



# Introduction au dimensionnement des génératrices à aimants permanents à flux axial pour le petit éolien

Adrien Prévost

## ► To cite this version:

Adrien Prévost. Introduction au dimensionnement des génératrices à aimants permanents à flux axial pour le petit éolien. École d'ingénieur. Conversion de l'Energie Electrique (CEE), INSA Lyon, France. 2023. hal-04274795

**HAL Id: hal-04274795**

**<https://hal.science/hal-04274795>**

Submitted on 8 Nov 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Introduction au dimensionnement des machines à flux axial pour le petit éolien.

5GE Option CEE

*Adrien Prévost*

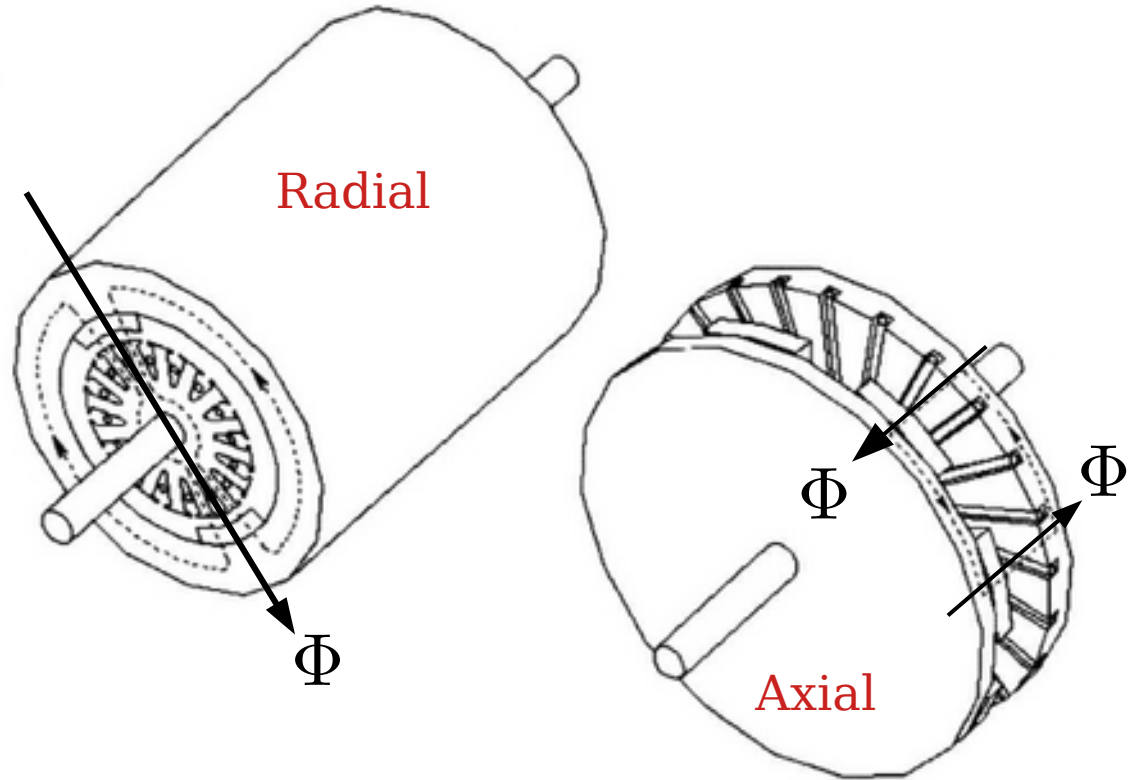


*Novembre 2023*

# Axial ou radial ?

Direction du flux magnétique :

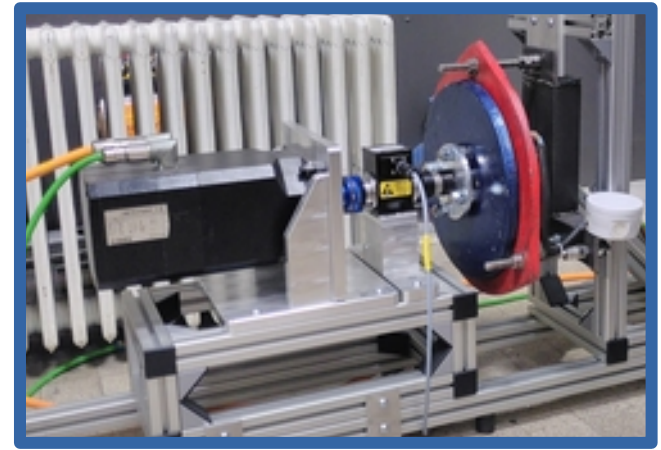
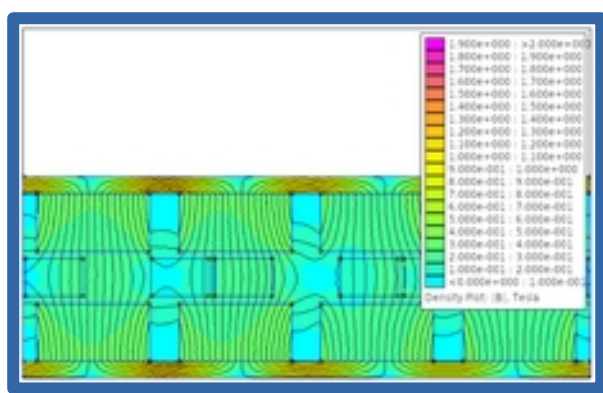
- **Colinéaire** avec l'axe de rotation = AXIAL
- **Perpendiculaire** à l'axe de rotation = RADIAL (direction du rayon)



Source : [3]

# Etude et Réalisation d'une génératrice d'éolienne Piggott

**Trois étapes** : Concevoir, Fabriquer, Expérimenter



# Objectifs et contenu du module

- |  |
|--|
| 1) Découverte de l'éolienne Piggott  |
| 2) Découverte de la topologie de machine synchrone à flux axiale<br>→ éléments fonctionnels, grandeurs, principe de fonctionnement |
| 3) Approche de dimensionnement analytique avec une vue système   |
| 4) Entraînement sur un outil de dimensionnement en ligne   |
| 5) Dimensionnement du bobinage de la machine à construire<br>→ dimensions, nombre de tours par bobine, paramètres électriques      |
| 6) Construction de la génératrice  |
| 7) Caractérisation de la génératrice   |

Cours (2h)

TD/TP (4h)  
Salle I017

TP (4 x 4h)

TP (4h)

TOTAL : ( 26 H )

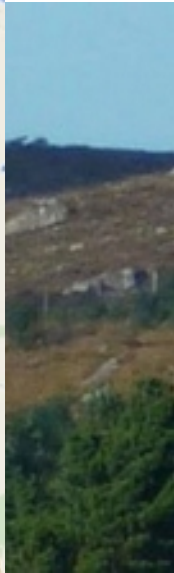
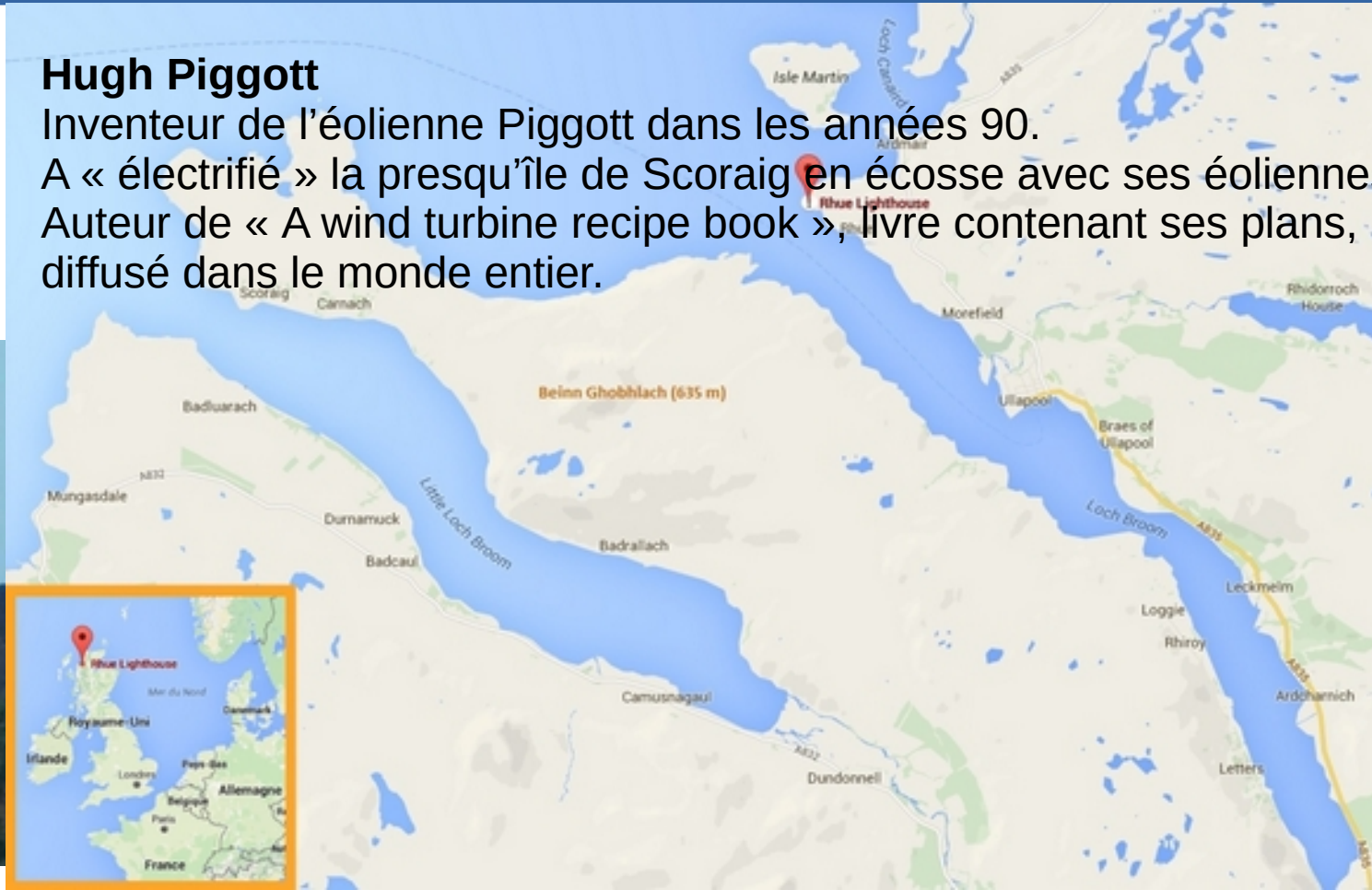
# 1. L'éolienne Piggott



## Hugh Piggott

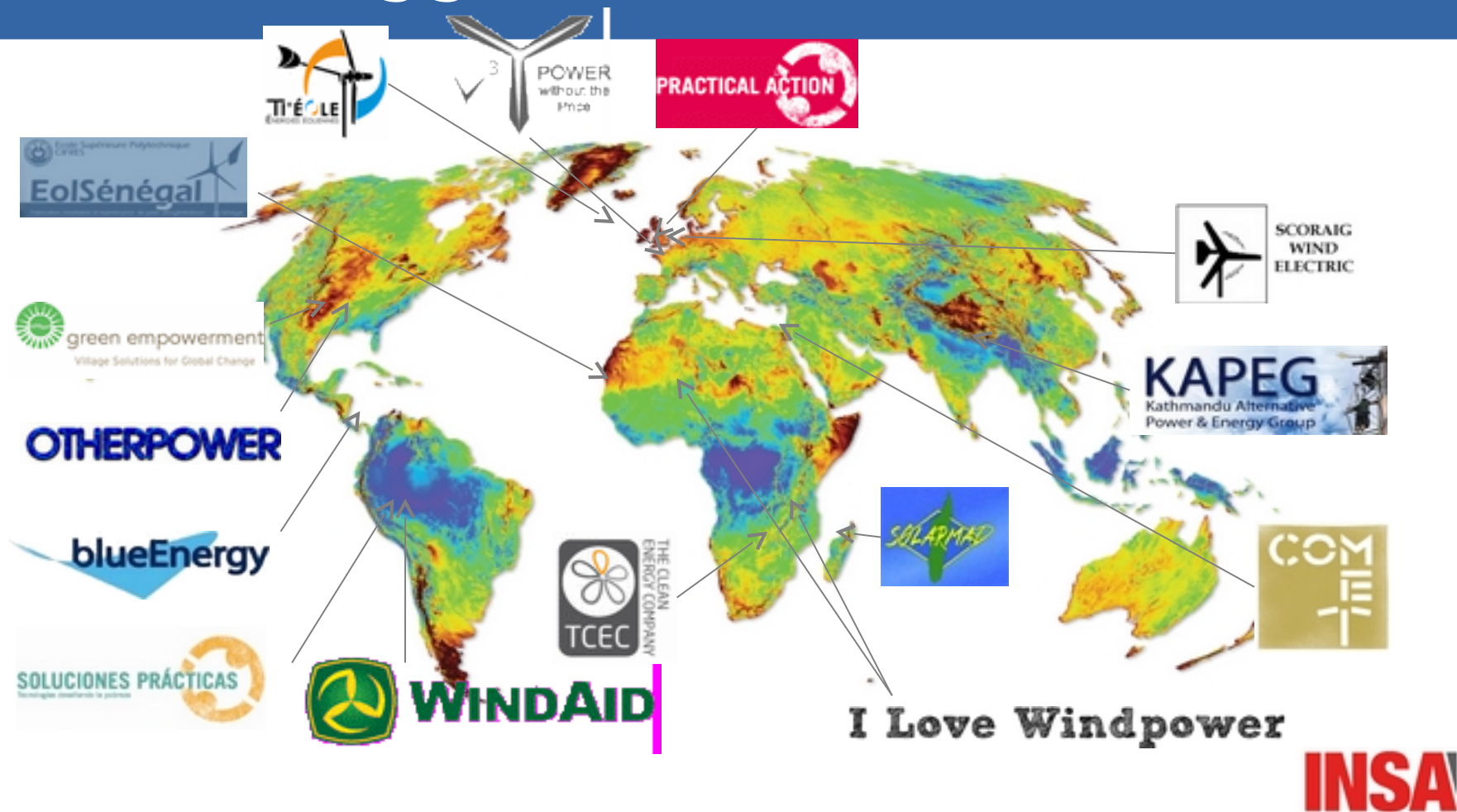
Inventeur de l'éolienne Piggott dans les années 90.

A « électrifié » la presqu'île de Scoraig en Écosse avec ses éoliennes.  
Auteur de « A wind turbine recipe book », livre contenant ses plans,  
diffusé dans le monde entier.

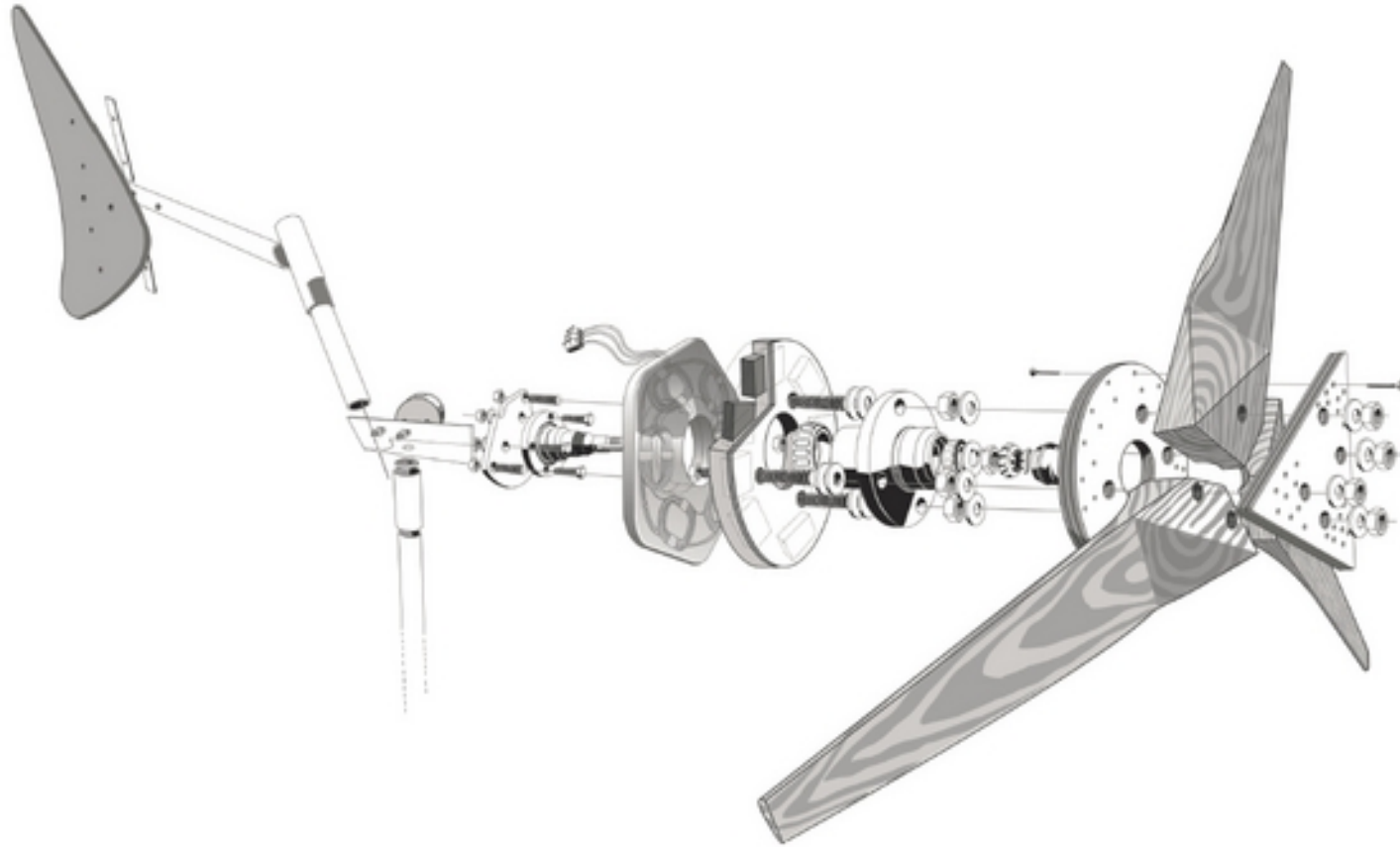




# L'éolienne Piggott : un réseau international



# 1.a L'éolienne Piggott : vue éclatée



## Retrouver les Elements ...

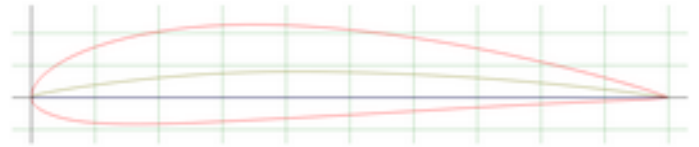
- 1) Pales
- 2) Génératrice
  - Stator
  - Rotor
- 3) Moyeu
  - Cages
  - Roulements
  - Fusée
- 4) Nacelle
- 5) Safran



# 1.b L'éolienne Piggott : les pales



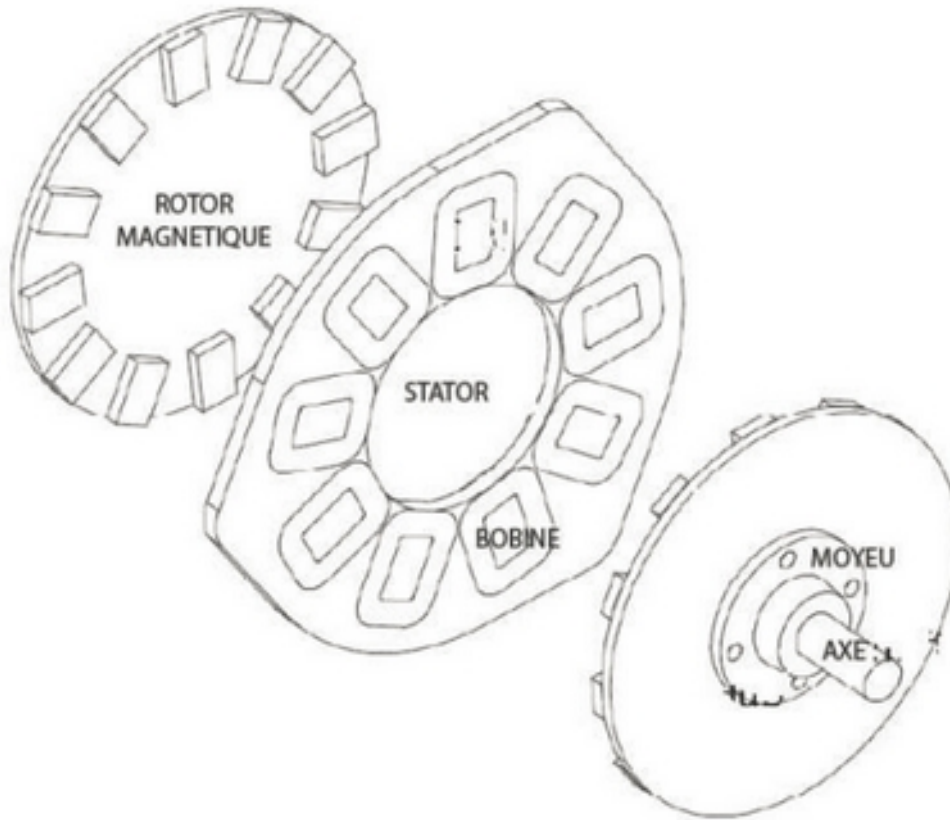
**Profil** : NACA 4412-4415  
simplifié



**Matériau** : bois vernis  
(résineux imputressible)

**Réalisation** : à la main  
(plane, rabot, scie..)  
grâce à une découpe en  
sections

# 1.c L'éolienne Piggott : génératrice



Topologie : **AFPM**SGCNOCW

**Axial Flux**

**Permanent Magnet**

**Synchronous Generator with  
Coreless**

**Non-Overlapping**

**Concentrated Winding**

On utilisera par la suite : AFPM

# 1.d Génératrice Piggott : le rotor

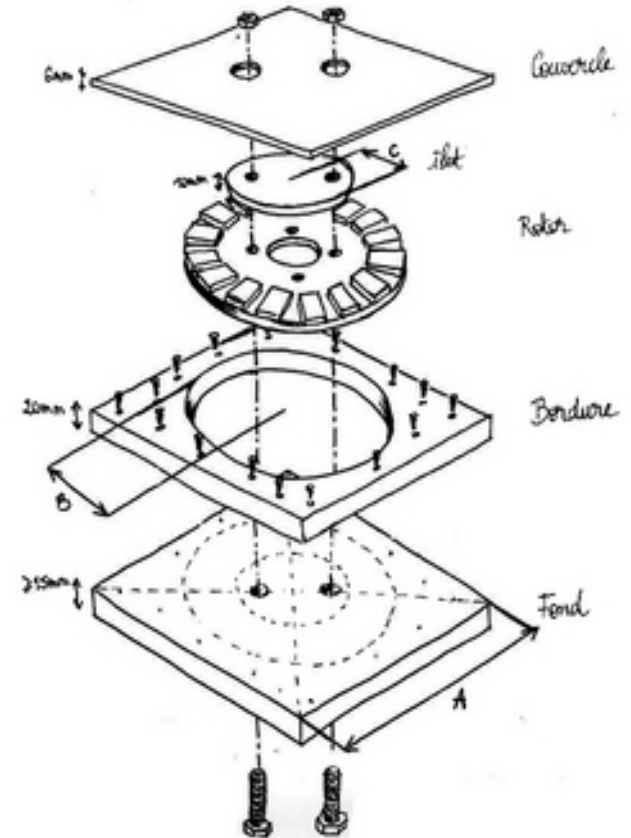
## Principe :

Disques en acier sur lequel sont collés des aimants.



## Réalisation :

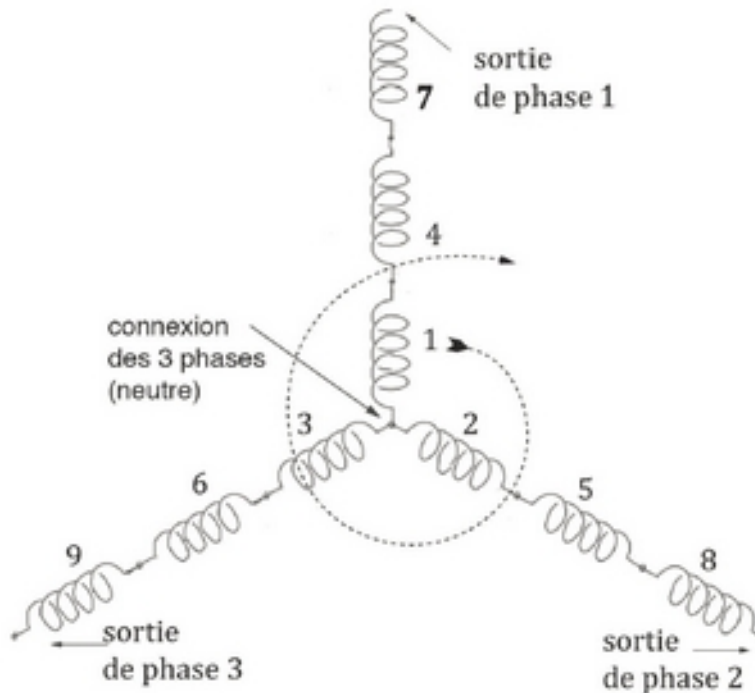
- Disque découpés au laser
- Gabarit pour placer les aimants
- Fabrication d'un moule
- Moulage du rotor dans de la résine (Vynilester/ Polyesther/Epoxy)



# 1.d Génératrice Piggott : le stator

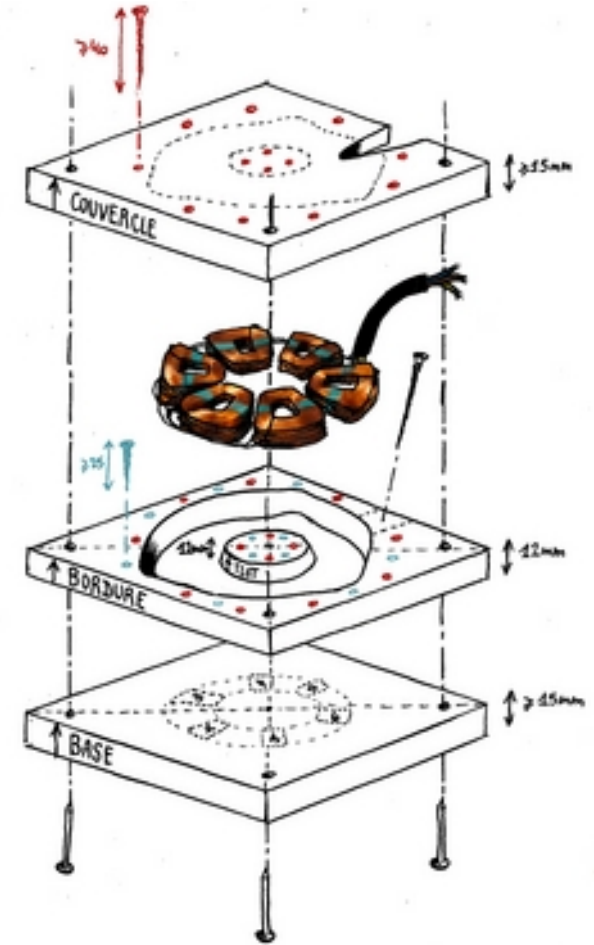
## Principe :

Assemblage de bobines pour créer trois phases déphasées dans l'espace de  $2\pi/3$  rad. électriques.



## Réalisation :

- Bobinage à la main
- Gabarit pour placer les bobines
- Connexion des bobines
- Fabrication d'un moule
- Moulage du stator dans de la résine (Vynilester/ Polyesther/Epoxy) structuré par de la fibre de verre.





# 1.e Génératrice Piggott : le stator

## Réalisation des bobines



## Assemblage des phases



# 1.f Génératrice Piggott : moulage

## Moulage du rotor

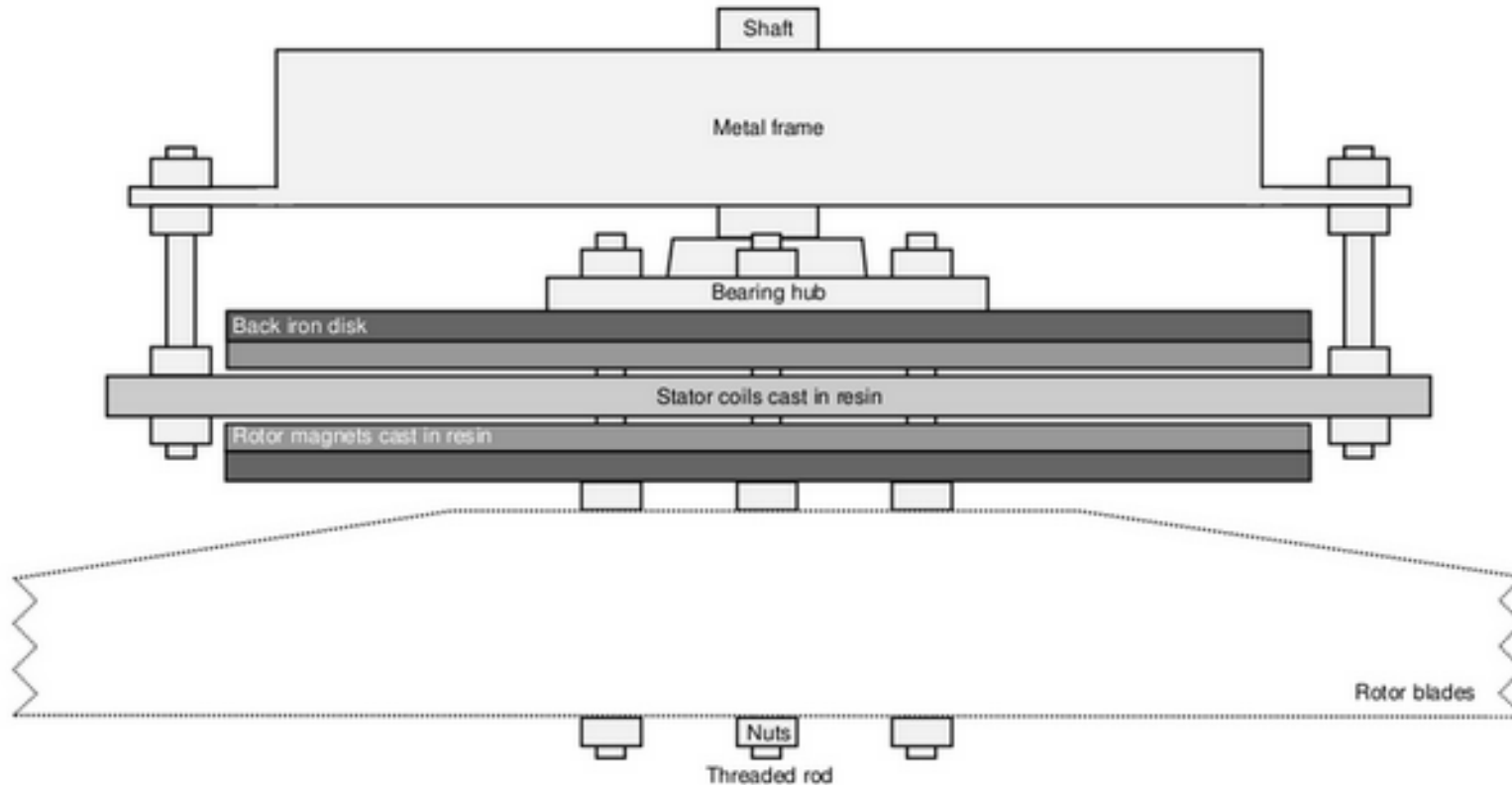


## Moulage du stator





# 1.h Génératrice Piggott : vue en coupe

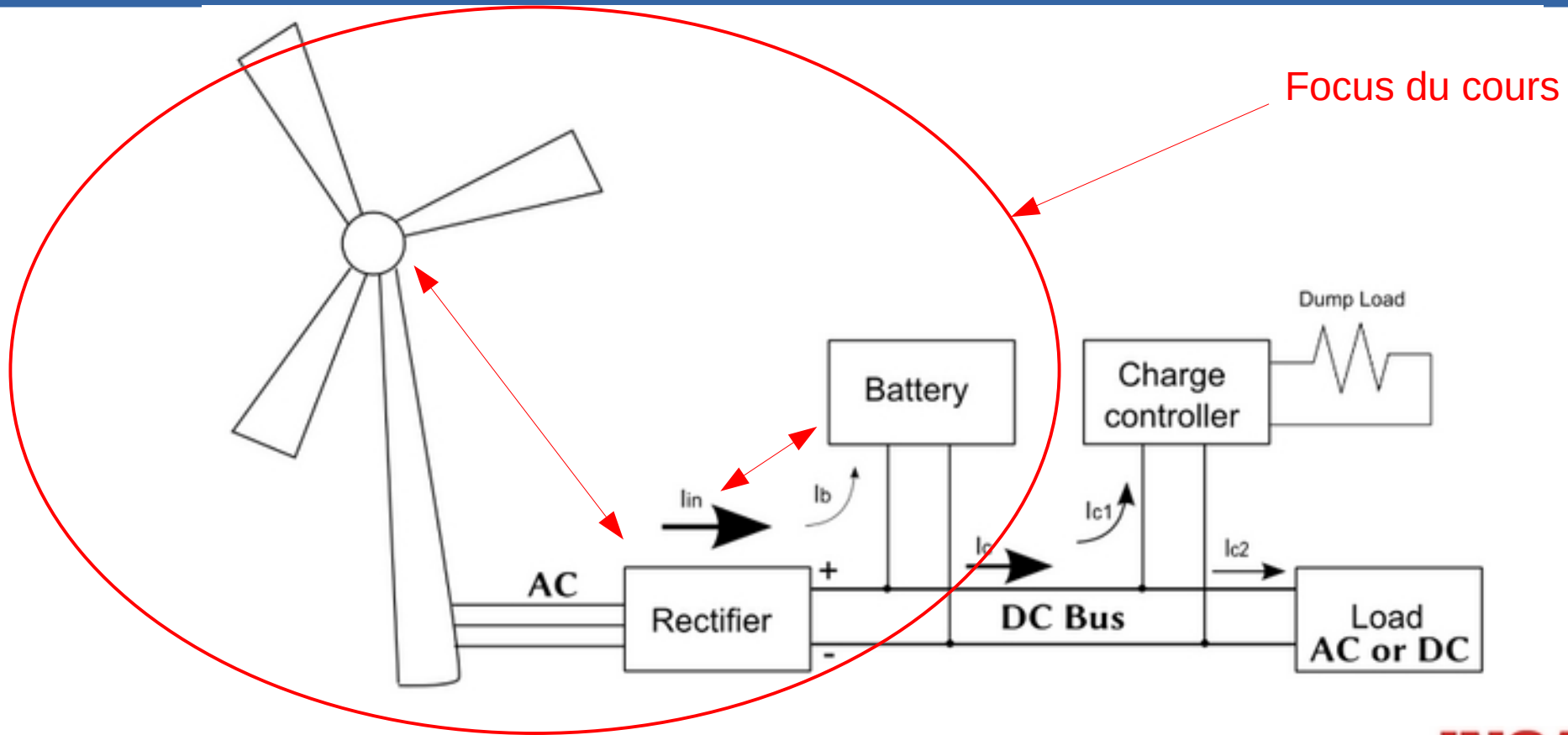


Source : [2]

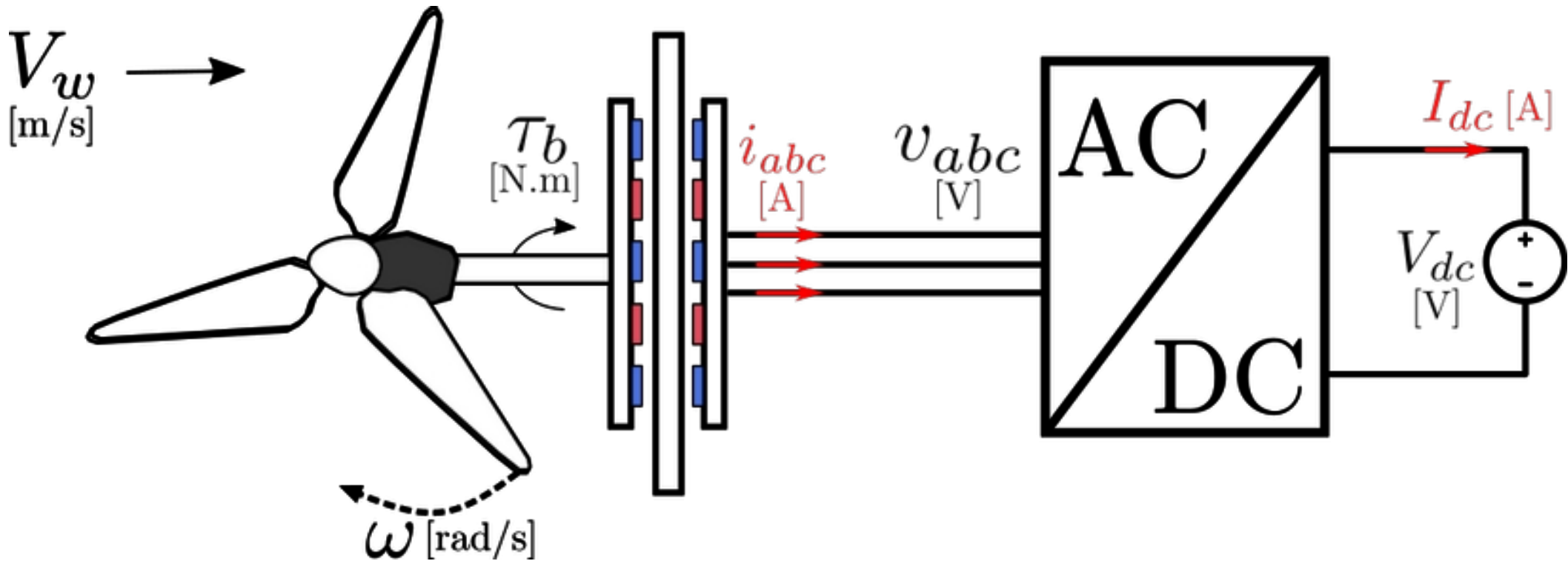
# Problématique

- Comment choisit-on :
  - La taille des pales ?
  - Le nombre d'aimants ?
  - La puissance des aimants ?
  - Le nombre de bobines ?
  - Le nombre de tours de conducteurs par bobine ?
  - L'épaisseur du stator ?

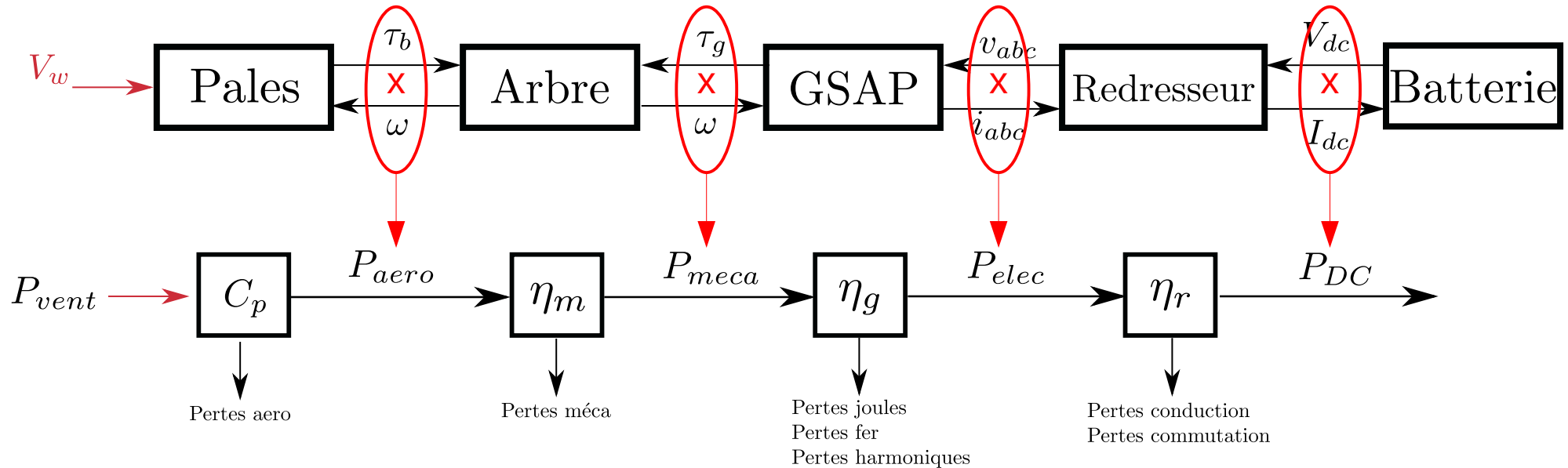
# Vue d'ensemble du système



# Système et grandeurs physiques



# Chaîne de conversion d'énergie



# Puissance et couple aérodynamique

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_w^3$$

$\rho$  : densité de l'air [kg/m<sup>3</sup>]

$S$  : Surface [m<sup>2</sup>]

$V_w$  : Vitesse du vent [m/s]

$$P_{aero} = P_{vent} \cdot C_p$$

$C_p$  : Rendement aérodynamique

$$\tau_b = P_{aero} / \omega$$

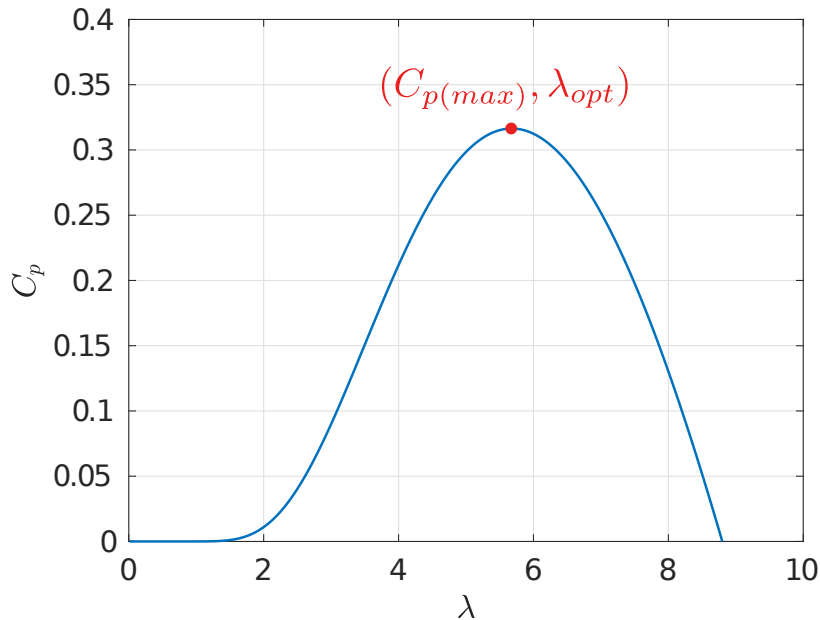
$\tau_b$  : couple des pales [N.m]

$\omega$  : vitesse angulaire [rad/s]



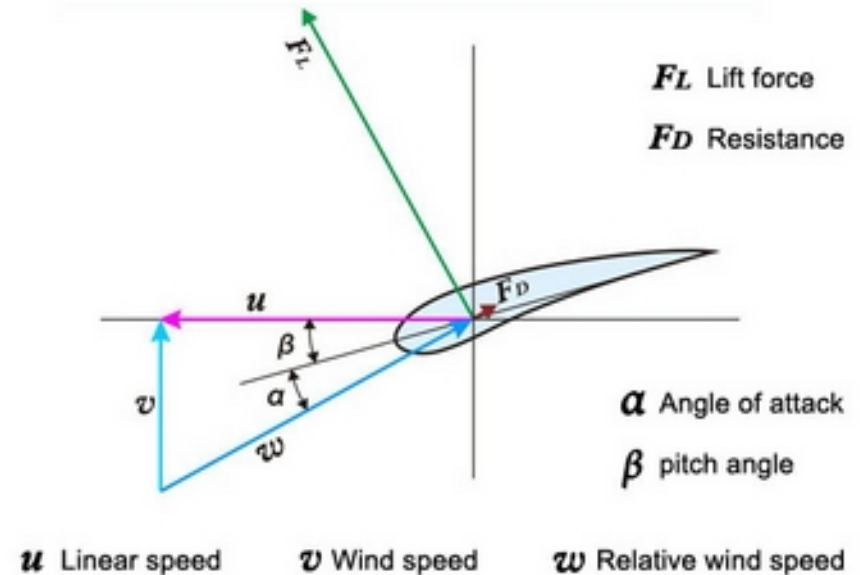
# Aérodynamique des pales

Rendement  
aérodynamique  $C_p = f(\lambda)$



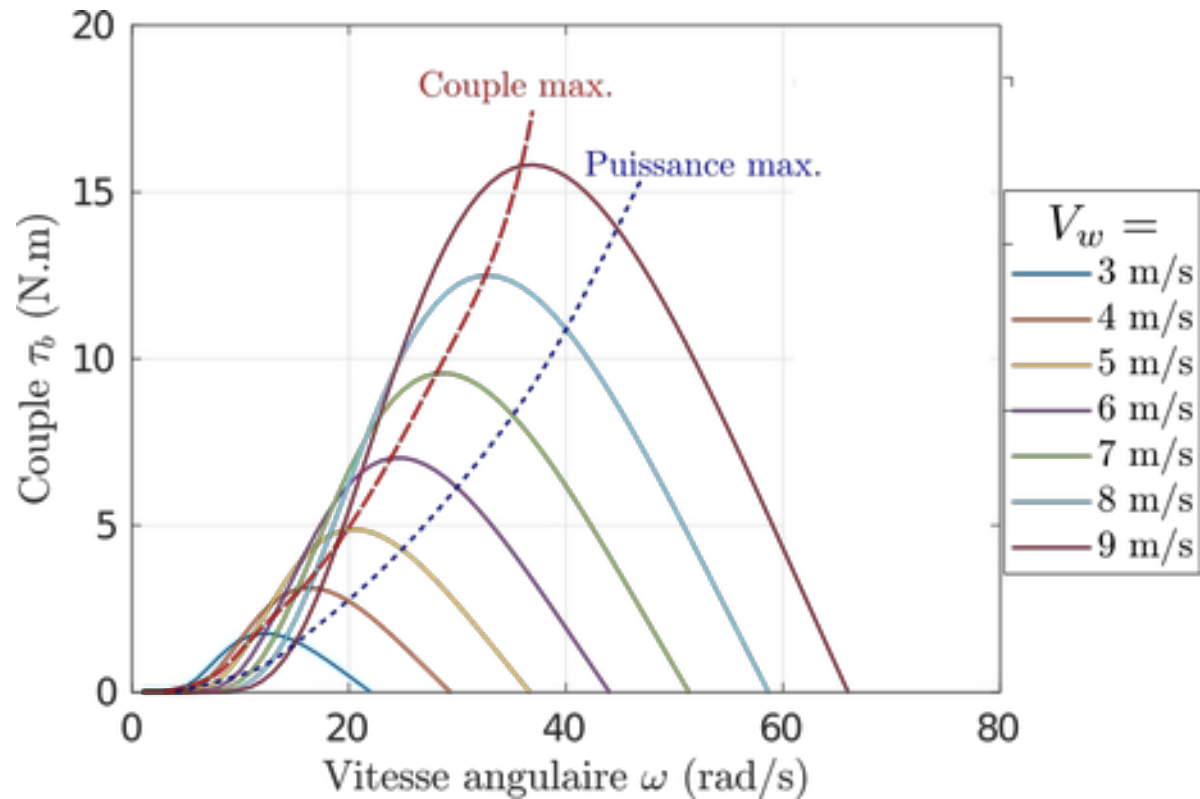
Coefficient aérodynamique en fonction  
de la vitesse spécifique.

Vitesse spécifique :  $\lambda = u/v = \omega \cdot R/v$   
(Tip Speed Ratio)



Forces aérodynamiques sur un  
profil de pale (Source : [1])

# Couple aérodynamique



# Mise en équation mécanique

Equation fondamentale de la  
dynamique en rotation

$$J \frac{d\omega}{dt} = \tau_b - \tau_g - b\omega$$

$\tau_g$  : couple de la génératrice

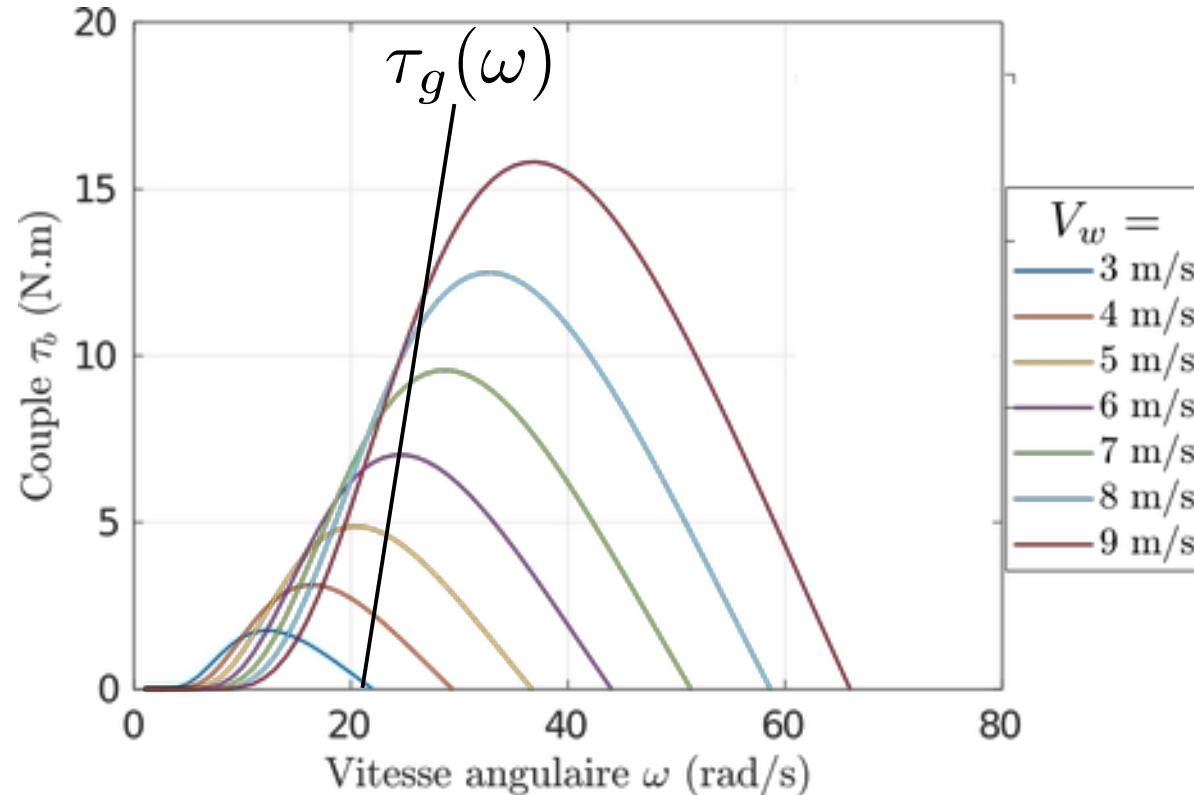
$b$  : coefficient de frottements visqueux

$J$  : inertie (pales + génératrice)

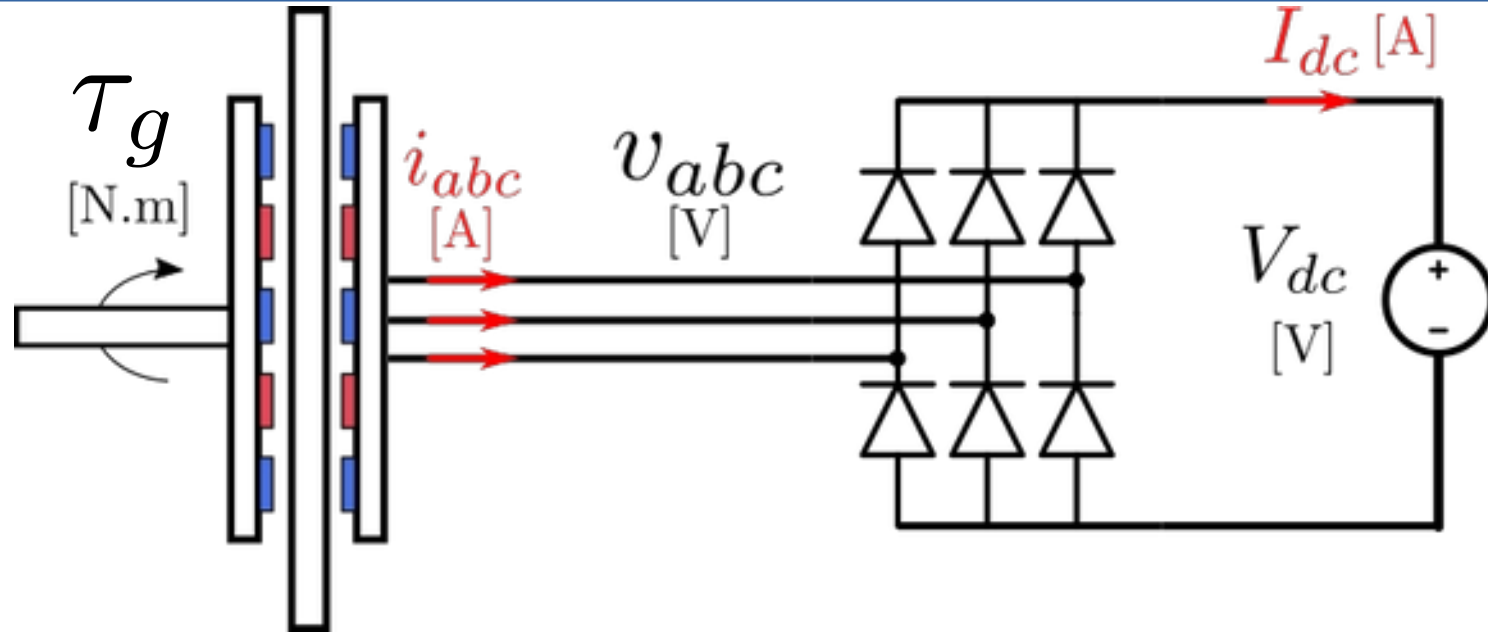
En régime permanent :

$$\tau_b = \tau_g + b\omega$$

# Equilibre des couples (régime permanent)



# Couple de la génératrice



$$\tau_g = f(\omega, V_{dc})?$$

Modélisation indispensable de la machine électrique et du redresseur !

## 2. La machine synchrone à flux axial

- a) Principes de fonctionnement
- b) Flux magnétique couplé
- c) Aimants permanents
- d) Circuit reluctant
- e) Force électro-motrice
- f) Bobinage
- g) Formulation du couple
- h) Circuit électrique équivalent



# 2.a Principes de fonctionnement

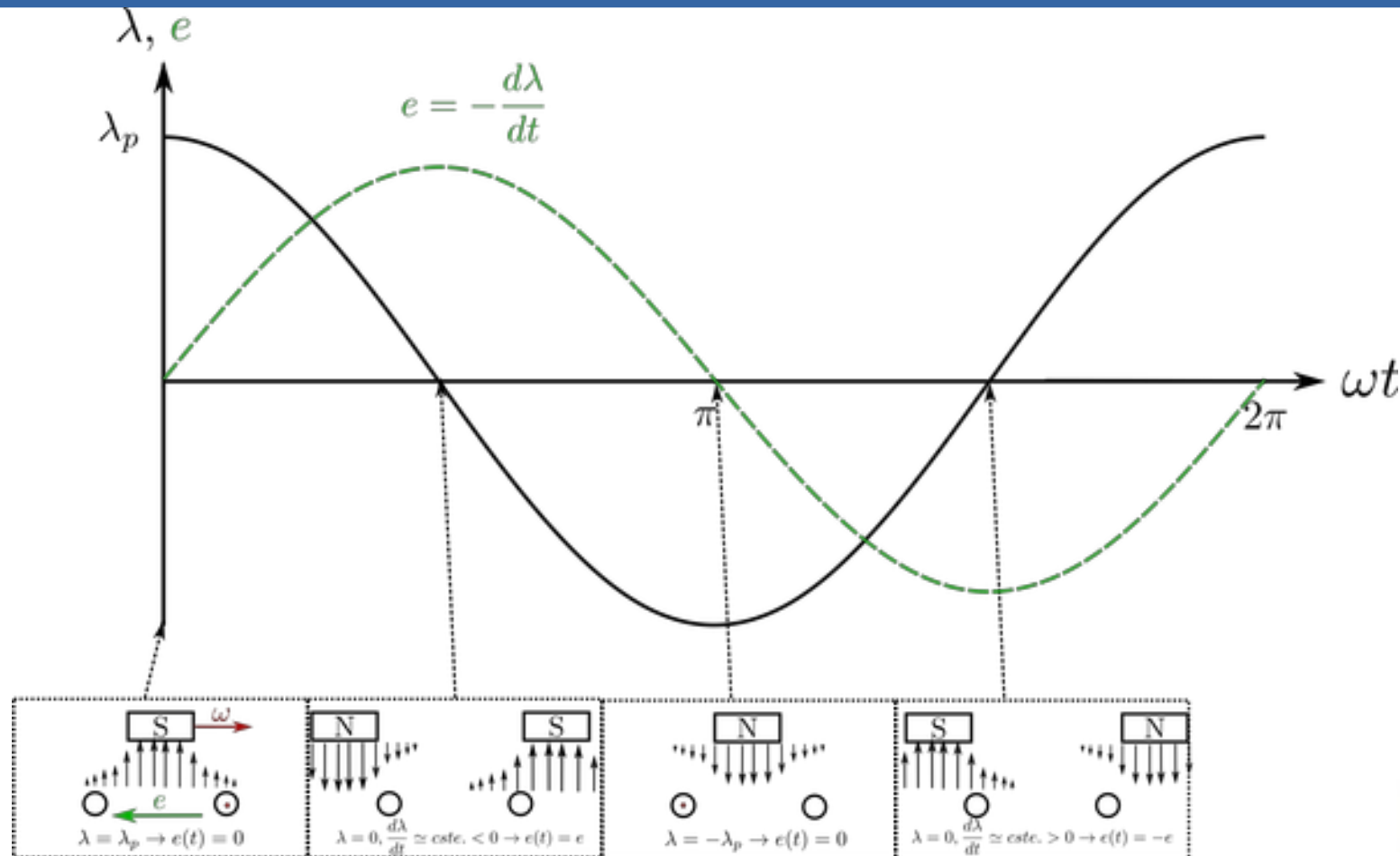
## Animation

### Qu'en retient-on ?

- La position d'un aimant par rapport à une bobine est identique pour toutes les bobines d'une même phase.
- Quand les aimants sont alignés sur le centre des bobines d'une même phase, l'EMF résultante est nulle.

**Formalisons un peu tout cela...**

## 2.c Force (contre) électro-motrice associée à une spire



## 2.b Flux magnétique (rappel)

Généralisation à une surface quelconque traversée par un flux spécifique à cette surface.

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

Induction constante à travers une surface d'échange constante et perpendiculaire au champ magnétique :

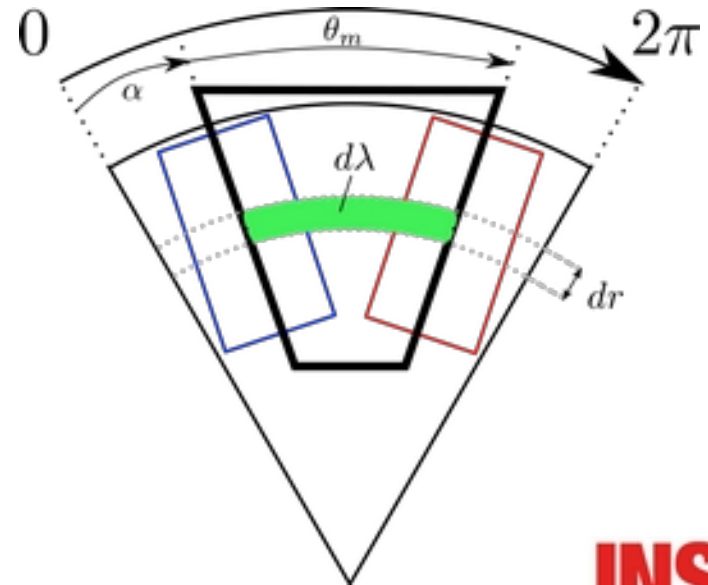
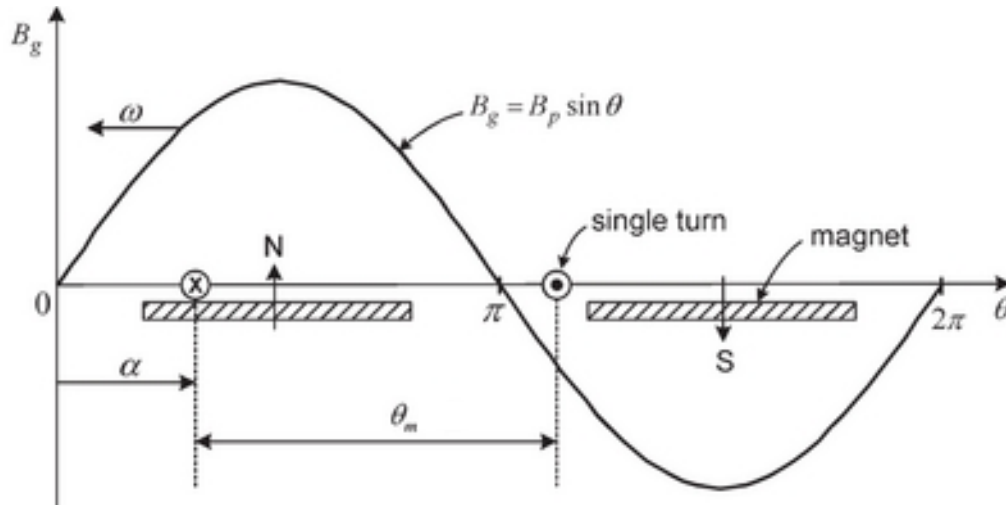
$$\Phi = B \cdot S$$

## 2.b Flux magnétique couplé à une spire.

**Flux couplé (flux linkage)** à une spire = flux à travers la surface d'échange de la spire c'est-à-dire le flux « vu » par cette spire.

C'est la **variation de ce flux** qui génère l'EMF aux bornes de la spire (loi de Lenz-Faraday).

Application à une spire perpendiculaire au champ magnétique présumé sinusoïdal

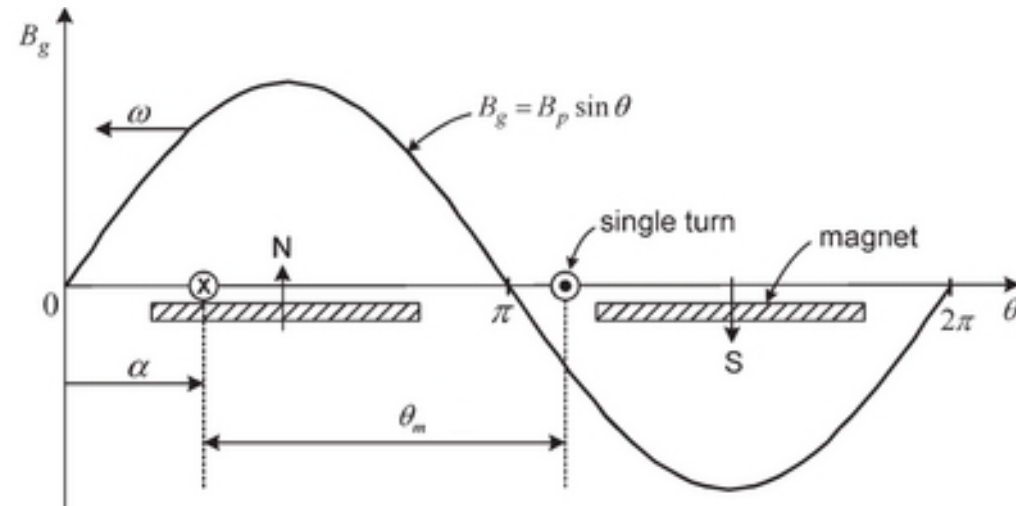


## 2.b Flux magnétique couplé à une spire.

**Flux couplé (flux linkage)** à une spire = flux à travers la surface d'échange de la spire c'est-à-dire le flux « vu » par cette spire.

C'est la **variation de ce flux** qui génère l'EMF aux bornes de la spire (loi de Lenz-Faraday).

Application à une spire perpendiculaire au champ magnétique présumé sinusoïdal



$$d\lambda = \int_{\alpha}^{\alpha + \theta_m} B_g(\theta) d\theta dr$$

Bobine de pas  
plein :

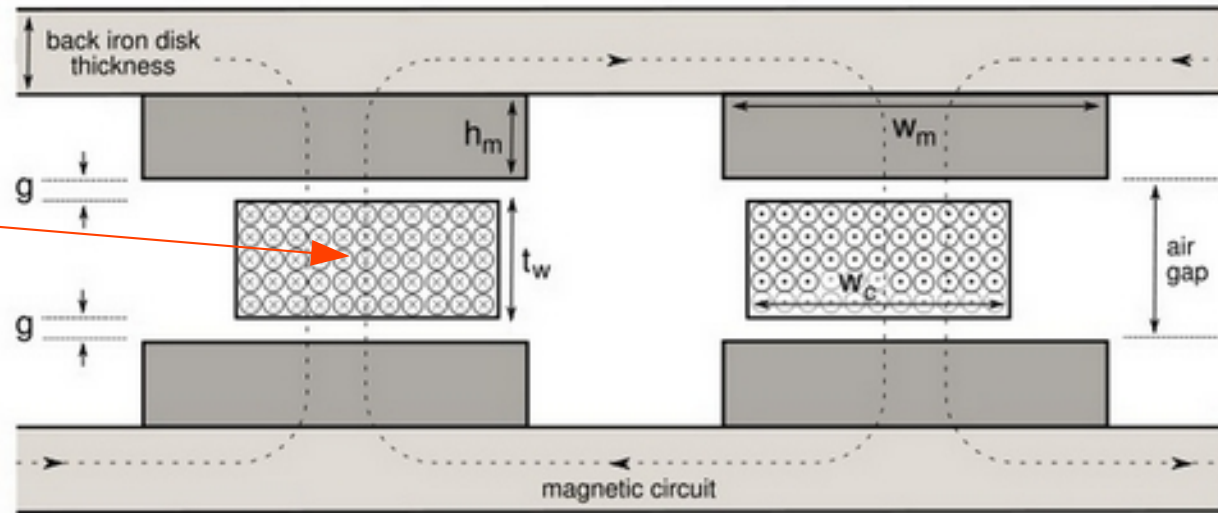
$$\theta_m = \pi \Rightarrow d\lambda = \int_{\alpha}^{\alpha + \pi} B_p \sin(\theta) d\theta dr$$

Quand le champ se déplace à une vitesse  $\omega$  :

$$\alpha = \omega t \Rightarrow d\lambda = 2B_p \cos(\omega t) dr$$

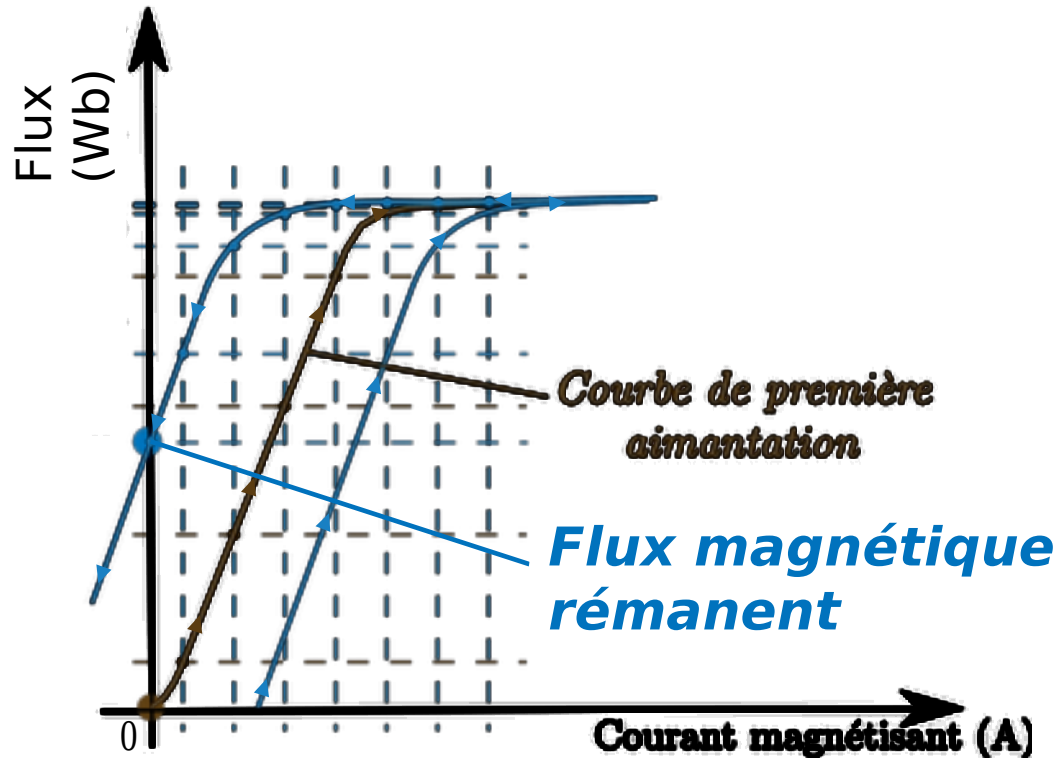
## 2.c Vue en coupe de la génératrice

Valeur de l'induction  
dans l'entrefer ?



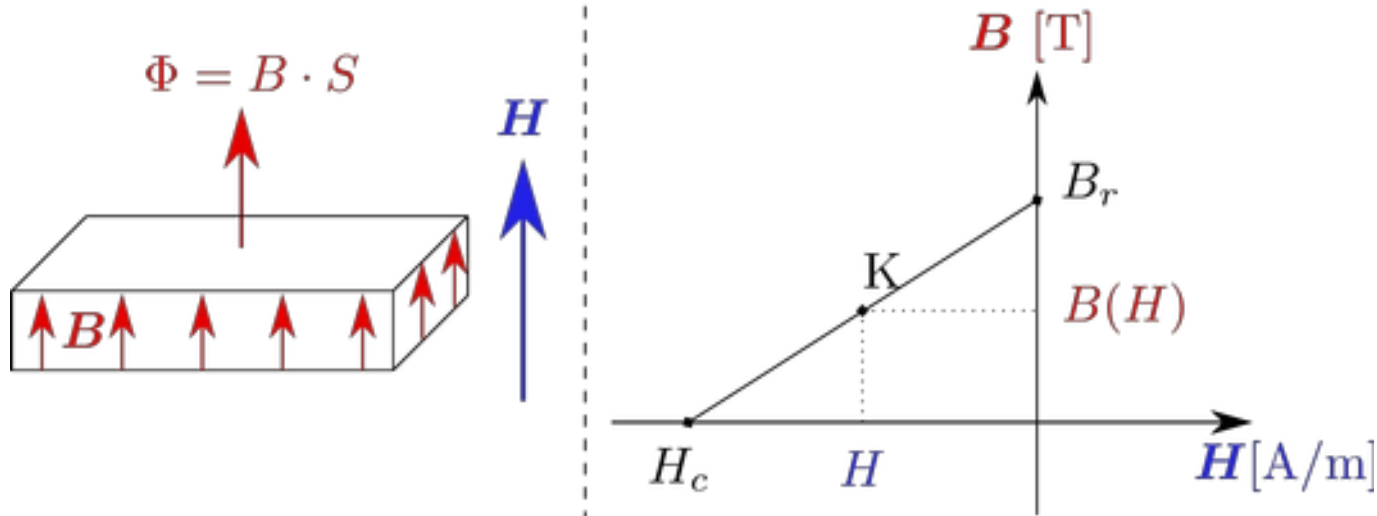


## 2.c Aimants : flux rémanent et courbe d'aimantation



Animation: Laurent Schuller

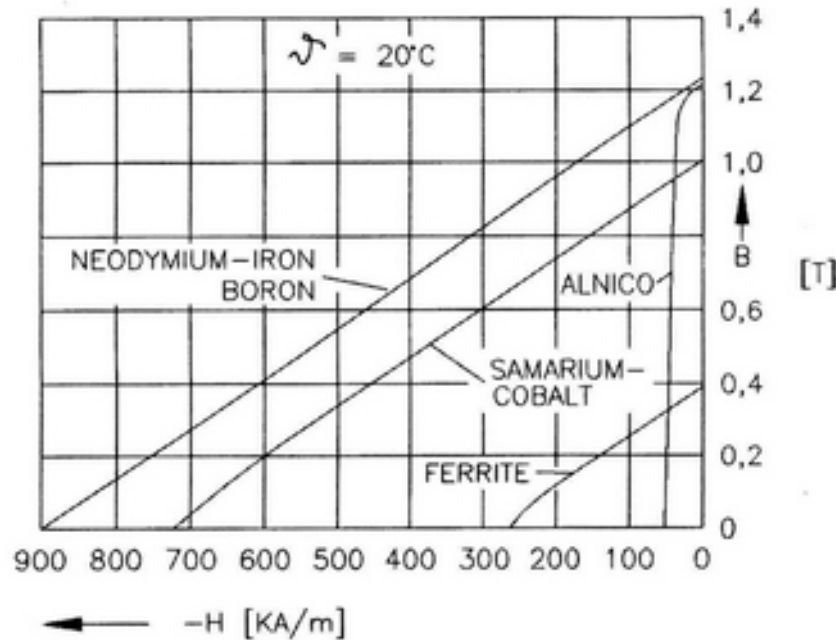
# Point de fonctionnement d'un aimant permanent



$$B(H) = B_r + \frac{B_r}{-H_c} \cdot H = B_r + \mu_{rec} \cdot H$$

Attention :  $H < 0$

## 2.c Les aimants permanents : droite de recul



**Remarque :** pour les aimants permanents, l'évolution  $B(H)$  est quasiment linéaire !

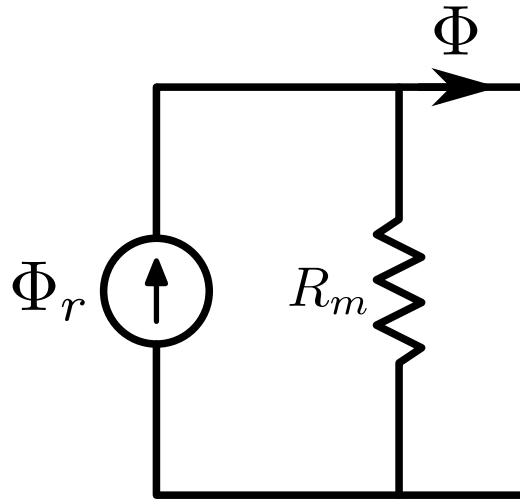
$$\mu_{rec} = \mu_0 \mu_{rrec} = \frac{\Delta B}{\Delta H} \simeq \frac{B_r}{-H_c}$$

→ Avec  $B_r$  et  $H_c$  d'un aimant permanent, on peut approximer le point de fonctionnement en analysant le circuit magnétique qui entoure l'aimant.

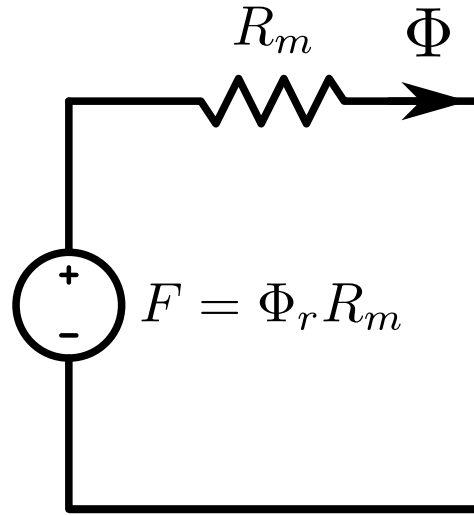
Figure. Courbes de démagnétisation des principaux matériaux utilisés dans les aimants permanents [3]

# Circuit équivalent électrique d'un aimant

Norton

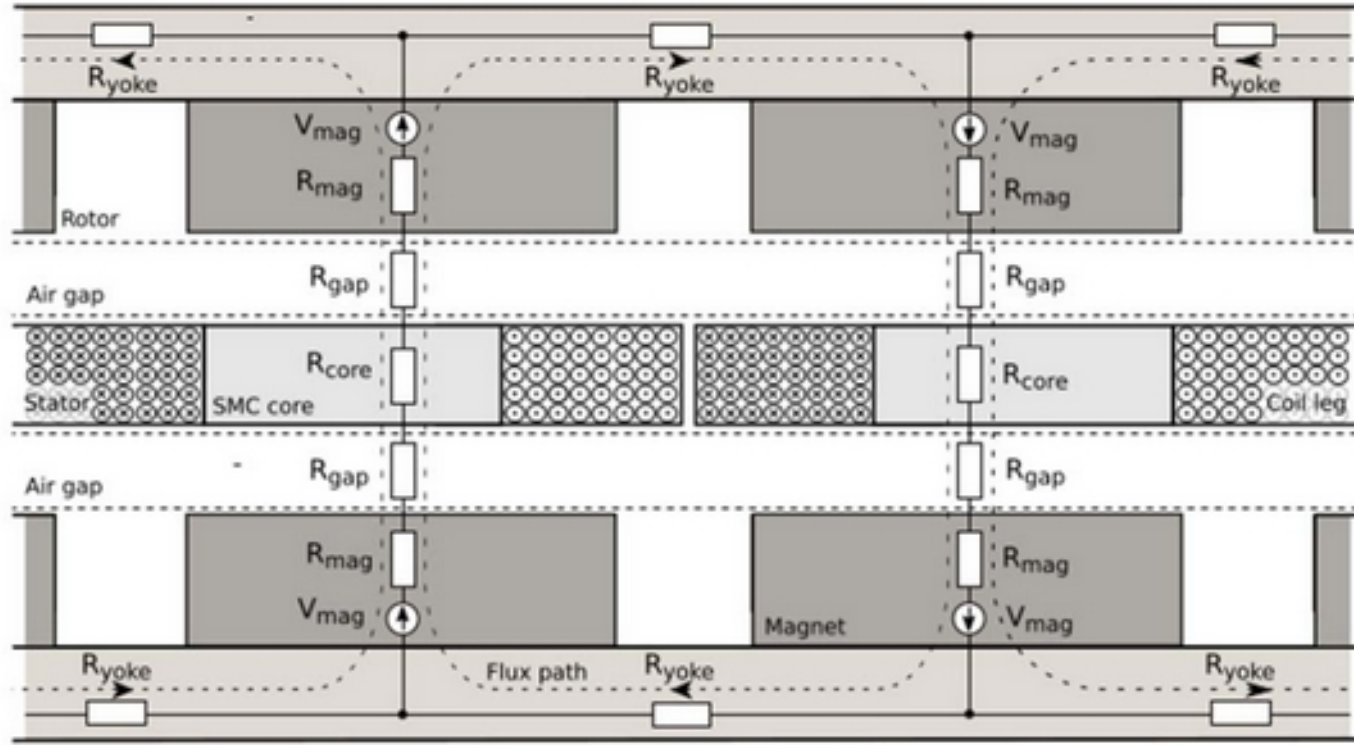


Thevenin



$$\Phi_r = B_r \cdot S$$
$$R_m = \frac{h_m}{\mu_{rec} S}$$

# Circuit réluctant équivalent



## 2.c Calcul de l'induction magnétique dans l'entrefer : Ferrite vs NdFeB

	Ferrite (C8)	NdFeB (N40)
Br [T]	0.4	1.265
-Hc [kA/m]	228	982
(BH)max [kJ/m <sup>3</sup> ]	30	326
Coût volumique	faible	Très élevé (ferrite x 145) Et volatiles !

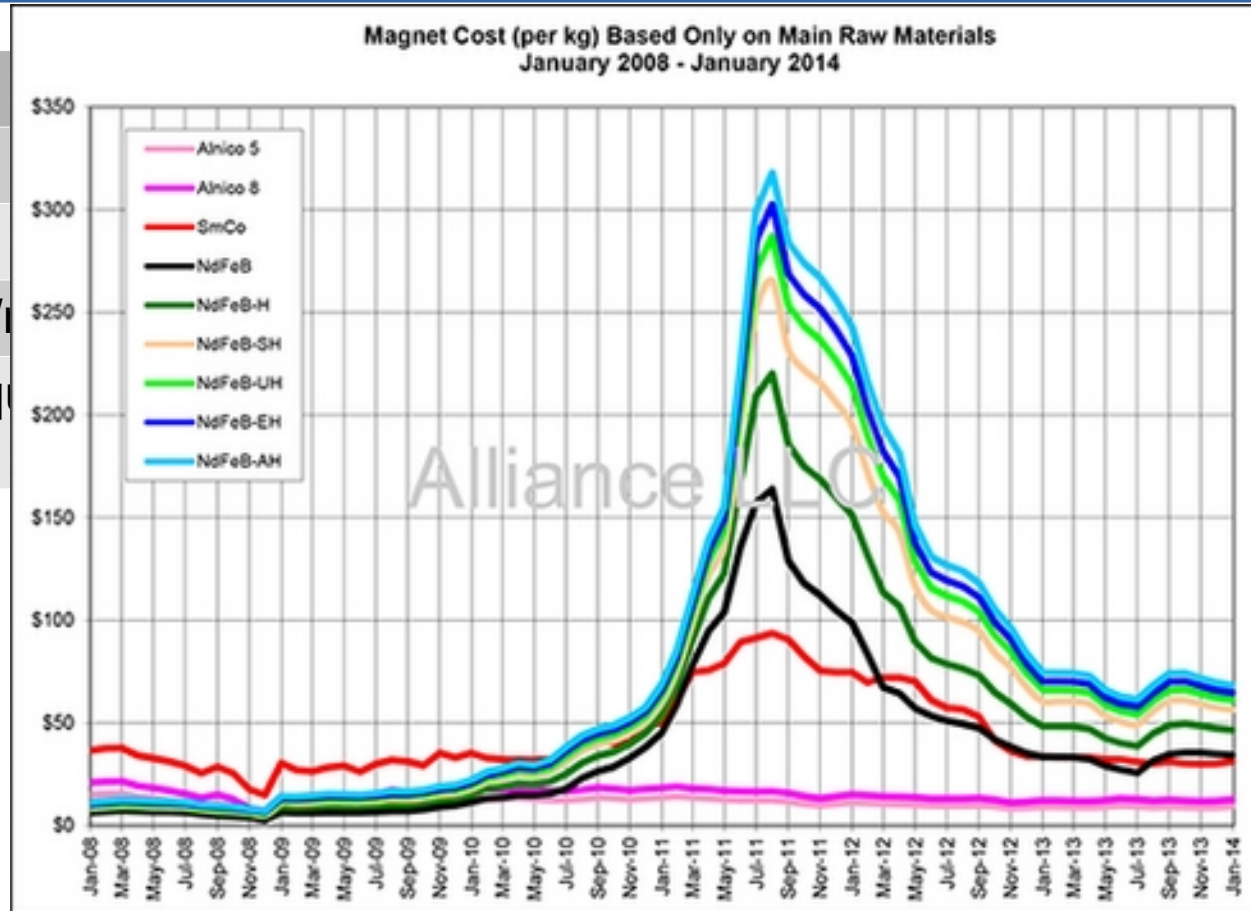
## 2.c Ferrite vs NdFeB

Br [T]

Hc [kA/m]

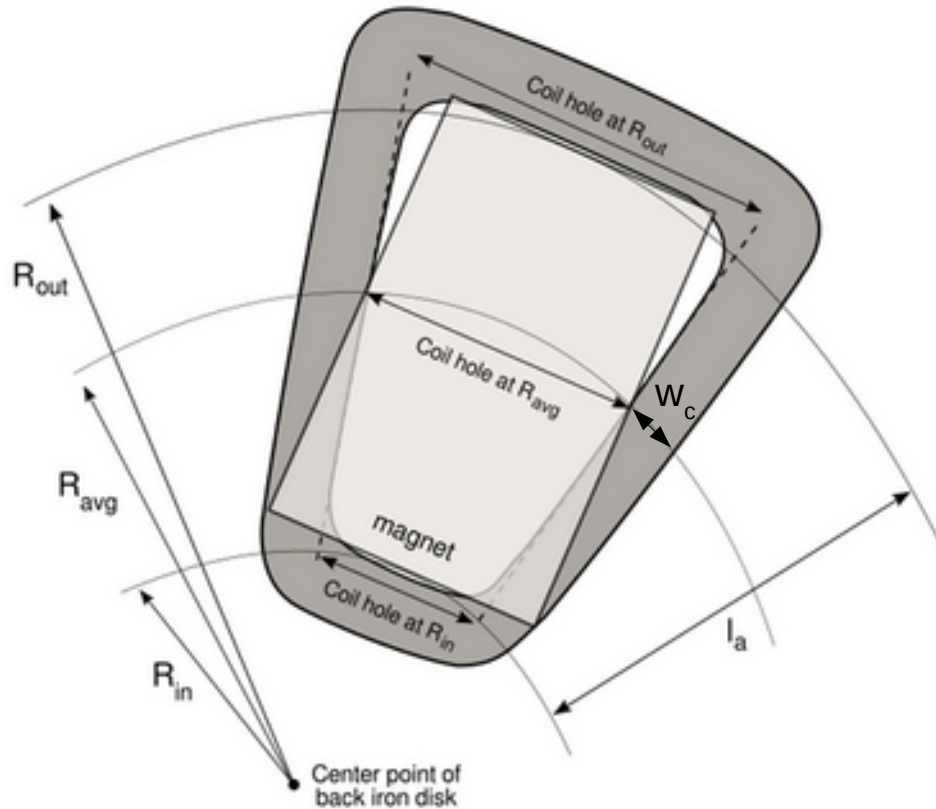
(BH)max [kJ/m<sup>3</sup>]

Coût volumique



Ferrite x 145)

## 2.c Caractéristiques des bobines



### Grandeurs :

- $l_a$  = longueur active
- $w_c$  = largeur de la jambe
- $t_w$  = épaisseur de bobine
- $\theta_m$  = angle mécanique qu'occupe la bobine sur le stator
- Forme : rectangulaire, trapézoïdale, triangulaire.

La forme de la bobine est un compromis entre la quantité de le flux couplé, la résistance et la compacité.

Figure. Bobine trapézoïdale [2]



# EMF à partir du flux

Pour une bobine dont le coeur est de même dimension que l'aimant :

$$\lambda(t) = \Phi(t) \cdot N_c \cdot q \cdot k_w$$

Avec l'hypothèse d'une répartition du flux sinusoïdale :

$$\Phi(t) = \hat{\Phi} \cdot \cos(p\omega t)$$

L'EMF s'exprime ainsi :

$$e = -d\frac{\lambda}{dt} = p \cdot \Phi_f \cdot \omega \cdot \sin(p\omega t)$$

q = nb bobines/phase

Nc=nb spires par bobine

k<sub>w</sub>= facteur de bobinage (en pratique k<sub>w</sub>=0.95)

p=nb paires de poles

$$\Phi_f = N_c \cdot q \cdot k_w \cdot \hat{\Phi}$$

## 2.d Coefficient de remplissage et densité de courant

### Le coefficient de remplissage



$$k_f = \frac{N_c \cdot s_c}{w_c \cdot t_w}$$

$k_f$  détermine la quantité de cuivre ( $N_c$  conducteurs de section  $s_c$ ) efficace au sein d'un brin de section  $w_c \times t_w$ .

En pratique (construction manuelle),

$0.5 < k_f < 0.6$  :

- Bobines triangle : 0.52
- Bobines carrées/trapèze : 0.55
- Limite théorique (fil circulaire) : 0.78

### La densité de courant

$$J = I_{acmax} / s_c \quad [A/mm^2]$$

$$I_{acmax} \simeq \frac{P_{aero(nom)}}{3 \cdot e_{f(nom)}}$$

En pratique :

- Ajout d'un facteur de 10 % de marge pour la puissance nominale
- On essaie de garder  $J \leq 6 A/mm^2$

Hypothèses de calcul :

- E en phase avec I.
- Pas de pertes mécaniques.

## 2.d Résistance et coefficient d'échauffement

### Résistance d'une bobine

$$R_s = \frac{\rho_t L}{S_{cu}} = \frac{N_c q \rho_t l_{avg}}{a^2 k_f t_w w_c} \quad [\Omega]$$

q=nb bobines / phase en séries  
a=nb bobines en parallèle  
l<sub>avg</sub>=longueur moyenne d'une spire

### Coefficient d'échauffement d'une bobine

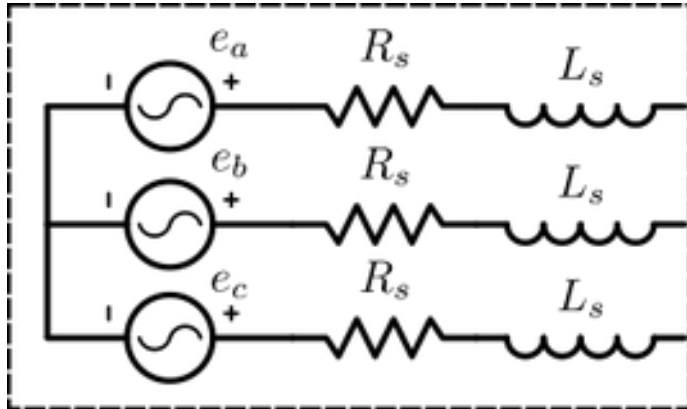
$$c_q = \frac{3R_s I_{acmax}^2}{2Q l_{avg} w_c} \quad [W/m^2]$$

En pratique c<sub>q</sub> ne doit pas dépasser une valeur max ( 0.3 W/cm<sup>2</sup> ).

**Quizz :** Donner une condition sur w<sub>c</sub> à partir de R<sub>s</sub> et c<sub>q</sub> .

# Modèle électrique de la MSAP

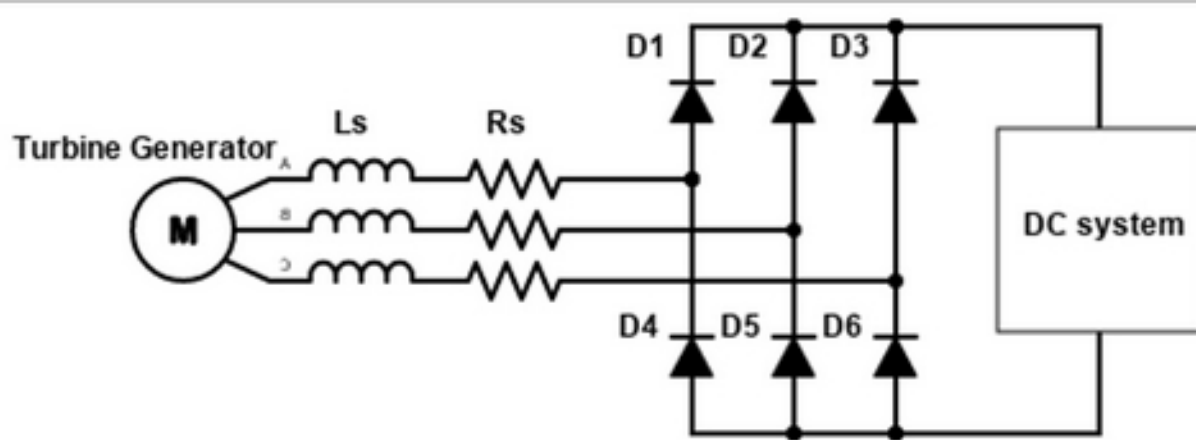
Schéma équivalent électrique d'une machine synchrone à aimants permanents



$$V_{abc} = e_{abc} - R_s \cdot i_{abc} - L_s \frac{di_{abc}}{dt}$$

# Connexion avec un PD3

AC → DC



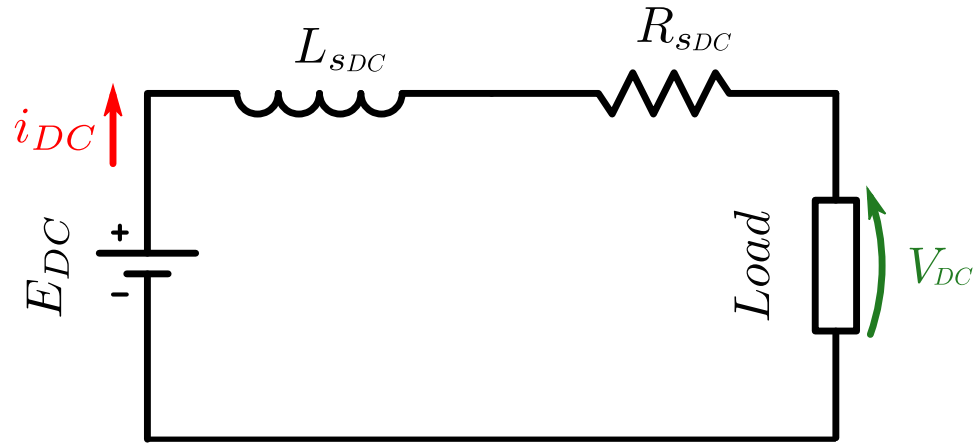
Relation entre tension de bus et EMF (RMS) :

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{ac} + 2V_D$$

$$V_{ac} = e_f - R_s \cdot i - L_s \frac{di}{dt}$$

$$\hat{e}_f = p \cdot \phi_f \cdot \omega$$

# Modèle moyen équivalent DC



**Loi des mailles :**

$$V_{DC} = E_{DC} - L_{sDC} \frac{di_{DC}}{dt} - R_{sDC} i_{DC}$$

**EMF équivalent DC :**

$$E_{DC} = p \cdot \Phi_{DC} \cdot \omega$$

**Formulation du couple :**

$$\tau_g = p \cdot \Phi_{DC} \cdot i_{DC}$$

Comportement d'une MCC !

Hypothèse : Effet d'empiètement négligé

# Table d'équivalences

Variable	Symbole	Equivalent DC
EMF	$e_f$	$E_{DC} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} e_f$
Courant	$i$	$i_{DC} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} i$
Flux	$\Phi_f$	$\Phi_{DC} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \Phi_f$
Resistance	$R_s$	$R_{sDC} = 3\left(\frac{\sqrt{6}}{\pi}\right)^2 R_s$
Inductance	$L_s$	$L_{sDC} = 3\left(\frac{\sqrt{6}}{\pi}\right)^2 L_s$

Source [7]

# Formulation du couple en fonction de la vitesse

**En régime permanent :**

$$V_{DC} = E_{DC} - R_{sDC}i_{DC}$$

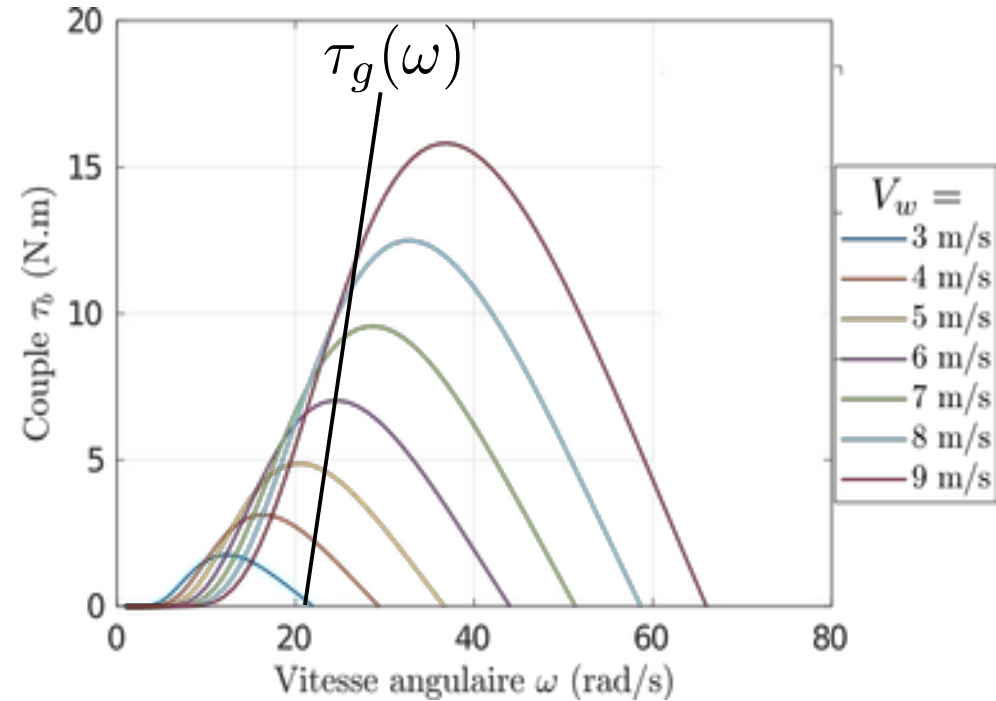
**Le courant s'exprime :**

$$i_{DC} = \frac{p\Phi_{DC}}{R_{DC}}\omega - \frac{V_{DC}}{R_{DC}}$$

**Et ainsi le couple :**

$$\tau_g(\omega) = \frac{p^2\Phi_{DC}^2}{R_{DC}}\omega - \frac{V_{DC}}{R_{DC}}p\Phi_{DC}$$

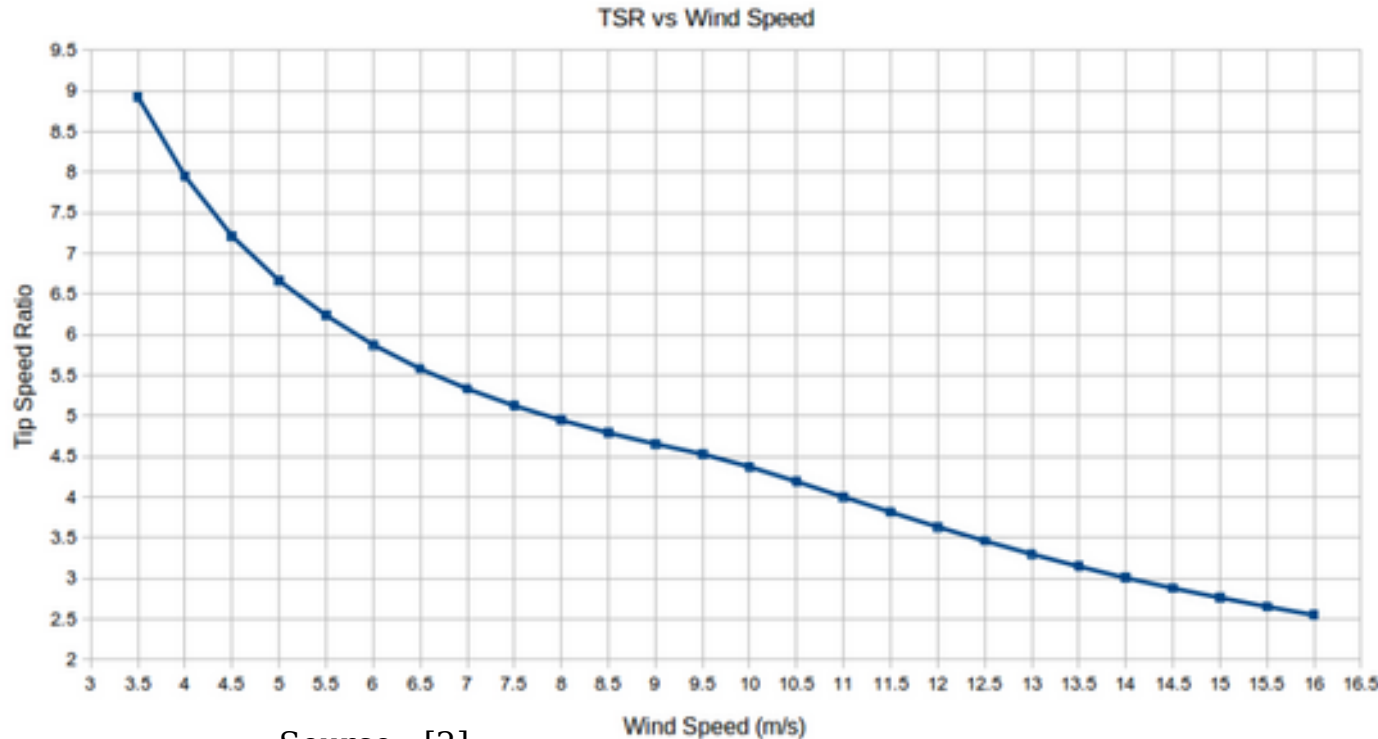
Système non réversible !  $\Rightarrow \tau_g > 0$





## 3.a Vitesse spécifique (à vitesse de rotation fixe)

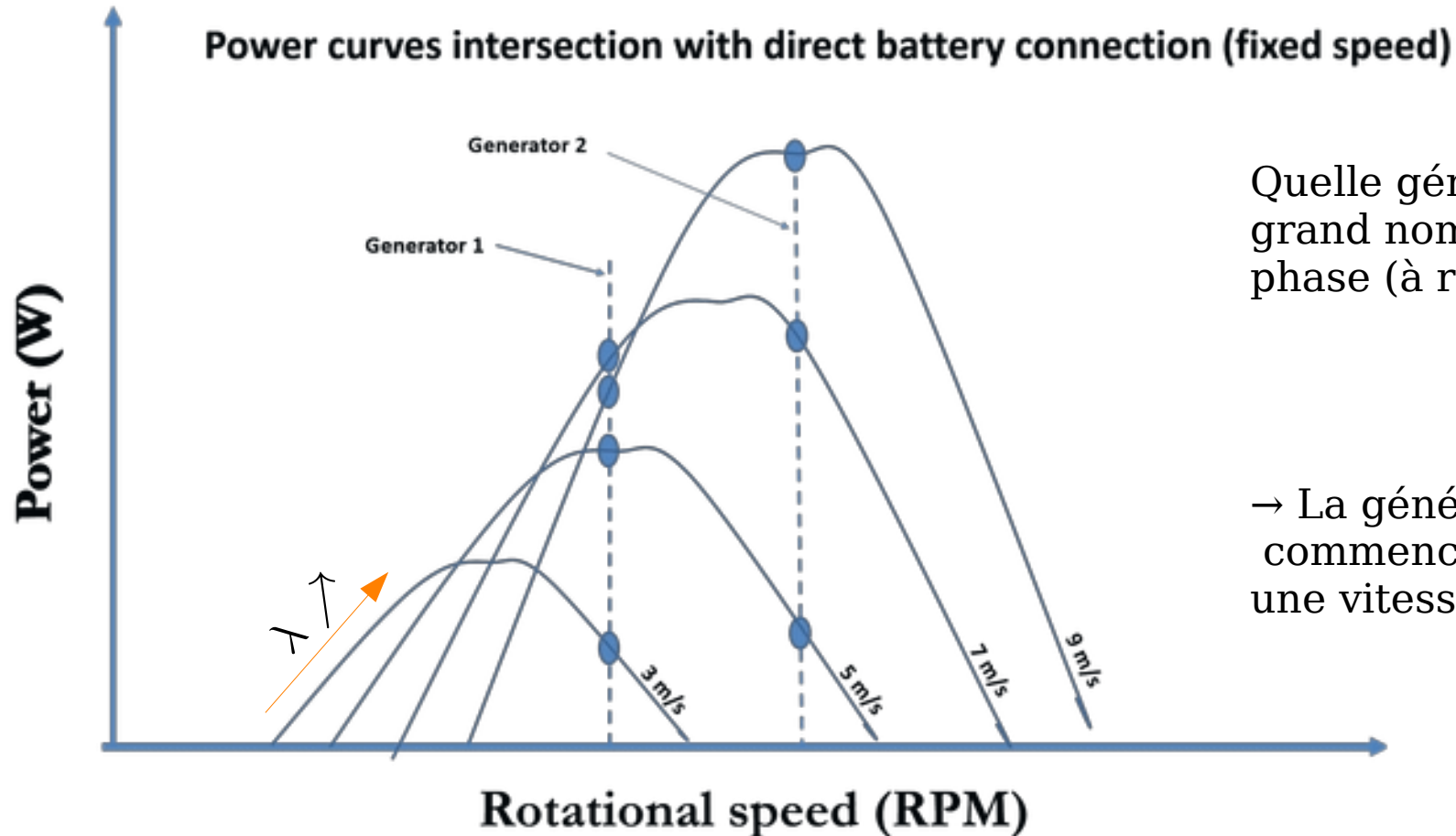
A vitesse de rotation fixe, que fait la vitesse spécifique quand la vitesse de vent augmente ?



Source : [2]

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v}$$

## 3.b Courbes de puissances de l'éolienne et courbes de charge

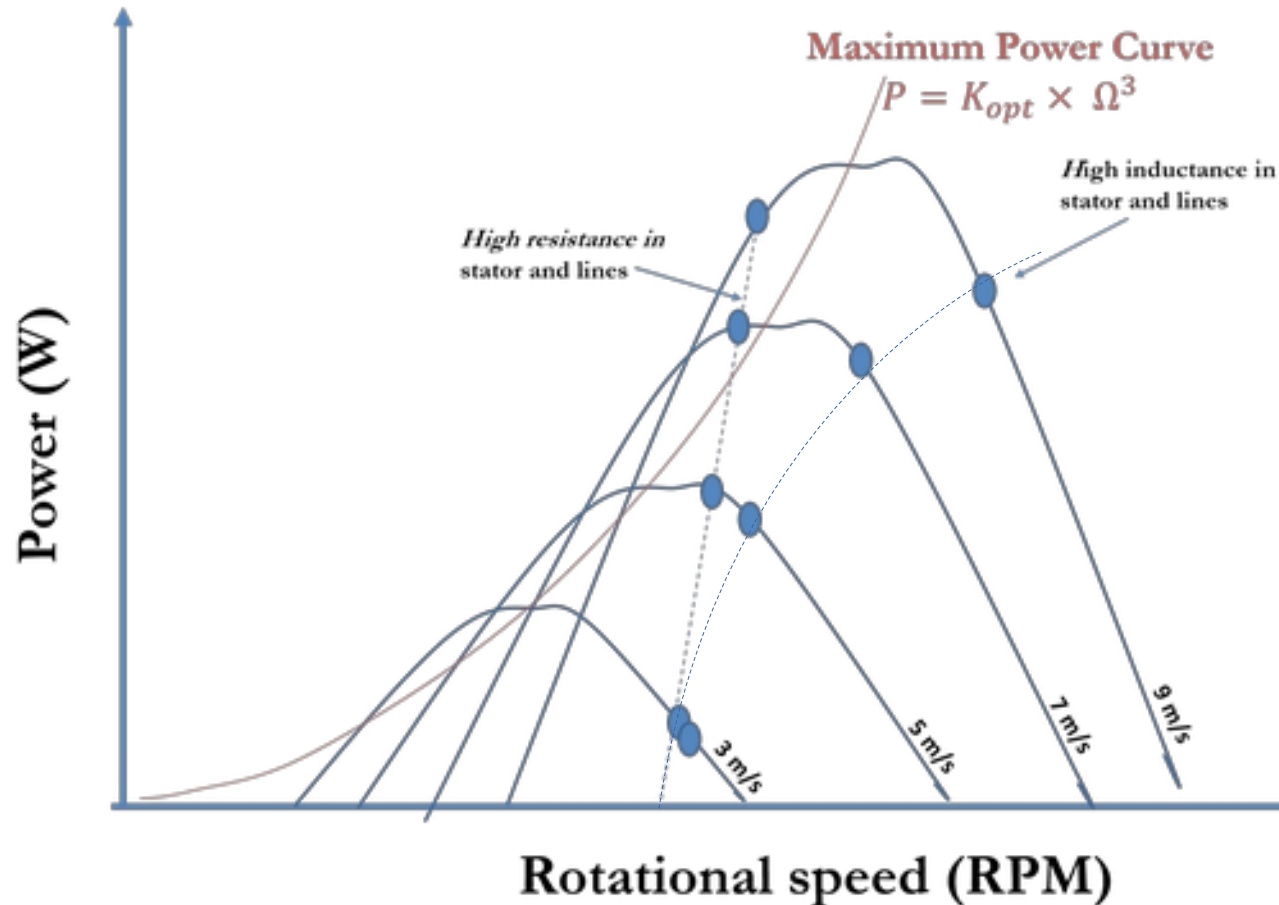


Quelle génératrice a le plus grand nombre de spires par phase (à rotor équivalent) ?

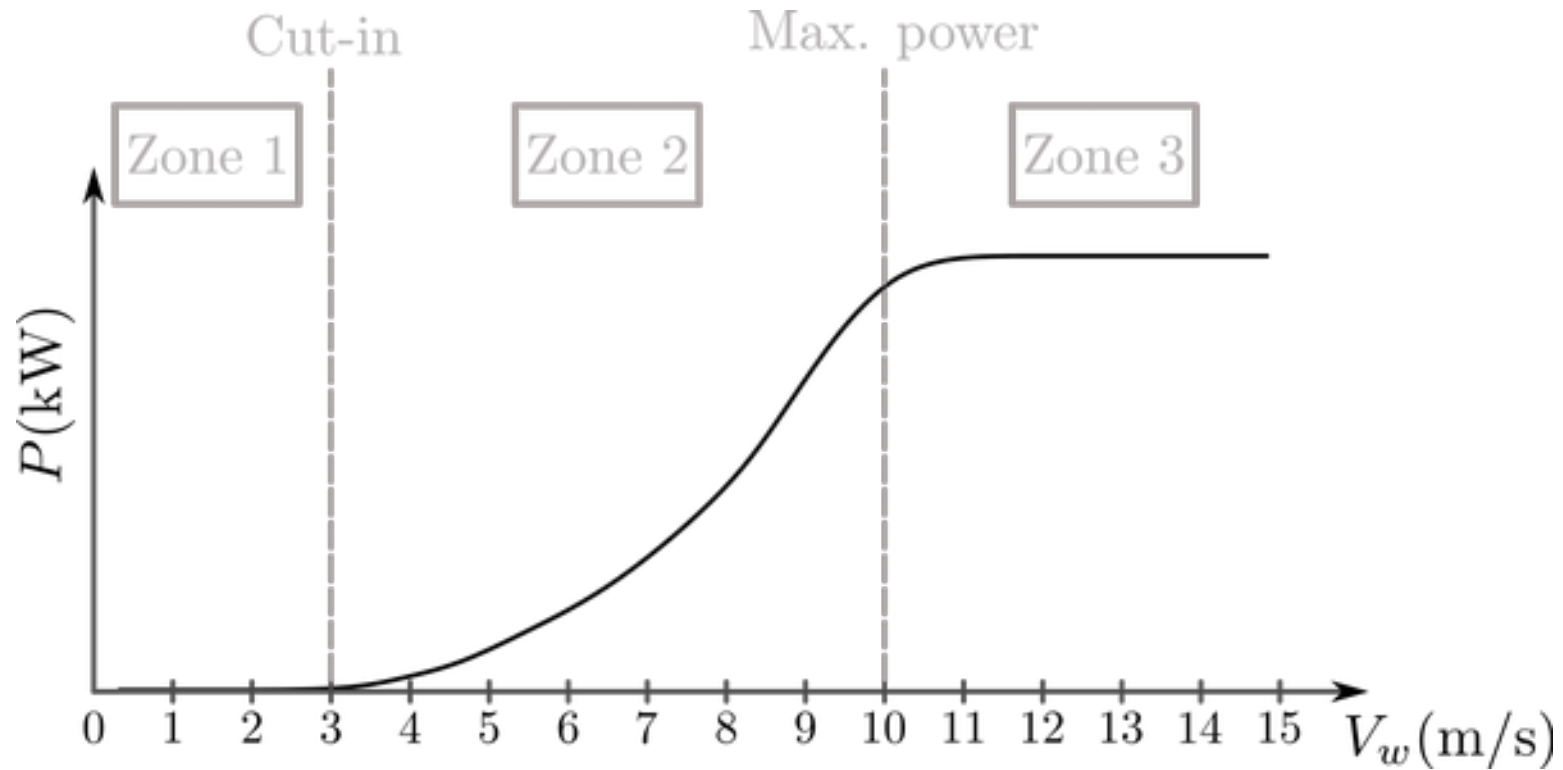
...

→ La génératrice 1 car elle commence à produire à une vitesse plus faible

## 3.b Effet des paramètres de la génératrice sur la courbe de charge



# Courbe de puissance



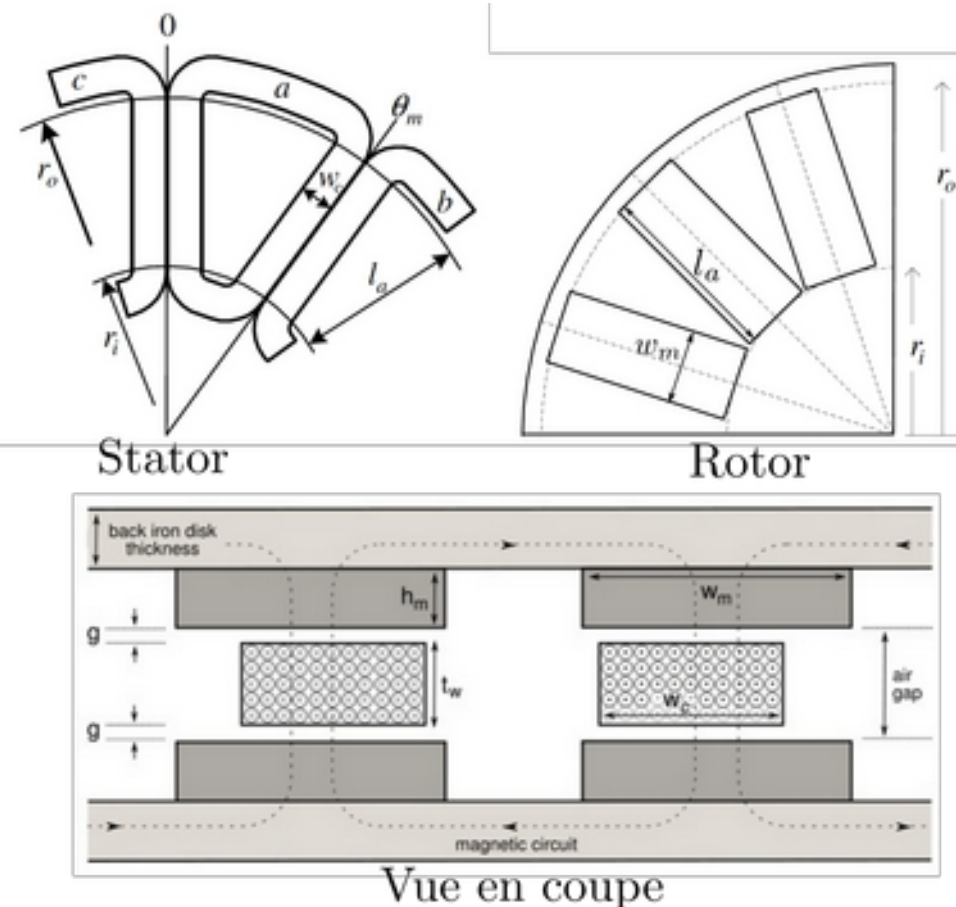
# 3. TD : Introduction au dimensionnement analytique

**Objectif :** Dimensionner une machine AFPM double rotor, de manière analytique en partant d'un cahier des charge aérodynamique.

# Cahier des charges

- Puissance nominale :  $P_{DC} = 700 \text{ W}$  pour un vent nominal  $V_w = 10\text{m/s}$
- Tension batterie :  $V_{dc} = 24\text{V}$
- TSR d'accroche :  $\lambda_{cut-in} = 9$

# Synthèse des dimensions de la génératrice



## Données :

Aimants :  $l_a$ ,  $w_m$ ,  $B_r$ ,  $H_c$ ,  $p$

Entrefer :  $2g + t_w$

Stator :  $t_w$ ,  $k_f$

## A calculer :

- Nombre de tours de fil / bobines  **$N_c$**
- Section de fil  **$s_c$**
- Largeur d'un brin de bobine  **$w_c$**

# Données

	Paramètres	Valeur
Aimants ferrite (C8)	$l_a \times w_m \times h_m$	$50 \times 50 \times 20$ mm
Aimants NdFeB (N40)	$l_a \times w_m \times h_m$	$46 \times 30 \times 10$ mm
Nombre de paire de poles	$p$	6
Epaisseur statorique	$t_w$	13mm
Dégagement mécanique (stator-rotor)	$g$	1,5mm
Nombre de bobines en série par phase	$q$	3
Densité de l'air	$\rho$	$1.204 kg/m^3$



# Calcul de la vitesse d'accroche

1. Calculer la longueur d'une pale.

On désire une puissance nominale dans la batterie  $P_{DC} = 700 \text{ W}$  à une vitesse de vent  $v_w = 10 \text{ m/s}$ .

Hypothèse :  $\eta_{meca} \cdot \eta = \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_r = 0.8$ ,  $C_{p(nom)} = 0.32$

2. Calculer la vitesse d'accroche du rotor (vitesse pour laquelle le rotor commence à produire du couple et donc à injecter sur la batterie). Donner aussi une valeur en tours par minutes.

CDC : vent de démarrage de  $3.5 \text{ m/s}$ , TSR d'accroche  $\lambda_{cut_{in}} = 9$

# Calcul du flux et du nombre de conducteurs

3. Calculer le flux équivalent DC  $\Phi_{DC}$  qu'il faudrait obtenir pour que l'éolienne commence à produire du couple à cette vitesse.
4. En déduire la constante de flux couplé  $\phi_f$  nécessaire.
5. Calculer la valeur du flux magnétique  $\hat{\Phi}$  dans l'entrefer à partir du circuit magnétique reluctant et des dimensions géométriques des données. Faire le calcul pour les aimants ferrites et Néodyme.
6. En déduire le nombre de tours de fil par bobine qu'il faudrait avoir pour chaque type d'aimant.

# Section de cuivre et largeur des brins

8. Calculer le courant maximum dans une phase (RMS)  
Hypothèse :  $\lambda_{nom} = 4.5$
9. En déduire la section de conducteur par le critère de la densité de courant.  
CDC :  $J_{max} = 6.5 \text{ mm}^2$
10. En déduire le diamètre de conducteur  $d_c$  minimal pour un puis deux conducteurs en parallèle
11. En déduire la largeur  $w_c$  d'un brin de bobine  
Hypothèse :  $k_f = 0.55$

# Résumé de la démarche

Donner le résumé de la démarche de dimensionnement sous forme de schéma.

# 4. Les outils de dimensionnement

## OpenAFPM

- a) Les trois outils MagnAFPM, UserAFPM, OptiAFPM
- b) MagnAFPM : processus de design
- c) Variables principales
- d) Quelques réflexes

# 4.a La suite d'outil OpenAFPM<sup>1</sup>

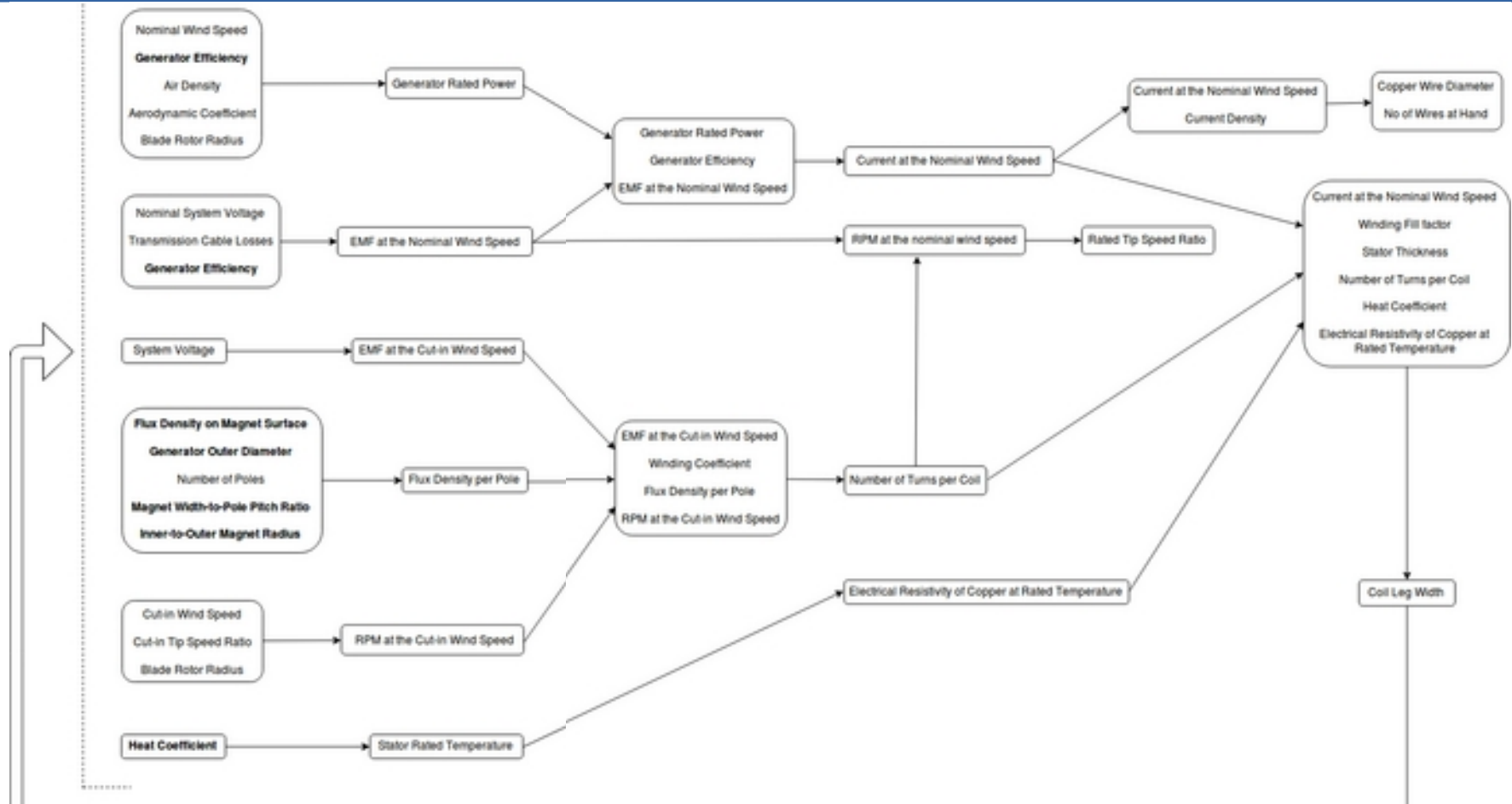
**Concept** : Une suite d'outil pour dimensionner des machines AFPM pour le petit éolien.

**Particularité** : Couplage d'un algorithme d'optimisation à un processus d'analyse par éléments finis magnétiques (FiniteElementMagnetics) avec l'outil libre FEMM.

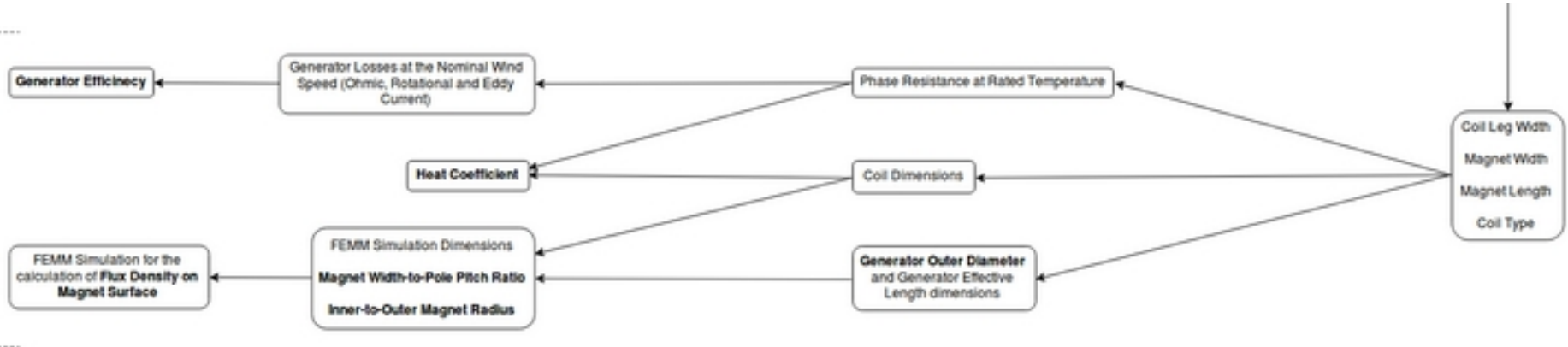
- **OptiAFPM** : recherche d'une dimension optimale d'aimants permanents pour un jeu de pales spécifique.
- **MagnAFPM** : design d'une machine pour un jeu de pales et une dimension d'aimant spécifique.
- **UserAFPM** : banc d'essai virtuel, permet de vérifier les performances en charge d'une génératrice.

<sup>1</sup> Réalisé par RURERG de la National Technical University of Athens, financé par Wisions.

# 4.b MagnAFPM : processus de design

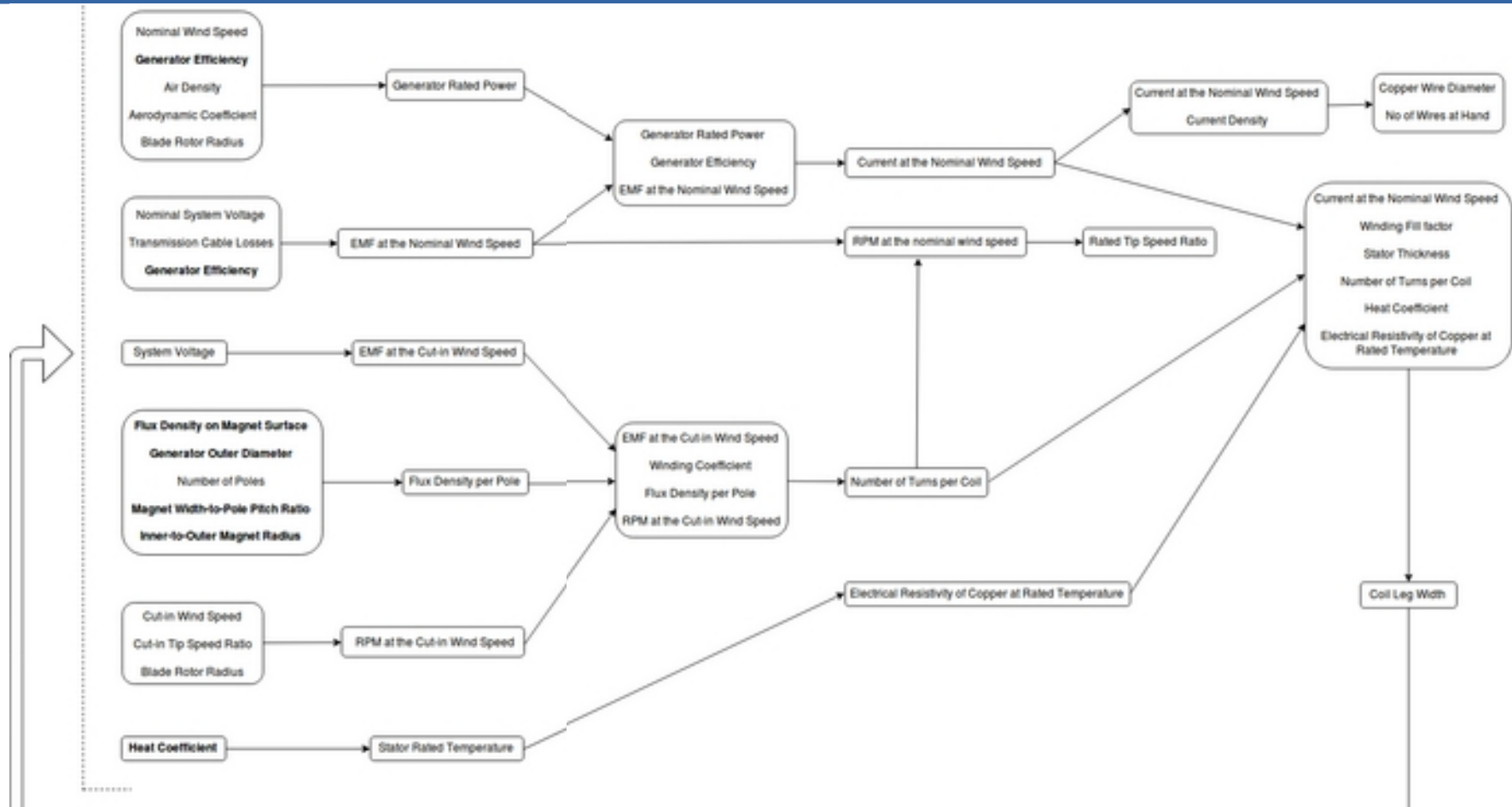


## 4.b MagnAFPM : processus de design





# 4.b MagnAFPM : processus de design



# 4.c Lancer une simulation MagnAFPM

## 1) Initialisation des paramètres

Title \* Eolienne Ferrite CEE

Blade Rotor Inputs	Generator Stator Inputs	Generator Rotor Inputs
<b>Turbine radius *</b> <input type="text" value="1"/> m	<b>Select coil type *</b> <input type="text" value="Triangular"/>	<b>AFPM rotor topology *</b> <input type="text" value="Double Rotor"/>
<b>Aerodynamic coefficient *</b> <input type="text" value="0.3"/>	<b>Winder bolt size *</b> <input type="text" value="8"/> mm	<b>Magnetic material *</b> <input type="text" value="Ferrite C8"/>
<b>Cut-in wind speed *</b> <input type="text" value="3"/> m/s	<b>Winding fill factor *</b> <input type="text" value="User defined"/>	<b>Number of generator poles *</b> <input type="text" value="12"/>
<b>Nominal wind speed *</b> <input type="text" value="10"/> m/s	<b>Winding fill factor *</b> <input type="text" value="0.52"/>	<b>Magnet length *</b> <input type="text" value="50"/> mm
<b>Cut-in TSR *</b> <input type="text" value="8.75"/>	<b>Stator thickness *</b> <input type="text" value="User defined"/>	<b>Magnet width *</b> <input type="text" value="50"/> mm
<b>Design TSR *</b> <input type="text" value="7"/>	<b>Stator thickness *</b> <input type="text" value="13"/> mm	<b>Magnet thickness *</b> <input type="text" value="20"/> mm
<b>Air density *</b> <input type="text" value="1.204"/> kg/m³	<b>Current density *</b> <input type="text" value="6"/> A/mm²	<b>Rotor disk thickness *</b> <input type="text" value="User Defined"/>
		<b>Rotor disk thickness *</b> <input type="text" value="10"/> mm
		<b>Mechanical clearance *</b> <input type="text" value="2"/> mm

## 2) Options de simulation

System Inputs	Financial Inputs	Constants
<b>System voltage *</b> <input type="text" value="24"/> V	<b>Iron price *</b> <input type="text" value="1"/> €/kg	<b>Copper resistivity *</b> <input type="text" value="1.678E-8"/> Ω·m
<b>Nominal voltage *</b> <input type="text" value="24"/> V	<b>Resin price *</b> <input type="text" value="11.23"/> €/kg	<b>Copper density *</b> <input type="text" value="8.94"/> g/cm³
<b>Transmission cable losses *</b> <input type="text" value="10"/> %	<b>Copper price *</b> <input type="text" value="12"/> €/kg	<b>Iron density *</b> <input type="text" value="7.87"/> g/cm³
<b>Rectifier losses *</b> <input type="text" value="10"/> %	<b>Plywood price *</b> <input type="text" value="17.6"/> €/m²	<b>Resin density *</b> <input type="text" value="1.36"/> g/cm³

**Simulation Inputs**  
☐ Also run UserAFPM

**Privacy options**  
☒ Private

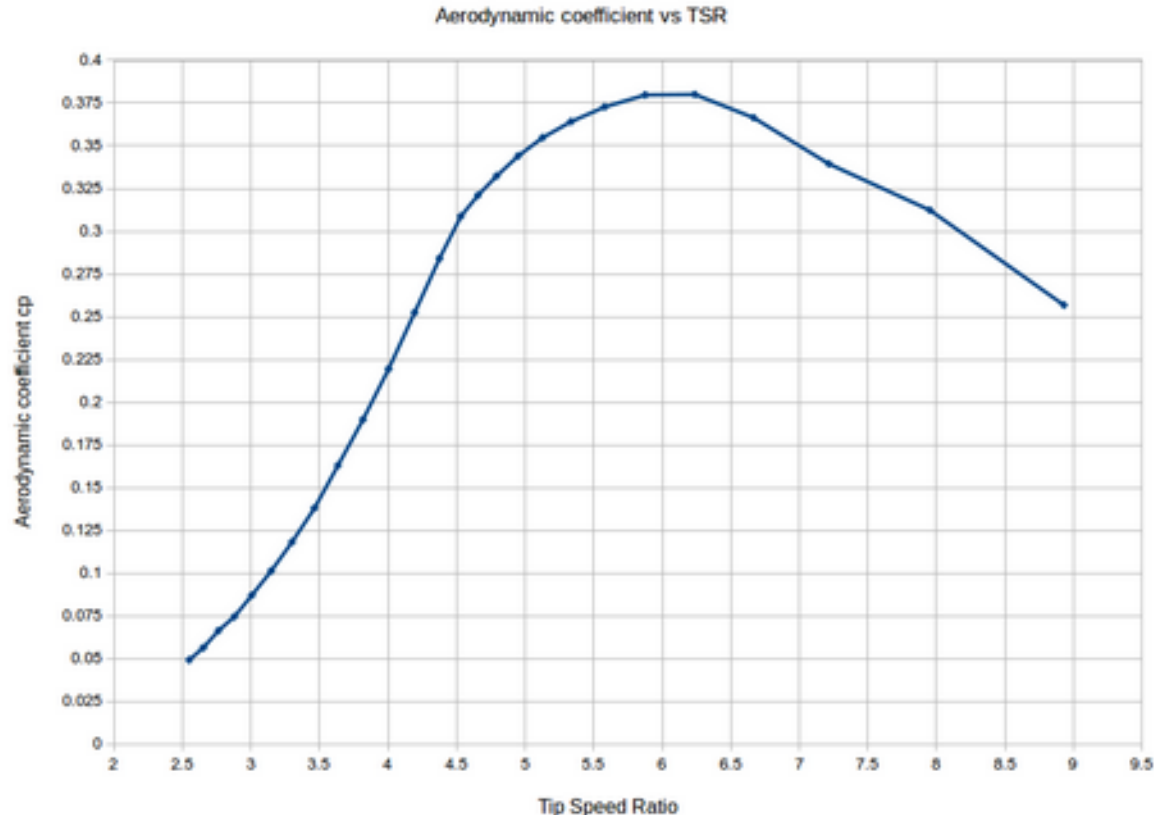
# 4.c Relancer une simulation MagnAFPM

## 1) Initialisation des paramètres

## 2) Options de simulation

Title \* Eolenne Ferrite CEE

Blade Rotor Inputs	
Turbine radius *	1 m
Aerodynamic coefficient *	0.3 Hypothèse !!
Cut-in wind speed *	3 m/s
Nominal wind speed *	10 m/s
Cut-in TSR *	8.75
Design TSR *	7
Air density *	1.204 kg/m³



Constants	
€/kg	Copper resistivity * 1.678E-8 Ω·m
€/kg	Copper density * 8.94 g/cm³
€/kg	Iron density * 7.87 g/cm³
€/m³	Resin density * 1.36 g/cm³

# 4.d Quelques réflexes pour converger vers le design final...

Les curseurs principaux à ajuster :

- Current density
- Aerodynamic coefficient à puissance nominale

A vous de jouer !!  
[openafpm.net](http://openafpm.net)

# TP 1 : Simulation de la génératrice dimensionnée précédemment

- Lancer une simulation MagnAFPM avec les mêmes critères que pour le calcul analytique (cf. TD)
  - Génératrice Ferrite
  - Génératrice Néodyme

# TP 2 : Design d'une nouvelle machine pour vélo-générateur

## **Cahier des charges :**

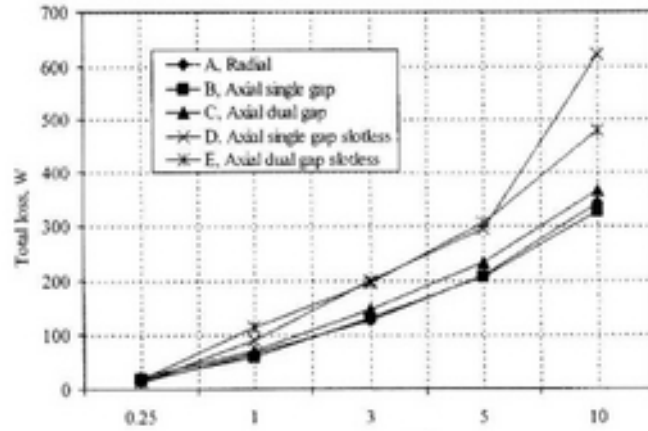
- Rotor simple
- 8 Aimants ferrite (C8)(50x50x20) ( $p=4$ )
- Taille d'une pale : 60cm
- Épaisseur stator :  $t_w=13\text{mm}$
- Bobines triangulaires.
- TSR d'accroche : 7 , Vent d'accroche : 3m/s /
- TSR nominal : 5
- Rayon extérieur du rotor : 165 mm

→ **Trouver les dimensions du bobinage en utilisant MagnAFPM.**

# Préparation du TP de caractérisation

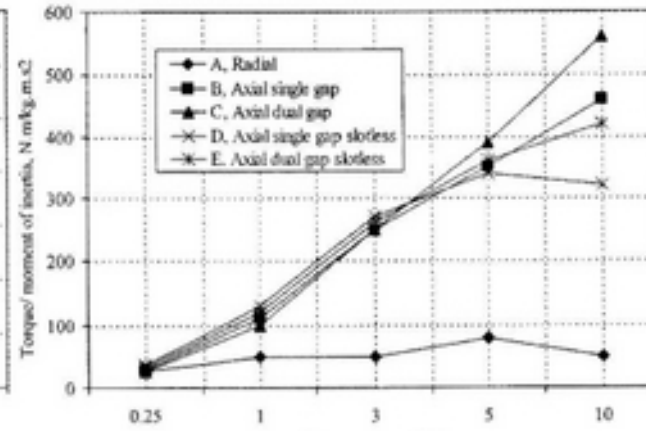
- 1) Proposer deux méthodes pour mesurer la résistance de phase  $R_s$ .
- 2) Proposer deux méthodes pour mesurer l'inductance  $L_s$ .
- 3) Proposer une méthode pour mesurer la constante de flux.  
→ Justifier par des schéma électriques + explications

# Ouverture : Axial vs. Radial



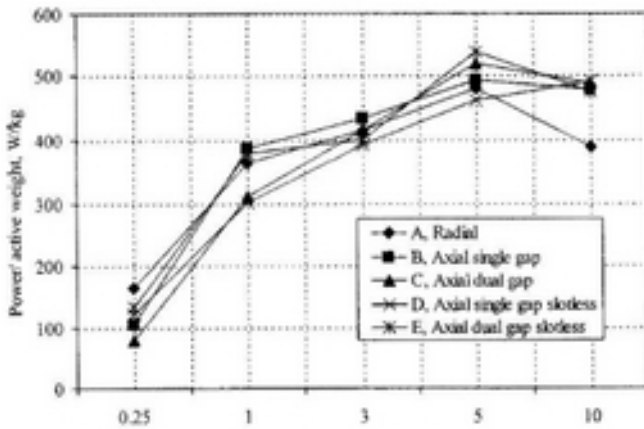
© IEEE 2001

Output power, kW



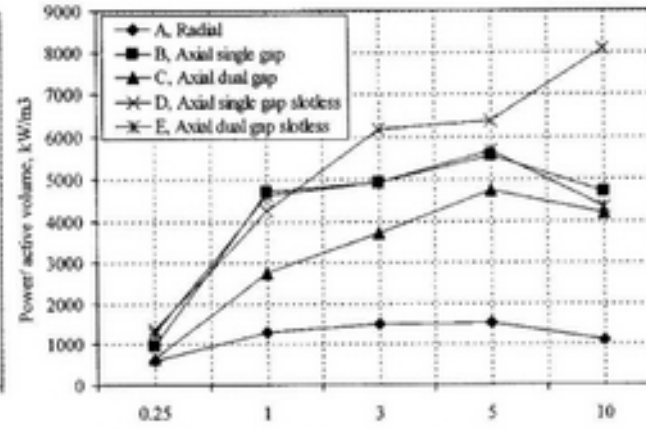
© IEEE 2001

Output power, kW



© IEEE 2001

Output power, kW



© IEEE 2001

Output power, kW



# Références

[1] [www.pengki.cn](http://www.pengki.cn)

[2] [www.openafpm.net](http://www.openafpm.net)

[3] Gieras, Jacek & Wang, Rong-Jie & Kamper, Maarten. (2008). Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines. 10.1007/978-1-4020-8227-6.

[4] « Construire une éolienne », manuel de construction, association Tripalium, adaptation de « A wind Turbine Recipe Book », Hugh Piggott.

[5] M. J. Kamper, R. Wang and F. G. Rossouw, "Analysis and Performance of Axial Flux Permanent-Magnet Machine With Air-Cored Nonoverlapping Concentrated Stator Windings," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, no. 5, pp. 1495-1504, Sept.-Oct. 2008, doi: 10.1109/TIA.2008.2002183.

[6] H. Piggott, 2F wind turbine construction manual, smashwords edition, 2014

[7] Latoufis, Kostas & Messinis, Georgios & Kotsampopoulos, Panos & Hatziaargyriou, Nikos. (2012). Axial Flux Permanent Magnet Generator Design for Low Cost Manufacturing of Small Wind Turbines. Wind Engineering. 36.

[8] Sareni, B., A. Abdelli, X. Roboam, and D.H. Tran. "Model Simplification and Optimization of a Passive Wind Turbine Generator." Renewable Energy 34, no. 12 (December 2009): 2640-50. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.04.024>.

# Dimensions génératrice 2F 48V

Pour s'entraîner à retrouver un design existant :

- $V_{dc}=48V$
- $r=1m$
- TSR accroche = 8,75
- Aimants ferrite C8 : 50 x 50 x 20
- $R_{out}=150mm$
- $d_c = 1.15mm$
- $t_w=13mm$
- $N_c= 180$  tours
- $p=6$ ,  $Q=9$  bobines,  $q=3$  bobines en série par phase,