

6. Aspects électriques des éoliennes

6.1 Les générateurs électriques



Hussein Ibrahim, Ph.D. - Antoine Brégaint, M.Sc.A.

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Fonctionnement des machines électriques
- Les différents générateurs électriques
- La machine asynchrone
- La machine synchrone
- Comparaison entre les différentes machines
- Conclusion

Plan de cette présentation

- ***Introduction et objectifs***
- Fonctionnement des machines électriques
- Les différents générateurs électriques
- La machine asynchrone
- La machine synchrone
- Comparaison entre les différentes machines
- Conclusion

Introduction et objectifs

- L'électricité est associée à de nombreux aspects des éoliennes modernes.
- Parmi ces aspects, la production d'électricité occupe une place importante.
- À l'issue de la conversion de la puissance éolienne en puissance mécanique, il est nécessaire de convertir cette dernière en puissance électrique. Cette conversion est assurée par les générateurs électriques.
- Cette présentation vise à faire l'inventaire des différents générateurs électriques existants et utilisés dans les éoliennes.

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- ***Fonctionnement des machines électriques***
- Les différents générateurs électriques
- La machine asynchrone
- La machine synchrone
- Comparaison entre les différentes machines
- Conclusion

Fonctionnement des machines électriques : Rappels

- **Loi d'Ampère** : Création d'un champ magnétique par un courant (exemple: passage de courant dans un câble)
- **Loi de Lorentz** : Force exercée sur un courant placé dans un champ magnétique (exemple: Rotor et Stator dans un moteur électrique)

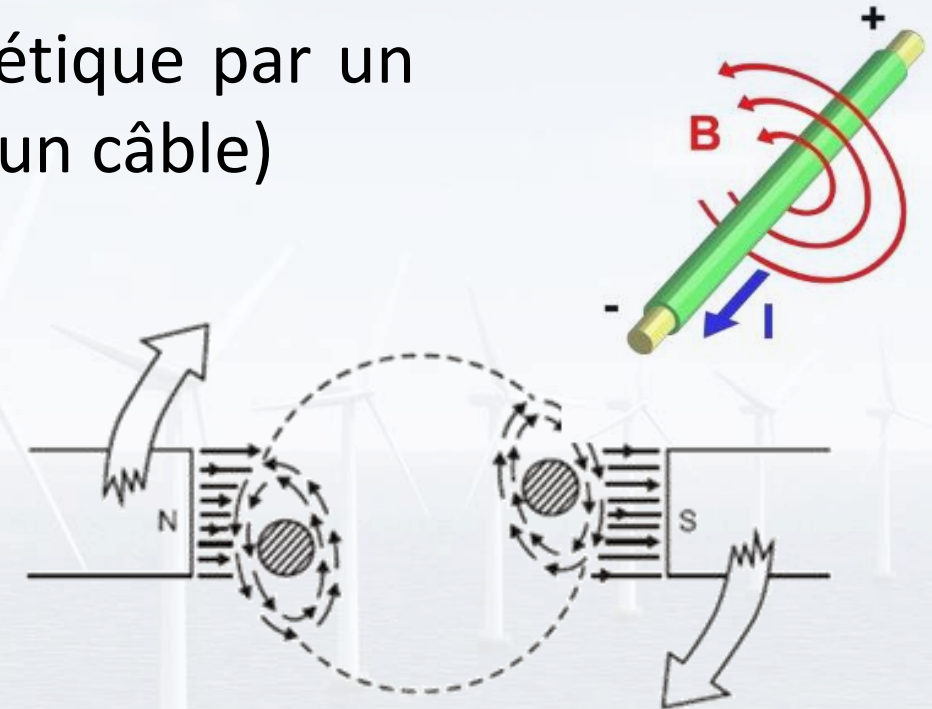
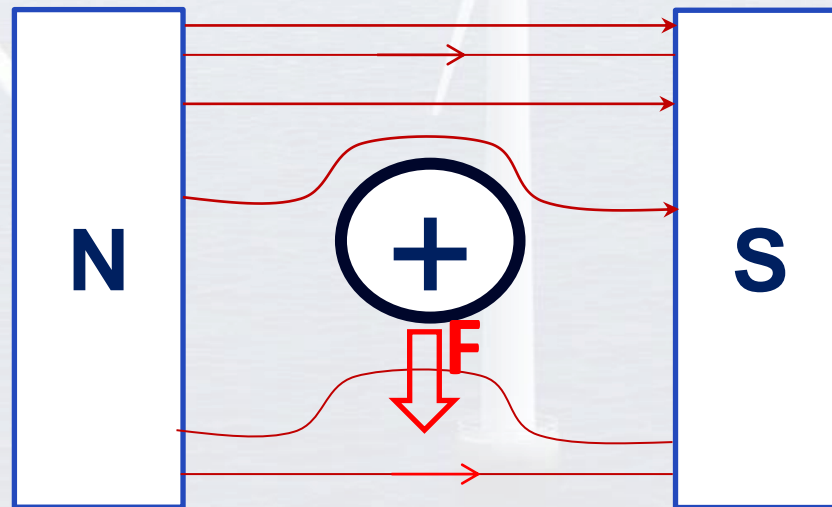
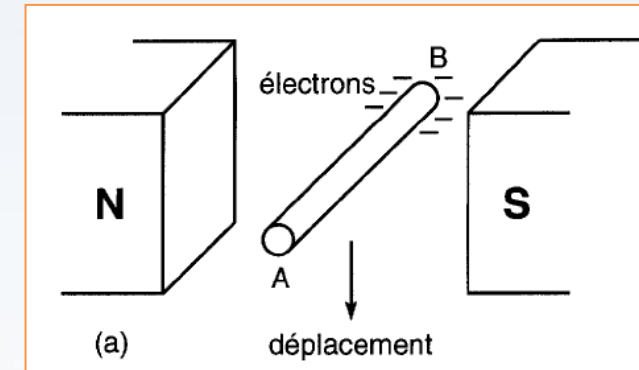


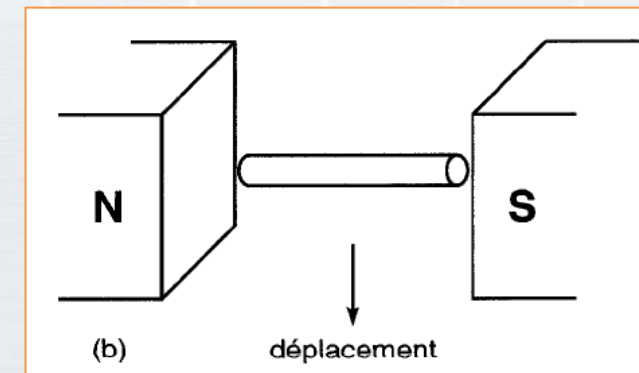
Figure 1: Rotor Magnets Interaction with Stator

Fonctionnement des machines électriques : Rappels

- L'intensité de la force dépend de quatre facteurs :
 - De l'intensité du courant
 - De la densité du flux du champ magnétique : plus la densité des lignes est grande, plus la force est grande
 - De la longueur du conducteur actif
 - De la direction du conducteur par rapport à celle du champ : la force est maximale quand le conducteur est perpendiculaire aux lignes de forces et nulle quand il est parallèle



Si le conducteur est perpendiculaire aux lignes de force, il apparaît une différence de potentiel entre A et B



La tension induite est nulle lorsque le conducteur en mouvement est parallèle au flux.

Fonctionnement des machines électriques : Rappels

- Tension induite dans un conducteur

Si un conducteur rectiligne coupe les lignes de flux à un angle droit, on constate que la valeur de la tension induite est proportionnelle à :

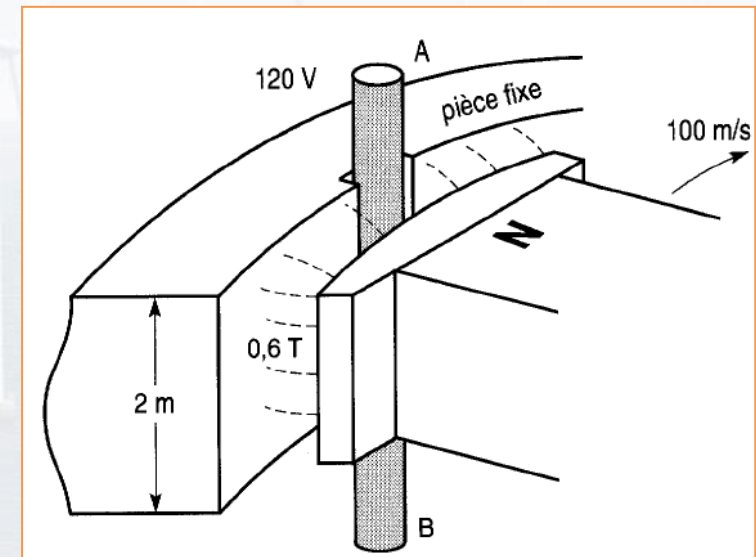
La longueur du conducteur

La densité de flux

La vitesse du déplacement

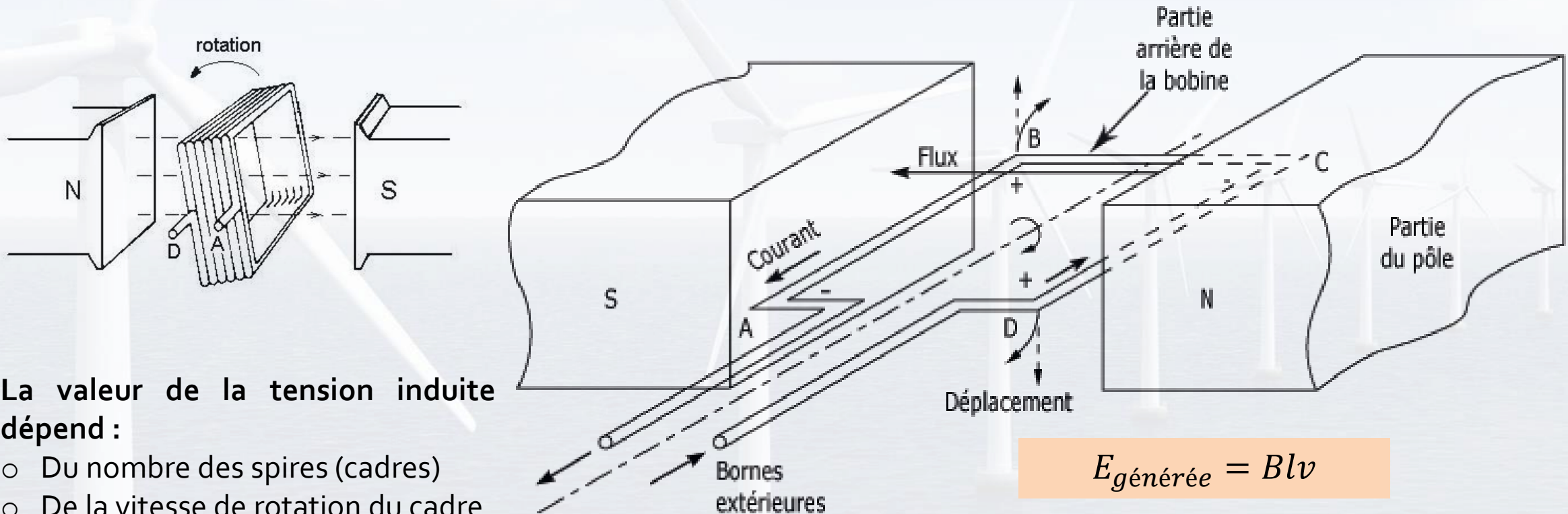
$$E_{\text{générée}} = Blv$$

B – densité du flux en teslas
 l – longueur du conducteur dans le champ en m
 v – vitesse de déplacement en mètres par seconde



Fonctionnement des machines électriques : Rappels

- Tension induite dans un conducteur



La valeur de la tension induite dépend :

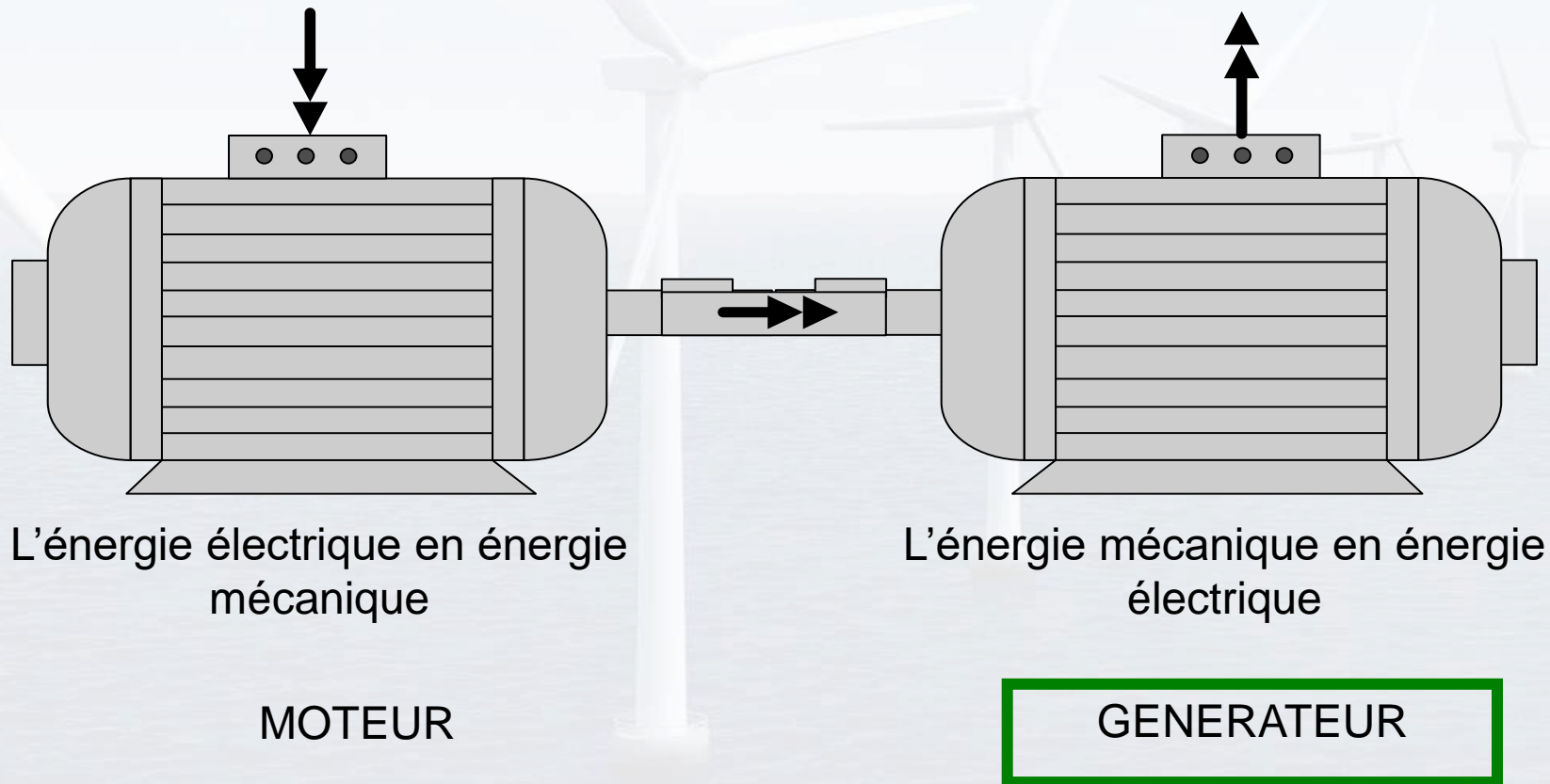
- Du nombre des spires (cadres)
- De la vitesse de rotation du cadre
- Du flux créé par les pôles
- De la forme des pôles (ceci affecte la forme du signal de la tension)

$$E_{\text{générée}} = Blv$$

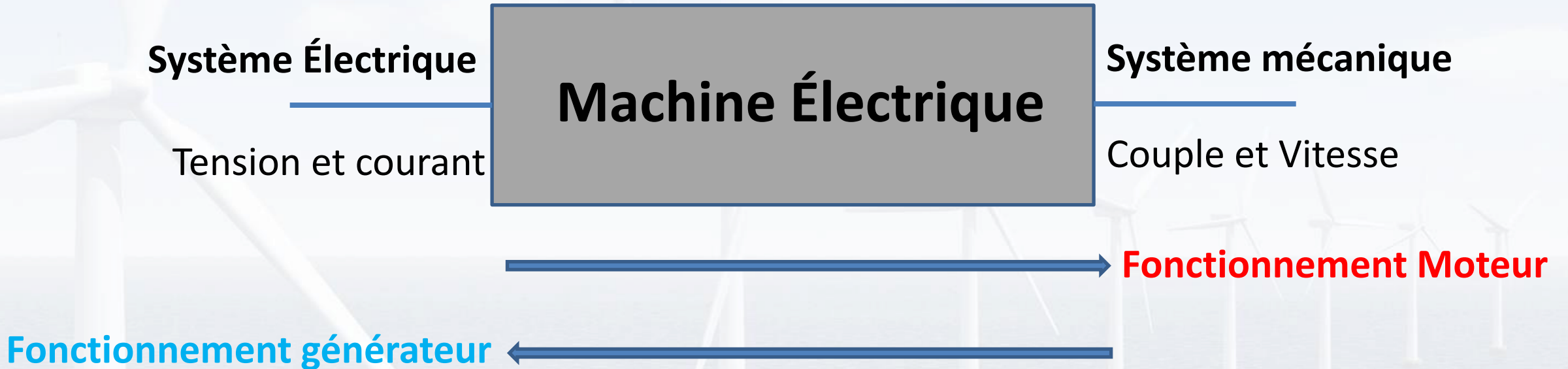
B – densité du flux en teslas
 l – longueur du conducteur dans le champ en m
 v – vitesse de déplacement en mètres par seconde

Fonctionnement des machines électriques

- Machines électriques tournantes : Convertisseurs électromagnétiques qui transforment :



Fonctionnement des machines électriques



- Conversion de la mécanique à l'électrique : **fonctionnement générateur**
- Conversion de l'électrique à la mécanique : **fonctionnement moteur**

Fonctionnement des machines électriques

- Structure de base des machines électriques
 - La structure des machines électriques comporte deux composants principaux, le **stator** et le **rotor**, séparés par l'entrefer.
 - **Le stator** ne bouge pas et est normalement le cadre extérieur de la machine.
 - **Le rotor** est libre de se déplacer et est normalement la partie intérieure de la machine



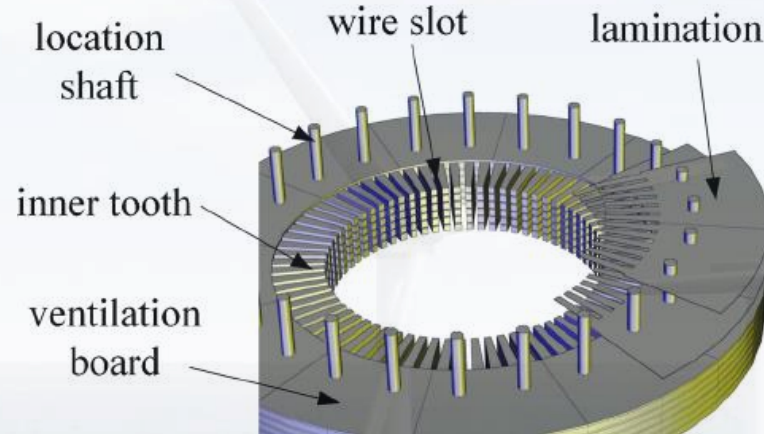
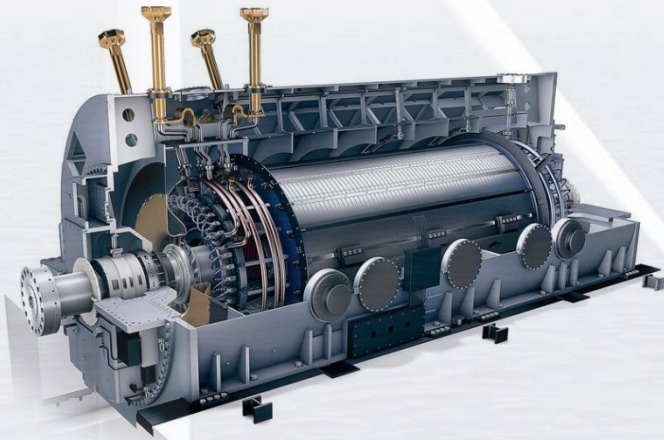
Stator de la machine



Rotor de la machine

Fonctionnement des machines électriques

- Le Stator



- Chaque segment de tôle du stator est recouvert d'un vernis isolant pour limiter les courants de Foucault.
- L'enroulement est toujours raccordé en étoile et le neutre est accessible pour permettre sa mise à la terre $\rightarrow E_{\phi} = 1/\sqrt{3} E_L$ (Réduire l'épaisseur de l'isolant dans les encoches et grossir les conducteurs \rightarrow puissance)

Fonctionnement des machines électriques

- Le Rotor
 - Le rotor porte l'enroulement de l'inducteur. Cet enroulement est constitué d'électro-aimants dans lequel on envoie un courant continu (courant d'excitation) de sorte d'obtenir sur sa circonférence alternativement un pôle Nord et un pôle Sud.
 - Il existe deux types de rotor :



Rotor à pôles lisses (non saillants)



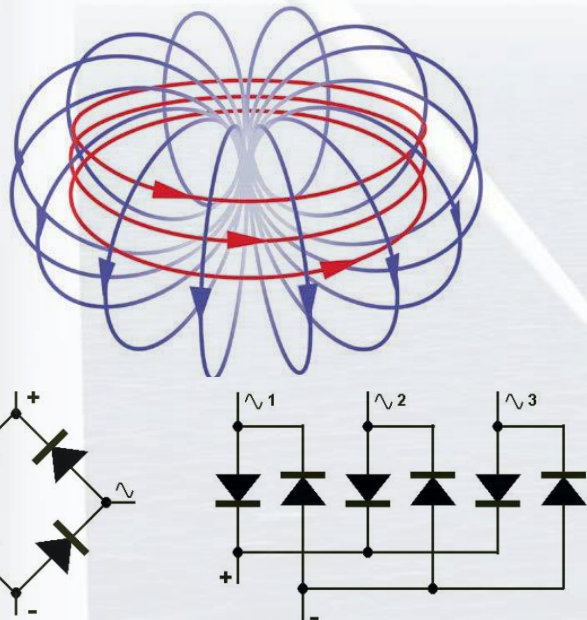
Rotor à pôles saillants



Fonctionnement des machines électriques

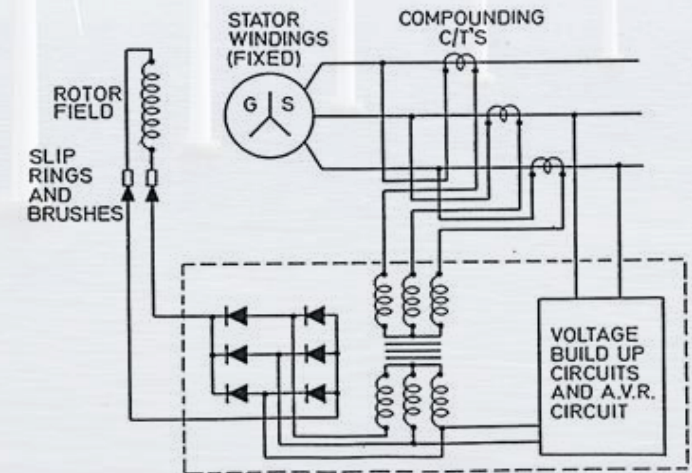
- L'excitation I_{field}
- Que le rotor soit à pôles lisses ou saillants, les bobines de l'inducteur (électroaimants) doivent être alimentées par une source de tension continue. Cette source variant de 115-600V dépendamment de l'alternateur peut être obtenue de diverses façons, ce qui amène différents dispositifs d'excitation.

EXCITATION DYNAMIQUE



Génératrice C.C. montée sur l'arbre

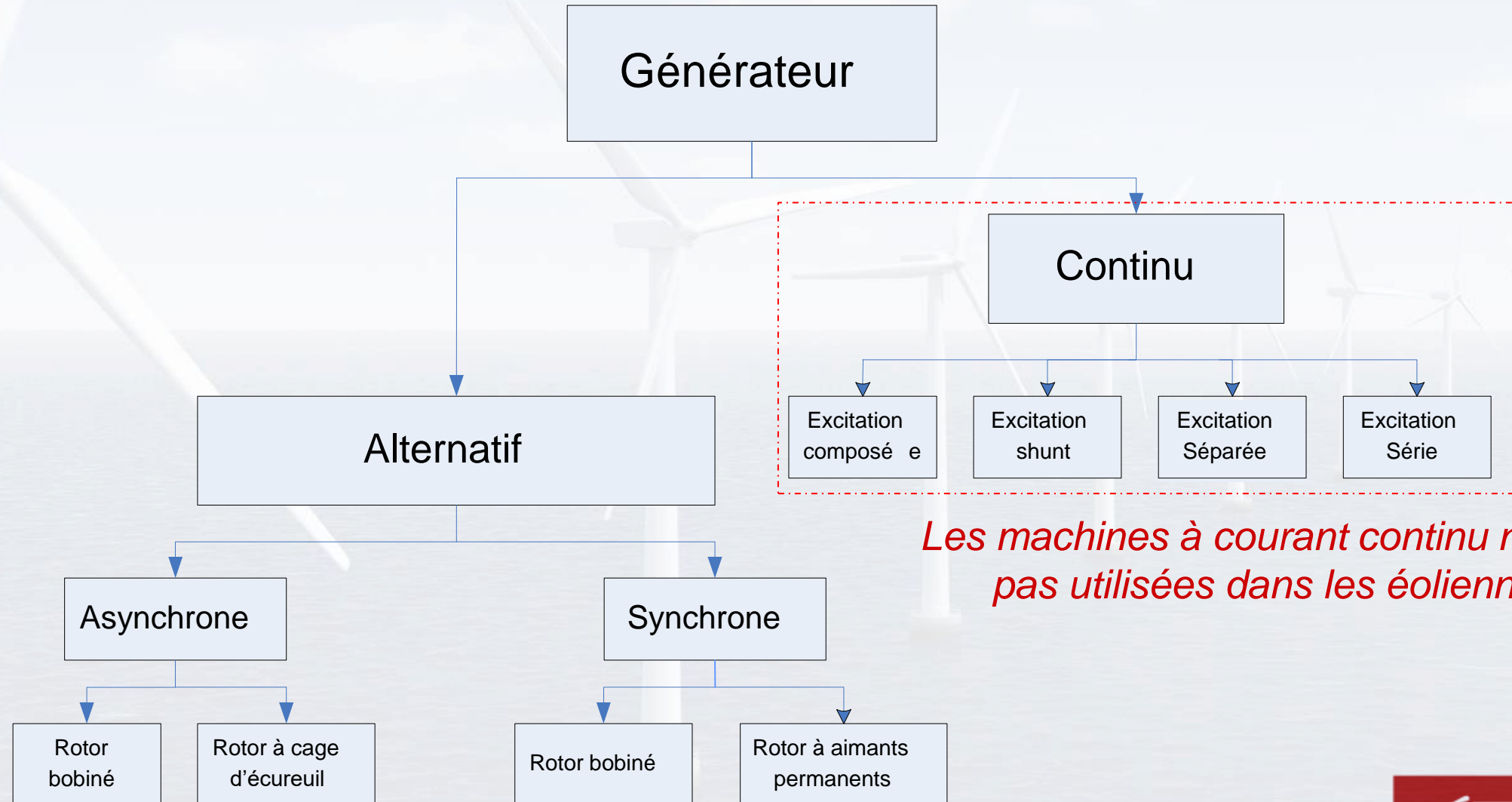
EXCITATION STATIQUE



Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Fonctionnement des machines électriques
- ***Les différents générateurs électriques***
- La machine asynchrone
- La machine synchrone
- Comparaison entre les différentes machines
- Conclusion

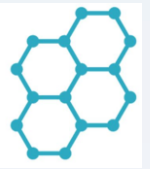
Les différents générateurs électriques



Les machines à courant continu ne sont pas utilisées dans les éoliennes

Plan de cette présentation

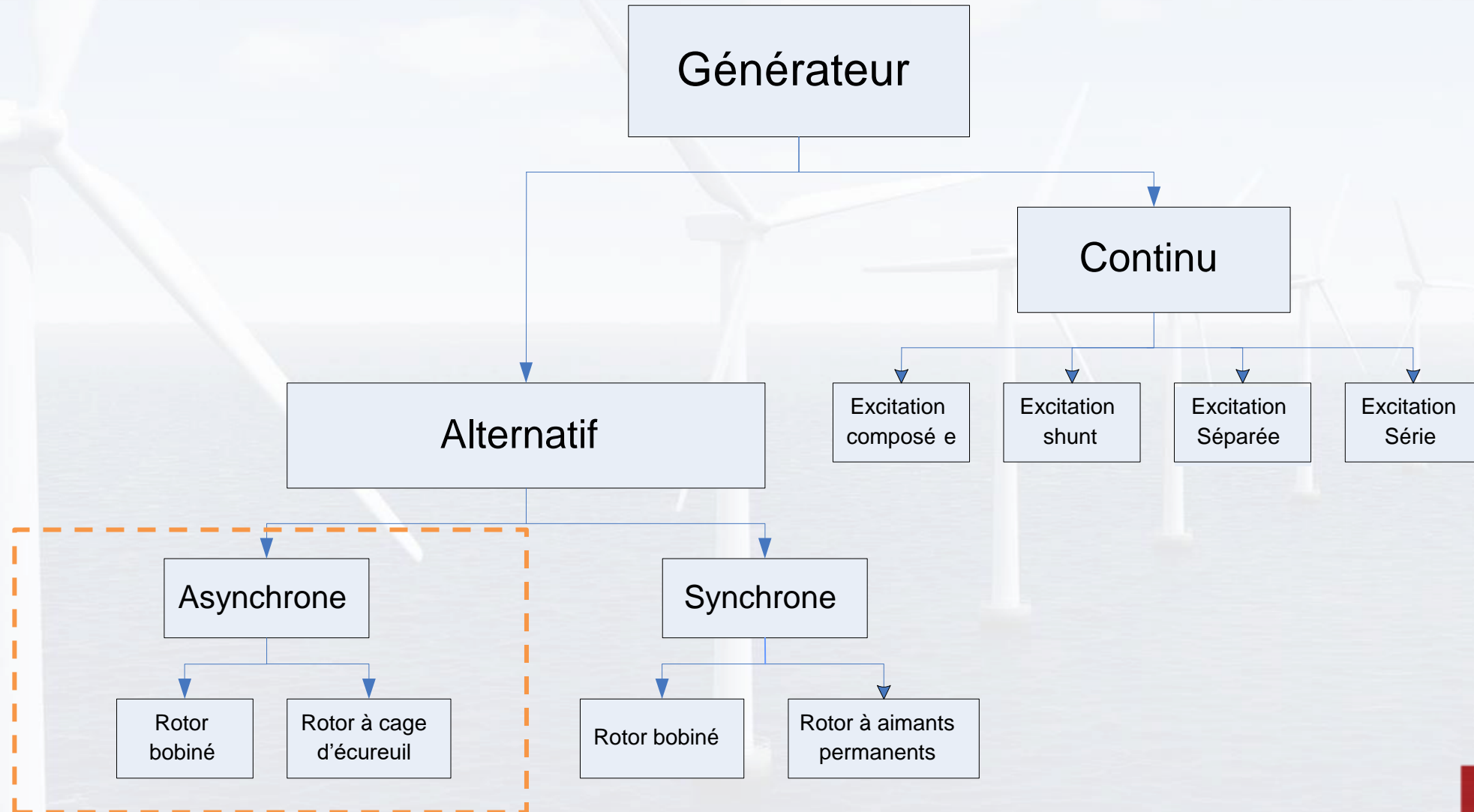
- Introduction et objectifs
- Fonctionnement des machines électriques
- Les différents générateurs électriques
- ***La machine asynchrone***
- La machine synchrone
- Comparaison entre les différentes machines
- Conclusion



Question

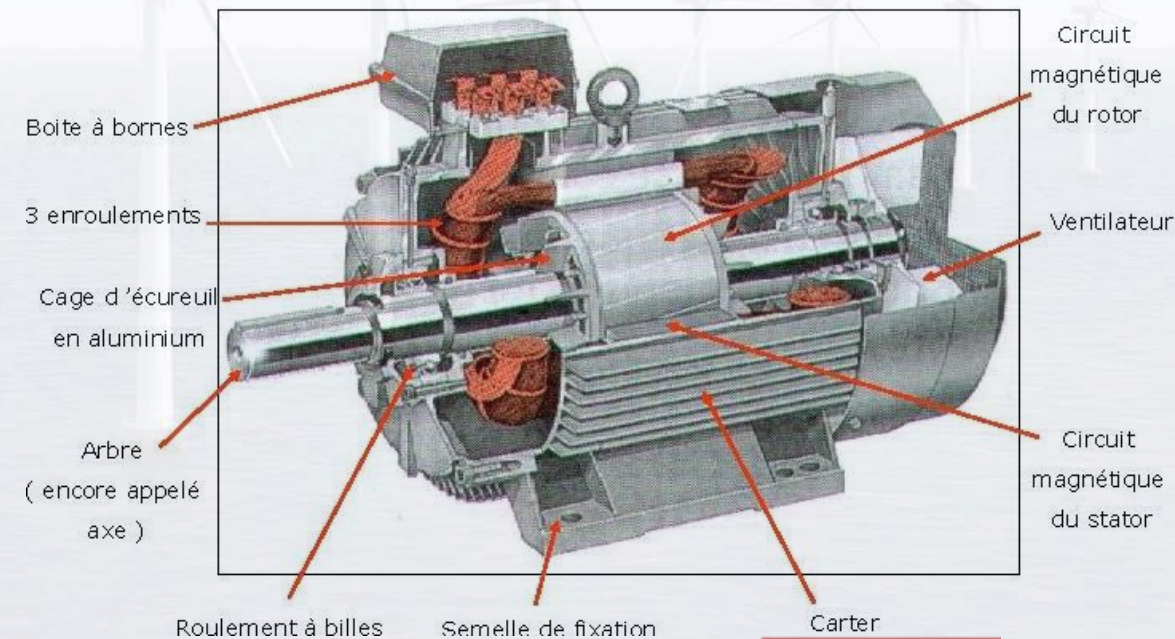
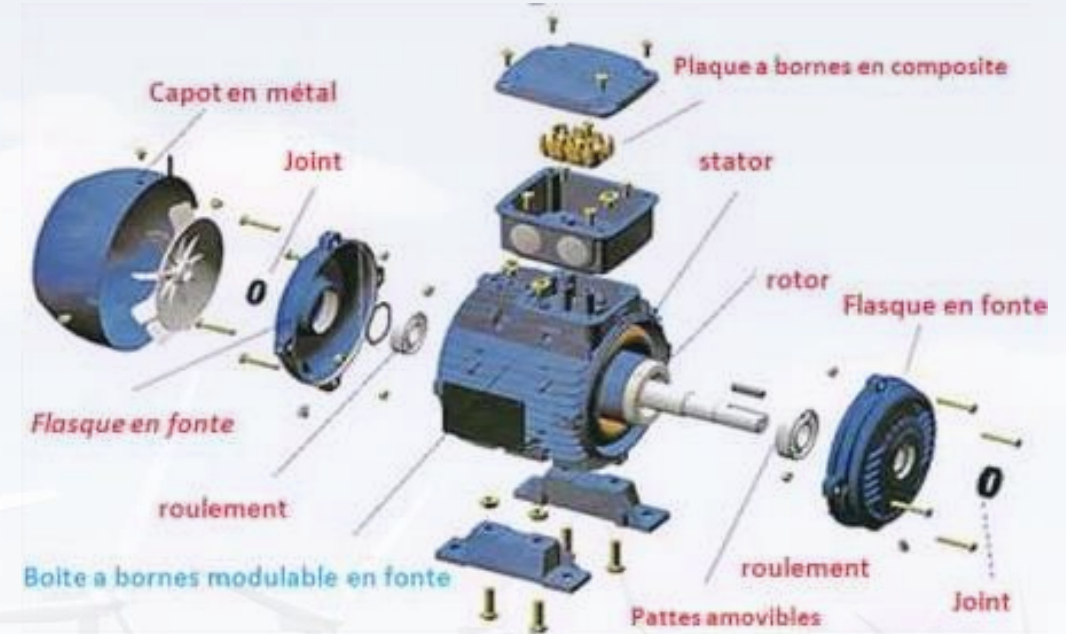
- Quelles propositions sont vraies concernant la machine asynchrone ?
 - A. La puissance active fournie au stator est égale à celle fournie au rotor
 - B. La vitesse de fonctionnement est généralement différente de celle de synchronisme
 - C. Si le glissement est négatif, la machine fonctionne en mode moteur
 - D. Un glissement nul permet d'obtenir un couple maximal
 - E. La vitesse de synchronisme dépend du nombre de paire de pôles

La machine asynchrone

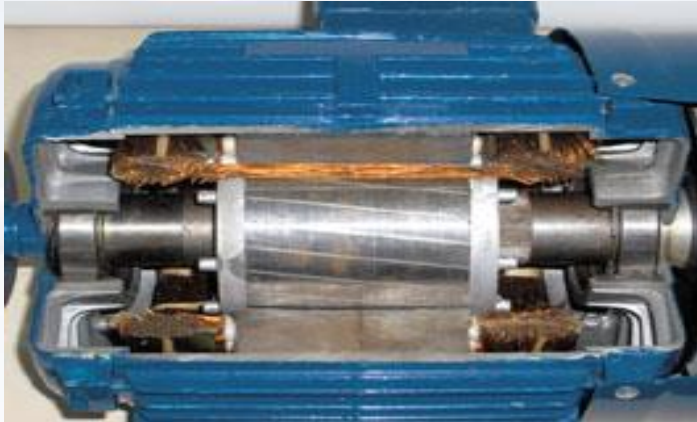


La machine asynchrone

- La **machine électrique asynchrone** est la plus répandue des *machines électriques à courant alternatif*. Connue également sous le terme " anglo-saxon " de **machine à induction** , elle est sans connexion entre le *stator* et le *rotor*.
- Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la *fréquence* des courants qui les traversent.
- Elle a la particularité d'être robuste et simple. Elle est aujourd'hui la machine électrique la plus utilisée, car sa gamme de *puissance* peut aller de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts.



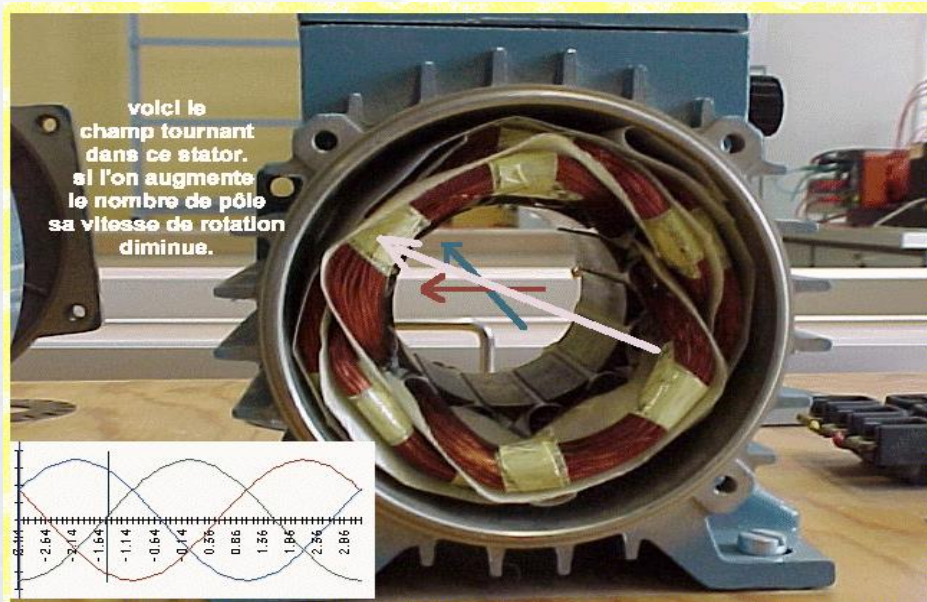
La machine asynchrone



Magnétisation : Courants induits dans les barres du rotors



© DWTMA 1998

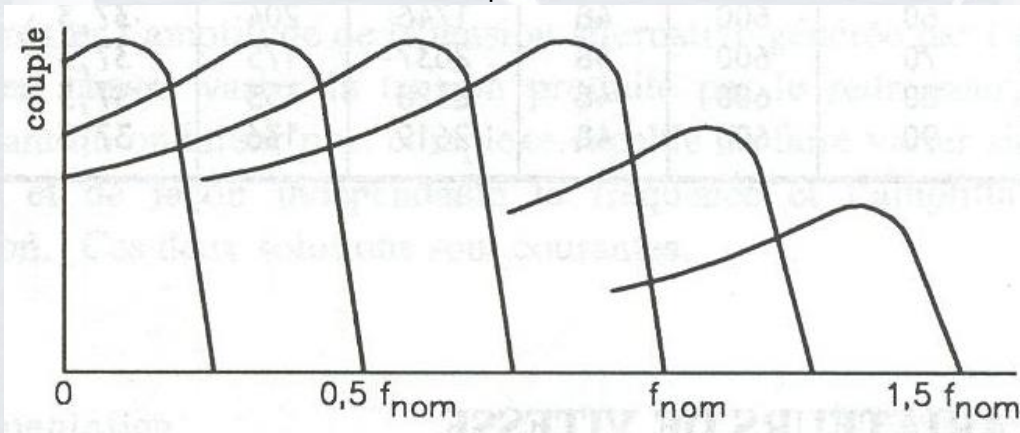
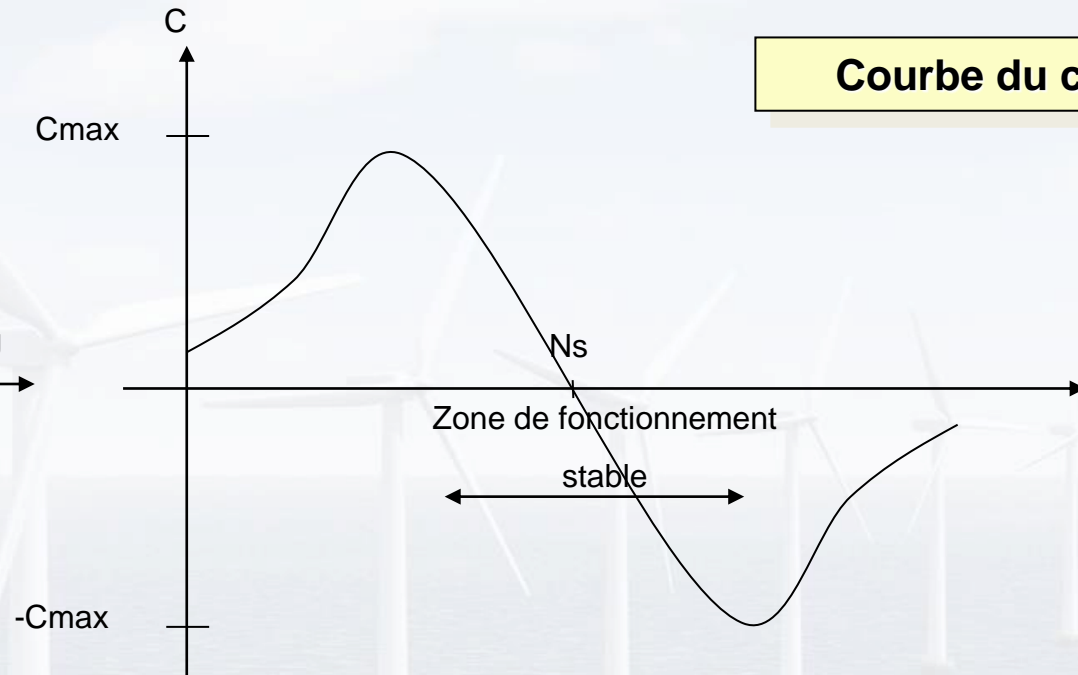
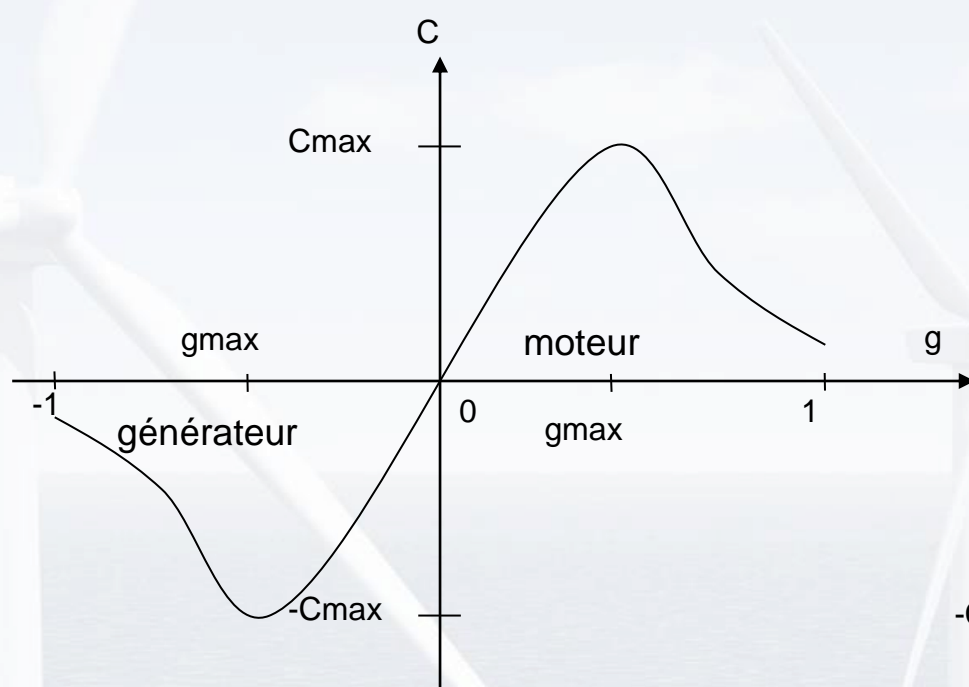


- N_s = vitesse de synchronisme
- N = vitesse de fonctionnement du rotor
- g = glissement (décalage entre les champs tournants du stator et du rotor)
- C = Couple électromagnétique
- p = nombre de pôles

$$N_s = \frac{120f}{p} \text{ (rpm)}$$
$$g = \frac{N_s - N}{N_s}$$
$$N = (1 - g)N_s$$

La machine asynchrone

Courbe du couple

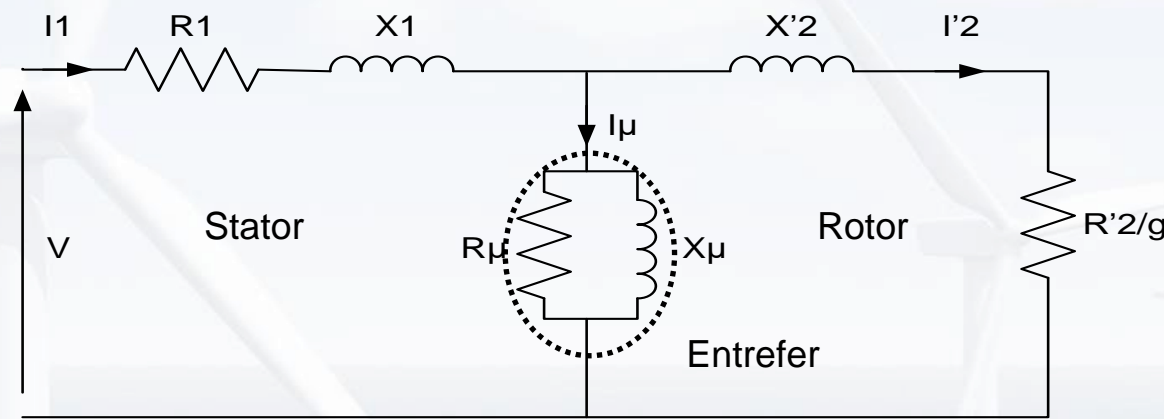


$$C_{\max} = \frac{3p}{(2\pi)^2} \frac{\left(\frac{V}{f}\right)^2}{2X_1}$$

=> Commande du moteur à V sur f constant => flux statorique constant => Couple maximal constant

La machine asynchrone

Schéma monophasé équivalent



Puissance électrique :

$$P_e = \frac{3R'_2 g V^2}{R'^2_2 + g^2 X'^2_2}$$

$$I_\mu = \frac{V}{Z_\mu} \quad Z_\mu = \frac{R_\mu jX_\mu}{R_\mu + jX_\mu} \quad P_\mu = \frac{3V^2}{R_\mu}$$

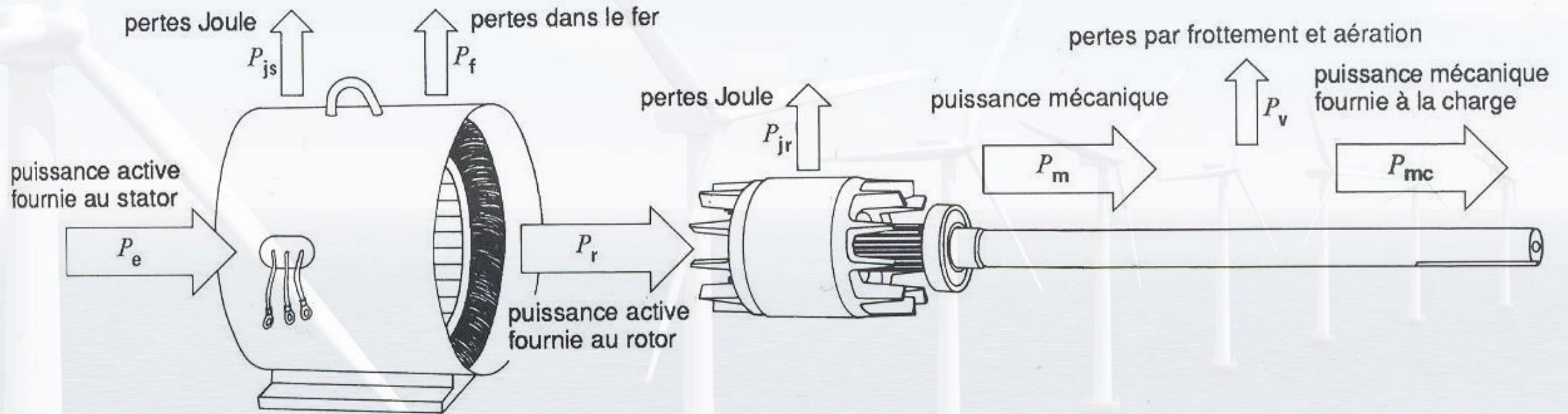
$$I'_2 = \frac{V}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{g}\right)^2 + X'^2_2}} = \frac{gV}{\sqrt{R'^2_2 + g^2 X'^2_2}}$$

$$P_e = 3 \frac{R'_2}{g} I'^2_2 = 3 \frac{R'_2}{g} \frac{g^2 V^2}{R'^2_2 + g^2 X'^2_2}$$

- ❖ Si $g > 0$, fonctionnement moteur
 - $P_e > 0$: la puissance électrique est absorbée par le moteur
- ❖ Si $g < 0$, fonctionnement générateur
 - $P_e < 0$: la puissance électrique est fournie par le générateur

La machine asynchrone

Bilan de puissance



- La machine absorbe toujours de la puissance réactive

La machine asynchrone : à cage d'écureuil

- Les bobines du stator sont serrées dans les encoches des cales de fibre et le tout trempé dans un vernis imprégnant le bobinage au complet.

- **Avantages :**

- Faible coût
- Simple et robuste
- Encombrement réduit
- Peu de maintenance

- **Inconvénients :**

- Plage de fonctionnement très restreinte à cause de :
 - Vitesse maximale tolérée par le vent
 - Vitesse de synchronisme
- Une très faible variation de N_r (vitesse de rotation du rotor) => Très grande variation de la puissance

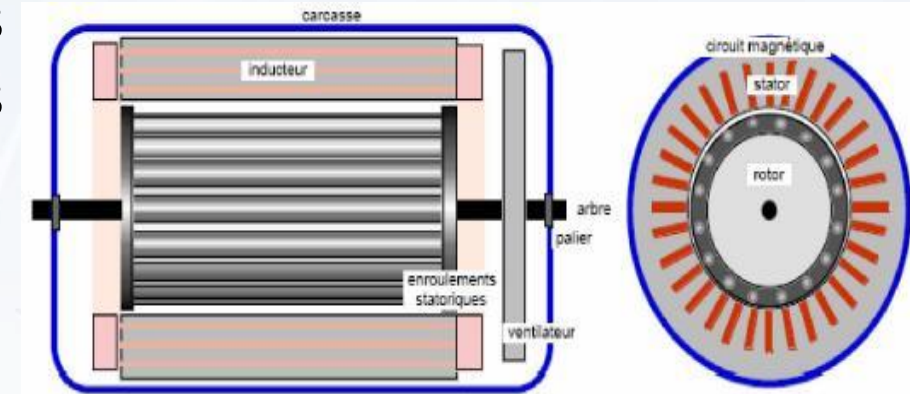
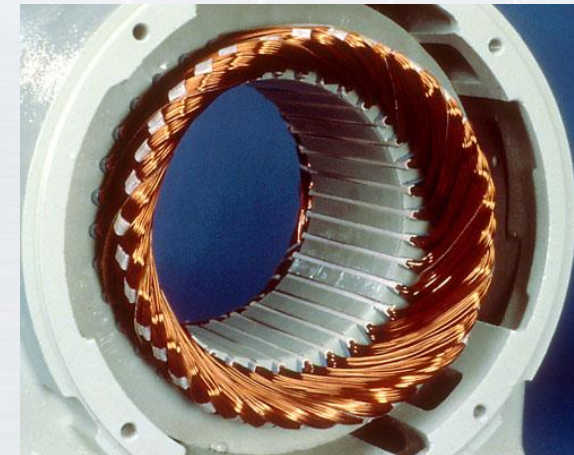
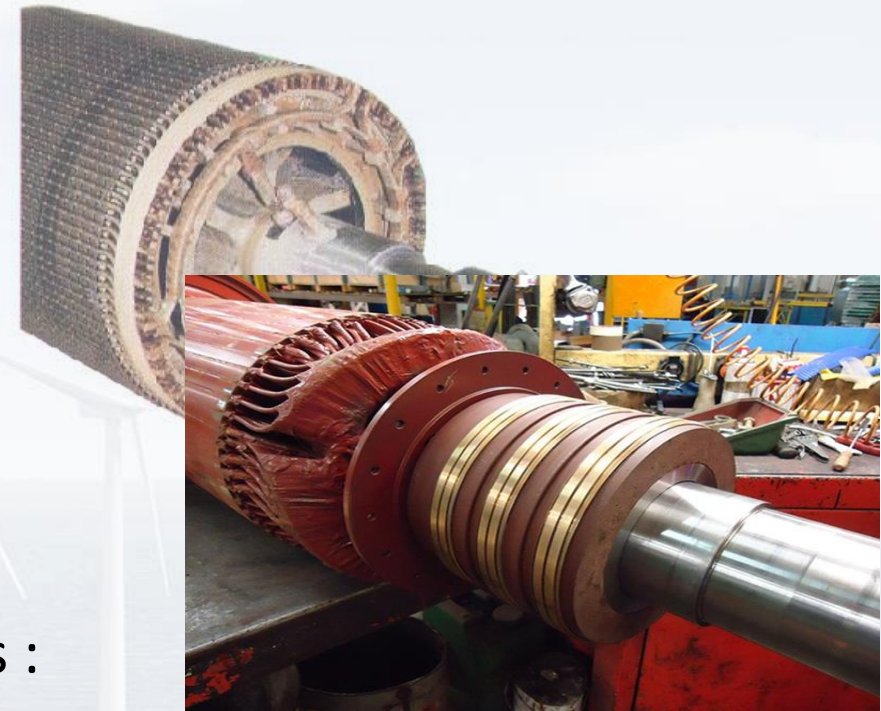


Figure 2-2 : Coupe d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil



La machine asynchrone : Rotor bobiné

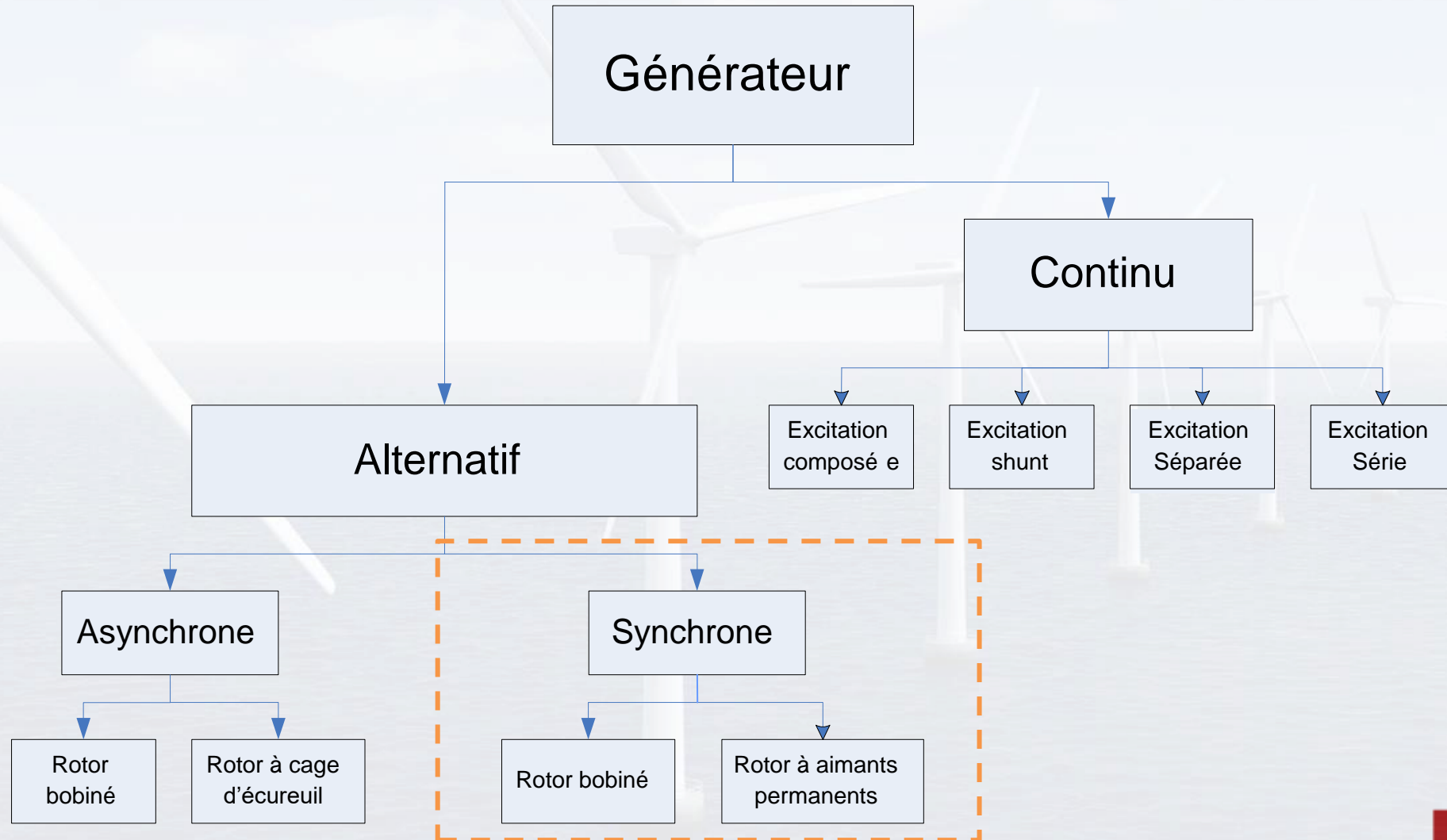
- Ensemble de trois enroulements triphasés connectés en étoile ou en triangle, et dont les extrémités sont généralement attachées à des bagues glissantes (slip rings) sur l'arbre.
- Les courants rotoriques sont accessibles par des balais, on peut donc les contrôler.
- Inconvénients :
 - Deux bobinages
 - Maintenance des balais et des bagues
 - Installation encombrante
 - Coût élevé
- Avantages :
 - Grande variation de vitesse
 - Simplicité,
 - Robustesse
 - Maintenance facile.

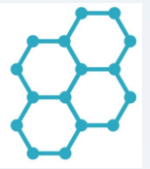


Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Fonctionnement des machines électriques
- Les différents générateurs électriques
- La machine asynchrone
- ***La machine synchrone***
- Comparaison entre les différentes machines
- Conclusion

La machine asynchrone



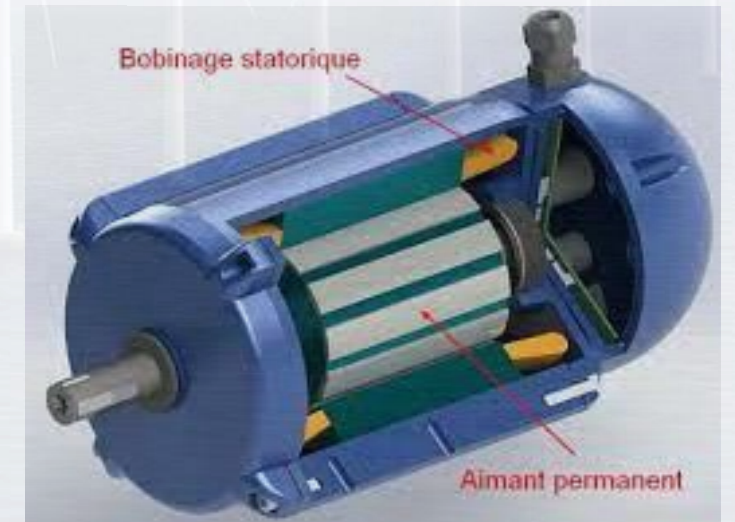
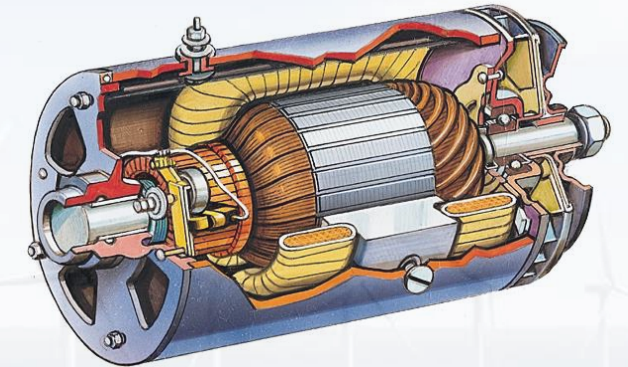
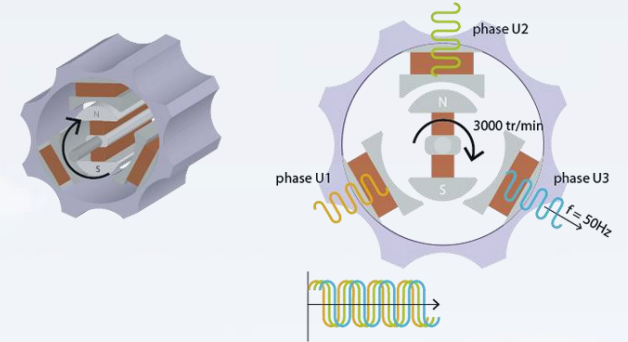


Question

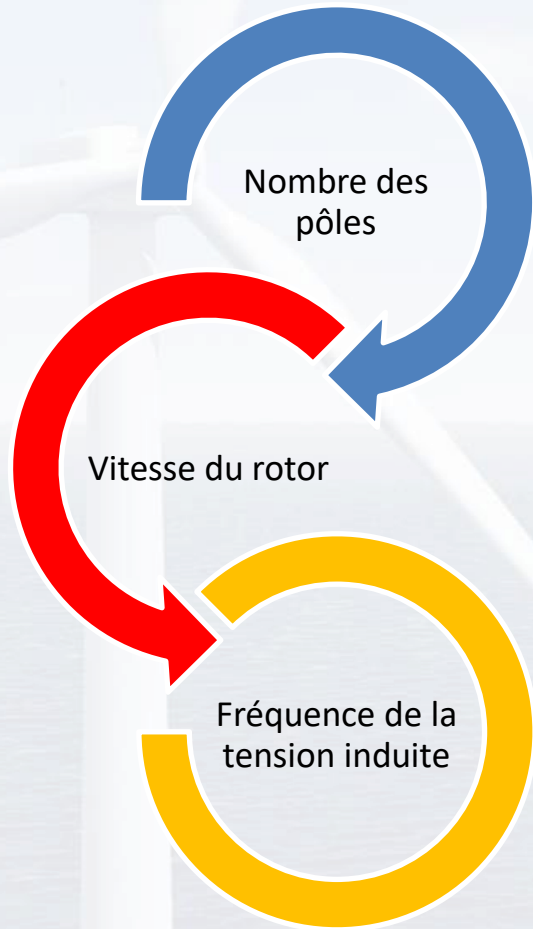
- Lesquelles de ces technologies sont des machines synchrones ?
 - A. Les machines à cage d'écureuil
 - B. Les machines à rotor à pôles saillants
 - C. Les machines à rotor à pôles lisses
 - D. Les machines à aimants permanents
 - E. Les machines à excitation série

La machine synchrone

- La machine synchrone existe en deux versions soit bobinées pour les fortes puissances et à aimant permanent pour les entraînements à hautes performances.
- Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de "rotation de l'arbre de sortie" est égale à la vitesse de "rotation du champ tournant".
- Les machines électriques synchrones sont généralement des machines triphasés. Le rotor est alimenté par une source continue ou équipé d'aimants permanents.



La machine synchrone



$$f = \frac{pn}{120}$$

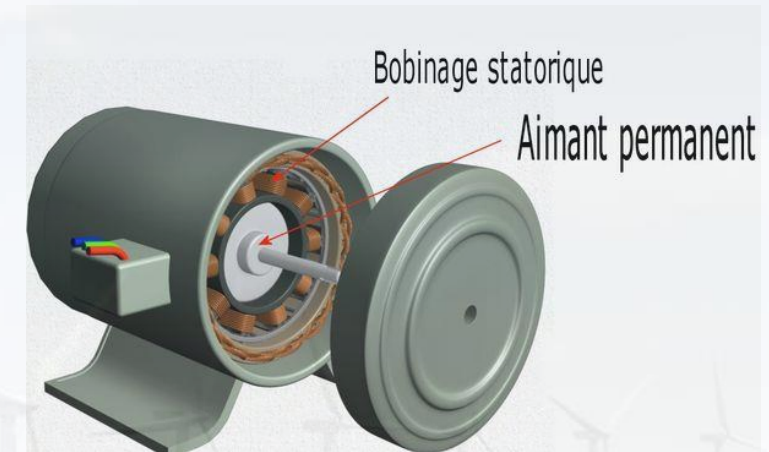
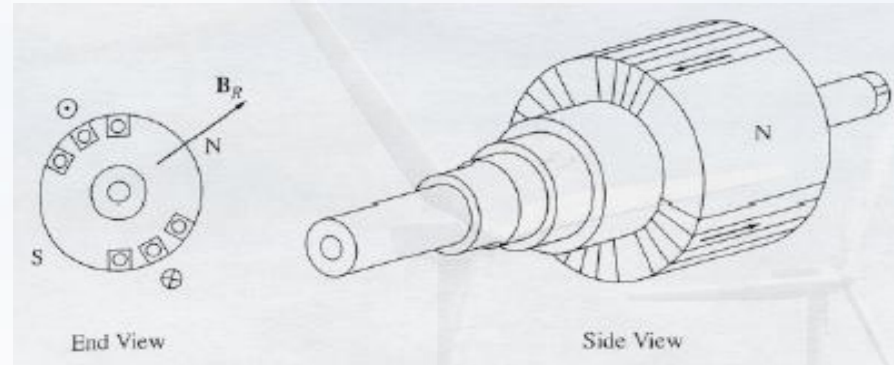
f – fréquence de la tension induite en Hz
p – Nombre de pôle du rotor
n – vitesse du rotor (RPM)

- La vitesse synchrone représente la vitesse de rotation du champ magnétique tournant. Elle dépend de la fréquence de la tension d'alimentation et du nombre de pôle relié à chacune des phases de tension. Ainsi, plus le nombre de pôles par phase est grand, plus la vitesse synchrone est petite. On peut calculer la vitesse synchrone en appliquant l'équation suivante :

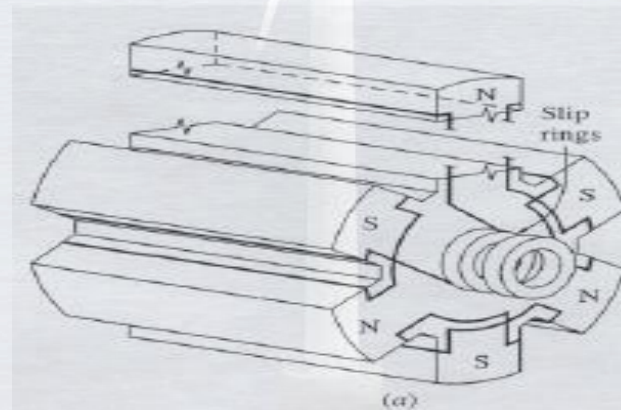
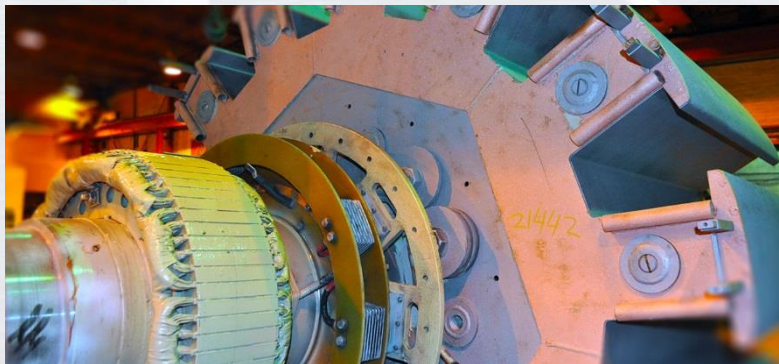
$$v_s = \frac{120 f}{p}$$

La machine synchrone : À aimants permanents

Rotor à pôles lisses



Rotor à pôles saillants



- **Caractéristiques des machines synchrones à aimants permanents**

- Fort couple de démarrage
- Pas besoin d'excitation
- Pas de bagues et balais
- Peu de maintenance
- Utilisé dans le petit Éolien (Bergey)
- Transmission directe

La machine synchrone : À rotor bobiné



- **Caractéristiques des machines synchrones à aimants permanents**
 - Fort couple de démarrage
 - Variation de vitesse facile
 - Rendement élevé
 - Contrôle de la tension
 - Contrôle du facteur de puissance
 - Transmission directe
 - Construction plus complexe
 - Coût élevé
 - Magnétisation des aimants nécessaire
 - $N(\text{tr}/\text{min})=60f/p$

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Fonctionnement des machines électriques
- Les différents générateurs électriques
- La machine asynchrone
- La machine synchrone
- ***Comparaison entre les différentes machines***
- Conclusion

Comparaison entre les différentes machines

	Asynchrone à cage d'écureuil		Asynchrone à rotor bobiné		Synchrone à rotor bobiné		Synchrone à aimants permanents
v	Simple et robuste	x	Structure complexe	x	Structure complexe	v	Simple et robuste
v	Solide	x	Coûteux	x	Coûteux	v	Solide
v	Pas de bagues et balais	x	Nécessite des bagues et des balais	v	Nécessite des bagues et des balais	v	Pas de bagues et balais
				x	Maintenance régulière	x	Peu de maintenance
x	Rendement faible	v	Rendement élevé	v	Rendement élevé	v	Rendement élevé
v	Faible couple	x	Couple élevé (dépend du glissement)				
		v	Large plage de vitesse	v	Large plage de vitesse	x	Faible plage de vitesse
				v	Contrôle rapide du couple		
x	Contrôle de la tension difficile	x	Contrôle de la tension difficile	v	Contrôle de la tension facile	v	Contrôle de la tension très difficile
x	Besoin de condensateurs	v	Pas besoin de condensateurs	v	Pas besoin de condensateurs	v	Pas besoin de condensateurs
v	Démarre en moteur	v	Démarre en moteur	v	Transmission sans multiplicateur	v	Transmission sans multiplicateur
v	Exploitable en très forte puissance	v	Exploitable en très forte puissance	v	Exploitable en très forte puissance	v	Exploitable en très forte puissance
v	Beaucoup de machines commerciales	v	Beaucoup de machines commerciales	v	Beaucoup de machines commerciales	x	Peu de machines commerciales

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Fonctionnement des machines électriques
- Les différents générateurs électriques
- La machine asynchrone
- La machine synchrone
- Comparaison entre les différentes machines
- ***Conclusion***

Conclusion

- Les éoliennes à attaque directe sont de plus en plus commercialisées aux dépens des éoliennes à multiplicateur de vitesses. De ce fait, les génératrices synchrones sont de plus en plus sollicitées.
- Une fois la puissance éolienne obtenue, il est nécessaire de se connecter au réseau.
- La présentation suivante s'intéresse à cet aspect de la production d'électricité par les éoliennes.

MERCI POUR VOTRE ATTENTION !



MERCI



Questions ?

Hussein IBRAHIM, Ph.D
Tél: 418-962-9848 # 340
cc-hussein.ibrahim@etsmtl.ca
Hussein_ibrahim01@uqar.ca
Hussein.ibrahim@itmi.ca