# Génératrice pour éolienne à flux axial avec stator en circuits imprimés

Fabrice FRUGIER, Denis RAULIN, Didier DUCLOS, Cécile DOLLÉ, Martine GRISENTI, François VERNAY, Jacky BRESSON

> IUT de Perpignan, département G.I.M. Ch. de la Passio Vella, BP 79905 – 66962 PERPIGNAN Cédex 9 E.mail : <u>fabrice.frugier@univ-perp.fr</u> Site internet : <u>http://gim.iut.univ-perp.fr</u>



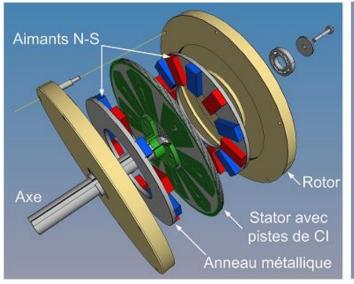


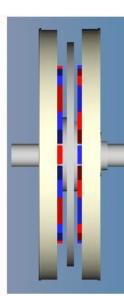
### Introduction

► Etude intégrée aux projets tuteurés des étudiants GIM → Concours National Gim'Eole « les éoliennes urbaines ».

#### Concept de la génératrice discoïde :

- Alternateur synchrone multipôles à aimants permanents à flux axial
- Cette structure minimise les puissances massique et volumique tout en présentant un bon rendement.





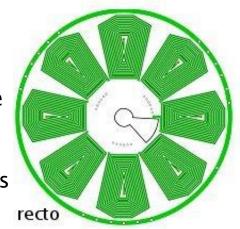
- Rotor feuilleté à bobines gravées sur circuit imprimé
- Encombrement minimum ( $\phi$ =270mm ; épaisseur=55mm) pour couplage direct à une éolienne à axe horizontal de 800mm de diamètre.

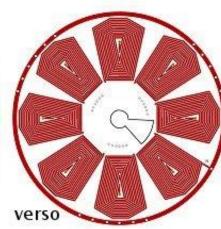
# Structure de la génératrice

 Un stator gravé sur circuits imprimés (Induit) pris en sandwich entre deux rotors magnétiques (Inducteur).

#### Etude du rotor :

- Chaque rotor comporte 16 aimants alternés N-S (40x20x10mm) au néodyme (NdFeB) d'induction magnétique de 1,3T.
- Aimants collés sur un anneau métallique pour renforcer le champ magnétique dans l'entrefer.





#### Etude du stator feuilleté en CI (ep ~ 6mm) :

- 6 disques circuits imprimés double face (chaque CI : 240x0,9mm) → 6 phases
- Décalage de 7,5° entre disque → système hexaphasé
- Chaque phase → 8 bobines en série
- Chaque bobine  $\rightarrow$  12 spires gravées/face  $\rightarrow$  24 spires/bobine
- Piste cuivre (L=1,5mm, e=175 $\mu$ m)  $\rightarrow$  intensité admissible de l'ordre de 9,5A



### Simulation magnétique du rotor

- ≥ 2 rotors → double le champ magnétique dans l'entrefer de 10mm
- ▶ 16 aimants par rotor  $\rightarrow$  nb de paires de pôles p et l'angle électrique  $\alpha$

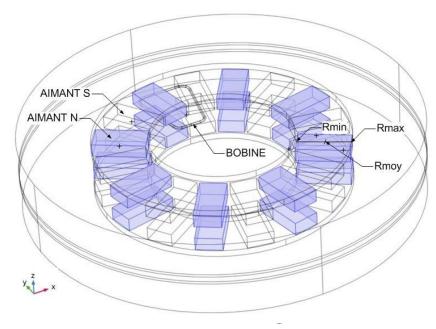
$$p = \frac{N_{aimants}}{2} = 8$$
;  $\alpha = \frac{2\pi}{p} = 45^{\circ}$ 

#### Approche 2D → logiciel FEMM :

- Facile d'utilisation et gratuit
- Manque la dimension radiale OX → ordre de grandeur du champ magnétique dans l'entrefer

#### Approche 3D → logiciel COMSOL :

- Plus professionnelle mais plus compliquée
- Plus réaliste → prend en compte les 3 dimensions
- Donne de bons résultats



Entrefer:  $e_{hoh}+2g = 10mm$ 

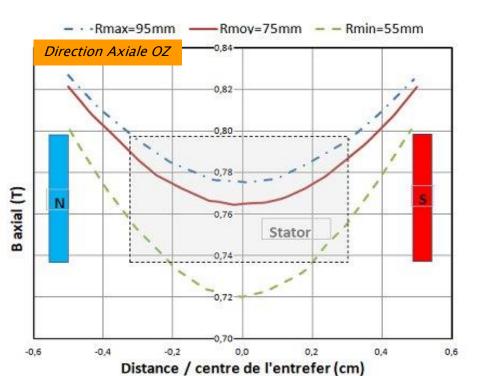
# Champ magnétique dans l'entrefer (1/2)

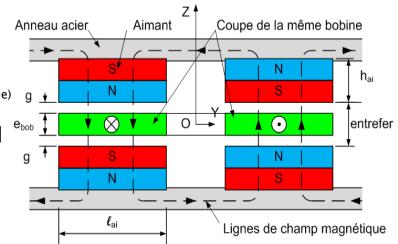
#### logiciel 2D FEMM:

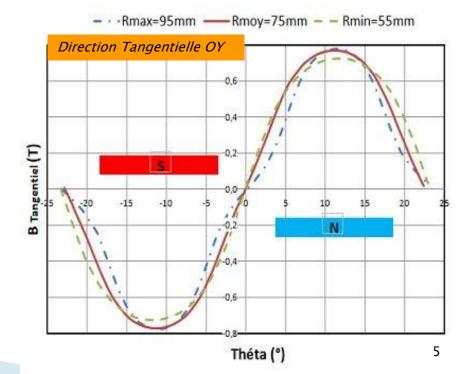
- Direction Axial OZ → Bmoy=0,76T (valeur surestimée)
- Direction Tangentielle OY → quasi sinusoïdal

$$B(\theta) = B_{moy} \sin\left(\frac{2\pi}{\alpha}\theta\right)$$

$$avec - \alpha/2 < \theta < \alpha/2$$







# Champ magnétique dans l'entrefer (2/2)

#### logiciel 3D COMSOL:

▶ Direction Axiale OZ →

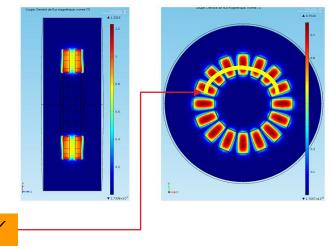
Bmoy=0,66T

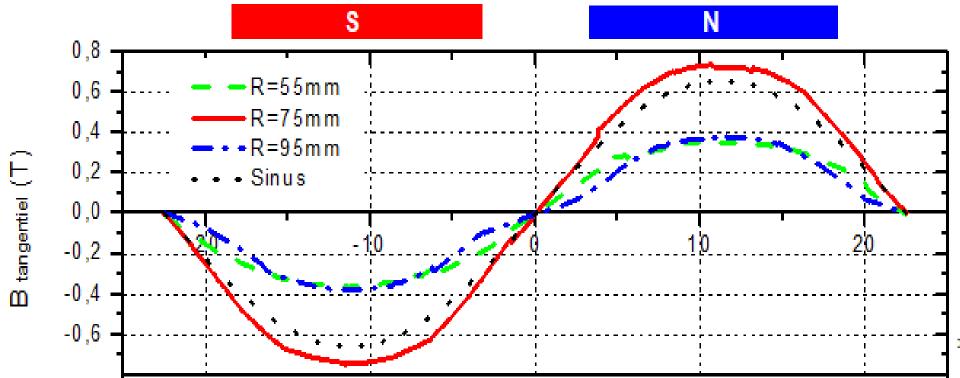
- ▶ Direction Radiale OX →
- Direction Tangentielle OY → champ tournant → forme quasi sinusoïdale →

$$B(\theta) = B_{moy} \sin\left(\frac{2\pi}{\alpha}\theta\right)$$

avec  $-\alpha/2 < \theta < \alpha/2$ 

Direction Tangentielle OY





### Calcul de la f.é.m induite (1/3)

#### Loi de Lenz-Faraday:

Pour une bobine de N spires baignant dans un champ magnétique perpendiculaire, la force électromotrice (f.é.m) induite vaut :

$$e(t) = -N_{sp} \frac{d\varphi}{dt} = -N_{sp} \frac{d\varphi}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = -N_{sp} \frac{d\varphi}{d\theta} \omega$$

 $O\dot{u}$ :  $\phi = B.S$ : flux magnétique traversant les spires (Wb)

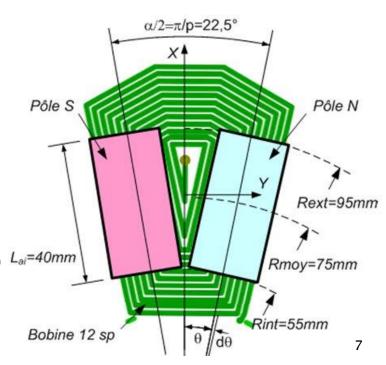
Nsp: nombre de spires dans une bobine

B : champ magnétique (T)

S : surface embrassée par le flux magnétique (m²)

 $\omega = 2\pi N trs$ : vitesse angulaire (rd/s)

Ntrs = vitesse de rotation du rotor de la génératrice (tr/s)  $L_{ai}=40mm$ 



### Calcul de la f.é.m induite (2/3)

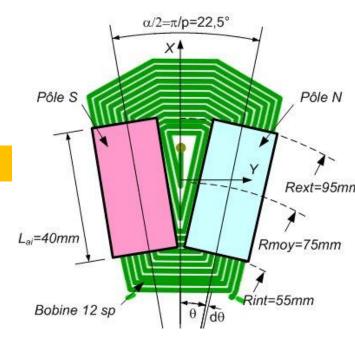
Ntrs=1tr/s et Nsp=20

#### Cas où B=Cte

B=Bmoy=0,66T est constant, alors:

$$d arphi = B_{moy} dS = B_{moy} L_{ai} R_{moy} . d heta$$
 
$$E_{max} = N_{sp} B_{moy} L_{ai} R_{moy} \omega = N_{sp} B_{moy} L_{ai} V_{tan g}$$
 
$$E_{max} = N_{sp} B_{moy} L_{ai} R_{moy} 2 \pi N_{trs}$$
 Soit Emax=0,49V

Où : Lai : longueur du fil en interaction avec l'aimant (m) Vtang  $= \omega$ Rmoy: vitesse tangentielle du milieu de l'aimant (m/s)



#### Cas où S=Cte

S=Cte=Saimant=20x40mm² et B=champ tournant sinusoïdal, alors:

$$e(t) = -N_{sp} \frac{d\varphi}{dt} = -N_{sp} S \frac{dB}{dt} = -N_{sp} S \frac{dB}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = -N_{sp} S \omega \frac{dB}{d\theta}$$

$$or \qquad \frac{dB}{d\theta} = B_{moy} \frac{2\pi}{\alpha} cos \left(\frac{2\pi}{\alpha}\theta\right) donc,$$

$$e(\theta) = -N_{sp} S\omega B_{moy} \frac{2\pi}{\alpha} cos\left(\frac{2\pi}{\alpha}\theta\right)$$
 Soit Emax=0,53V

### Calcul de la f.é.m induite (3/3)

Ntrs=1tr/s et Nsp=20

#### Méthode graphique

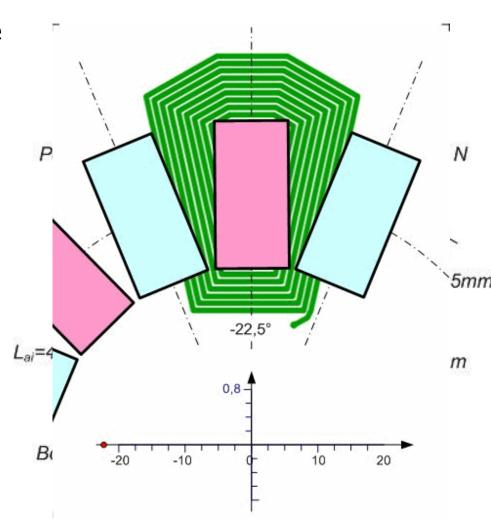
- Détermination graphique de la longueur des pistes sous chaque pôle à chaque incrément θ
- Plus laborieux mais prend en compte la géométrie de la bobine

Soit Emax=0,48V

#### Logiciel 3D COMSOL

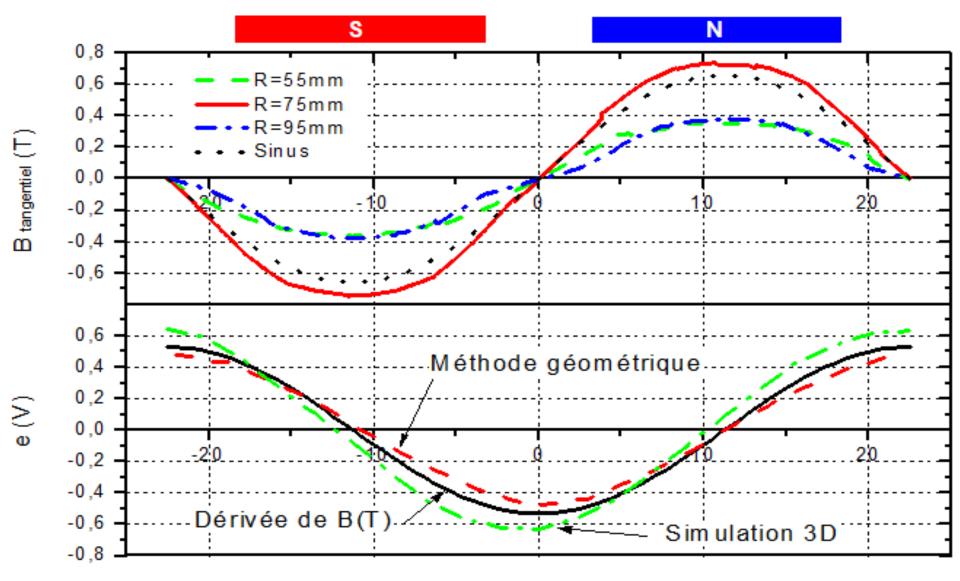
Valeur obtenue par simulation d'une bobine virtuelle qui ne représente pas tout à fait la réalité.

Soit Emax=0,63V



# Calcul de la f.é.m induite (3/3)

*Ntrs=1tr/s et Nsp=20* 



### Banc de tests

- Moteur à vitesse variable couplé à la génératrice
- Redresseur hexaphasé PD6
- Banc de charge résistif

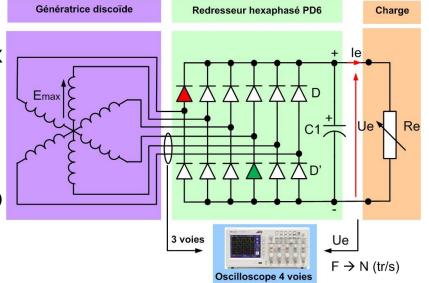
$$Ue_{moy} = \frac{2q}{\pi} E_{max} \sin\left(\frac{\pi}{q}\right)$$

avec q = 6 nb de phases

$$Ue_{moy} = \frac{6}{\pi} E_{max}$$

N Uemoy = Uemoy = Uemoy = Uemoy = Re

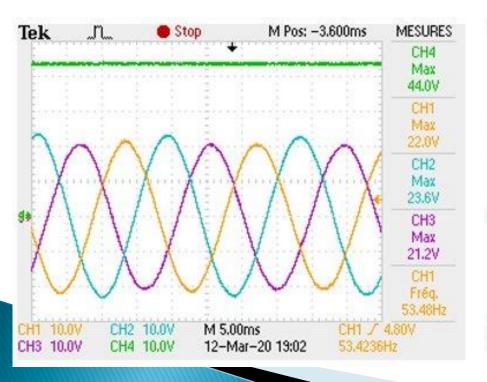
- A chaque conduction de 2 diodes, deux phases sont directement connectées à la charge → schéma équivalent où :
- 2.Rphase = résistance interne (estimée à 4,4  $\Omega$ )
- 2.lphase = inductance (négligeable)
- 2.Rdiode = chute de tension des deux diodes (~ 1V)

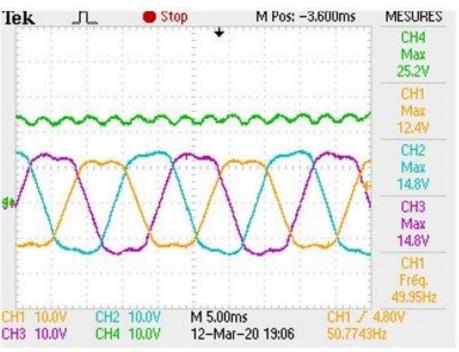


11

# Essais à vide et en charge

- Oscillogramme à vide
- Forme quasi sinusoïdale en accord avec la théorie
- Légère différence d'amplitude → dûe à la position des 6 phases dans l'entrefer
- Oscillogramme en charge : Re=5,5 $\Omega$
- Ondulation de Ue de fréquence q=6 fois celle des tensions de phase

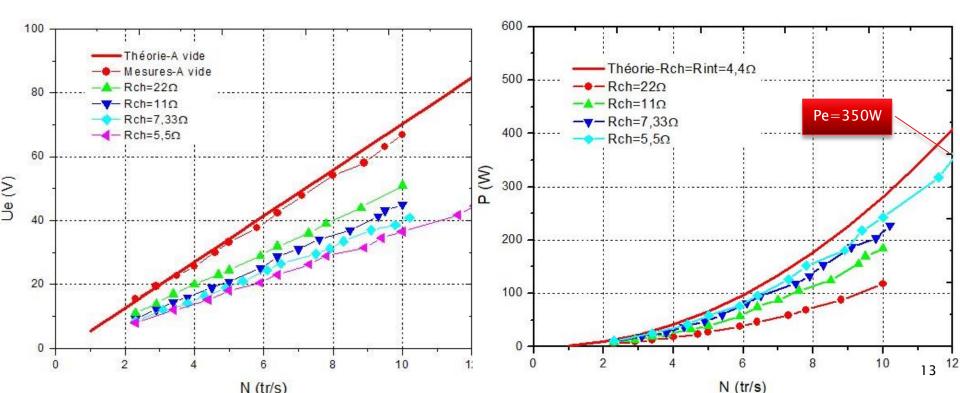




### Essais à vide et en charge

- Tension de sortie : Ue=f(Ntrs)
- · La mesure à vide de la tension de sortie suit quasiment la courbe théorique
- Puissance de sortie : Pe=f(Ntrs)
- La puissance optimale est obtenue lorsque la résistance de charge égale la résistance interne ainsi :

Si 
$$Re = Rint = 4,4 \Omega$$
 alors  $P_{opt} = \frac{Ue^2}{4Re}$ 



### Conclusion

- Nouveau concept de stator dont les bobines sont gravées, sans noyau, sur un circuit imprimé double face autorisant une faible épaisseur d'entrefer,
- L'absence de noyau métallique minimise les ondulations du couple de détente (cogging torque) → meilleur démarrage de l'éolienne,
- Ce concept donne la possibilité d'empiler plusieurs circuits imprimés → machine multiphasée,
- Modélisation de la génératrice avec FEMM 2D et COMSOL 3D,
- Des mesures effectuées sur banc de test sont proches de la théorie,
- Plus de 350W à 12 tr/s obtenus avec un couple de démarrage quasiment nul
- Possibilité d'améliorer les performances en diminuant l'entrefer (10mm → 8mm)

### Merci de votre attention

