

# Energies Nouvelles et Renouvelables

## CONVERSION DE L'ENERGIE

- Courants continu et alternatif
- Courants monophasés et triphasés
- Fréquence du courant et régulation des réseaux électriques
- La conversion mécanique/électrique en éolien
- Machines à courant continu, synchrone, asynchrones
- Raccordement de la production éolienne au réseau

## Lois de l'électromagnétisme : équations de Maxwell

Force de Coulomb :

$$\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$$

Force électromagnétique :

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

Force de Lorentz :

$$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

Loi d'Ohm :

$$\vec{j} = qn\vec{v} = qn\mu\vec{E} = \sigma\vec{E}$$

Equation de Maxwell-Ampère :

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

→  $B = \mu_0 n I$

$\mu_0$  : perméabilité magnétique du vide =  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m

$\varepsilon_0$  : permittivité diélectrique du vide =  $8.85 \cdot 10^{-12}$  F/m

$$\varepsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$$

Equation de Maxwell-Faraday :

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Loi de Lenz :

$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

$$d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Equation de Maxwell-Gauss :

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

création d'un champ électrique par une charge

Equation de Maxwell-Thomson :

$$\text{div } \vec{B} = 0$$

il n'existe pas de source magnétique unique :  
un aimant a toujours deux pôles.

## Courants continus et alternatifs

- Courant continu
  - transport à tension élevée : à cause de l'effet Joule (2.5% de la production française)
    - ➔ nécessité du transformateur
  - incompatible avec le principe du transformateur
    - ➔ diviseur de tension, hacheur, convertisseur Buck : complexe ou faible rendement
  - effet inductif et claquage à la coupure
- Courant alternatif
  - facilité de production (sinusoïdale) : machines tournantes (alternateurs)
  - compatible avec le transformateur mais effets inductifs indésirables
  - problème de l'effet de peau : augmente l'effet Joule

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu}}$$

- ➔ multiplication des conducteurs, câble bi-couches
- problème de puissance oscillante monophasée
- problème sanitaire (champ oscillant)

| fréquence | $\delta$   |
|-----------|------------|
| 50 Hz     | 9,38 mm    |
| 60 Hz     | 8.57 mm    |
| 10 kHz    | 0.66 mm    |
| 100 kHz   | 0.21 mm    |
| 1 MHz     | 66 $\mu$ m |
| 10 MHz    | 21 $\mu$ m |

## Puissance monophasée et puissance triphasée

- Monophasé

$$P = V \sqrt{2} \sin(\omega t) \cdot I \sqrt{2} \sin(\omega t + \phi)$$

$$\sin a \times \sin b = \frac{\cos(a - b) - \cos(a + b)}{2}$$

$$P = VI \cos \phi - VI \cos(2\omega t + \phi)$$

- Triphasé (phases équilibrées)

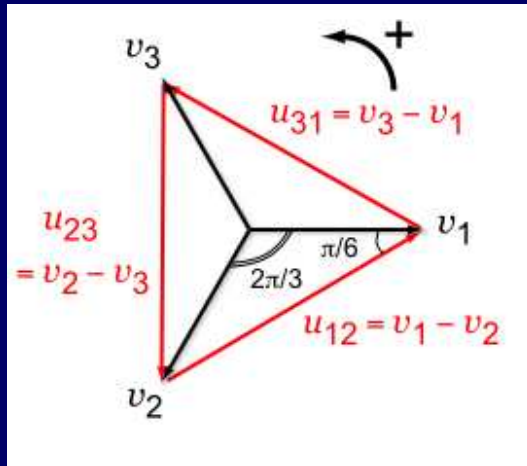
$$\begin{aligned}
 P &= V \sqrt{2} \sin(\omega t) \cdot I \sqrt{2} \sin(\omega t + \phi) \\
 &+ V \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot I \sqrt{2} \sin\left(\omega t + \phi - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 &+ V \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot I \sqrt{2} \sin\left(\omega t + \phi - \frac{4\pi}{3}\right)
 \end{aligned}$$

$$P = 3VI \cos \phi$$

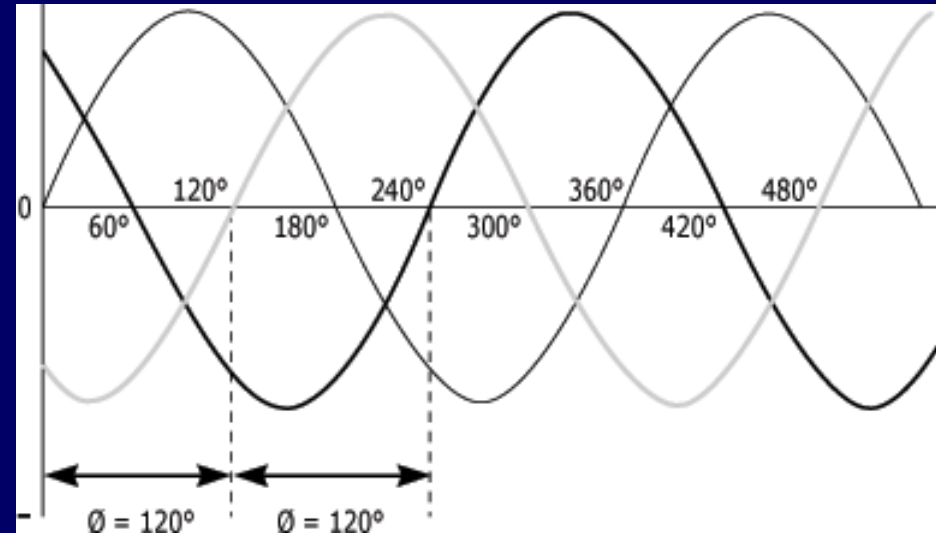
$$\left. - VI \cos(2\omega t + \phi) - VI \cos\left(2\omega t + \phi - \frac{4\pi}{3}\right) - VI \cos\left(2\omega t + \phi - \frac{8\pi}{3}\right) \right\} = 0$$

## Alternatif triphasé

- Diagramme de Fresnel
  - ➔ phases équilibrées



$$U = 2 \times V \times \cos(\pi/6)$$



- Triphasé
  - ❖ 3 phases
  - ❖ 1 neutre (facultatif mais souvent distribué)
- Tension entre 2 phases : U
- Tension entre 1 phase et le neutre : V
- Exemple :  $V=220 \text{ V} \Rightarrow U=380 \text{ V}$   
 $V=230 \text{ V} \Rightarrow U=400 \text{ V}$

# Couplages

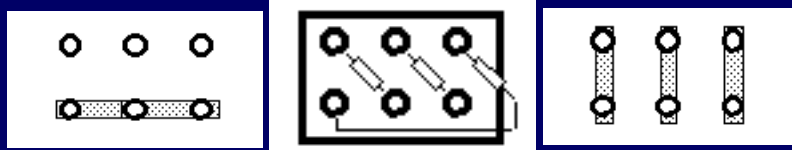
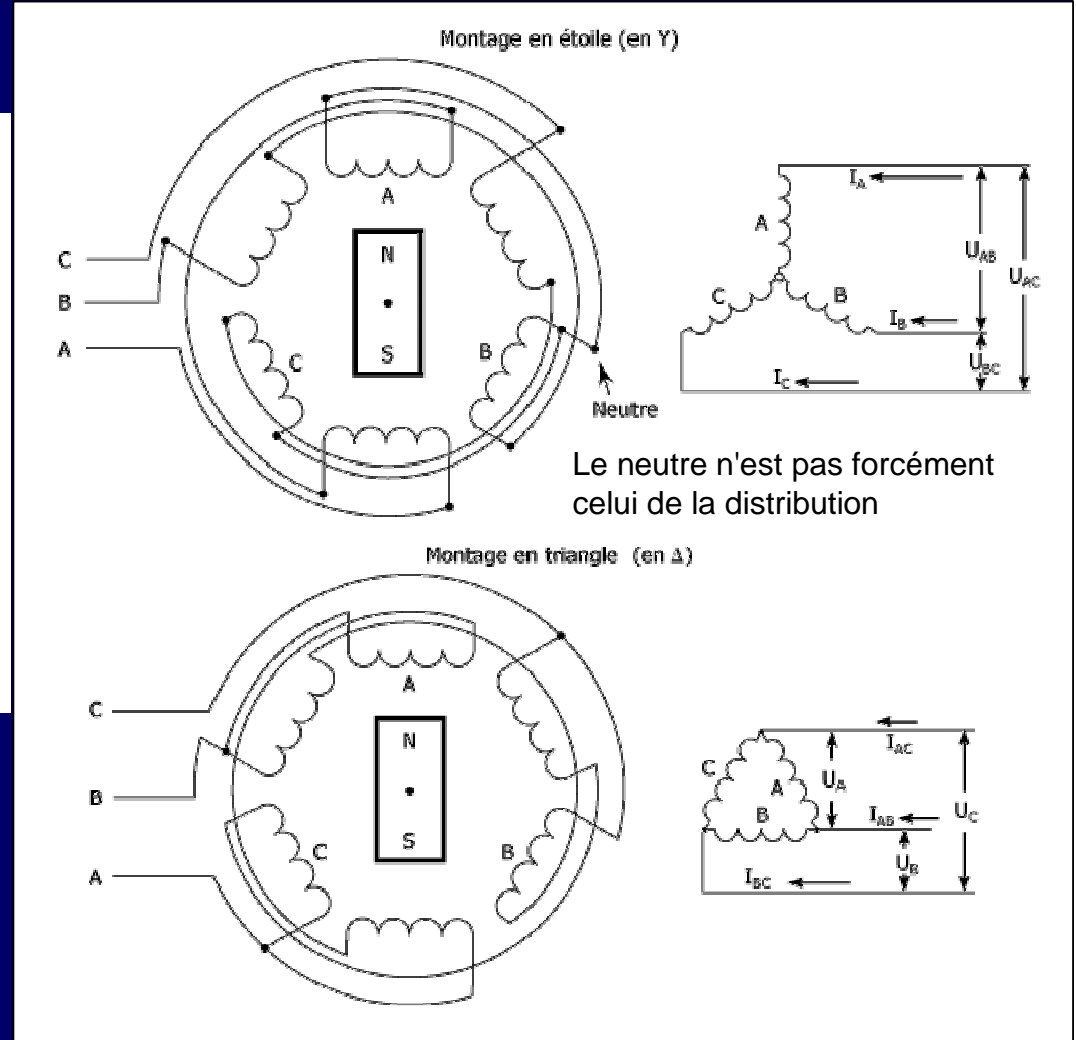
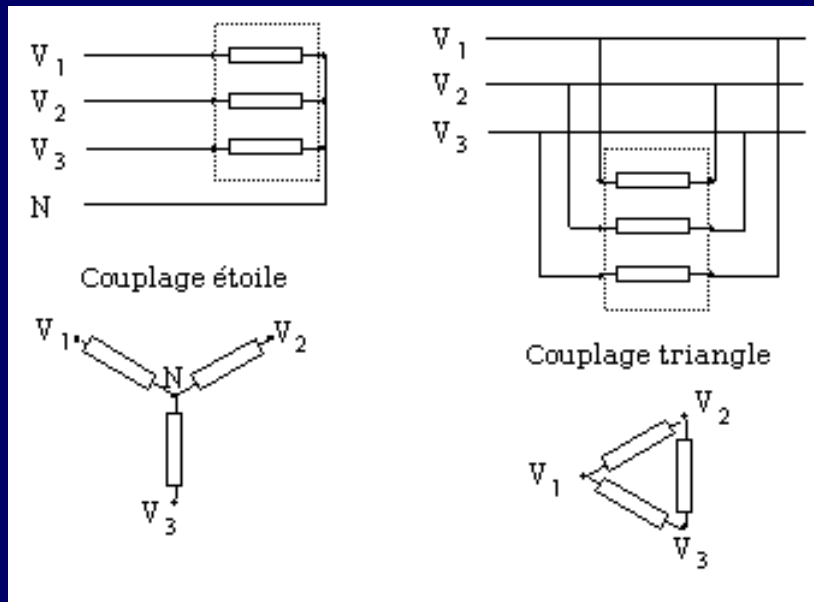
## Etoile (Y) et Triangle (Delta)

Forte tension

Plus de couple

Faible tension

Plus de vitesse



I : courants de ligne

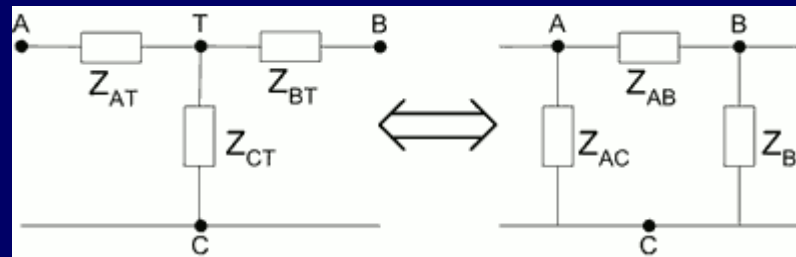
J : courants de phase

Montage étoile :  $I = J$

Montage triangle :  $I_{AC} = J_A + J_B$ ,  $I_{AB} = -J_A + J_B$ ,  $I_{BC} = -J_A - J_C$

# Passages Etoile – Triangle et Triangle – Etoile

Théorème de Kennelly



Passage Etoile - Triangle

Passage Triangle - Etoile

$$Z_{AB} = \frac{Z_{AT} \cdot Z_{BT} + Z_{BT} \cdot Z_{CT} + Z_{CT} \cdot Z_{AT}}{Z_{CT}}$$

$$Z_{BC} = \frac{Z_{AT} \cdot Z_{BT} + Z_{BT} \cdot Z_{CT} + Z_{CT} \cdot Z_{AT}}{Z_{AT}}$$

$$Z_{CA} = \frac{Z_{AT} \cdot Z_{BT} + Z_{BT} \cdot Z_{CT} + Z_{CT} \cdot Z_{AT}}{Z_{BT}}$$

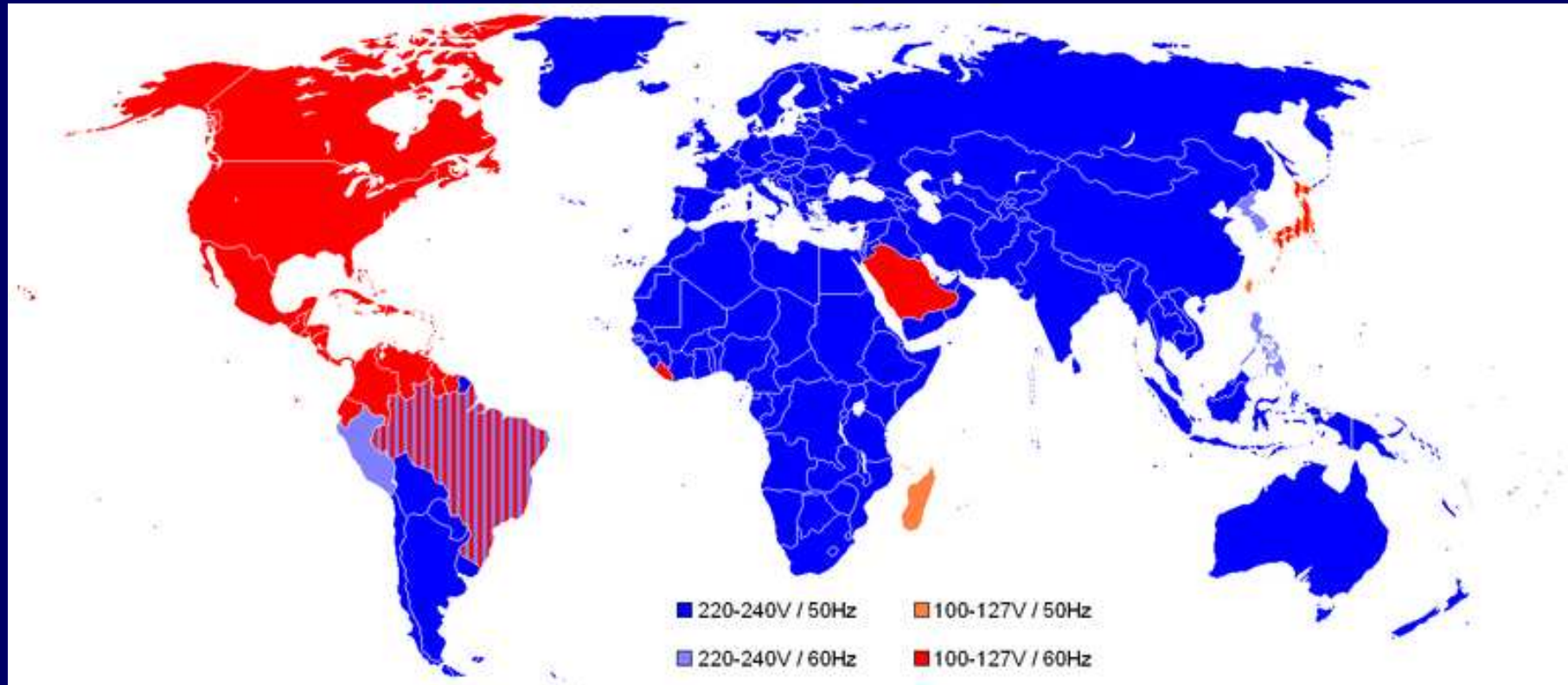
$$Z_{AT} = \frac{Z_{AB} \cdot Z_{AC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{AC}}$$

$$Z_{BT} = \frac{Z_{AB} \cdot Z_{BC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{AC}}$$

$$Z_{CT} = \frac{Z_{AC} \cdot Z_{BC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{AC}}$$

## Répartition géographique des fréquences et des tensions

- 2 fréquences : 50 et 60 Hz
- 2 jeux de tensions : 240/400 V et 127/220 V





## Avantage et inconvénient des hautes/basses fréquences

- 3 fréquences historiques : 25, 50 et 60 Hz
- Problème de scintillement à basse fréquence
- Meilleure efficacité des transformateurs aux hautes fréquences
  - influence sur la taille : 400 Hz dans l'aérospatiale, variable en aéronautique (moteurs)
- Bon synchronisme des réseaux à haute fréquence
- Effets inductifs dans les moteurs électriques
- Effets inductifs et capacitifs dans les lignes
- Mauvais comportement des redresseurs à haute fréquence
- Compromis : 40 Hz (l'histoire a imposé 50 et 60 Hz)

# Réseau électriques : historique

Années 1882-1896

Continu

Thomas Edison



Marcel Deprez

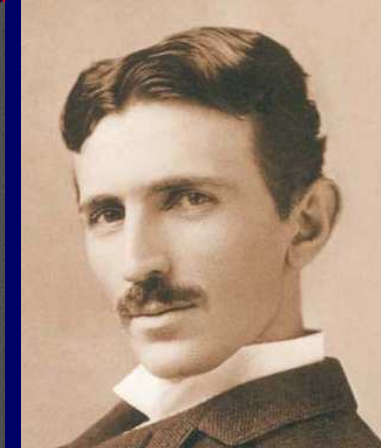


Alternatif triphasé

Lucien Gaulard



Nikola Tesla



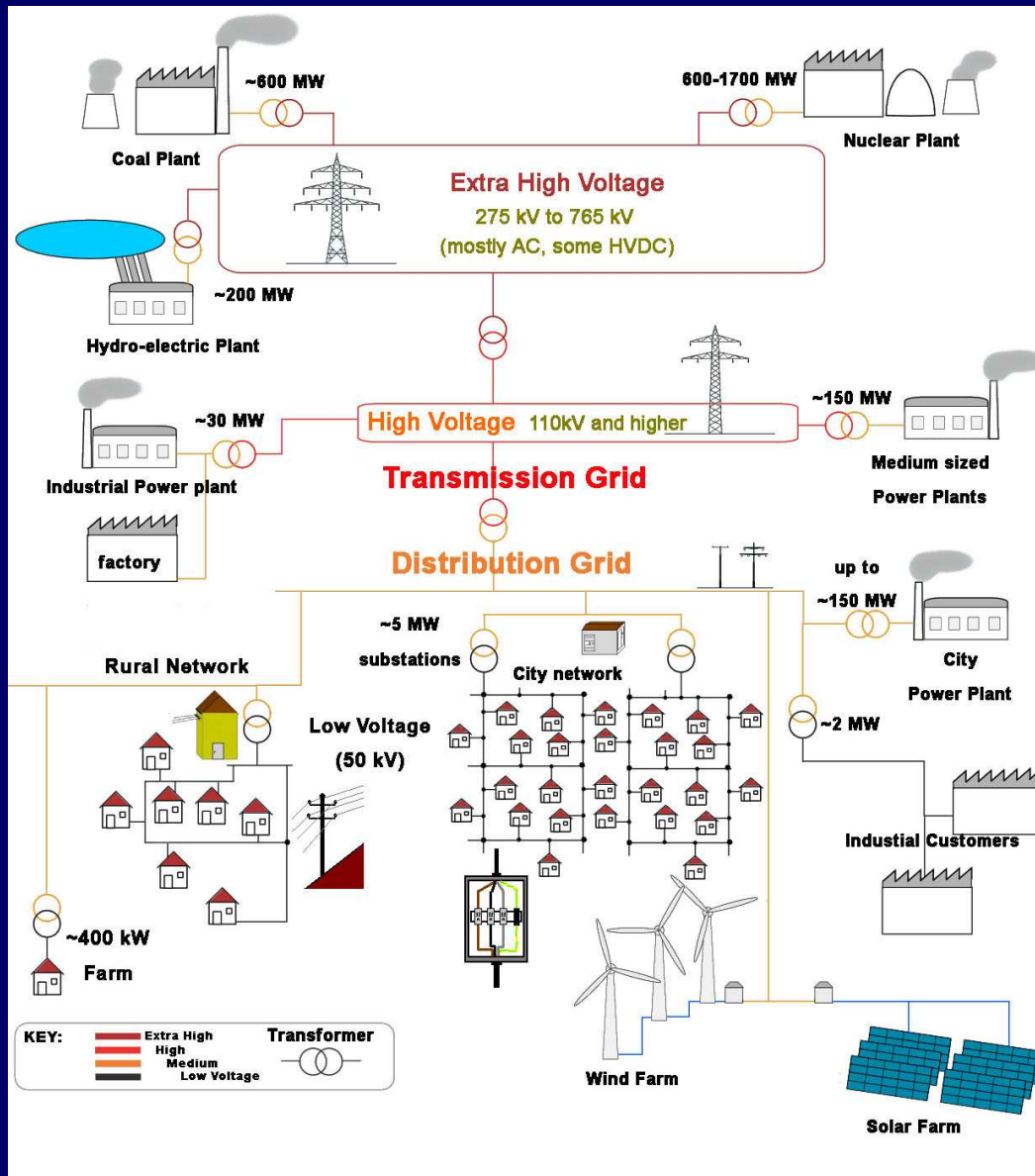
Répères :

- 1882 : premier réseau à courant continu (Edison)
- 1882 : premier réseau à courant continu longue distance (Deprez)
- 1884 : invention du transformateur haute puissance (Gaulard)
- 1890 : brevet du système triphasé (Wenström)
- 1891 : invention de l'alternateur triphasé (Tesla)
- 1896 : première ligne industrielle à courant alternatif triphasé

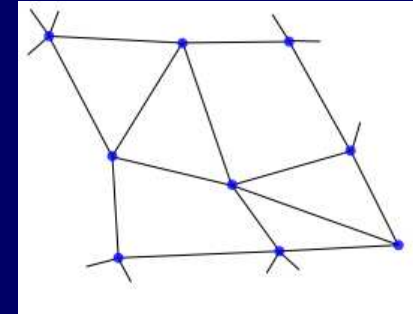
Jonas Wenström



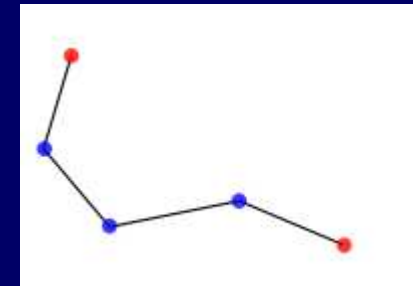
# Réseau électriques : structures



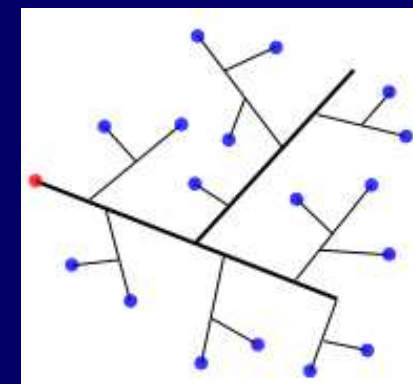
Maille : transport HT



Boucle : distribution rurale



Boucle : distribution urbaine



# Réseaux électriques : transports de l'électricité

## Famille de tensions

- Basse tension - moins de 1000 volts
  - ✓ habitations.
- Moyenne tension - entre 1000 volts (1 kV) et 33 kV
  - ✓ distribution dans les zones urbaines et rurales.
- Haute tension - entre 33 kV et 230 kV
  - ✓ transport de grandes quantités d'énergie électrique.
- Très haute tension - plus de 230 kV à 800 kV
  - ✓ longues distances, de très grandes quantités d'énergie électrique.
- Ultra haute tension - supérieure à 800 kV.
  - ✗ effets couronnes (décharge)

## Caractéristiques de l'ensemble ligne/pylône

- Groupes de câbles multiple de 3 (triphase)
- Groupes de 3 câbles remplace un gros câble
- Câbles nus en alliage d'aluminium
- Présence d'un câble de garde (foudre)
- Une assiette isolante par pas de 20 kV
- Distance mini inter-câble et avec le sol

## Enterrement des lignes : investissement



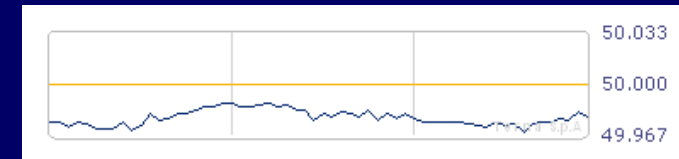
# Surveillance des réseaux électriques

## Inadéquation entre la production mise en ligne et la demande

- possibilité de stockage
- nécessité d'une mise en ligne rapide des réserves (15-30s)

## Fréquence

- indicatrice de la charge du réseau
- sensibilité de l'électronique de puissance à la fréquence



## Tension (haute tension privilégiée)

- haute : claquage des isolants, coup de foudre (disjoncteurs)
- basse : effet Joule, mauvais fonctionnement chez l'utilisateur (marge 5 à 10%)
- utilisation de transformateur à réglage de charge : tension secondaire constante

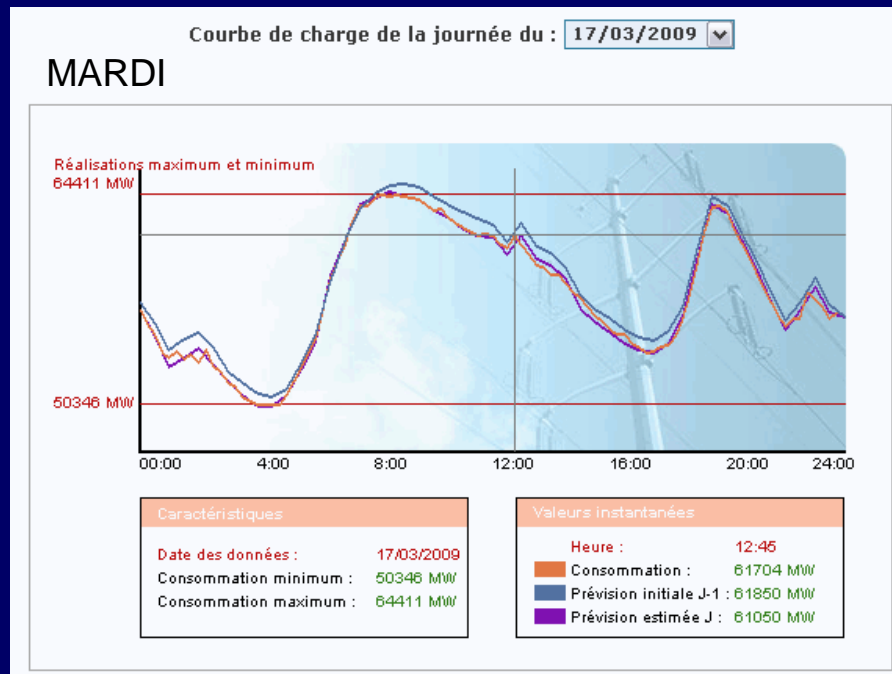
## Intensité

- fonte des isolants pour les câbles gainés
- dilatation : diminution de la distance avec le sol pour les lignes aériennes
- surchauffe des transformateurs

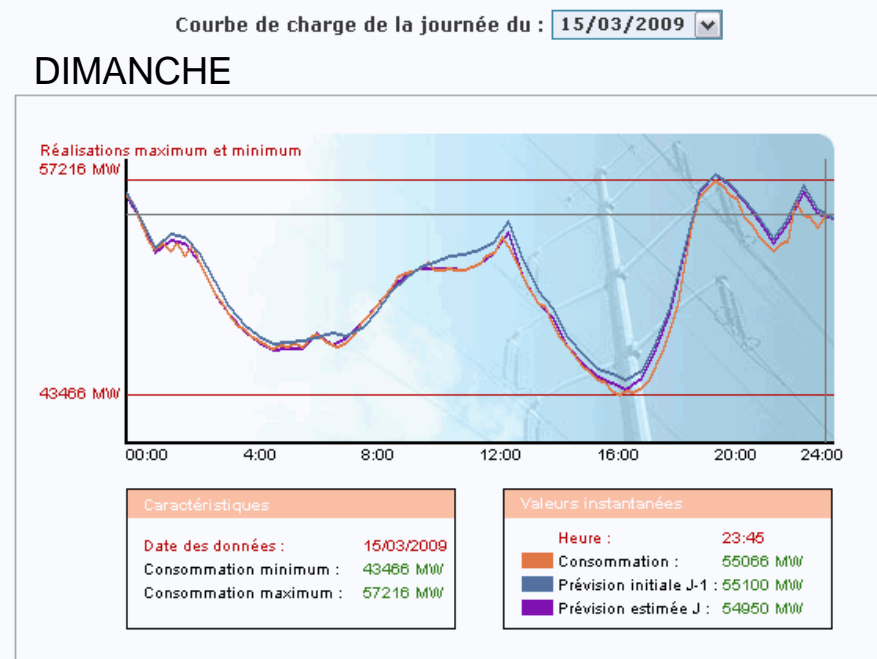
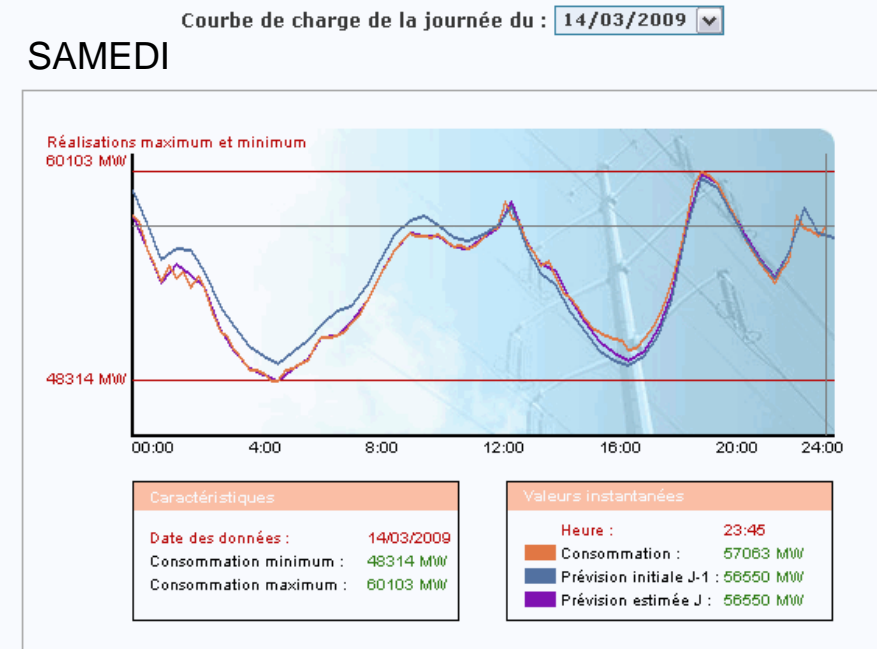
## Intensité de court-circuit (intensité maximale disponible)

- nécessairement élevée pour faire face aux appels sur le réseau
- doit être majorée dans les postes d'abaissement du courant

# Consommation électrique

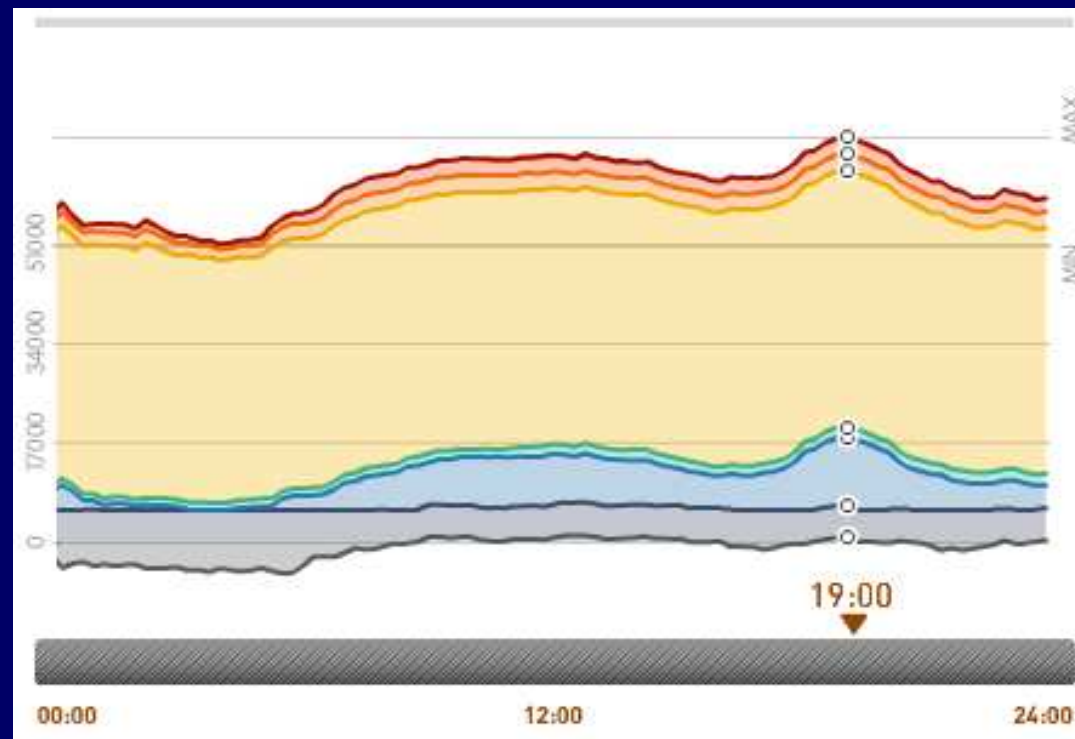
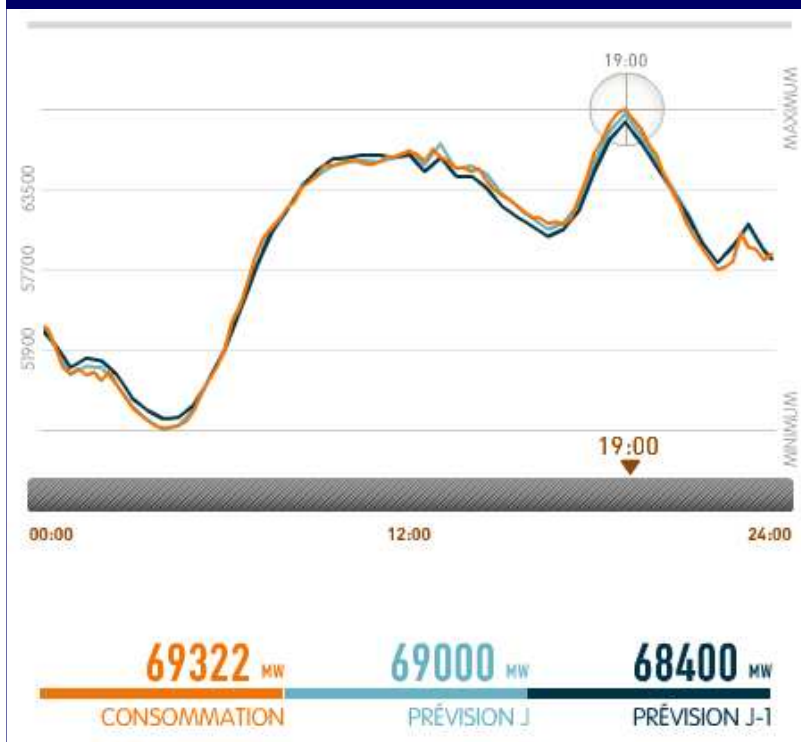


- Forte consommation : baisse de la fréquence
- Faible consommation : hausse de la fréquence
- <http://www.rte-france.com>



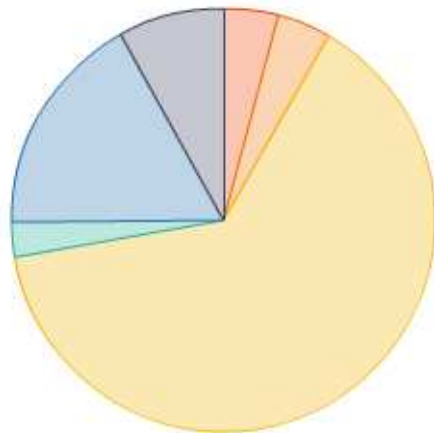
# Adaptation de la production

2 novembre 2010

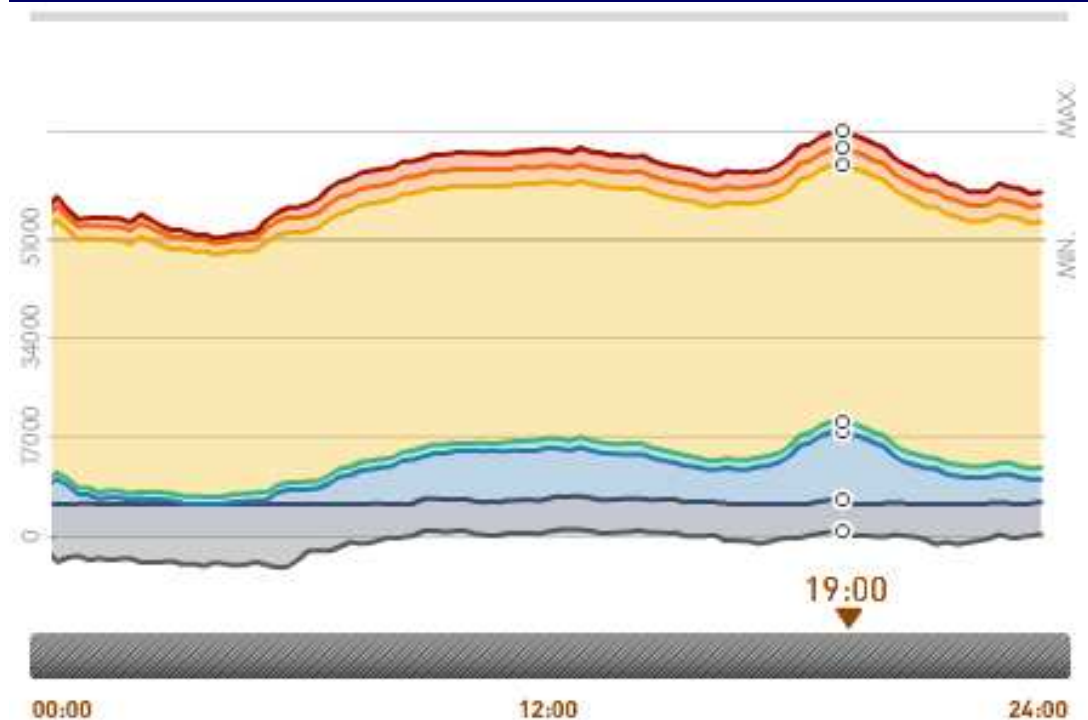


# Détails de la production

2 novembre 2010 : 19h



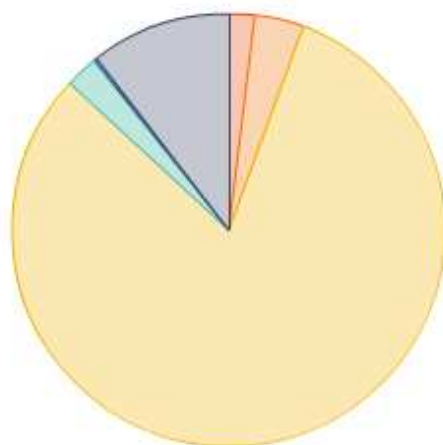
Survolez les légendes pour obtenir plus de détails.



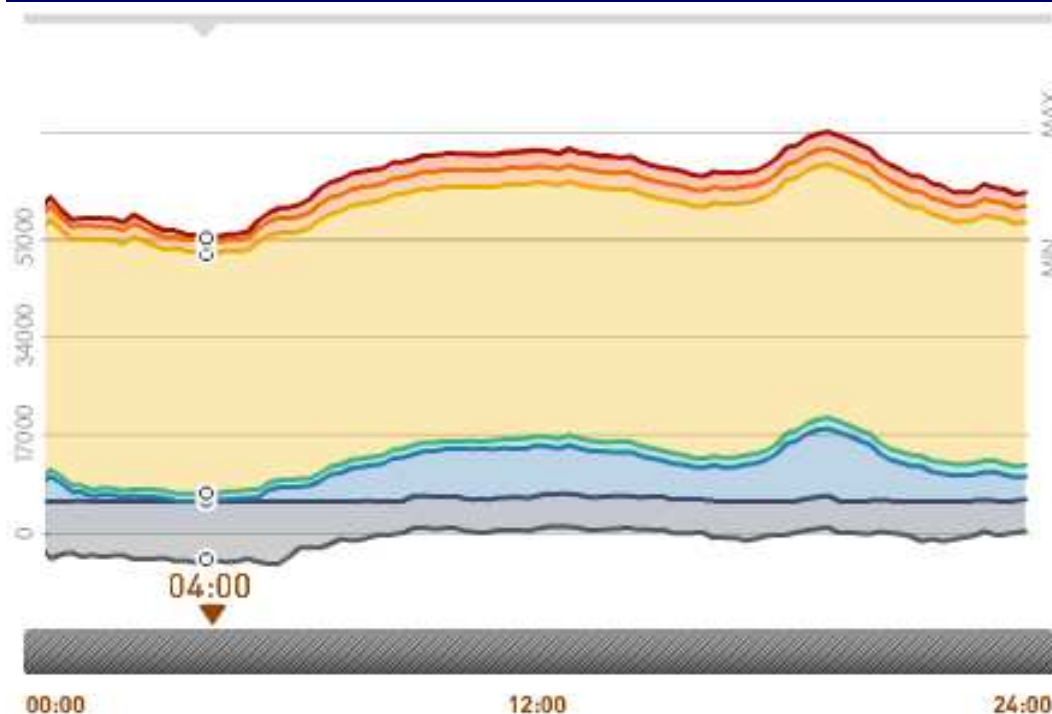


# Détails de la production

2 novembre 2010 : 4h



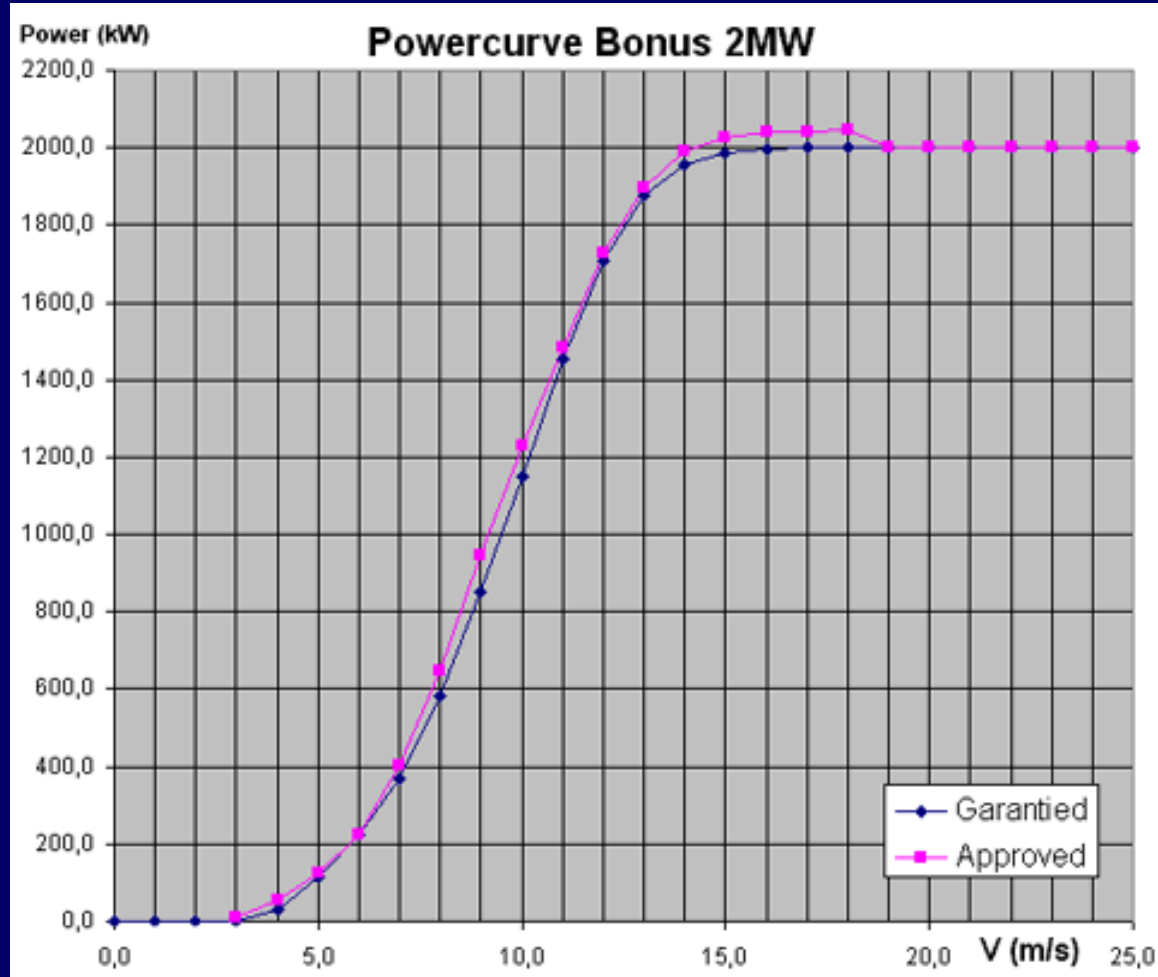
Survolez les légendes pour obtenir plus de détails.



## Réseaux intelligents – Smart grid

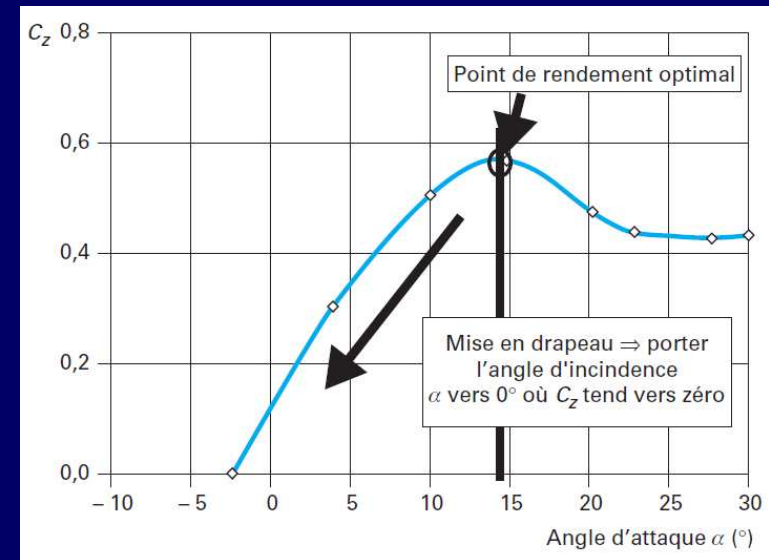
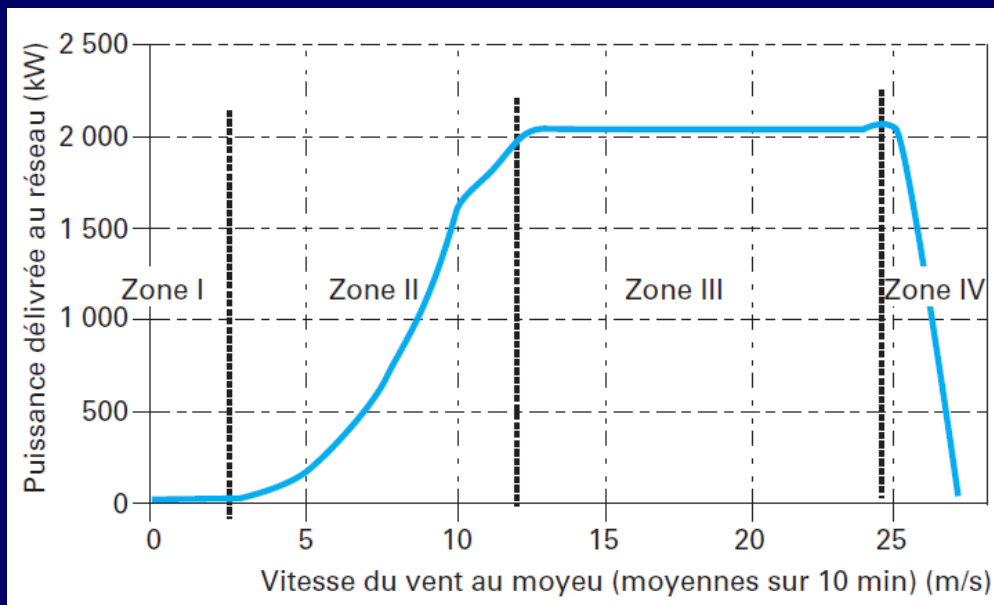
- Informatisation de la gestion du réseau
  - récupérer des données en temps réel sur la consommation d'énergie
  
- But à grande échelle
  - adapter finement la production à la consommation
  - faciliter l'intégration des énergies douces
  - éviter les surcharges
  - assurer l'indépendance énergétique à l'échelle continental
  
- But à petite échelle
  - permettre une réduction de la consommation
  - faciliter l'intégration des sources d'énergie locales
  - rendre l'utilisateur maître de sa consommation
  - coupler la gestion des appareils consommateurs

# Conversion énergie mécanique - énergie électrique : l'éolienne

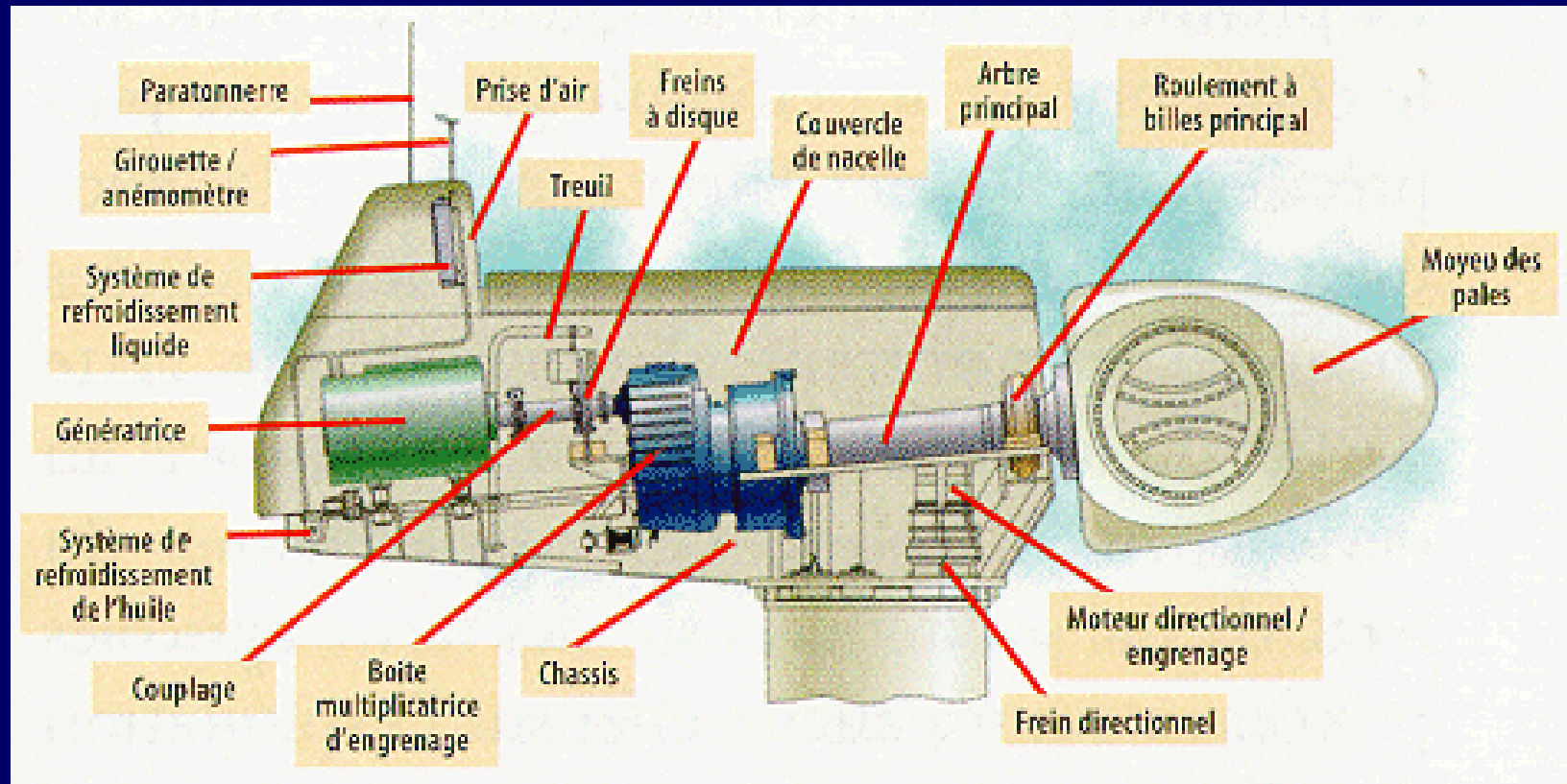


## Efficacité aérodynamique et vitesse de rotation

- Zone I : vitesse de vent inférieure à la vitesse de vent de démarrage - aucune puissance délivrée au réseau.
- Zone II : angle d'attaque optimal (4 à 12 m/s) - vitesse de rotation variable de 6 à 19,2 tr/min - rendement aérodynamique maximal.
- Zone III : zone de régulation de la puissance à sa valeur nominale par contrôle de l'angle d'attaque - vitesse de rotation constante : 19,2 tr/min - dégradation brutale du rendement aérodynamique.
- Zone IV : vitesse de vent supérieure à la vitesse d'arrêt - décroissance progressive de la puissance délivrée au réseau jusqu'à zéro par augmentation de l'angle d'attaque



## Nacelle d'une éolienne

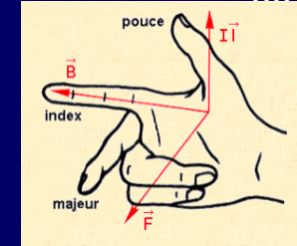


- Arbre
- Multiplicateur
- Frein
- Génératrice

## Générer de l'électricité transportable sur le réseau

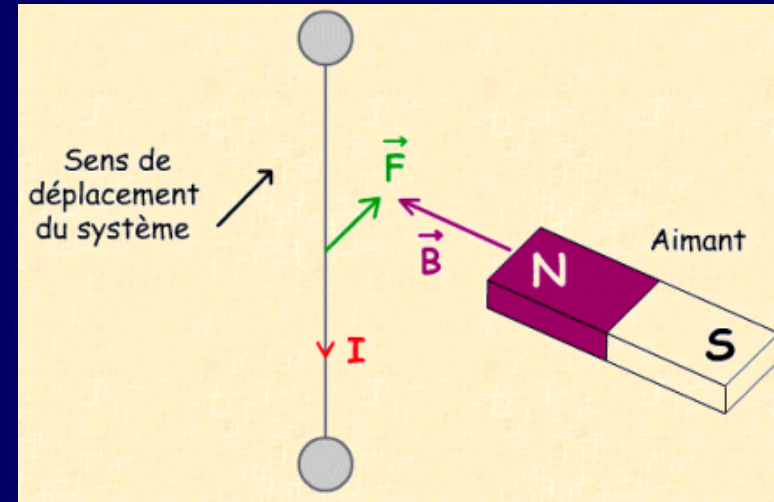
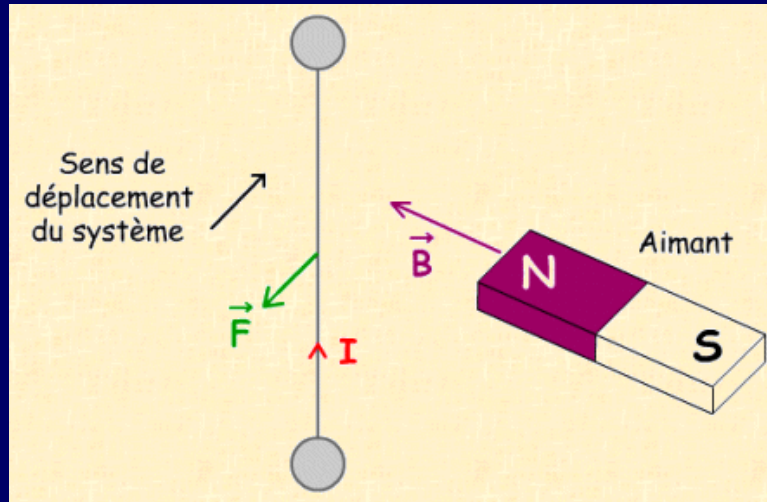
- Génération d'électricité : conversion énergie mécanique – énergie électrique
  - ❖ Machines à courant continu + onduleur
  - ❖ Génératrice synchrone
  - ❖ Génératrice asynchrone
  - ❖ Génératrice asynchrone à glissement variable
  
- Injecter l'énergie produite dans le réseau électrique
  - ❖ Problème de phase
  - ❖ Problème d'appels de courant
  - ❖ Problème de charge (contrainte mécanique sur l'arbre)
  - ❖ Problème de pénétration de l'énergie éolienne sur le réseau
    - 10% : limite classique jusqu'il y a quelques années
    - 2008 : Espagne (2e producteur européen)
      - 18 avril 2008 : 10880 MW (30% - 28% en moyenne sur la journée)
      - 24 novembre 2008 : 9253 MW (43%)

# Machine à courant continu (dynamo)



- Force de Laplace

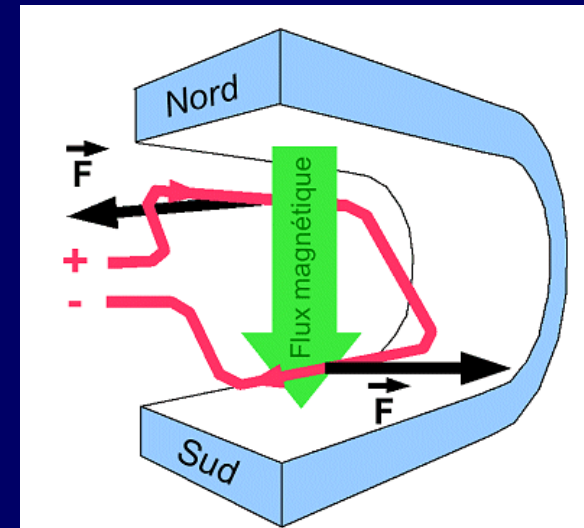
$$d\vec{F} = I \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B}$$



- Loi de Lenz-Faraday

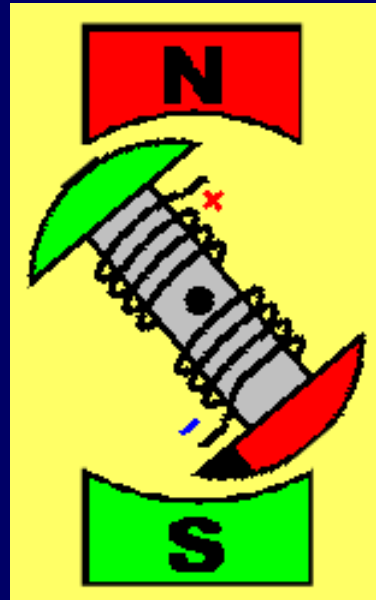
$$e = -\frac{d\phi}{dt}$$

- Rotor et Stator
- Balais / charbons / collecteurs tournants

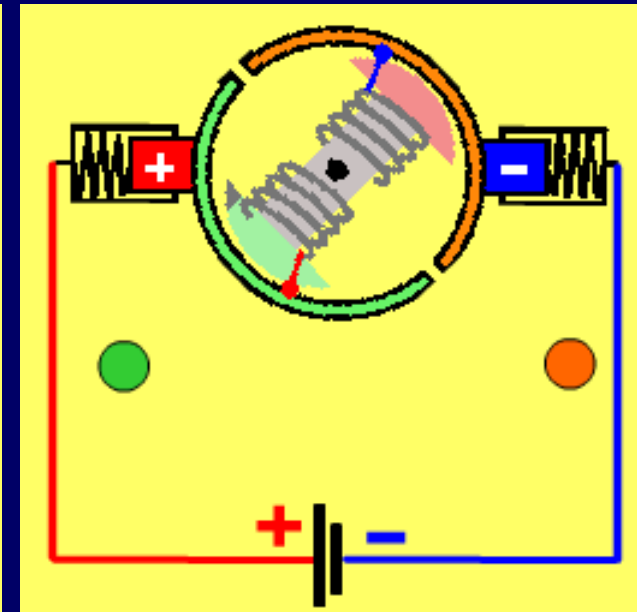
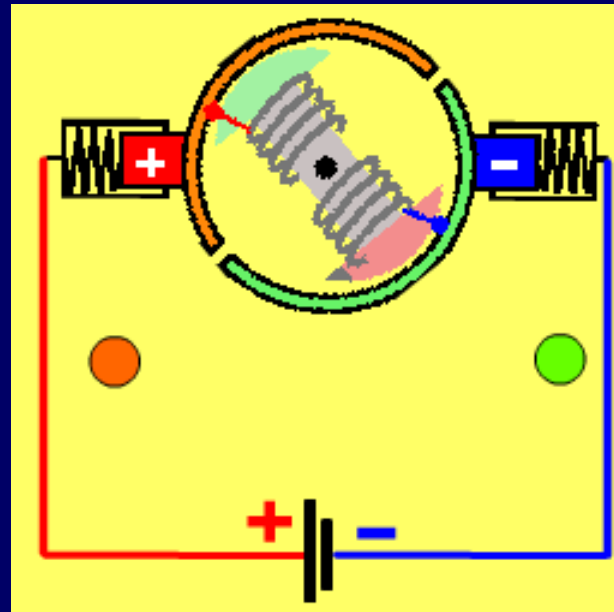


## Stator : aimants permanents ou inducteurs bobinés

- Aimants permanents



- Inducteurs bobinés





## Stator : aimants permanents ou inducteurs bobinés ?

- Aimants permanents
  - matériaux ferromagnétiques (aimantation sous l'effet d'un champ et maintien de cette aimantation en absence de champ)
  - perte du ferromagnétisme au-dessus du point de Curie : paramagnétisme
  - exemples
    - ◆ ferrites ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ),  $T_{\text{Curie}}=300-400^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{max}}=200^\circ\text{C}$
    - ◆ NdFeB,  $T_{\text{Curie}}=350^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{max}}=100-200^\circ\text{C}$
    - ◆ NdFeVa,  $T_{\text{Curie}}=300-400^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{max}}=200^\circ\text{C}$
    - ◆ Samarium-Cobalt,  $\text{SmCo}_5$ ,  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$
  - avantages
    - ◆ faible encombrement (surtout NdFeB)
    - ◆ meilleur efficacité (pas de courant inducteur)
    - ◆ plus fiable et plus simple à monter
  - inconvénients
    - ◆ flux inducteur non réglable
    - ◆ désaimantation

## Stator : aimants permanents ou inducteurs bobinés ?

- Inducteurs bobinés
  - flux inducteur réglable
  - pas de risque de désaimantation
- Induction magnétique
  - le champ induit s'ajoute au champ inducteur
    - ◆ déformation des lignes de champ (compensation : bobinages secondaires)
    - ◆ risque de saturation (perte de flux) ou d'inductions négatives (désaimantation)
  - perméabilité des aimants < perméabilité du cuivre ou du fer
    - ◆ les aimants engendrent peu de réaction d'induit
- Autres dispositions possibles des aimants

## Relations électriques

- Stator (si inducteur bobiné) :  $U_s = R_s \cdot I_s$
  - Rotor :  $U_i - E = R_i \cdot I_i$ 
    - force contre-électromotrice :  $E \sim B_s \cdot \omega$  et  $B_s \sim I_s$
    - couple électromécanique :  $C \sim B_s \cdot I_s$
    - $E \cdot I_i \sim C \cdot \omega$ 
      1. Pas d'action sur l'arbre :  $I_i \sim 0 \rightarrow U_i \sim E$
      2. Moteur, couple résistant :  $\omega \searrow \rightarrow E \searrow$ , pour U constant  $\rightarrow I_i \nearrow \rightarrow C \nearrow$   
 $\rightarrow$  Couple moteur (si  $\omega \rightarrow 0$ ,  $I_i \uparrow\uparrow$ , moteur grillé)
      3. Génératrice, couple accélérateur :  $\omega \nearrow \rightarrow E \nearrow$ , pour U constant  $\rightarrow R_i \cdot I_i < 0$   
 $\rightarrow |I_i| \nearrow$   
 $\rightarrow C \nearrow$   
 $\rightarrow$  Couple de freinage : le système consomme une "puissance négative"
- Machine parfaitement réversible (nécessité de vaincre la fcém en génératrice)
- Avec des aimants :  $B_s$  constant
- Avec des bobines :  $B_s$  variable

## Moteur série

- Stator et rotor en série :  $U = E + R_i \cdot I_i + R_s \cdot I_s = E + (R_i + R_s)I$ 
  - force contre-électromotrice :  $E \sim B_s \cdot \omega$  et  $B_s \sim I_s$
  - couple électromécanique :  $C \sim I_s^2$
  - fort couple à faible vitesse
  - risque d'emballement
  - pas d'utilisation en génératrice
  - moteur universel à rotor feuilleté (robot, perceuse, ...)

## Moteur parallèle

- Stator et rotor en parallèle :  $U = E + R_i \cdot I_i = R_s \cdot I_s$ 
  - force contre-électromotrice :  $B_s \sim U$  et  $E \sim U \cdot \omega$
  - couple électromécanique :  $C \sim E \cdot I_i / \omega \sim U \cdot I_i$
  - pas d'emballement

## Moteur compound

- Stator et rotor partiellement en série et en parallèle
  - cumule les avantages : fort couple à faible vitesse mais pas d'emballement

## Moteur brushless

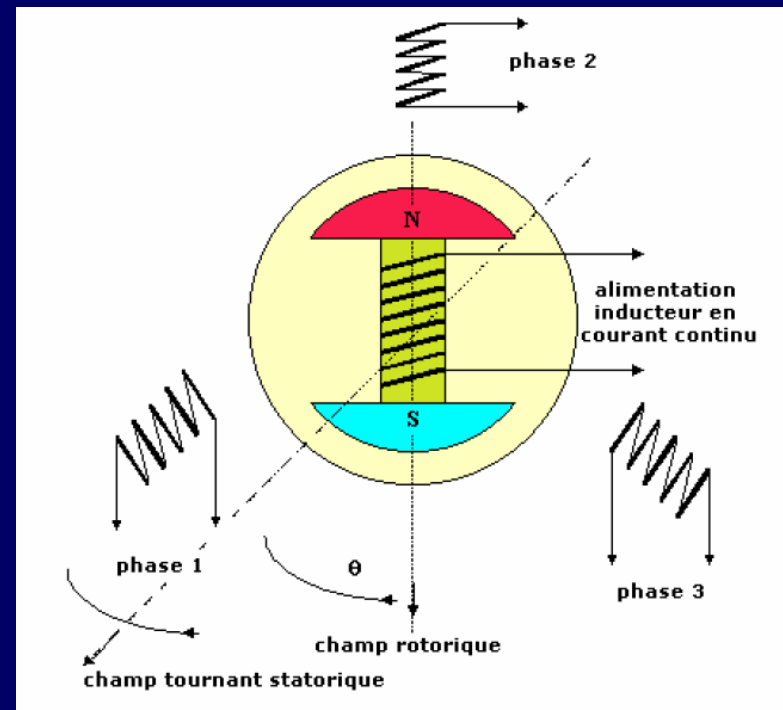
- Problèmes posés par les collecteurs : usure, arcs
- Moteur sans collecteurs
  - Rotor : aimant permanent
  - Détection électronique de la position
- Détection
  - Capteur à effet Hall
  - Capteur revolver (précision  $\frac{1}{4}^\circ$ )
- Commutation
  - Signaux rectangulaires : plus simples
  - Signaux sinusoïdaux : commutation douce, nécessite une grande précision

## Génératrice à courant continu

- Plus du tout utilisée pour produire de l'électricité
- Mais un moteur continu peut générer de la puissance électrique au freinage

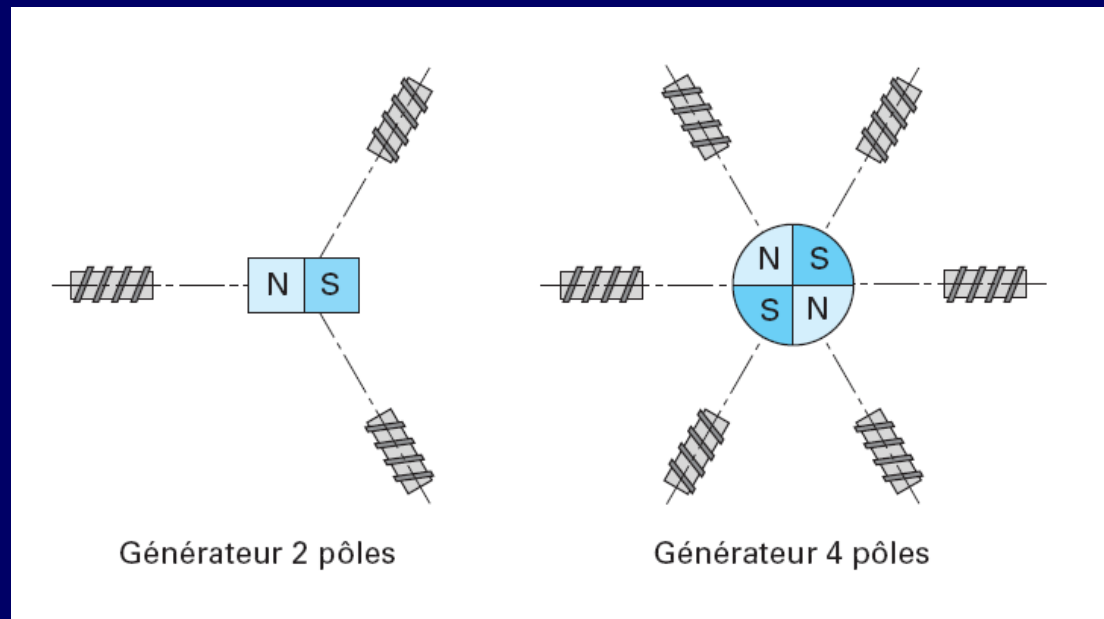
## Machine synchrone (alternateur)

- Création d'un champ tournant par le stator triphasé (moteur) ou par la stator (génératrice)
- Les champs rotoriques et statoriques tournent à la même vitesse
- Génératrice : la vitesse de rotation impose la fréquence du courant
- Moteur : la fréquence du courant impose la vitesse de rotation



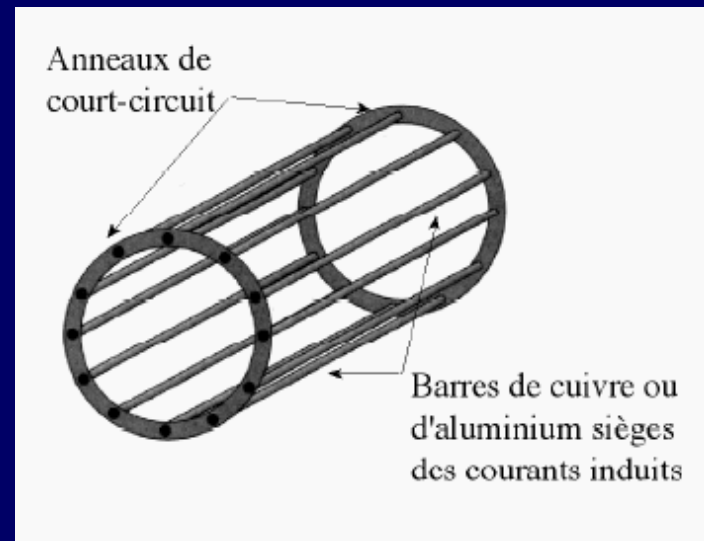
## Machine synchrone (alternateur)

- Vitesses et fréquences sont liées par le nombre de pôles
  - ❖ Vitesse (tr/min) =  $6000/(\text{nombre de pôles})$
  - ❖ Volume augmente avec le nombre de pôles
  - ❖ Gros générateurs lents ou petits générateurs rapides
- Déphasage des champs augmente avec la charge
- Alimentation en courant continu (source de courant, alimentation)
- Problème en cas de vitesses de rotation variables
  - ❖ Recours à l'électronique



## Machine asynchrone

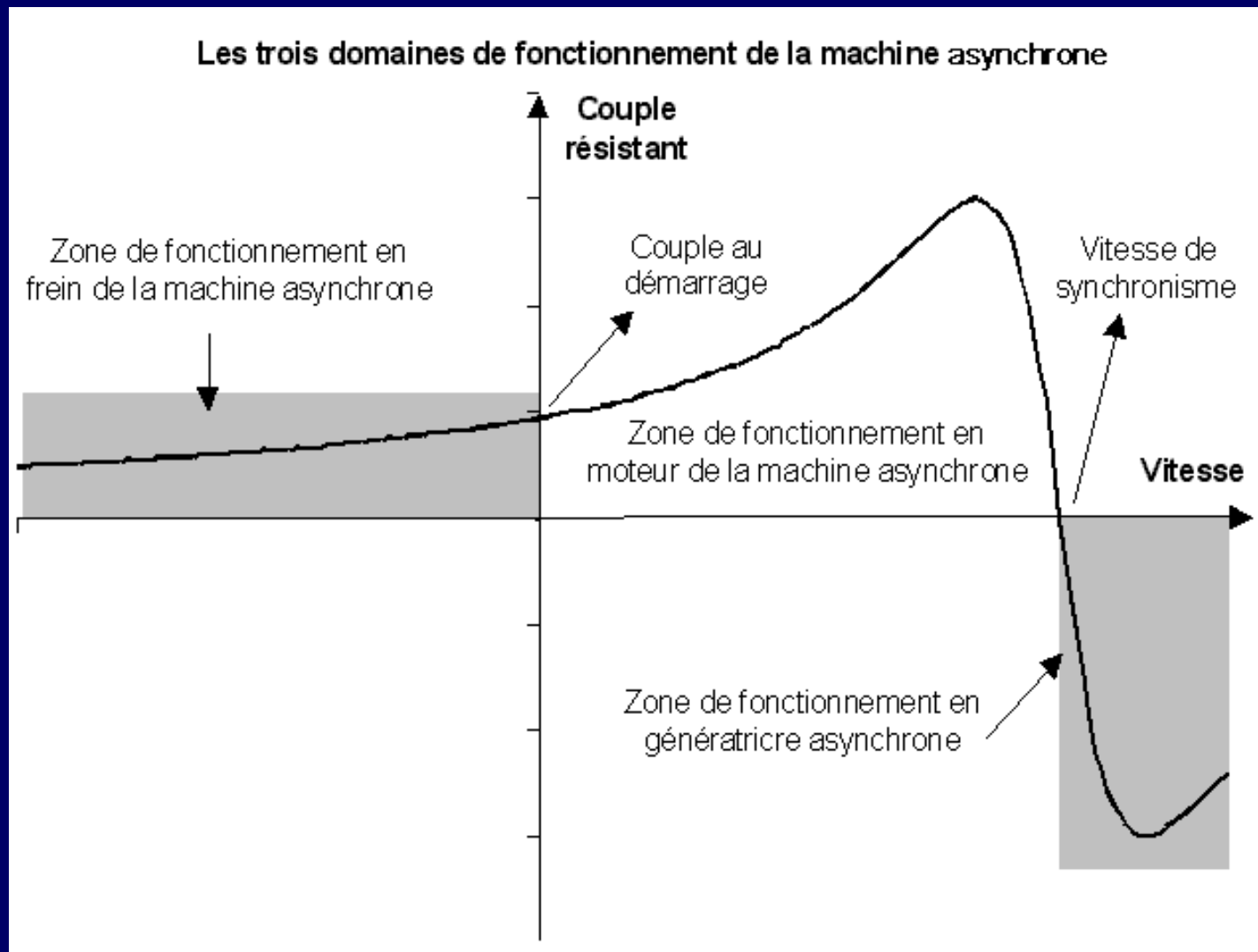
- Principe : les champs rotoriques et statoriques ne tournent pas à la même vitesse
- Stator identique à la machine synchrone
- Rotor constitué de barres parallèles en court-circuit (cage d'écureuil)



- L'asynchronisme crée une variation du flux qui engendre des courants de Foucault
- Loi de Lenz : la force électro-motrice s'oppose à la cause qui l'a créée
  - Apparition d'un couple moteur en-dessous de la vitesse de synchronisme
  - Apparition de courants induits au stator au-dessus de la vitesse de synchronisme



# Machine asynchrone



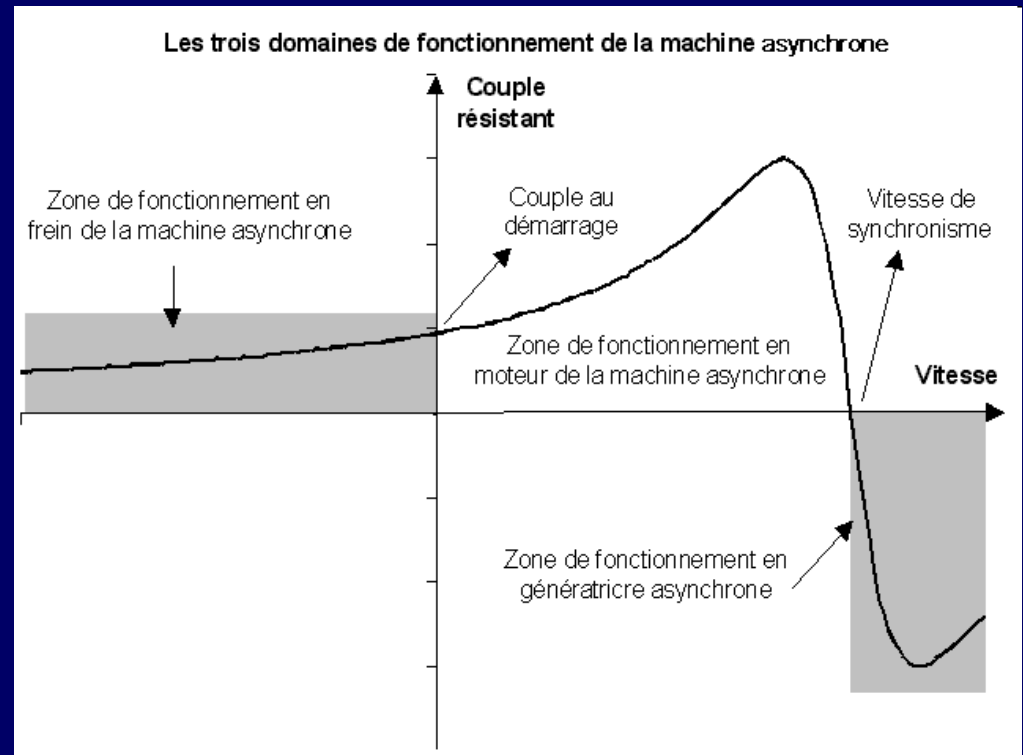
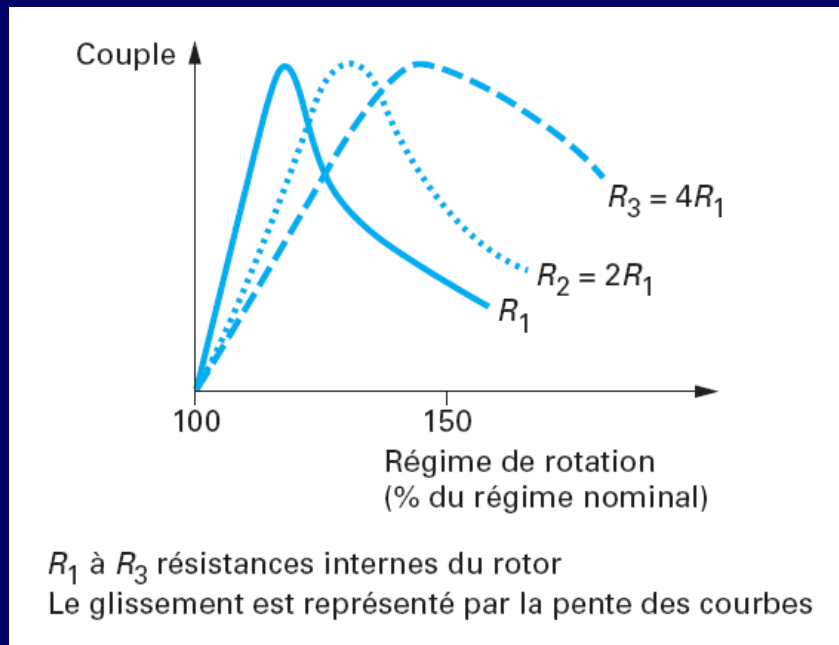
- Le couple augmente avec le glissement
- Existence d'un glissement optimal

## Machine asynchrone

- Caractéristiques de la machine à cage
  - ❖ Augmentation du nombre de pôles (présence d'un multiplicateur)
  - ❖ Matériaux
    - aluminium (léger)
    - cuivre (bon conducteur)
  - ❖ Démarrage par alimentation extérieure ou par le vent
  - ❖ Freinage par inversion de phase
  - ❖ Avantages
    - très simple
    - Adaptation possible mais limitée à des vitesses variables

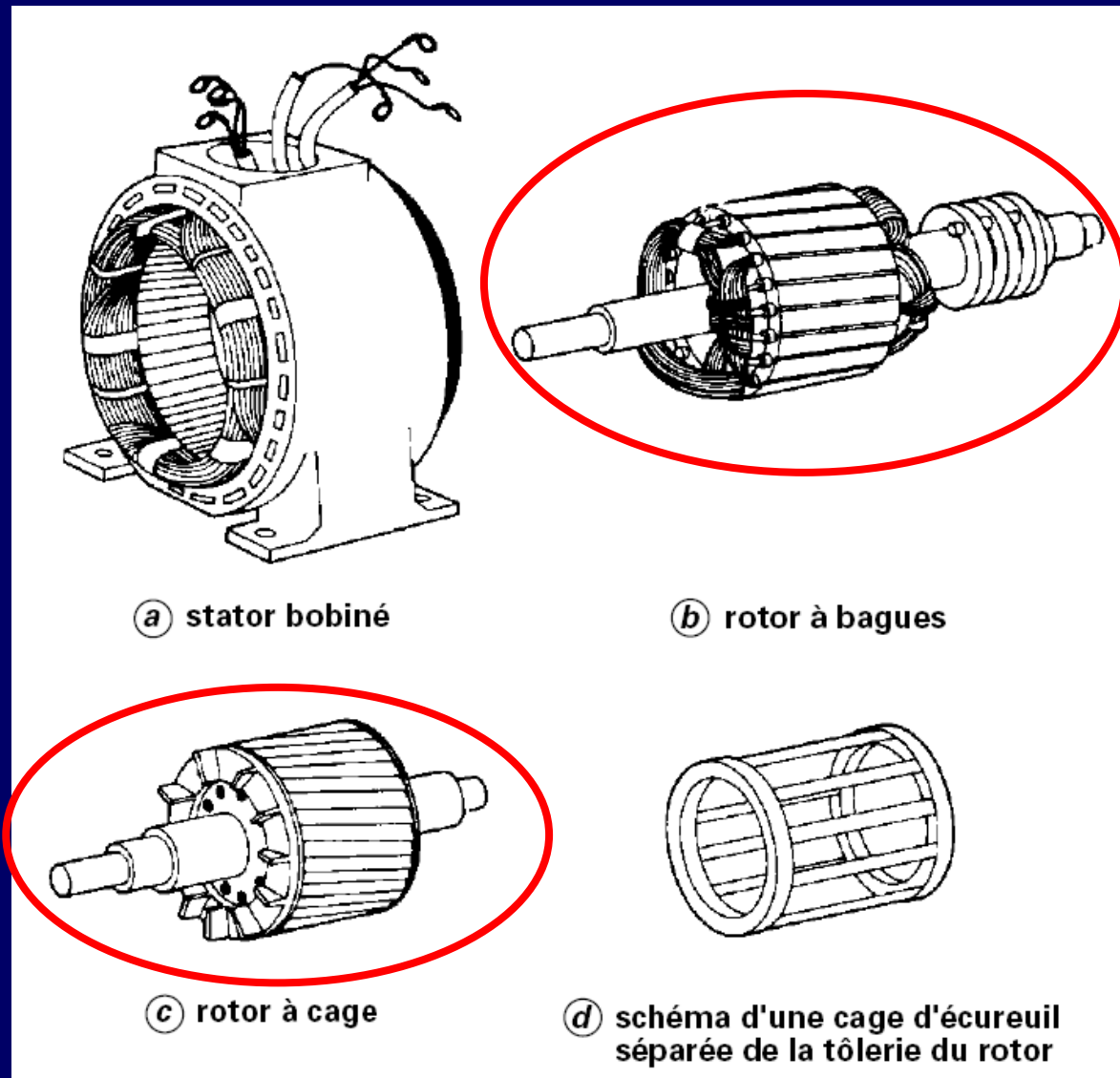
## Machine asynchrone à glissement variable

- Adapter la vitesse de la machine à la vitesse du vent
  - ❖ Orientation des pôles (servomécanismes)
  - ❖ Deux génératrices (faibles vitesses et fortes vitesses)
  - ❖ Modification du nombre de pôles (double jeu)
  - ❖ Action sur la vitesse de glissement
    - Dépend de la résistance du rotor
    - Résistances connectables



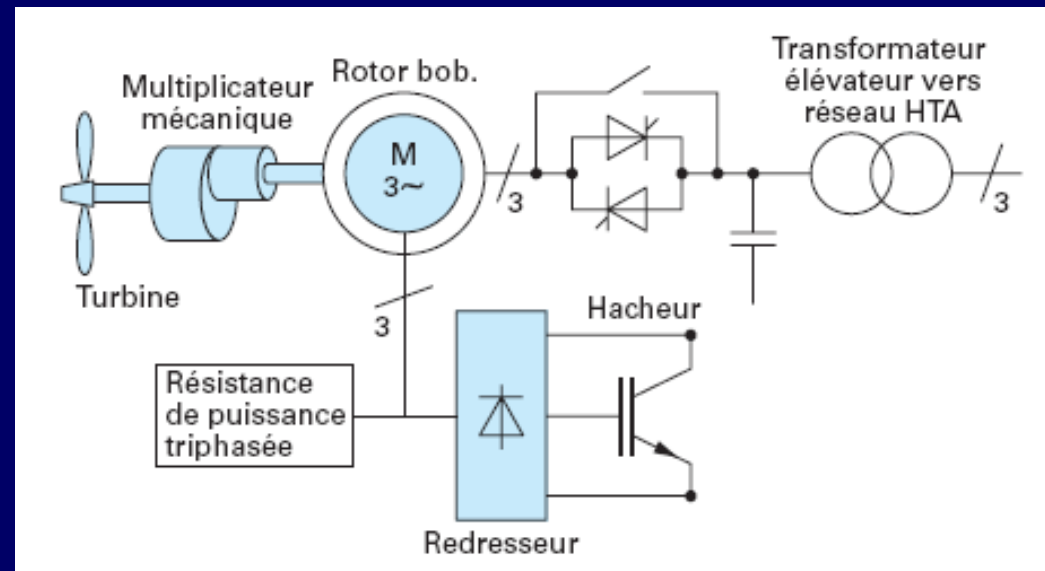
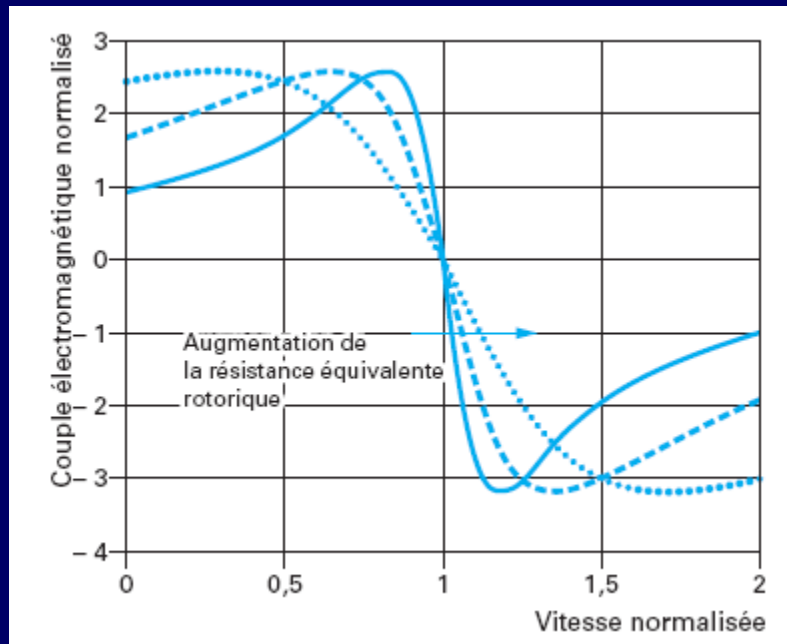
# Machine asynchrone

- Différents types



## Machine asynchrone à rotor bobiné

- Variation de la résistance rotorique



- Double alimentation

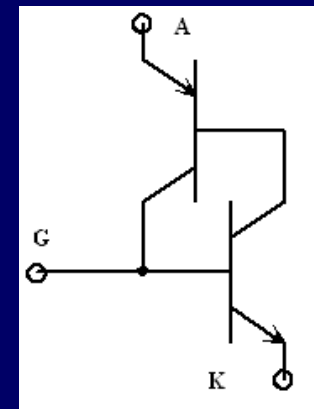
## Raccordement au réseau de la production d'une éolienne

- Problèmes

- Adaptation du courant produit à la fréquence et à la tension du réseau
- Prise en compte de la vitesse variable de rotation (filtrée par l'inertie de la turbine)
- Interaction production/consommation (chutes de tension)

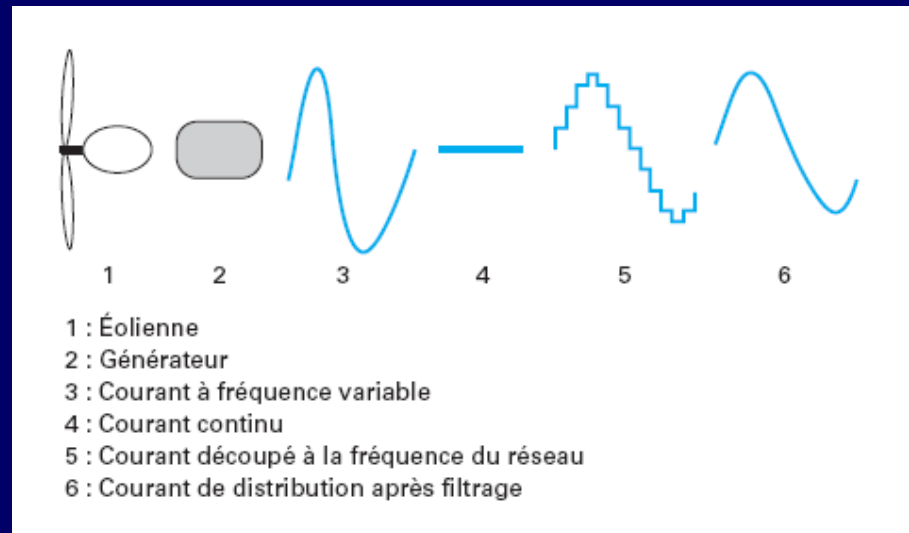
- Solutions

- Transformation : pour  $P > 100$  kW,  $U$ =quelques centaines de volts
  - ◆ 15 kV (ville), 60 kV (campagne)
- Déconnexion du réseau en phase de démarrage
- Raccordement en phase avec le réseau (contrôle électronique de la phase)
- Raccordement progressif au réseau
  - ◆ en fonction de la vitesse de rotation
    - ▲ sinon appels et pics de courant
    - ▲ sinon action mécanique sur l'arbre
  - ◆ utilisation d'un thyristor



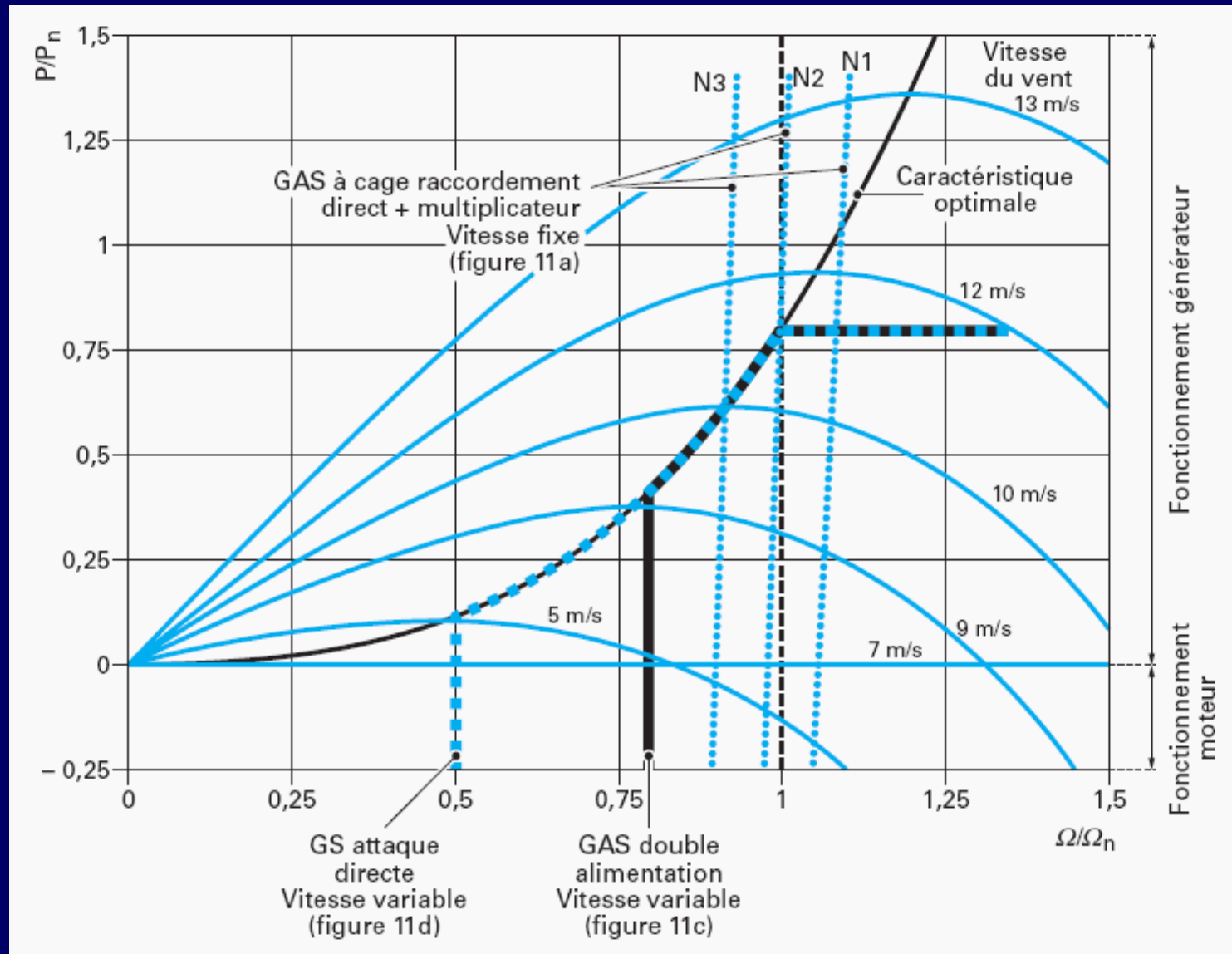
## Evolution des stratégies de raccordement

- Progrès de l'électronique de puissance



- Domination actuelle des machines asynchrones à glissement variable
  - ❖ simple
  - ❖ peu chère
- Emergence et avenir prometteur pour les machines synchrones (rotor bobiné ou à aimant)
  - ❖ chère (électronique)
  - ❖ meilleur rendement

# Adéquation turbine - génératrices





Téléchargement du cours :

<http://plasmas.free.fr/ens/>