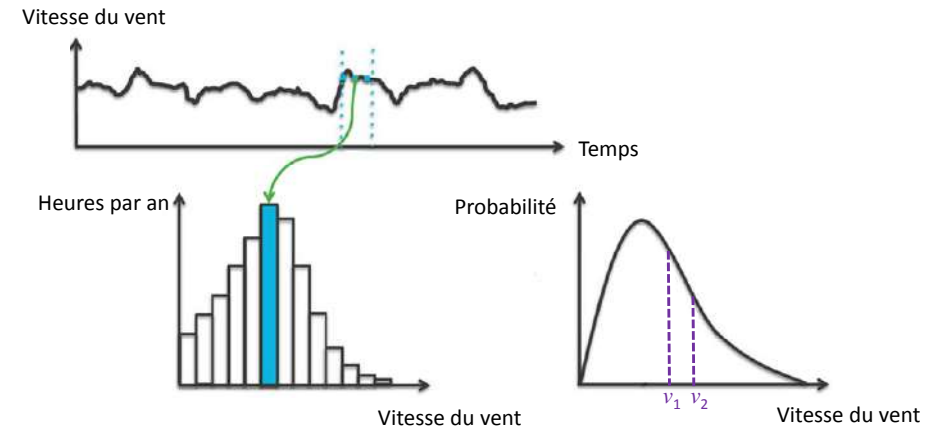
2.4. Caractéristiques du vent

## 2.2. Influence du terrain sur la vitesse du vent

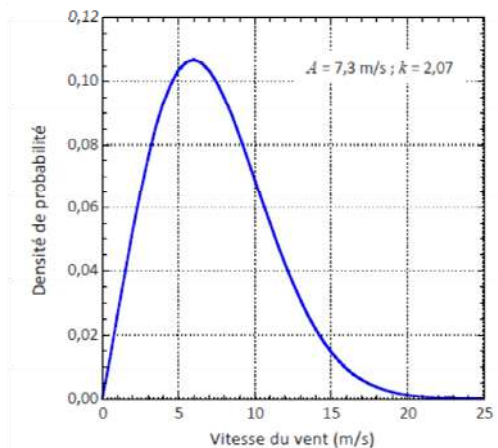
Classe de rugosité	Longueur de rugosité (m)	Coefficient énergétique (%)	Type de paysage
0	0,0002	100	Surface d'eau
0,5	0,0024	73	Terrain complètement dégagé avec une surface lisse, p.ex. une piste d'atterrissage en béton ou de l'herbe fraîchement coupée.
1	0,03	52	Terrain agricole dégagé, sans clôtures ou haies vives, et avec très peu de constructions. Seulement des collines aux pentes douces.
1,5	0,055	45	Terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8 m de haut situées à environ 1250 m les unes des autres.
2	0,1	39	Terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8 m de haut situées à environ 500 m les unes des autres.
2,5	0,2	31	Terrain agricole avec beaucoup de constructions, arbrisseaux et plantes, ou des haies vives de 8 m de haut situées à environ 250 m les unes des autres.
3	0,4	24	Village, petite ville, terrain agricole avec de nombreuses haies vives, des forêts, terrain très accidenté.
3,5	0,8	18	Grande ville avec de hauts immeubles.
4	1,6	13	Très grande ville avec de hauts immeubles et des gratte-ciel.

Source : Atlas éolien européen, 1991, Laboratoire National de Risø, Danemark.

## 2.4. Caractéristiques du vent



## 2.4. Caractéristiques du vent



**Fonction de distribution de Weibull** de la vitesse moyenne des vents à une hauteur de 55 m dans la région de Narbonne sur une année. Le **paramètre d'échelle A** est proportionnel à la de la vitesse moyenne du vent et le **paramètre de forme k** détermine la forme de la courbe de Weibull.

## 2.4. Caractéristiques du vent

Densité de probabilité liée à une distribution de Weibull :

$$f(u) = \frac{k}{A} \left( \frac{u}{A} \right)^{k-1} \exp \left( - \left( \frac{u}{A} \right)^k \right)$$

Fonction de survie (fonction cumulative d'une distribution de la vitesse du vent supérieure à une valeur  $u_0$ ) :

$$Q(u > u_0) = \exp \left( - \left( \frac{u_0}{A} \right)^k \right)$$

Fonction de répartition complémentaire de défaillance (fonction cumulative d'une distribution de la vitesse du vent inférieure ou égale à une valeur  $u_0$ ) :

$$F(u \leq u_0) = 1 - \exp \left( - \left( \frac{u_0}{A} \right)^k \right)$$



### 3. Aérodynamique

#### 3. Aérodynamique

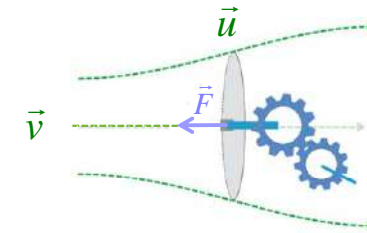
##### 3.1. Effet d'un disque sur le flux d'air

##### 3.2. Puissance optimale extraite

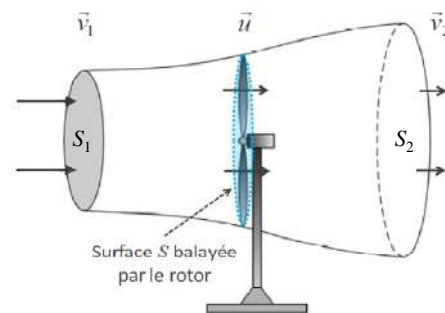
##### 3.3. Composants d'une éolienne

##### 3.4. Tip speed ratio TSR

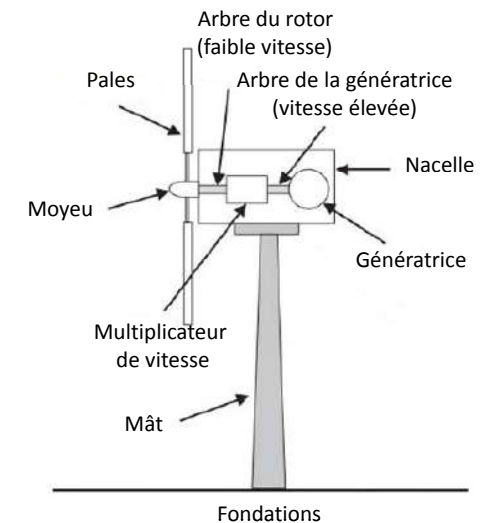
### 3.1. Effet d'un disque sur le flux d'air



### 3.2. Puissance maximale extraite



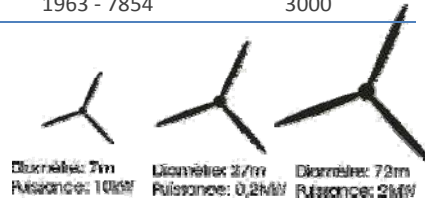
### 3.3. Composants d'une éolienne



### 3.3. Composants d'une éolienne

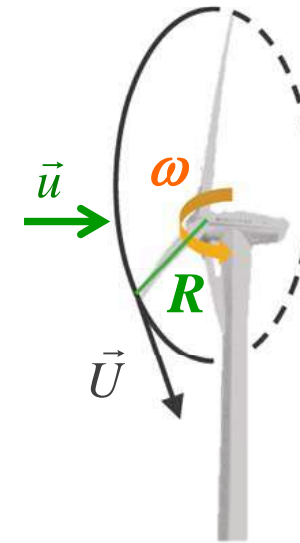
Classification selon la taille des pales :

Dénomination	Diamètre du rotor (m)	Aire balayée (m <sup>2</sup> )	Puissance nominale (kW)
Micro	0,5 – 1,25	0,2 – 1,2	0,25
Mini	1,25 - 3	1,2 – 7,1	1,5
Domestique	3 - 10	7 - 79	15
Petite commerciale	10 - 20	79 - 314	100
Moyenne commerciale	20 - 50	314 – 1963	1000
Grande commerciale	50 - 100	1963 - 7854	3000



Source : Cours d'Anne MIGAN (UPMC, Sept. 2017)

### 3.4. Tip speed ratio TSR

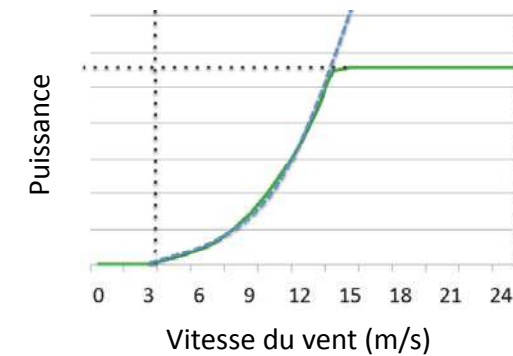


## 4. Production d'énergie

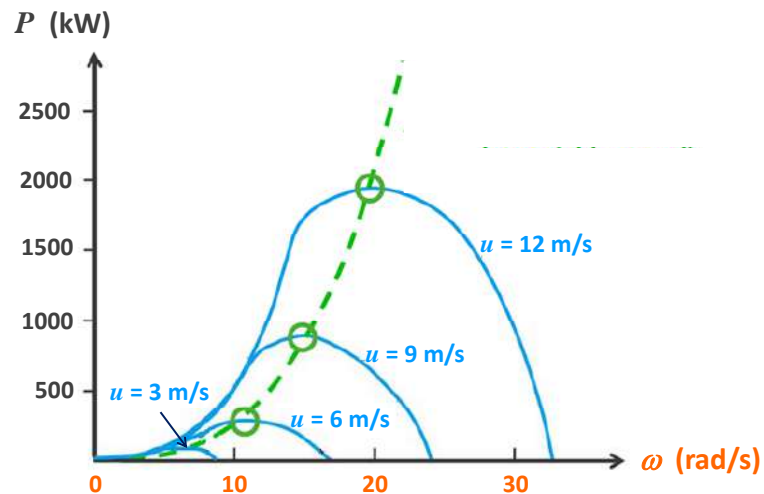
### 4. Production d'énergie

- 4.1. Courbe de puissance
- 4.2. Énergie produite
- 4.3. Facteur de charge
- 4.4. Parcs éoliens

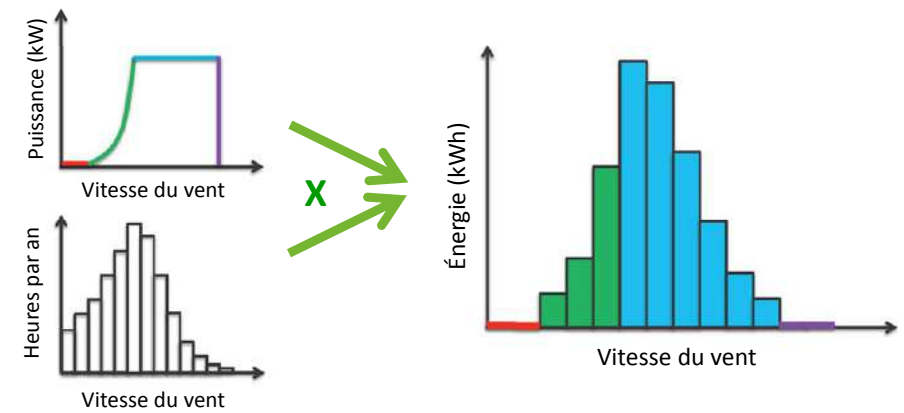
### 4.1. Courbe de puissance



## 4.1. Courbe de puissance



## 4.2. Énergie produite

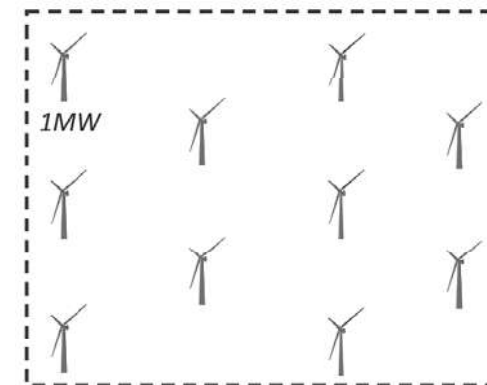


## 4.3. Facteur de charge

$$\text{Facteur de charge} = \frac{\text{énergie réellement produite pendant un an}}{\text{énergie maximale théoriquement produite pendant un an}}$$

## 4.4. Parcs éoliens (wind farms)

Est-ce que ce parc produit 10 MW ?



## 4.4. Parcs éoliens (*wind farms*)



## 5. Aspects systèmes

### 5. Aspects systèmes

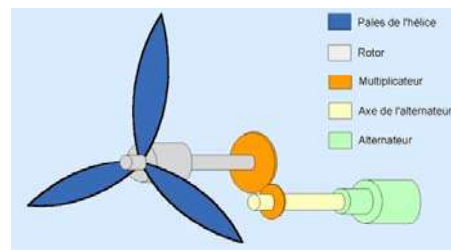
- 5.1. Multiplicateur de vitesse
- 5.2. Génératrice
- 5.3. Bruit
- 5.4. Nouvelles tendances

## 5.1. Multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse comporte :

- × un arbre lent (13 à 15 tr/min) supportant le rotor
- × un arbre à grande vitesse (1000 à 2000 tr/min)
- × un frein mécanique à disque
- × un système de refroidissement à l'huile

Il est couplé à la génératrice.



Source : Cours d'Anne MIGAN (UPMC, Sept. 2017)

## 5.2. Génératrice

Il peut s'agir d'une machine synchrone ou asynchrone, utilisée en vitesse fixe ou en vitesse variable.

La génératrice à courant continu (dynamo) :

La **dynamo** est utilisée dans la plupart des cas car elle nécessite moins de transformation du signal produit. En effet, le courant produit par une dynamo est un courant continu. Seule une **conversion continu → alternatif** via un **onduleur** est nécessaire.

- ☺ Système simple et utilisé depuis longtemps
- ⊗ Maintenance des balais et collecteurs
- ⊗ Poids
- ⊗ Coût



Source : Cours d'Anne MIGAN (UPMC, Sept. 2017)



## 5.2. Génératrice

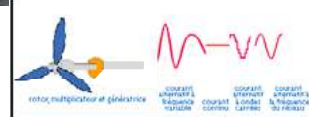
### La génératrice synchrone ou machine synchrone (MS) :

Elle tourne à une vitesse variable en fonction de la vitesse du vent. Il n'y a pas de multiplicateur.

Elle produit un courant à fréquence variable.

Ce courant doit être redressé en courant continu avant d'être ensuite transformé par un onduleur en courant alternatif de fréquence stable.

- ☺ Gain important en poids (*pas de multiplicateur*)
- ☺ Réduction du nombre de pièces en rotation (*moins de bruit, réduction de la charge, augmentation de la durée de vie, diminution de la maintenance*)
- ☺ Augmentation de la durée de vie
- ☺ Coûts de maintenance relativement faibles
- ☺ Bon rendement
- ⊗ Nécessite une conversion électrique afin de garder une fréquence constante
- ⊗ La construction de la génératrice requière des aimants permanents particulièrement gourmands en terres rares.



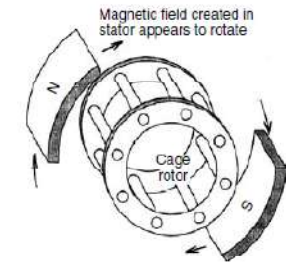
Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

## 5.2. Génératrice

### La génératrice asynchrone ou machine asynchrone (MAS, 1/2) :

Elle allie la simplicité, la robustesse et un faible coût.

Le rotor est le plus souvent constitué de deux cercles reliés entre eux par des barreaux, comme la roue d'une cage d'écureuil. Un courant doit être fourni pour produire un champ magnétique tournant. Lorsque le rotor tourne, un courant induit apparaît dans les barreaux de la roue. Cela crée un autre champ magnétique, variable celui-là. C'est seulement lorsqu'il tourne à une vitesse supérieure à celui du synchronisme, de 1 % à 2 %, qu'il fournit alors du courant au réseau.



Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

## 5.2. Génératrice

### La génératrice asynchrone ou machine asynchrone (MAS, 2/2) :

La génératrice asynchrone nécessite de fonctionner à une **vitesse nominale** de plusieurs centaines de tours par minute, ce qui implique l'utilisation d'un multiplicateur entre le rotor (arbre lent) et la génératrice (arbre rapide). Cette chaîne cinétique implique des forces de frottements qui empêchent la rotation du rotor par vent faible, il faut donc vaincre ces forces d'inertie au démarrage grâce à un coup de vent plus important.

- ☺ Système simple et utilisé depuis longtemps
- ☺ Faible coût
- ⊗ Pertes d'énergie dues au multiplicateur
- ⊗ Beaucoup de vibrations
- ⊗ Bruit
- ⊗ Usure des pièces
- ⊗ Risque d'incendies
- ⊗ Electricité de faible qualité

Source : Cours d'Anne MIGNAN (UPMC, Sept. 2017)

## 5.3. Bruit

