

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 :

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

→ $B = \mu_0 n I$

μ_0 : perméabilité magnétique du vide = $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m

ε_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	δ
50 Hz	9,38 mm
60 Hz	8.57 mm
10 kHz	0.66 mm
100 kHz	0.21 mm
1 MHz	66 μ m
10 MHz	21 μ 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)

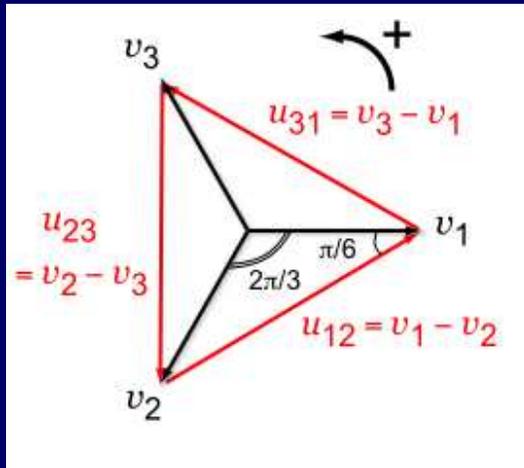
$$\begin{aligned}
 P &= V \sqrt{2} \sin(\omega t) \cdot I \sqrt{2} \sin(\omega t + \phi) \\
 &+ V \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot I \sqrt{2} \sin\left(\omega t + \phi - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 &+ V \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot I \sqrt{2} \sin\left(\omega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

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

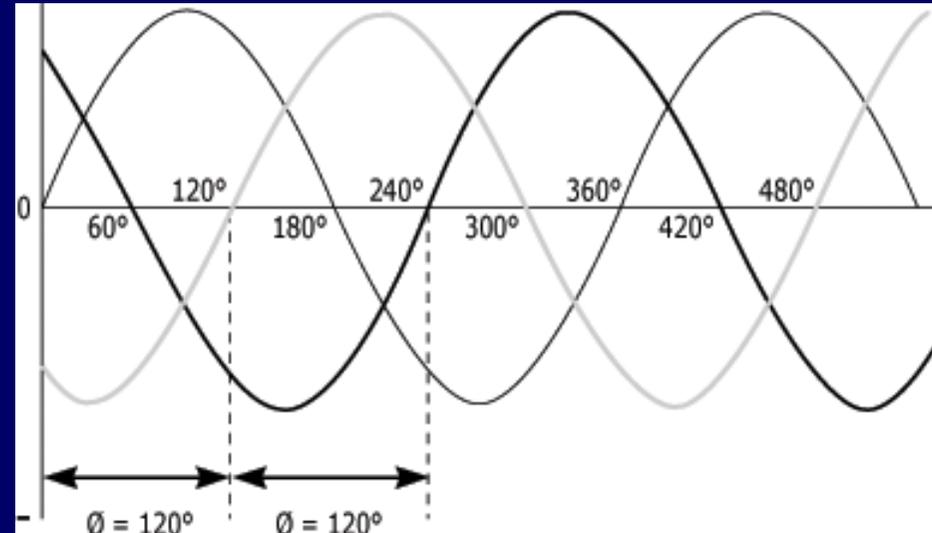
$$\left. - VI \cos(2\omega t + \phi) - VI \cos\left(2\omega t + \phi - \frac{4\pi}{3}\right) - VI \cos\left(2\omega t + \phi - \frac{8\pi}{3}\right) \right\} = 0$$

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

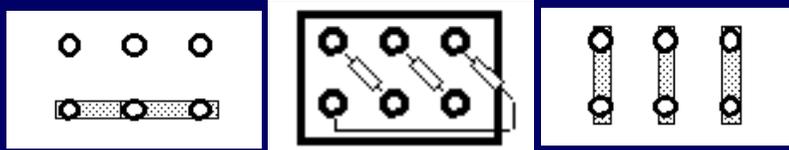
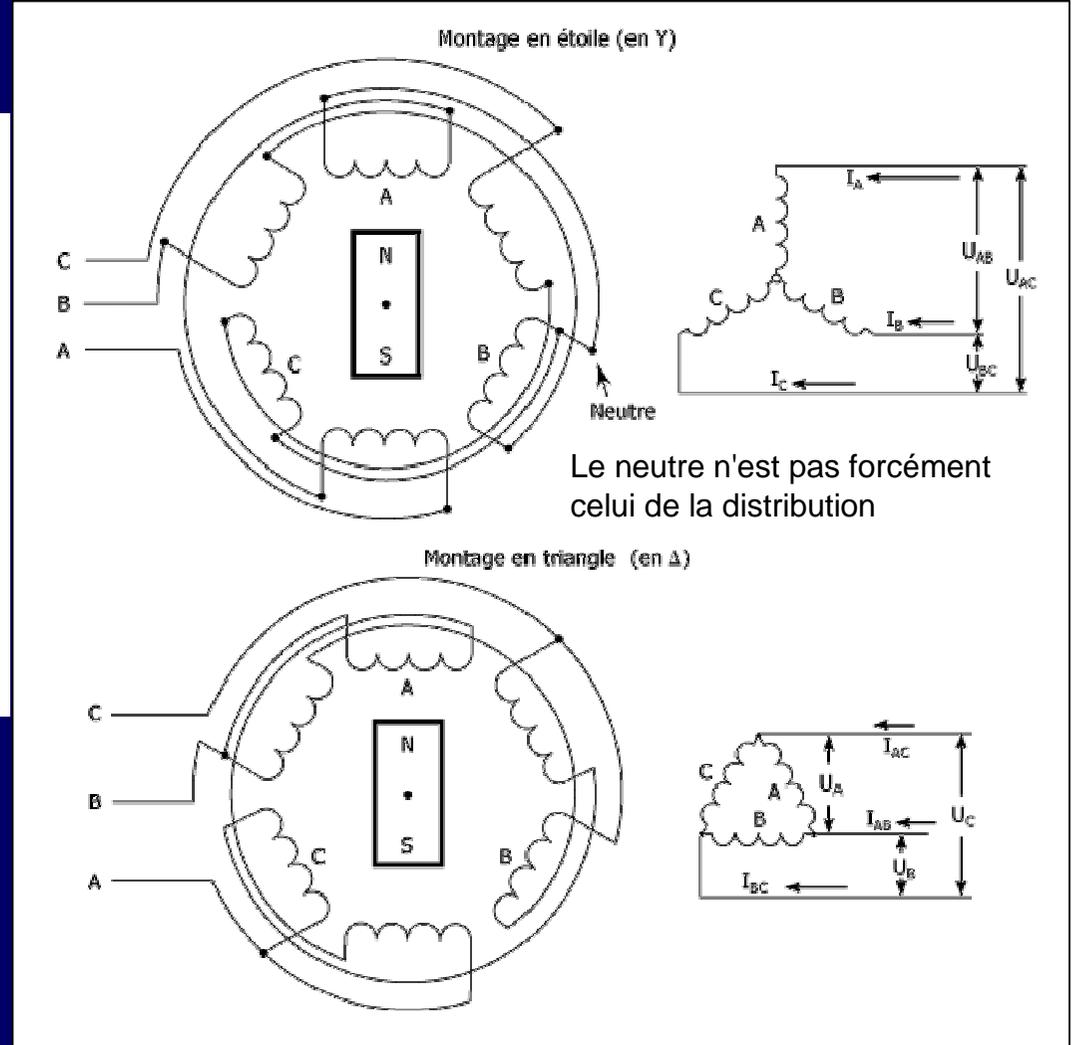
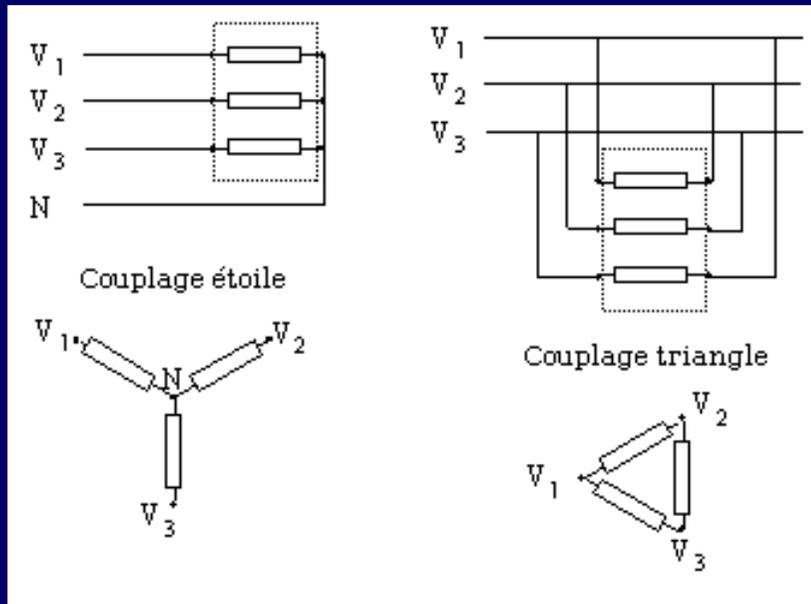
Etoile (Y) et Triangle (Delta)

Forte tension

Faible tension

Plus de couple

Plus de vitesse



I : courants de ligne

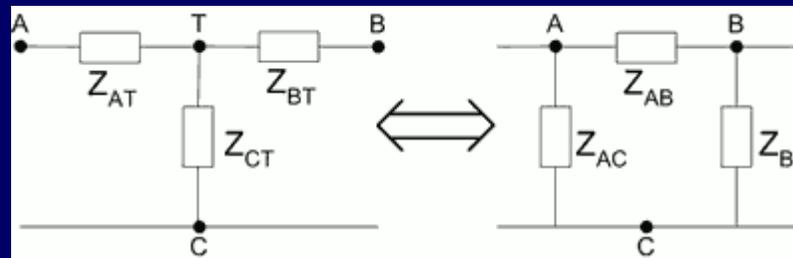
J : courants de phase

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

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

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

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

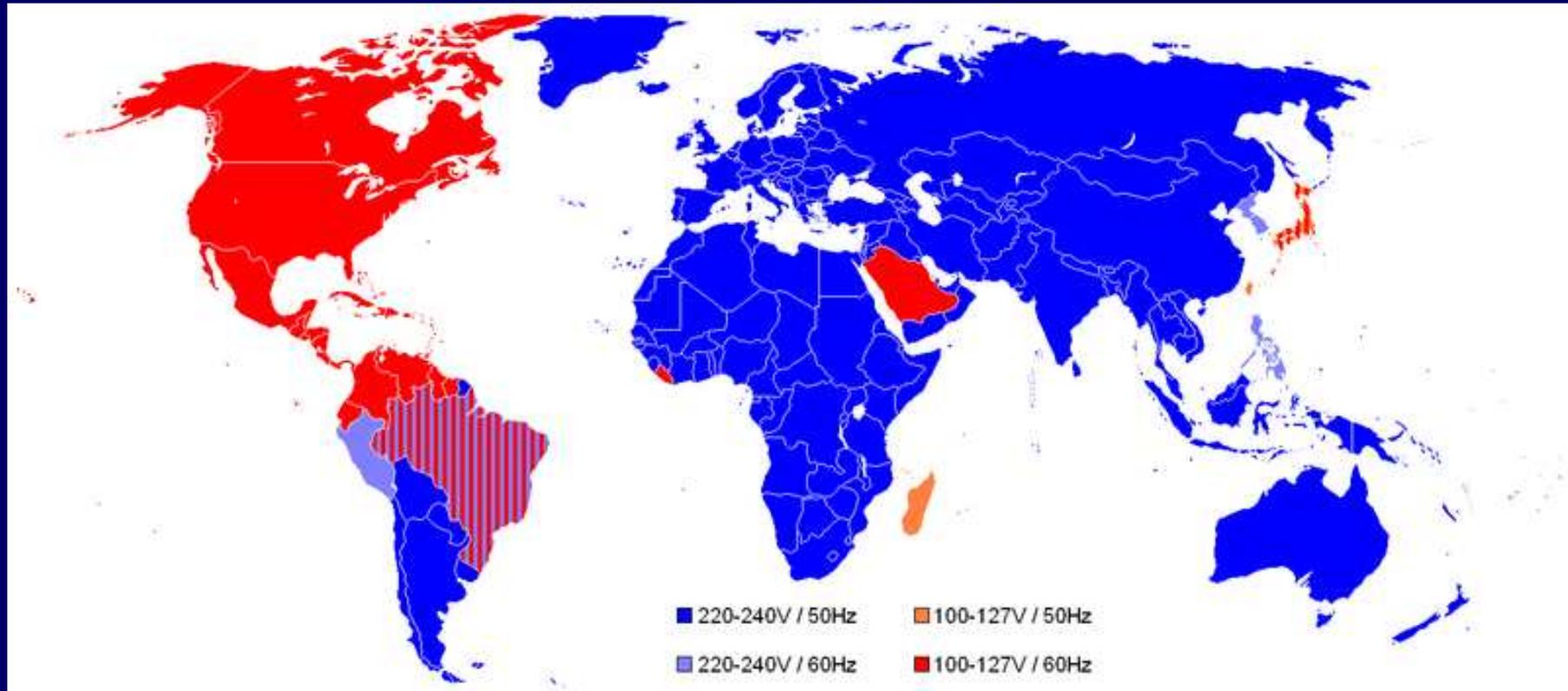
$$Z_{AT} = \frac{Z_{AB} \cdot Z_{AC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{AC}}$$

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

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

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

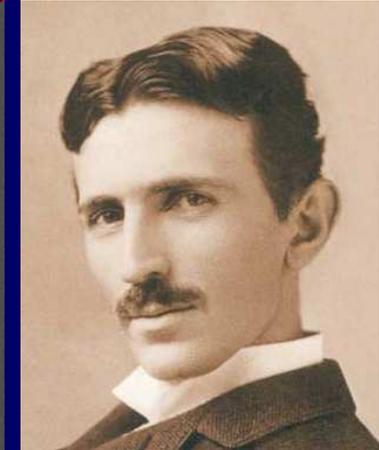


Alternatif triphasé

Lucien Gaulard



Nikola Tesla



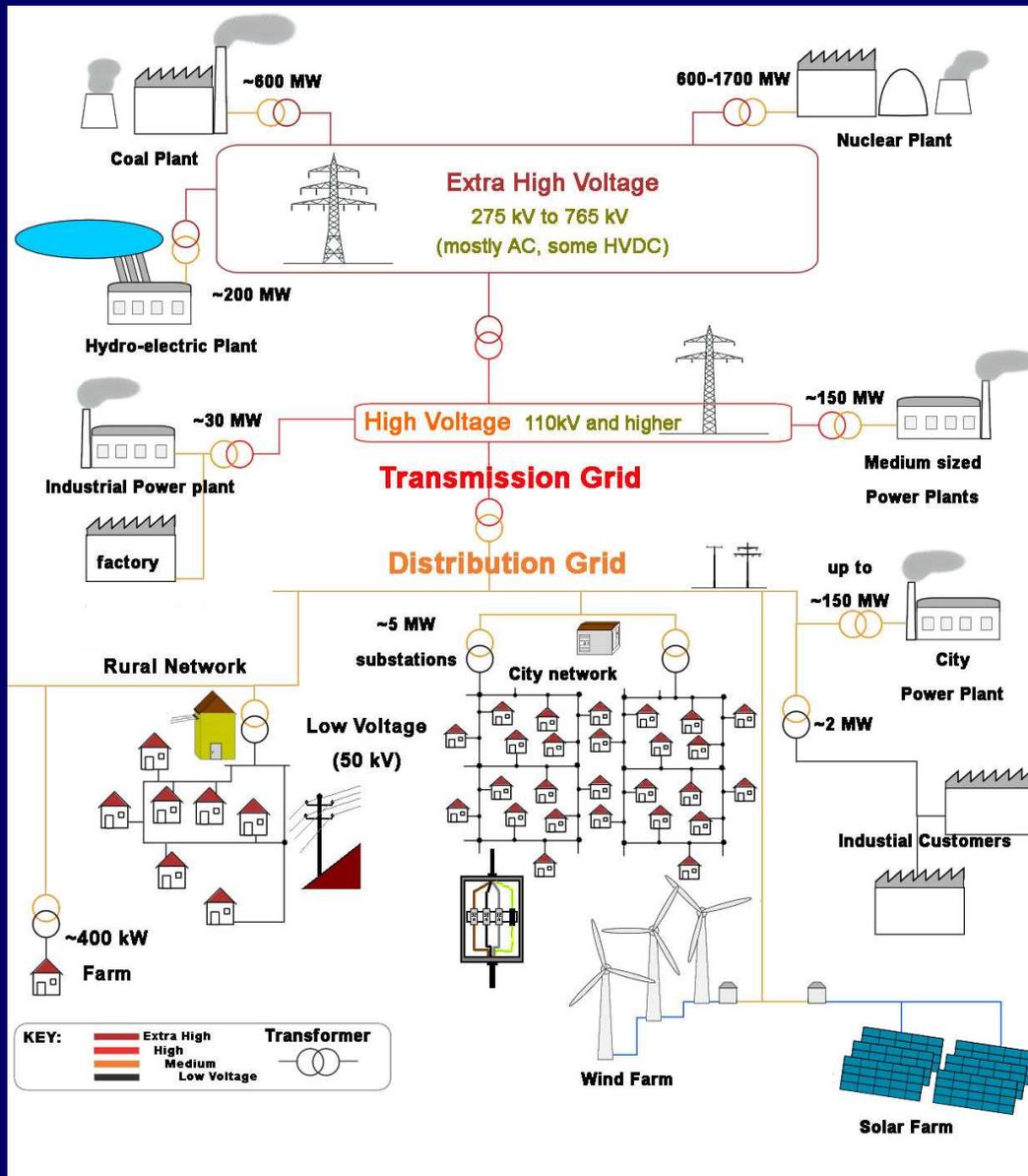
Répères :

- 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

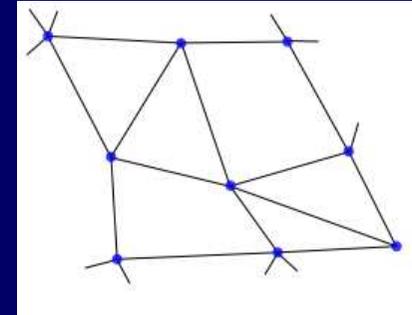
Jonas Wenström



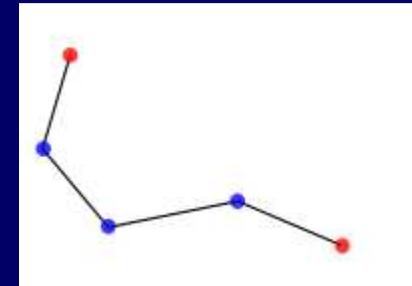
Réseau électriques : structures



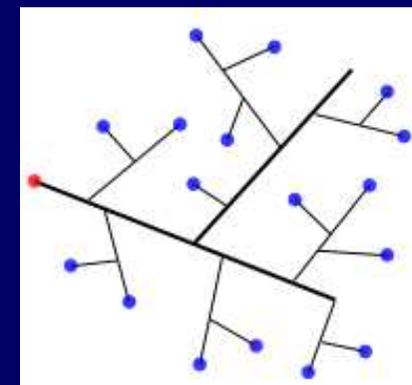
Maille : transport HT



Boucle : distribution rurale



Boucle : distribution urbaine



Réseaux électriques : transports de l'électricité

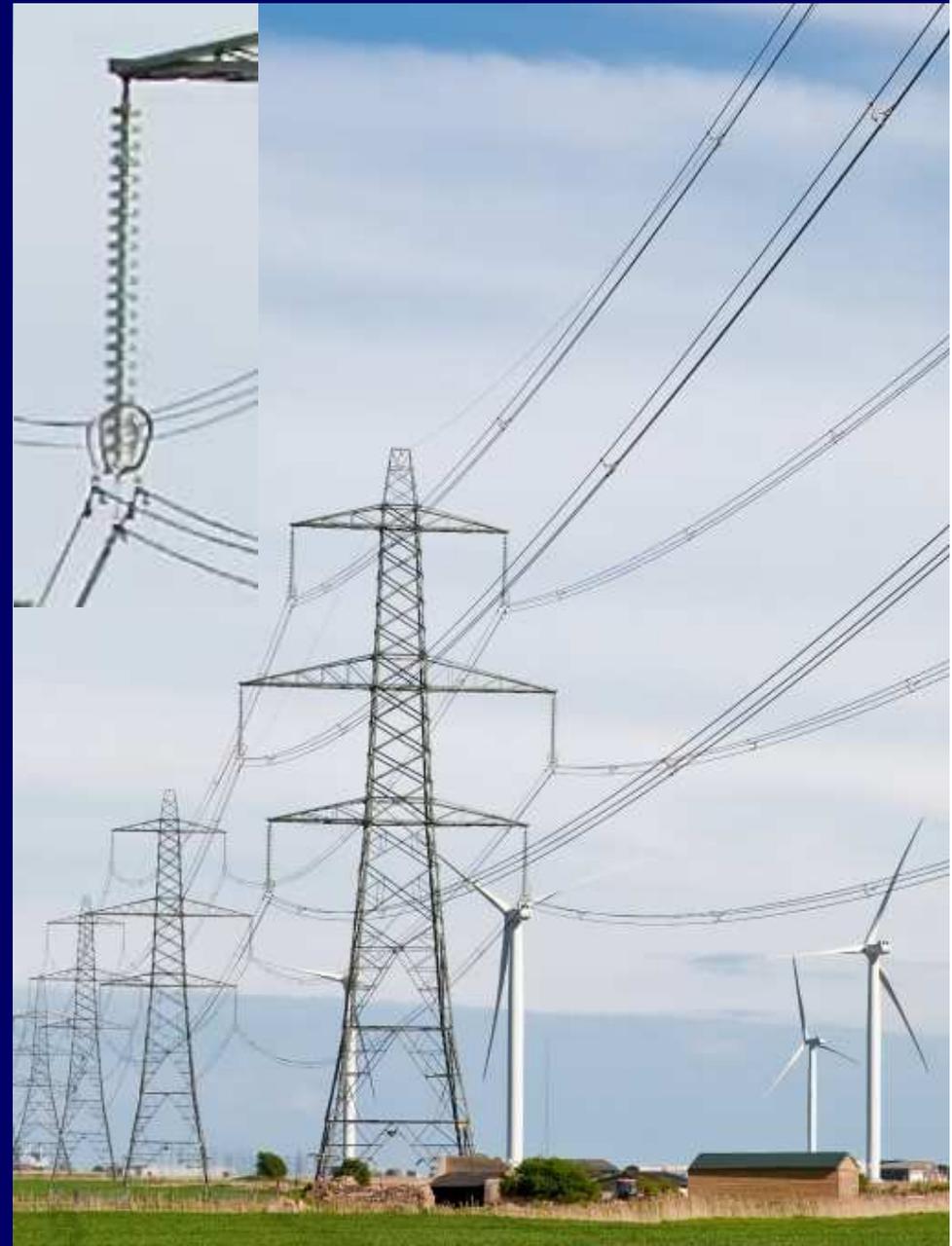
Famille de tensions

- 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

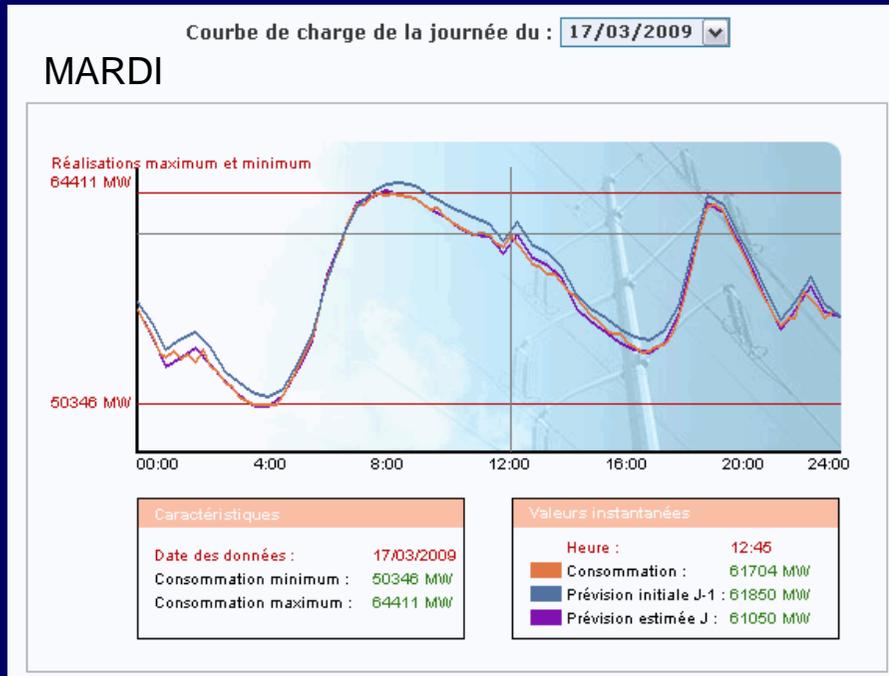
Intensité

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

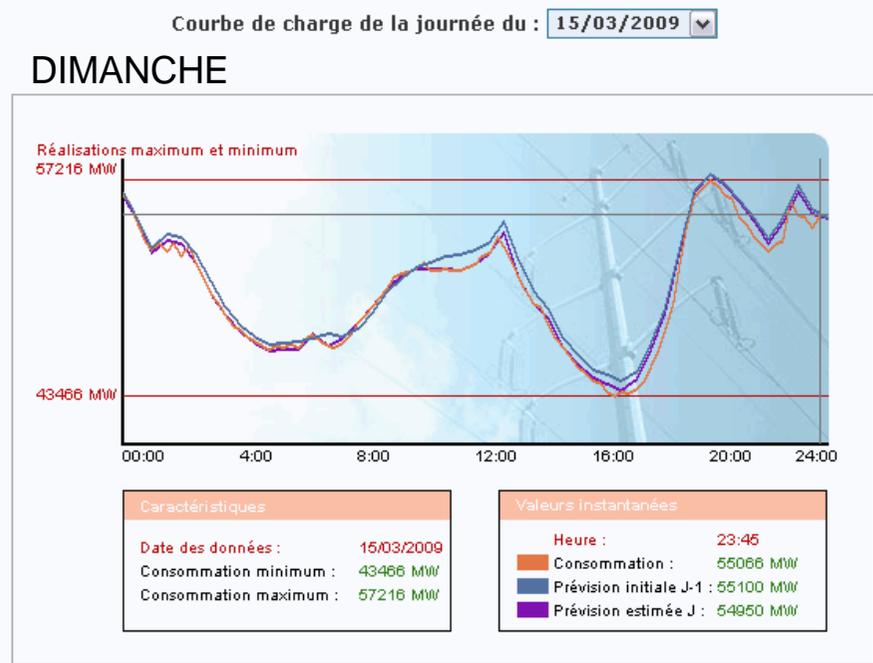
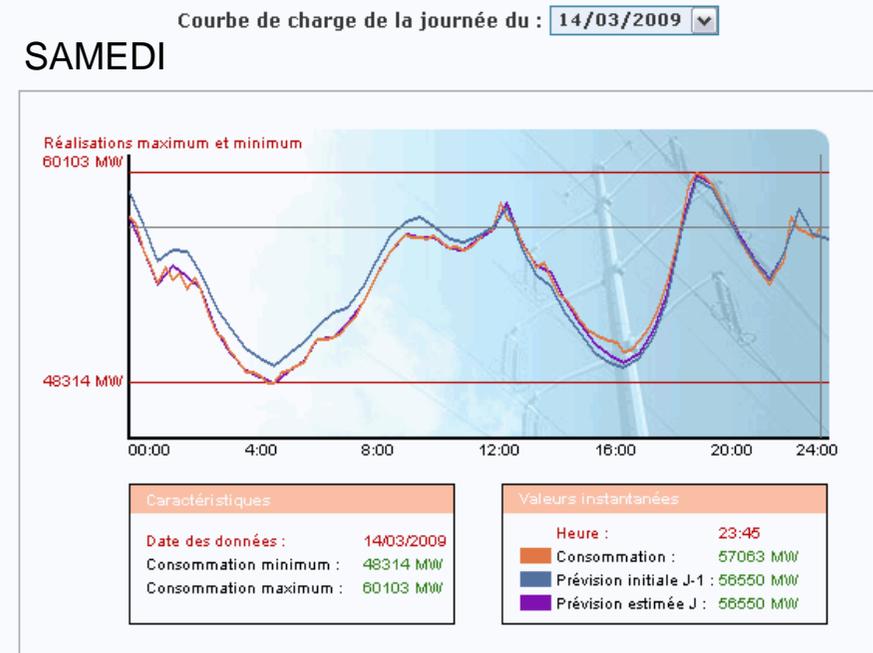
Intensité de court-circuit (intensité maximale disponible)

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

Consommation électrique

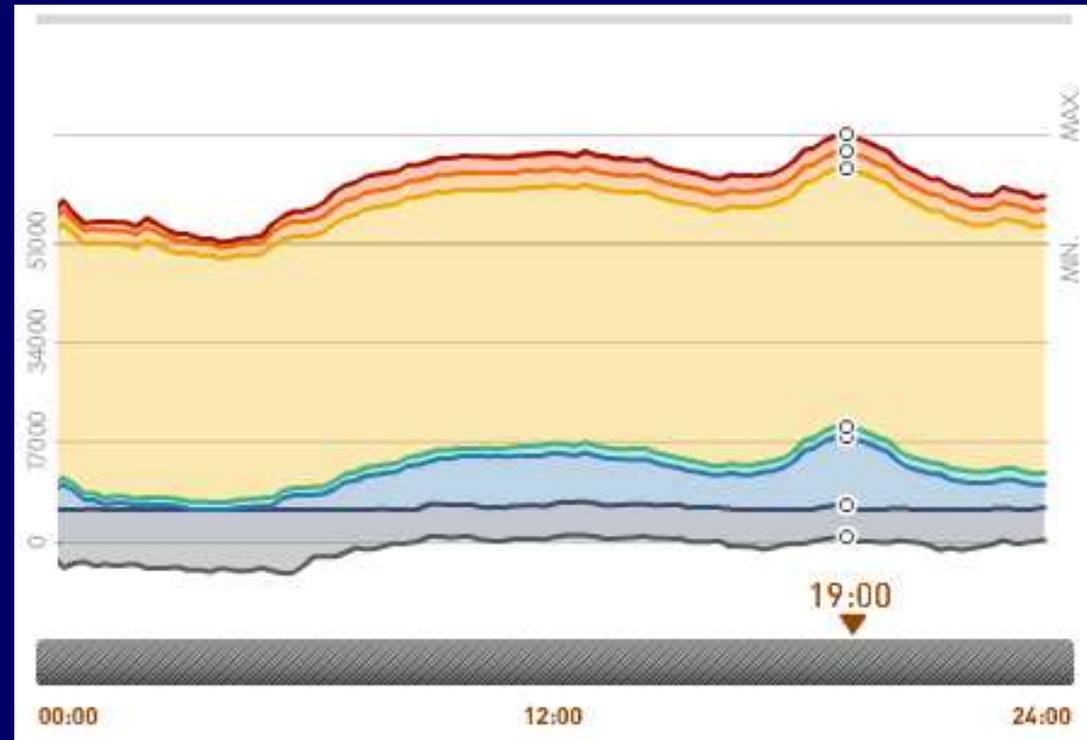
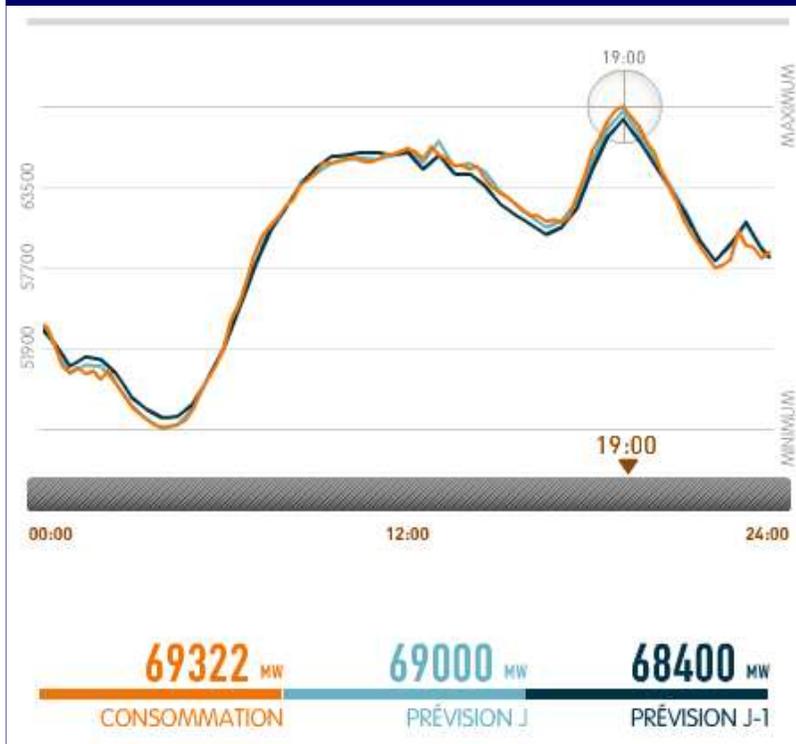


- Forte consommation : baisse de la fréquence
- Faible consommation : hausse de la fréquence
- <http://www.rte-france.com>



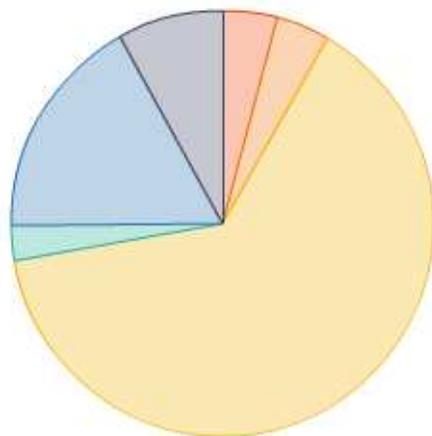
Adaptation de la production

2 novembre 2010

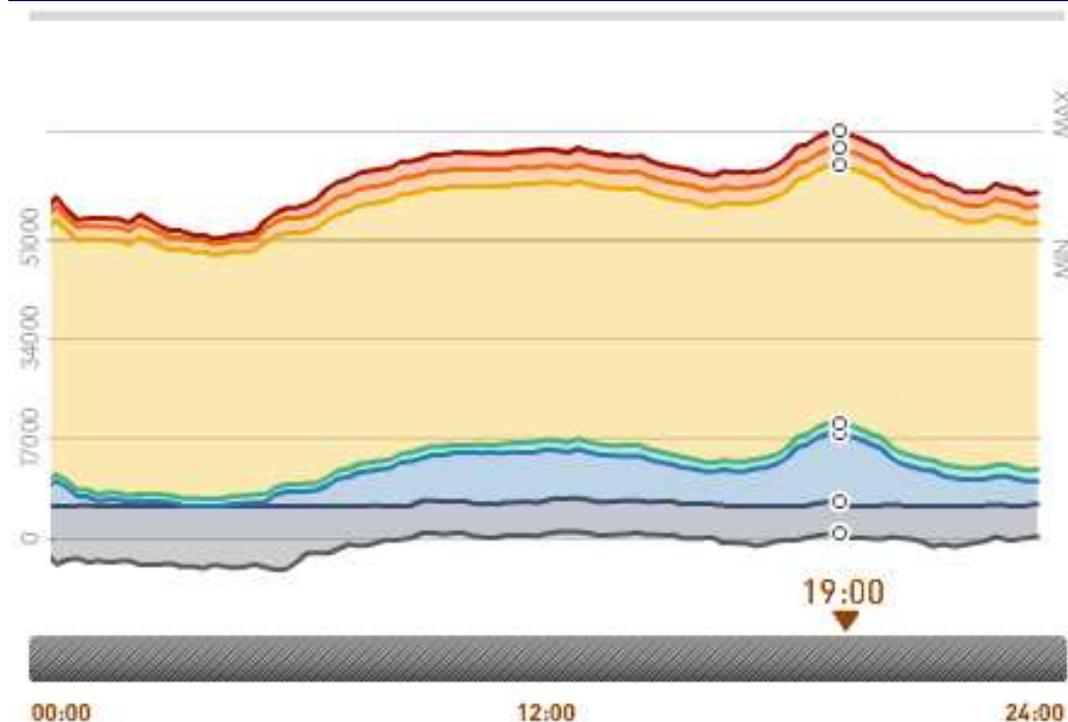


Détails de la production

2 novembre 2010 : 19h

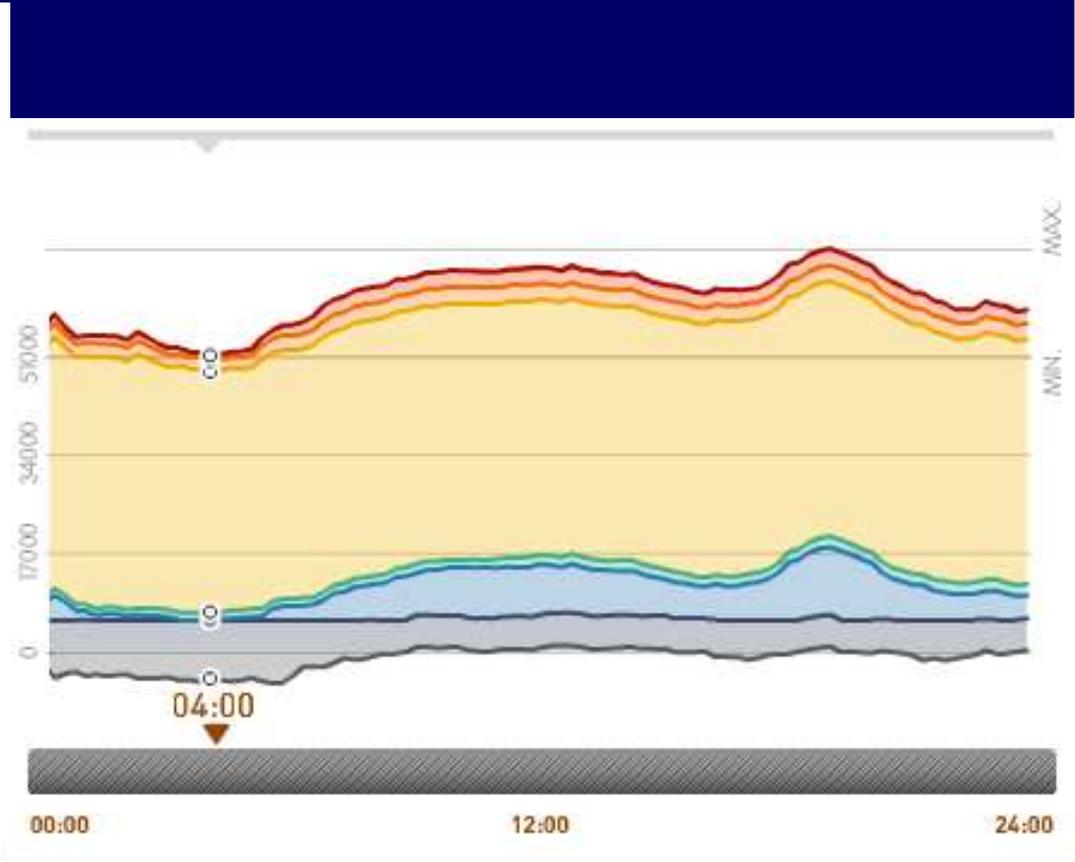
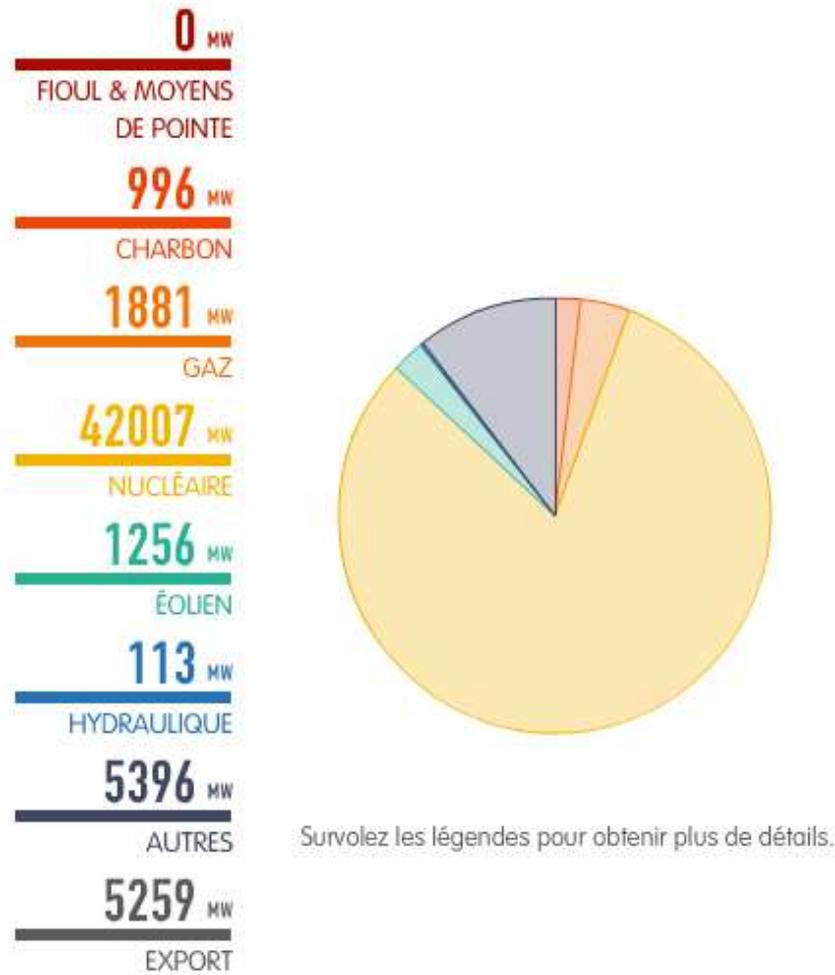


Survolez les légendes pour obtenir plus de détails.



Détails de la production

2 novembre 2010 : 4h



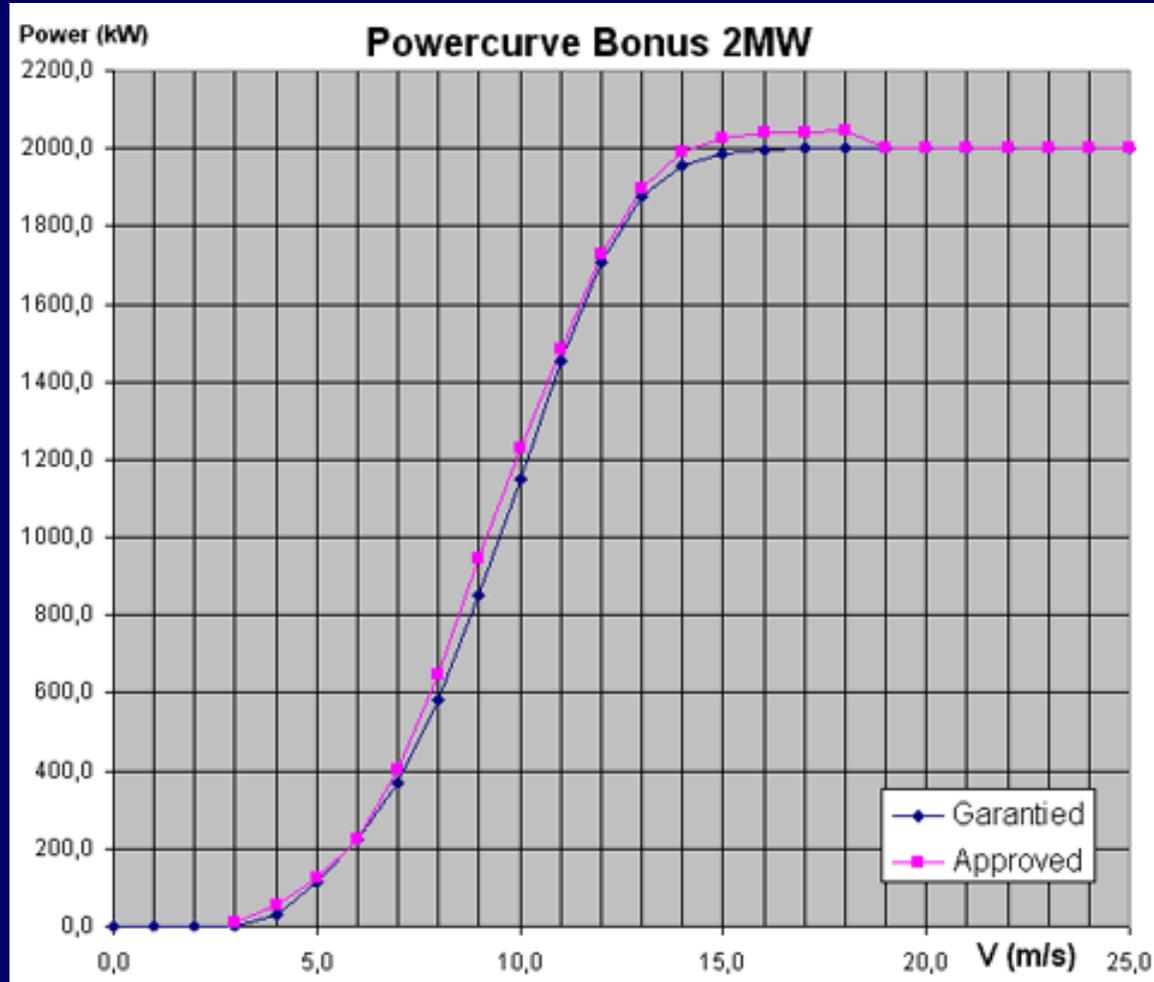
Réseaux intelligents – Smart grid

- 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

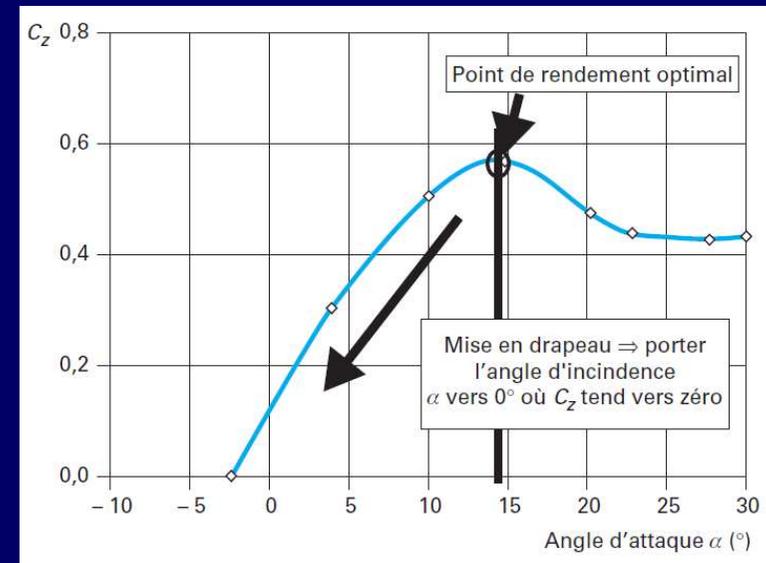
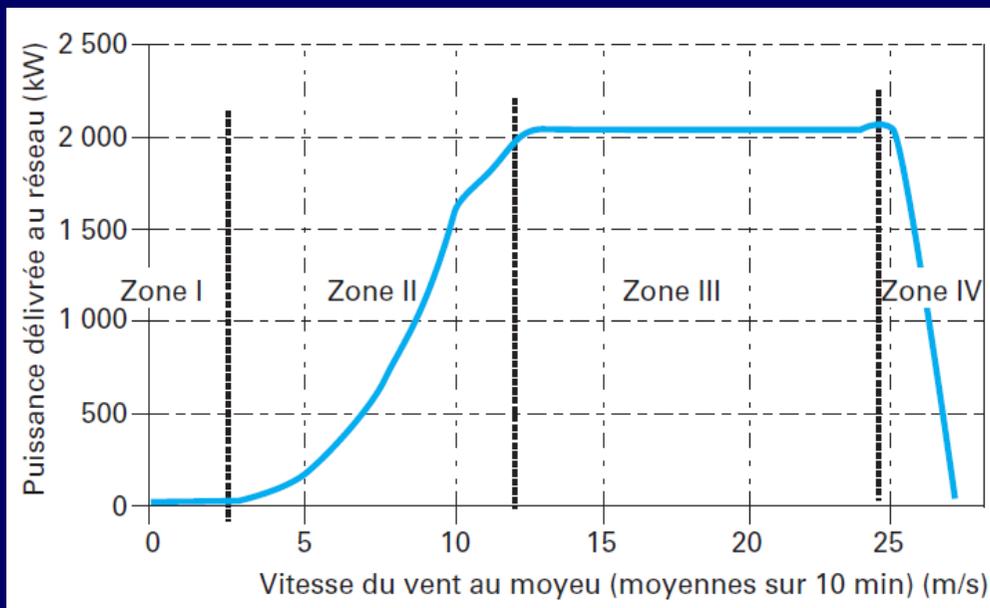
- But à petite échelle
 - permettre une réduction de la consommation
 - faciliter l'intégration des sources d'énergie locales
 - rendre l'utilisateur maître de sa consommation
 - coupler la gestion des appareils consommateurs

Conversion énergie mécanique - énergie électrique : l'éolienne

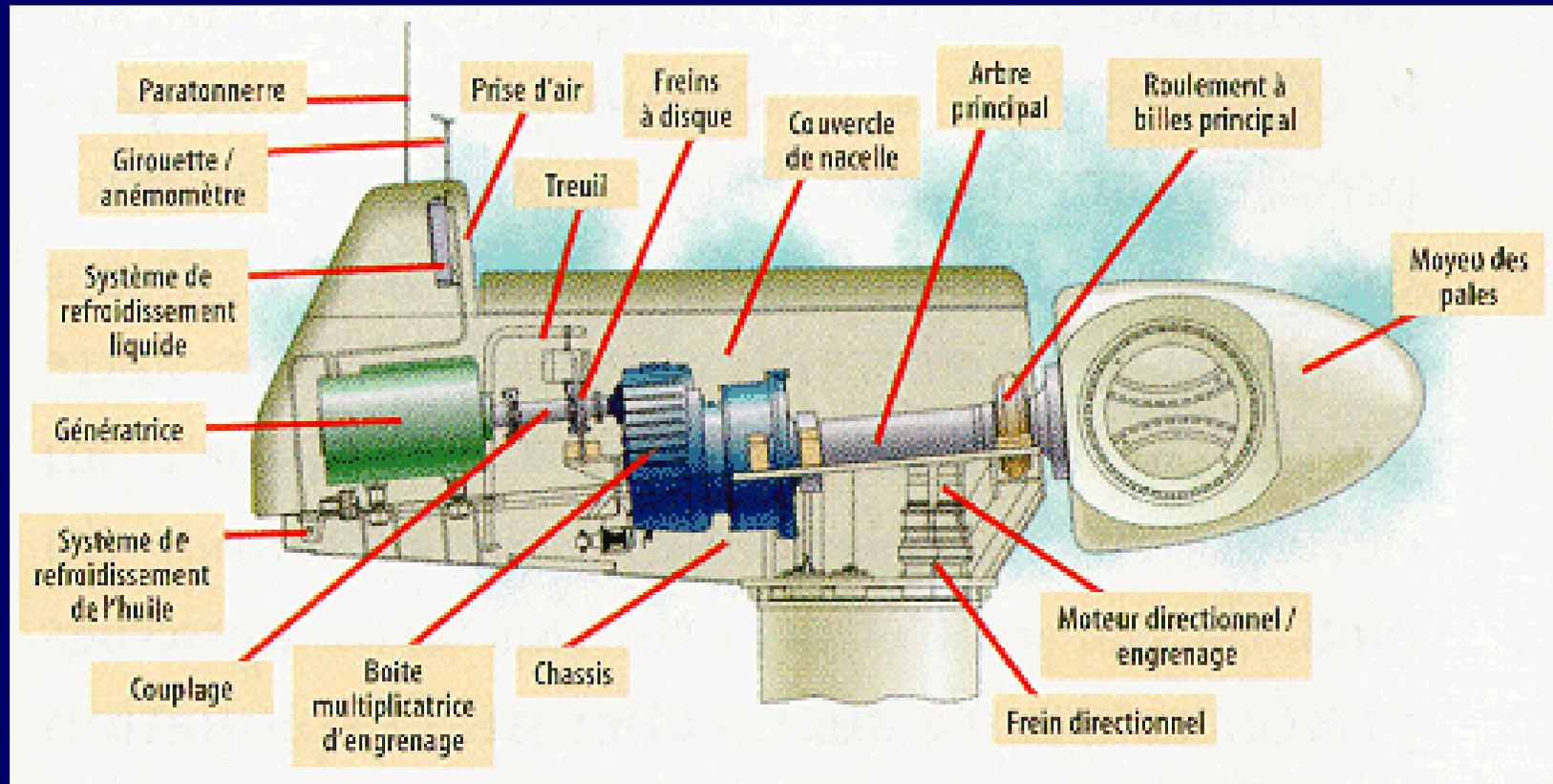


Efficacité aérodynamique et vitesse de rotation

- 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



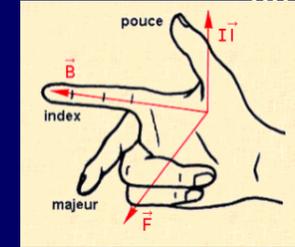
- Arbre
- Multiplicateur
- Frein
- Génératrice

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

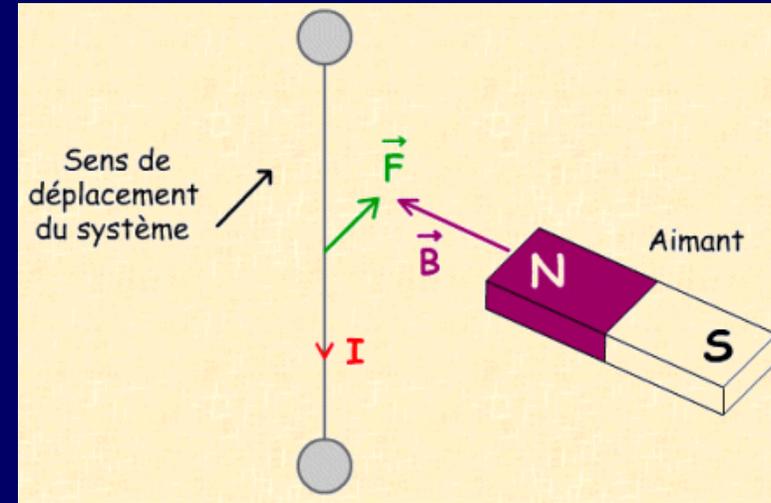
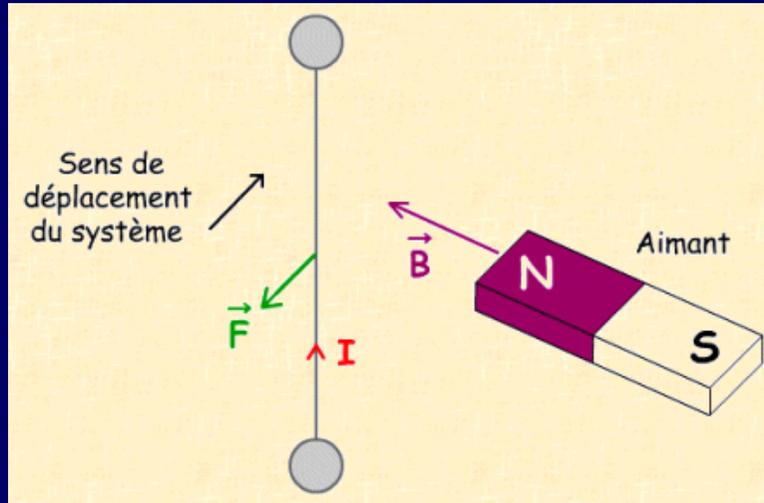
- Injecter l'énergie produite dans le réseau électrique
 - ❖ Problème de phase
 - ❖ Problème d'appels de courant
 - ❖ Problème de charge (contrainte mécanique sur l'arbre)
 - ❖ Problème de pénétration de l'énergie éolienne sur le réseau
 - 10% : limite classique jusqu'il y a quelques années
 - 2008 : 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

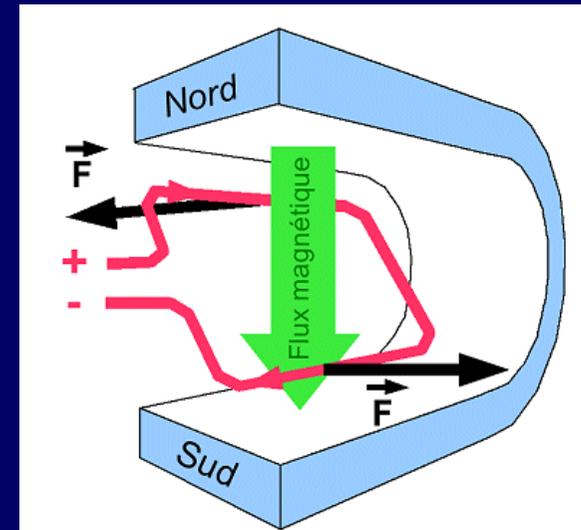
$$d\vec{F} = I \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B}$$



- Loi de Lenz-Faraday

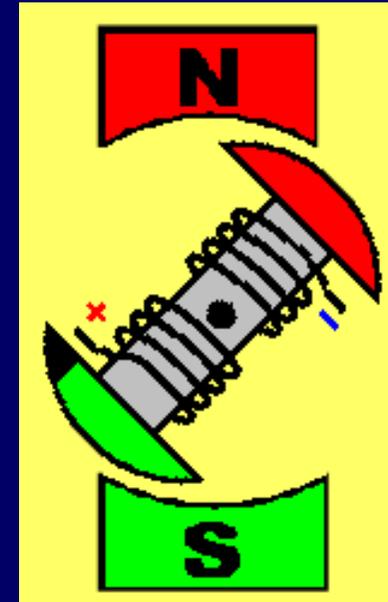
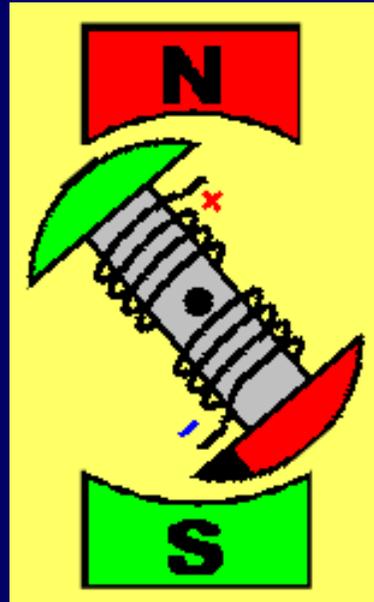
$$e = -\frac{d\phi}{dt}$$

- Rotor et Stator
- Balais / charbons / collecteurs tournants

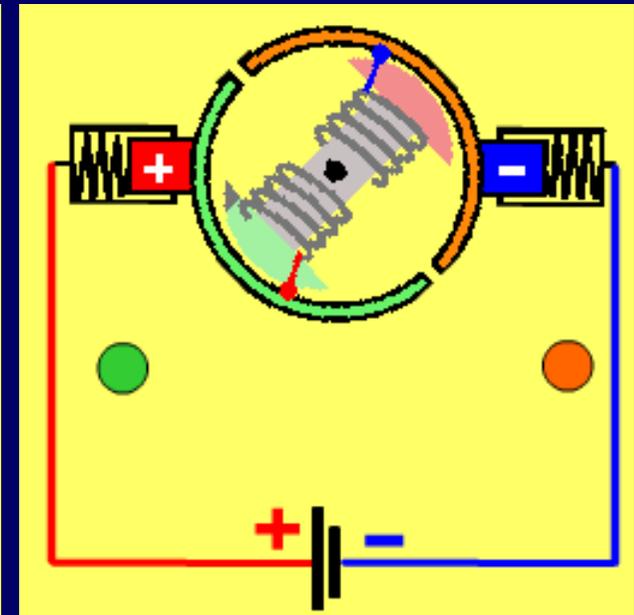
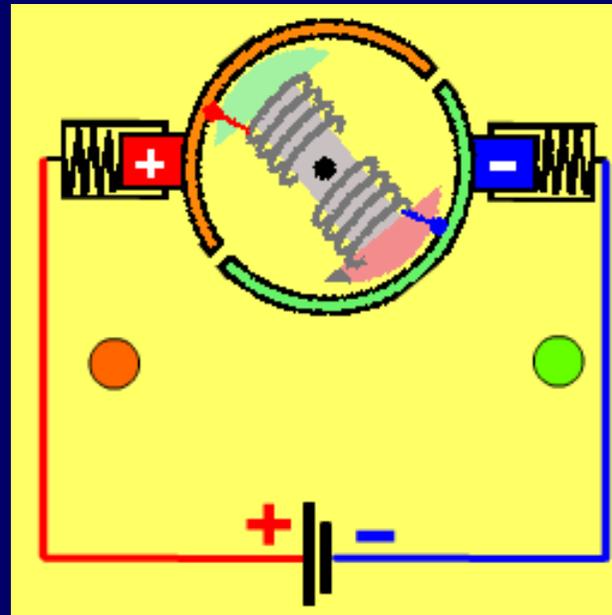


Stator : aimants permanents ou inducteurs bobinés

- 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 (Fe_2O_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, 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

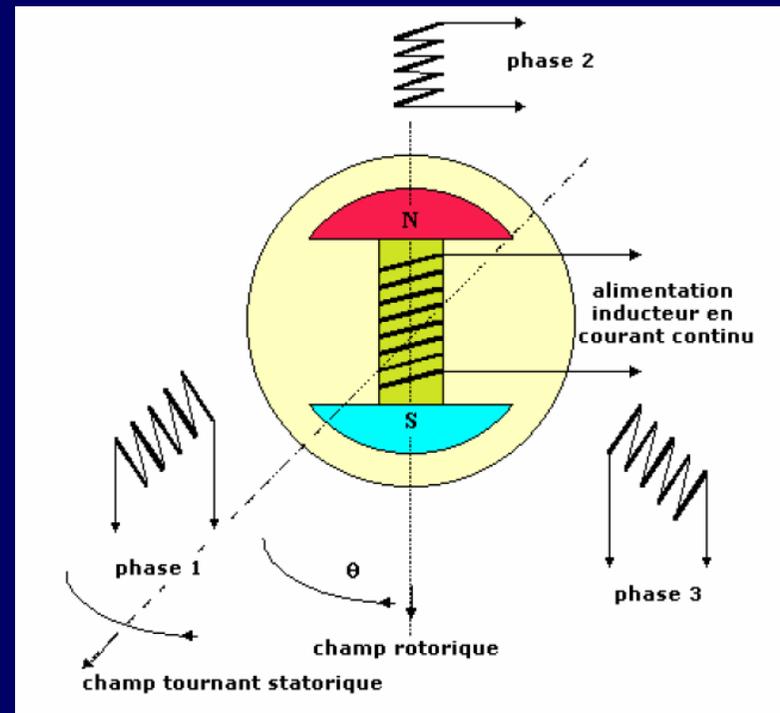
- Problèmes posés par les collecteurs : usure, arcs
- Moteur sans collecteurs
 - Rotor : aimant permanent
 - Détection électronique de la position
- Détection
 - Capteur à effet Hall
 - Capteur revolver (précision $\frac{1}{4}^\circ$)
- Commutation
 - Signaux rectangulaires : plus simples
 - Signaux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

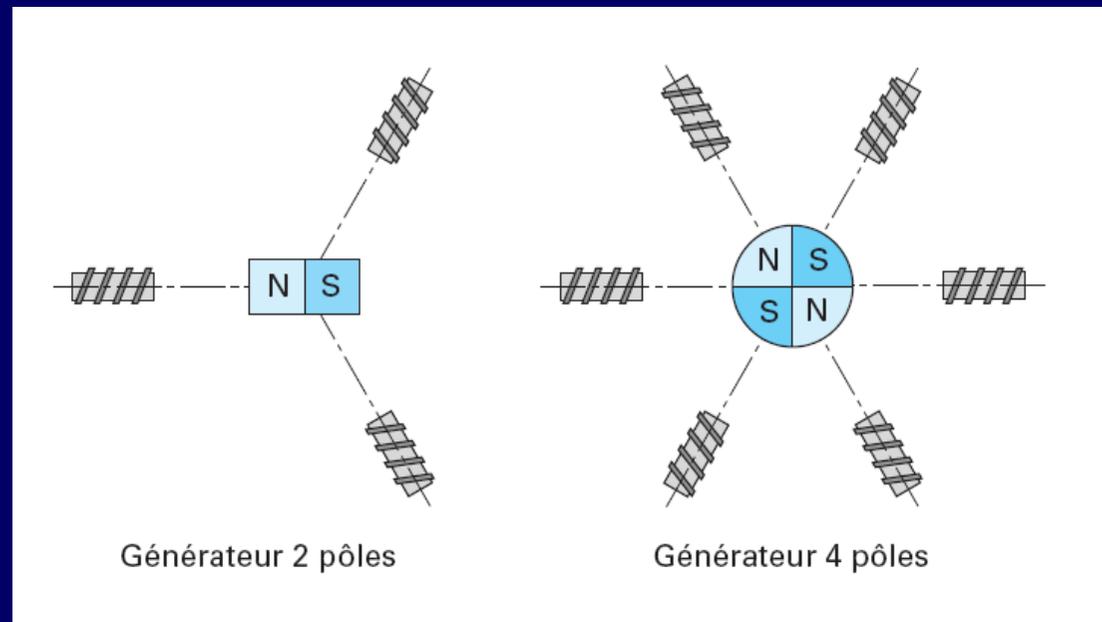
Machine synchrone (alternateur)

- 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



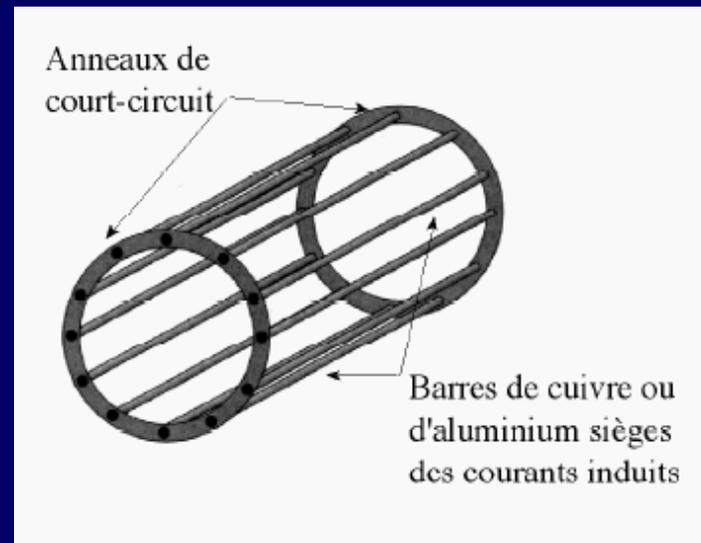
Machine synchrone (alternateur)

- 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



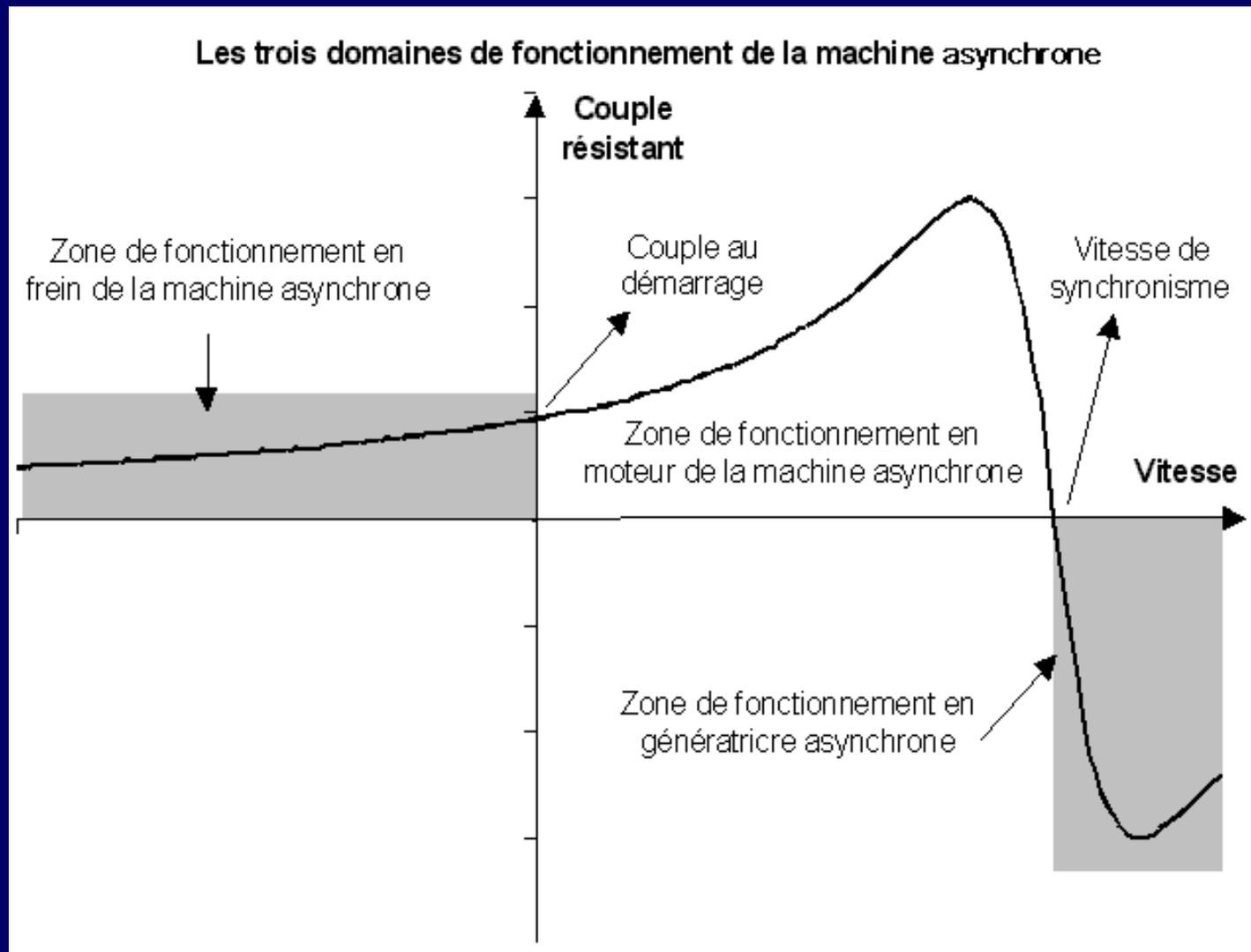
Machine asynchrone

- 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



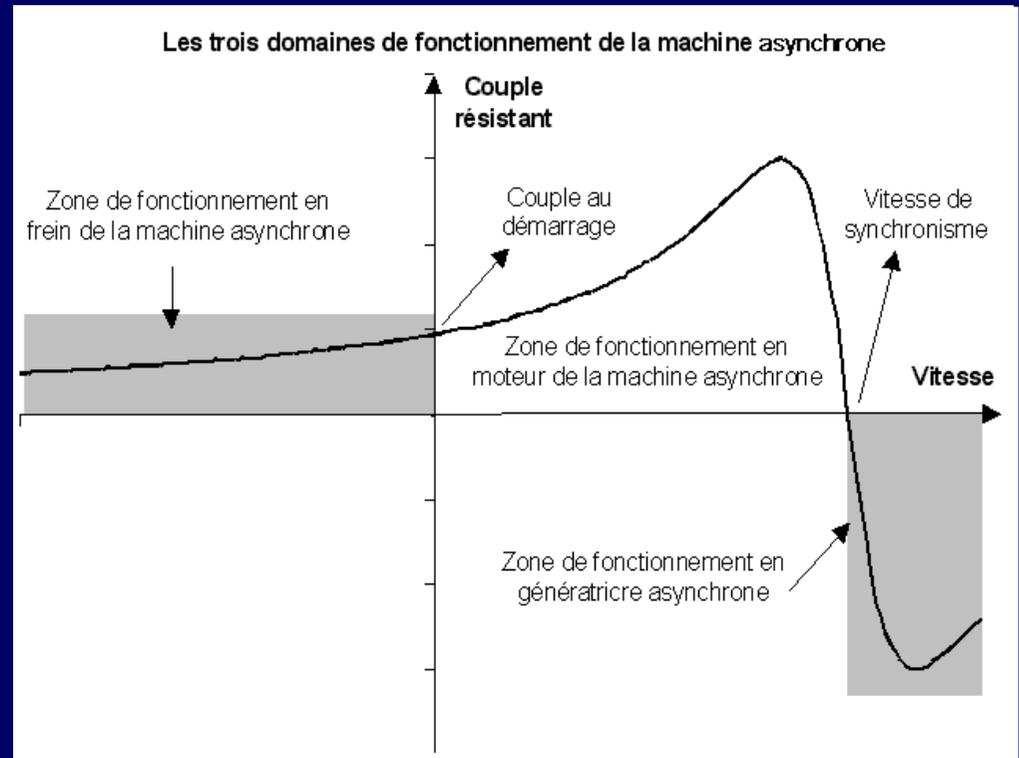
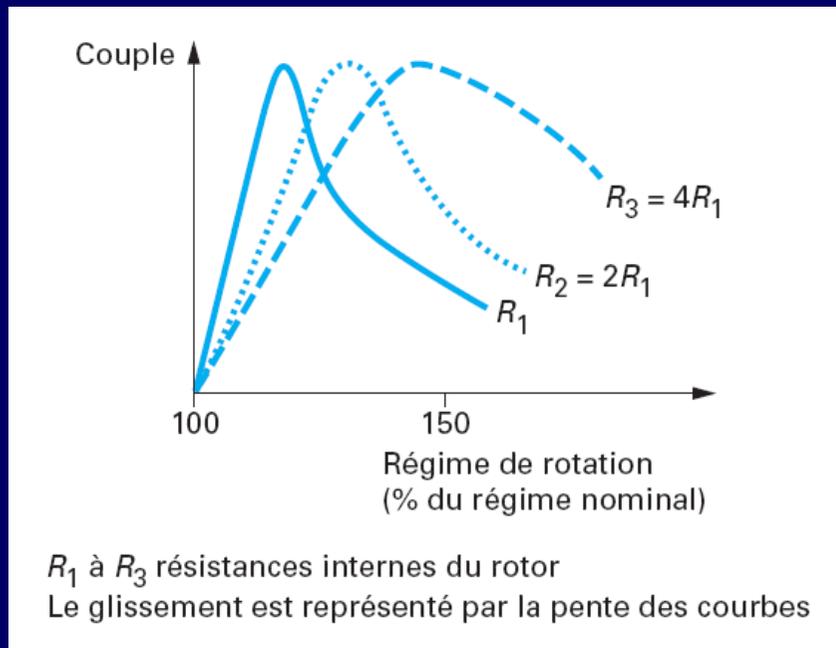
- Le couple augmente avec le glissement
- Existence d'un glissement optimal

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

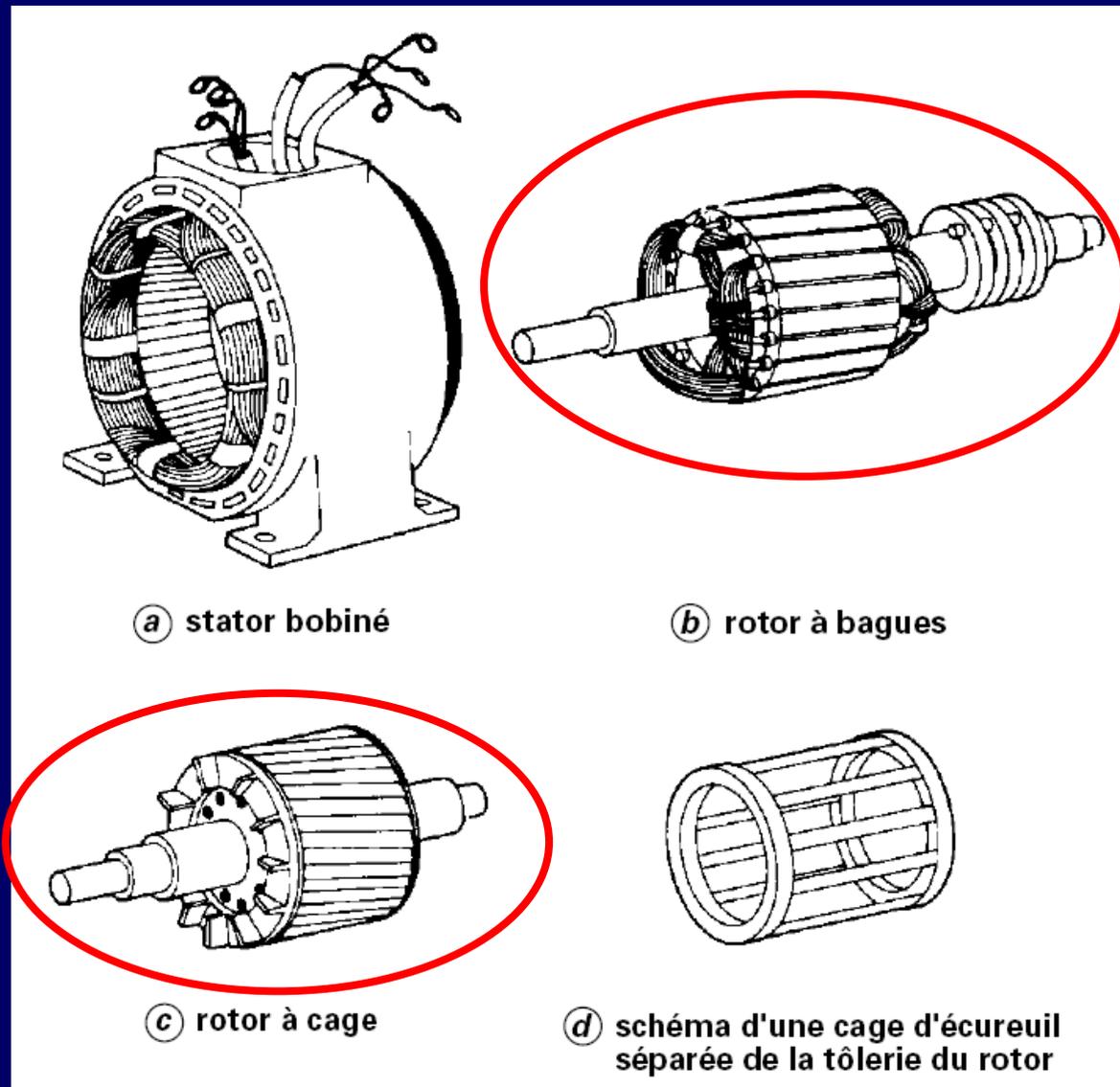
Machine asynchrone à glissement variable

- 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



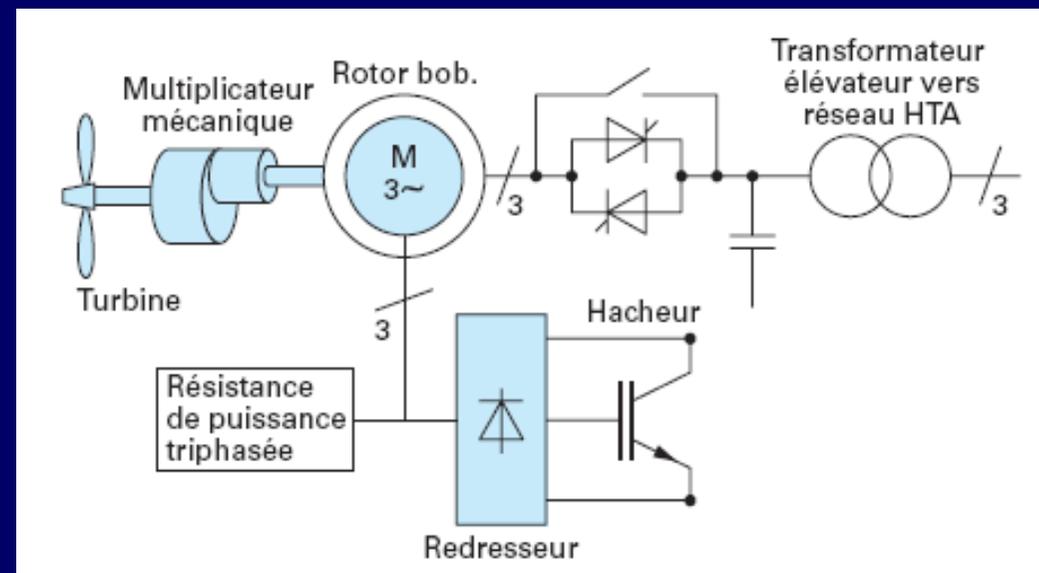
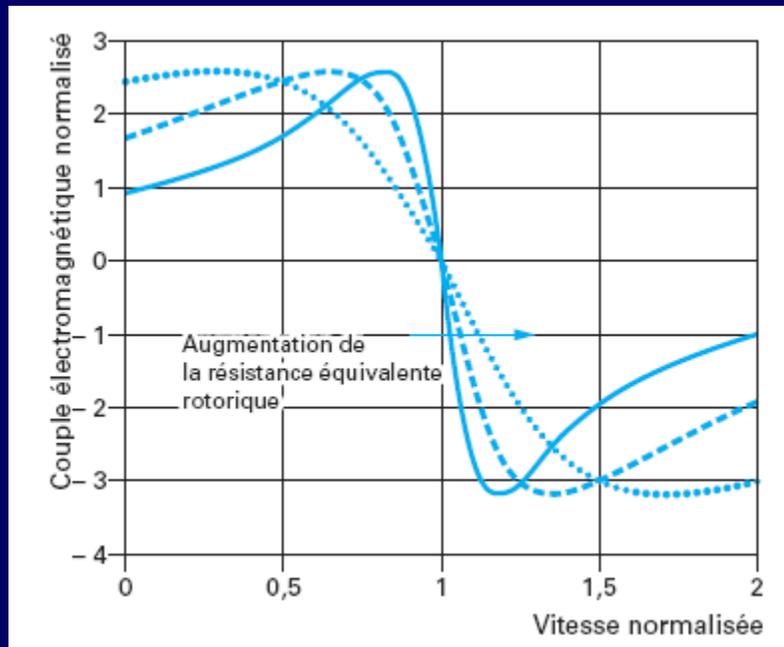
Machine asynchrone

- Différents types



Machine asynchrone à rotor bobiné

- Variation de la résistance rotorique



- Double alimentation

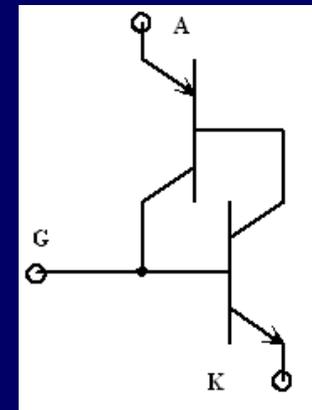
Raccordement au réseau de la production d'une éolienne

- 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)

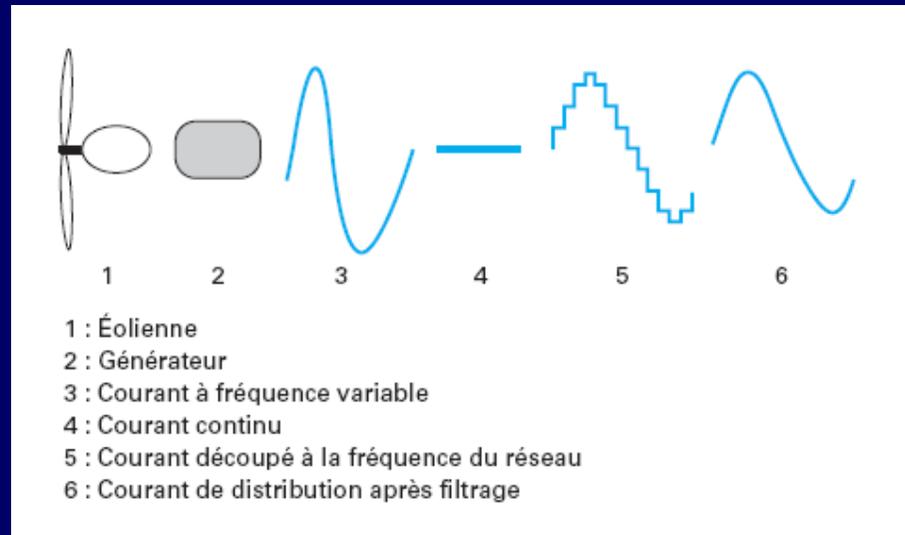
- Solutions

- 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



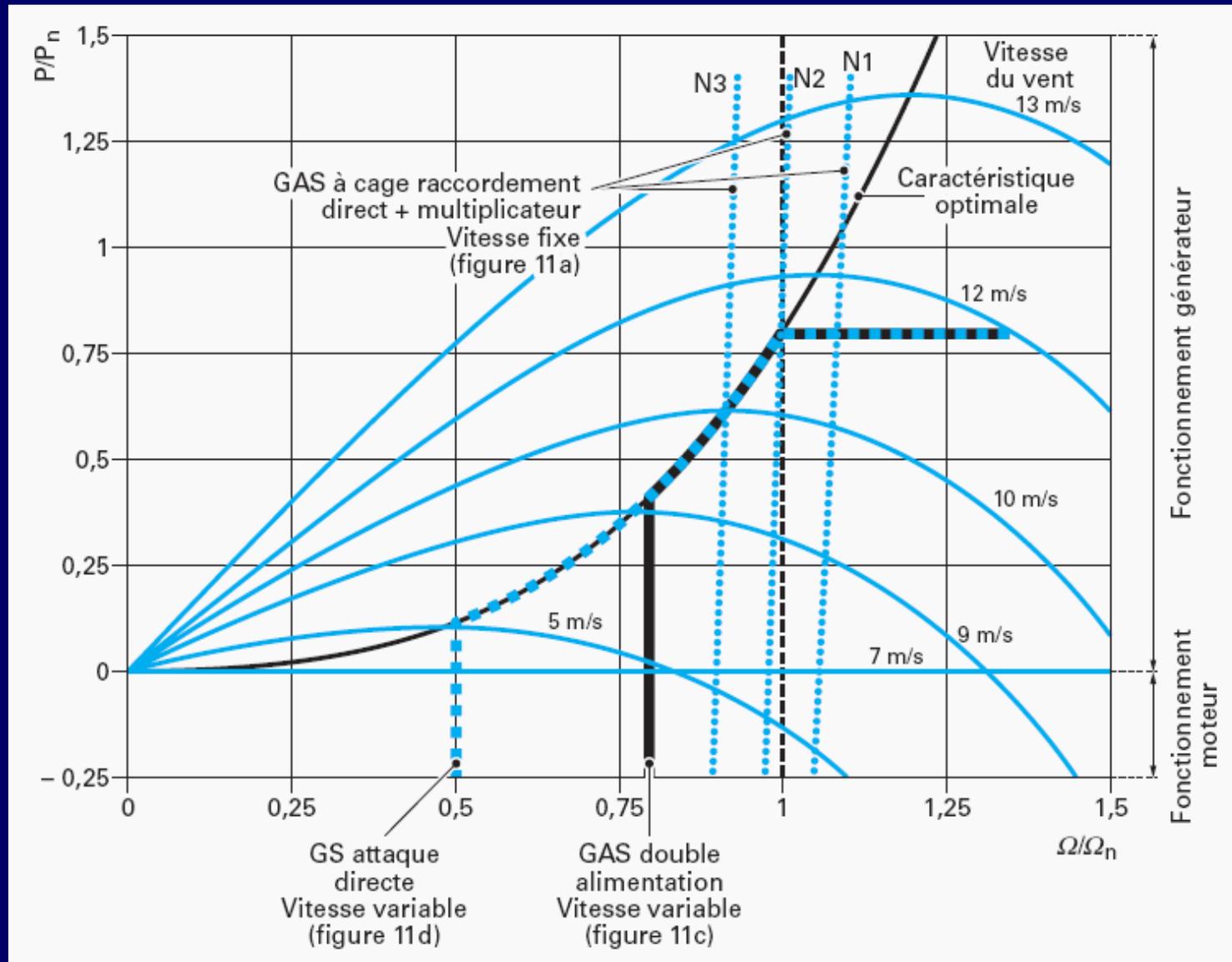
Evolution des stratégies de raccordement

- 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/>