



UNIVERSITÉ DE NANTES



## MACHINES RAPIDES

### Applications, Technologie et Dimensionnement

**Nicolas BERNARD**

*Maître de Conférences*

*IUT de Saint-Nazaire – Laboratoire IREENA*

Journée SEEDS - 9 Janvier 2019

ENS Paris-Saclay

## Plan de la présentation

- I. Contexte, généralités
- II. Technologie
- III. Dimensionnement
- IV. Conclusion

## I. Contexte, généralités

### Intérêt des hautes vitesses

Accroissement de la puissance volumique (encombrement réduit, haut rendement >97%)

*Les apports et les besoins*

*Coût et performances des aimants permanents (Chine années 90)*

*Besoin en applications performantes*

Qualité de conversion (usinage, ...)

### Machines rapides ?

Dimensionnement limité par la vitesse périphérique

Vitesse de rotation élevée

### Challenges

Densités de pertes élevées (problème thermique spécifique, pertes fer élevées)

Tenue mécanique

Acoustique

....

## Applications

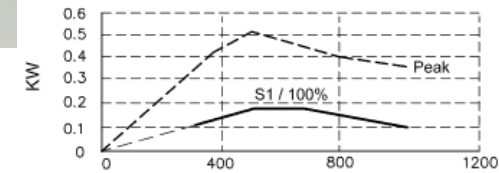
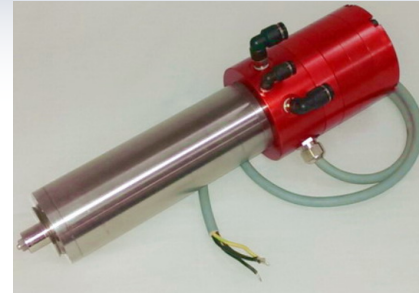


Usinage



High-speed 200W – 300 000 r/min PCB drilling spindle (Westwind) [GER\_14]

## Fraise de dentiste



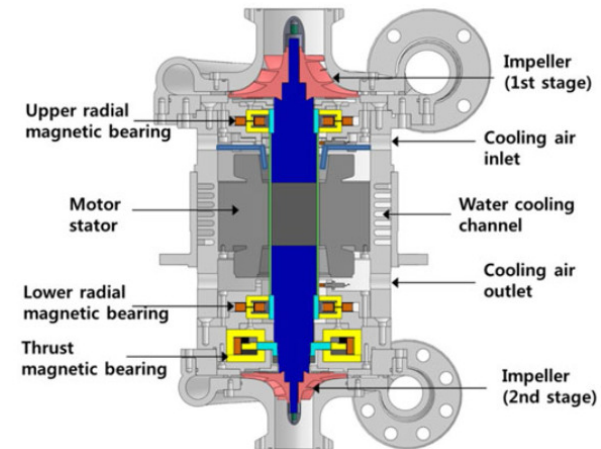
PMSM – 120 W, 58 000-r/min, refroidissement à eau  
<http://www.toolingmachine.biz/files/MP50-56R-Client-New.pdf>

## Stockage inertiel



Exemple de structure industrielle – MSAP - 300kW/800 Wh  
<http://www.vyconenergy.com/pages/flywheeltech.htm>

## Turbocompresseurs



PMSM – 225 kW, 50 000-r/min [UZH\_17]

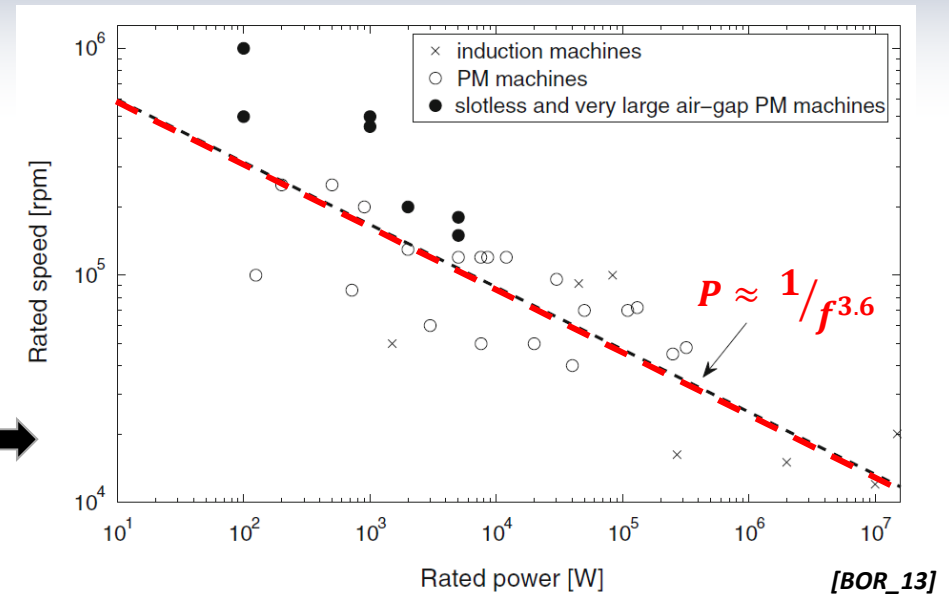
## Machines rapides : une définition ?

Haute vitesse ?

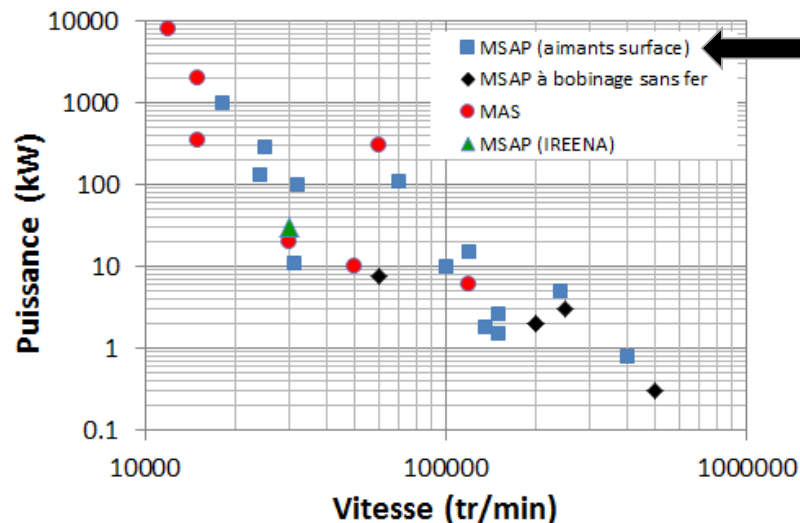
Critères → Contraintes liées à la vitesse

- ✓ Vitesse périphérique (tenue mécanique)
- ✓ Fréquences critiques
- ✓ Fréquence électrique

Loi de comportement en vitesse observée →



## La recherche



Recherche universitaire dans le monde sur les 20 dernières années  
(base : articles de revus « visibles » sur internet)

30 prototypes

- ✓ MS (20) : 14 MSAP montés en surface + 5 slotless
- ✓ MAS (7)
- ✓ MRV (2)
  
- ✓ Corée du Sud (4)
- ✓ Allemagne (3), Japon (3)
- ✓ Chine (2), Grande Bretagne (2), USA (2)

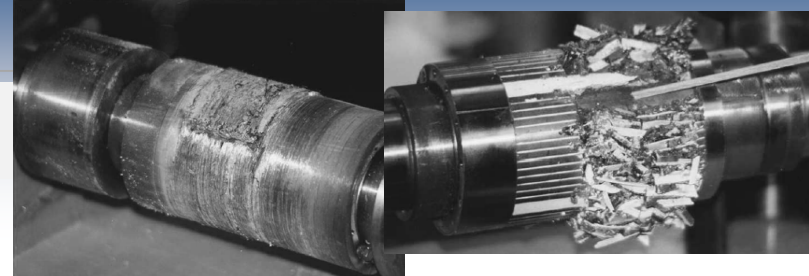
## II. Technologie

### Tenue mécanique

Frettes métalliques : coût réduit mais pertes magnétiques élevées (240 m/s, 290 °C)

Frettes composites : pertes faibles mais coût élevé (320 m/s, 180°C)

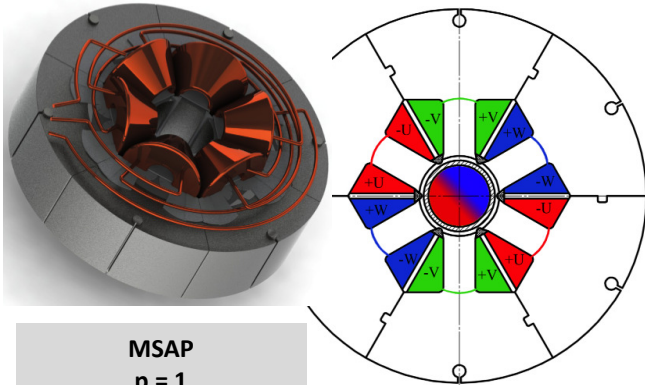
[GIE\_14]



#### Ex : utilisation de frette métallique

[UZH\_13]

Matériau : AISI 304L



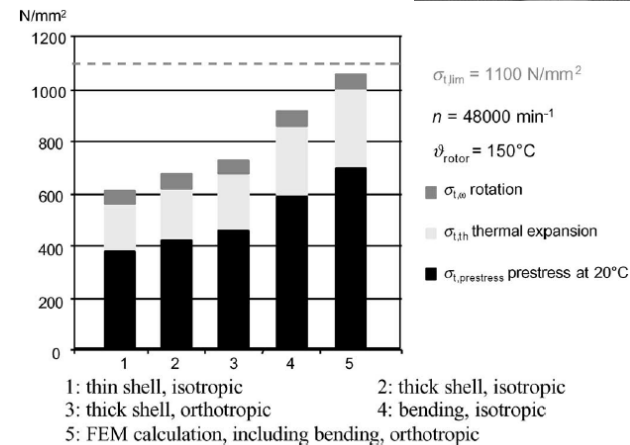
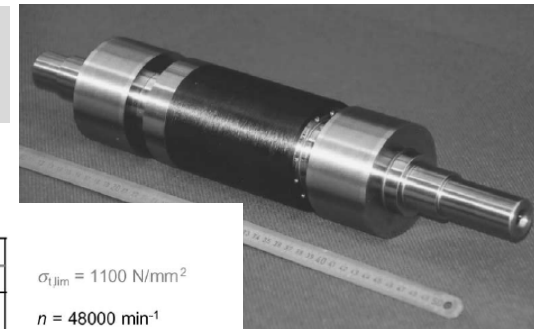
MSAP  
p = 1  
11 kW – 31 200 tr/min

Losses Type	Losses Value, W
Copper loss	88
Stator Iron loss	100
Rotor sleeve loss	34 $\longleftrightarrow$ 13%
Rotor magnet loss	11 $\longleftrightarrow$ 4,3%
Additional loss	22
<b>Total losses</b>	<b>255</b>

#### Ex : utilisation de frette en fibre de carbone

[BIN\_06]

MSAP  
p = 1  
40 kW – 40 000 tr/min



## Les paliers

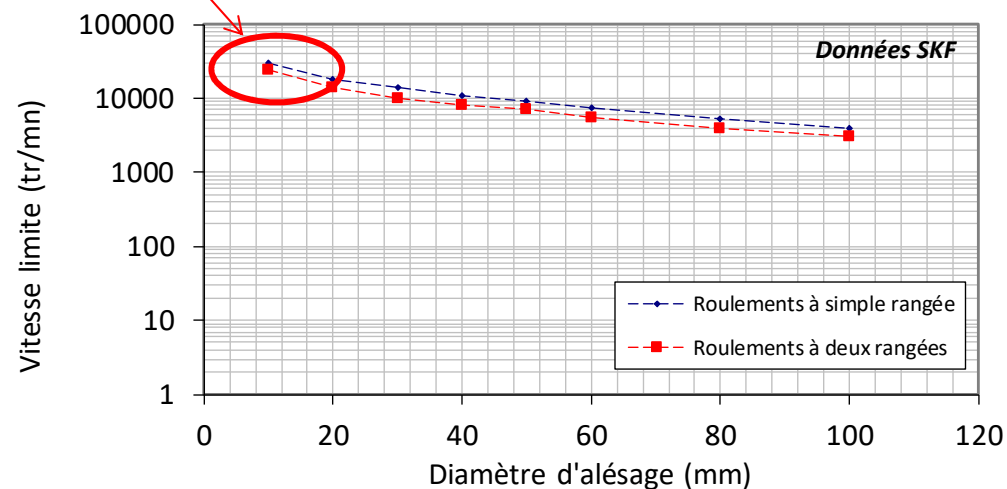
Surcoût pouvant aller de 30 à 70% du rotor (Réf.)

### ■ A billes

- Vitesse maximale fonction de la taille
- Utilisés comme palier de secours
- Utilisation de contacts obliques et billes céramiques

Roulements à ...	Vitesse moyenne (m/s)
Billes céramiques (SNFA modèle VAB)	130
Billes à contact oblique de précision (broche, 15°)	91
Billes à gorges profondes	37
Rotule sur billes	31
Billes à contact oblique (40°)	30
Billes à 4 points de contact	30
Aiguilles	23

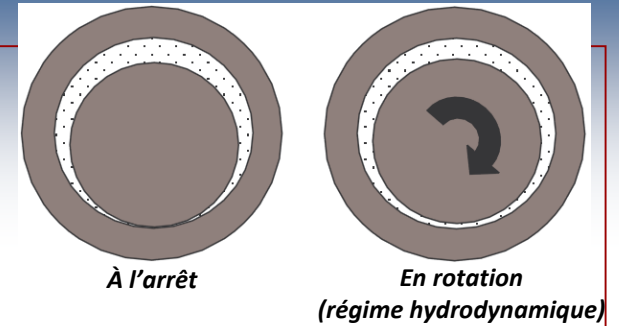
**Vitesse max**  
**~ 30 000 tr/mn**



■ A fluide sous pression

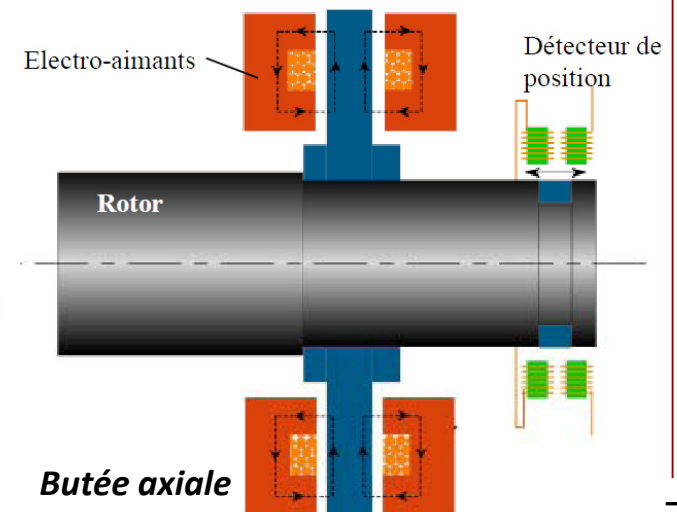
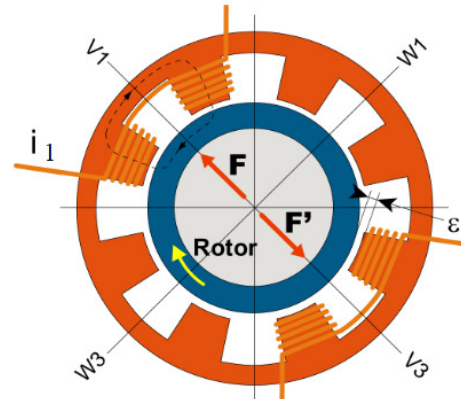
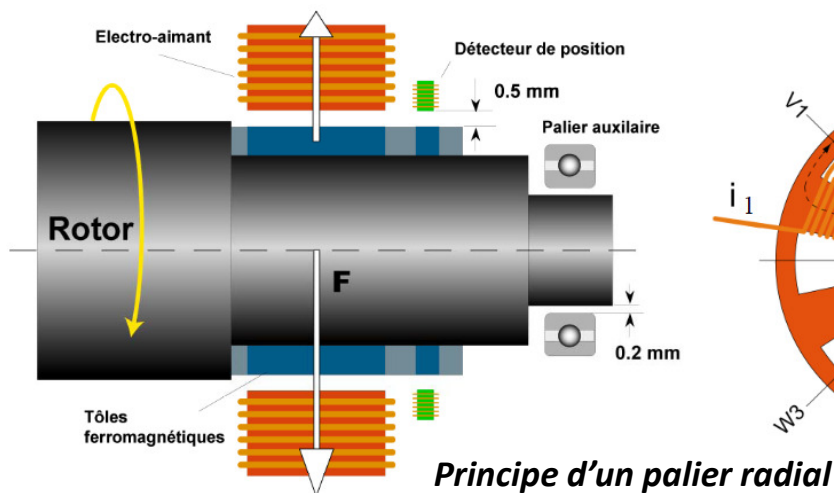
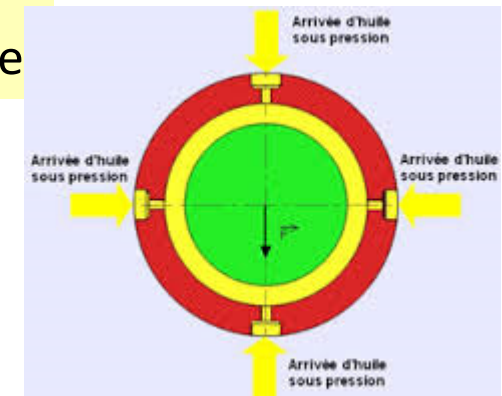
**Hydrodynamiques** (dits à « film fluide ») :  
pression créée par la vitesse

**Hydrostatiques** :  
Film fluide ou gazeux sous pression par pompe externe



■ Magnétiques

**Magnétiques actifs** :  
Av. : hautes vitesses, raideur élevée  
Inc. : consommation, complexité





## Magnétiques Supra-conducteur (HTC, 70-80K)

Av. : consommation très réduite, simples, stables

Inc. : cryostat

- Température : 70/80 K
- Efforts qq 100 kN
- Pour fortes puissances (qq 100 kW)

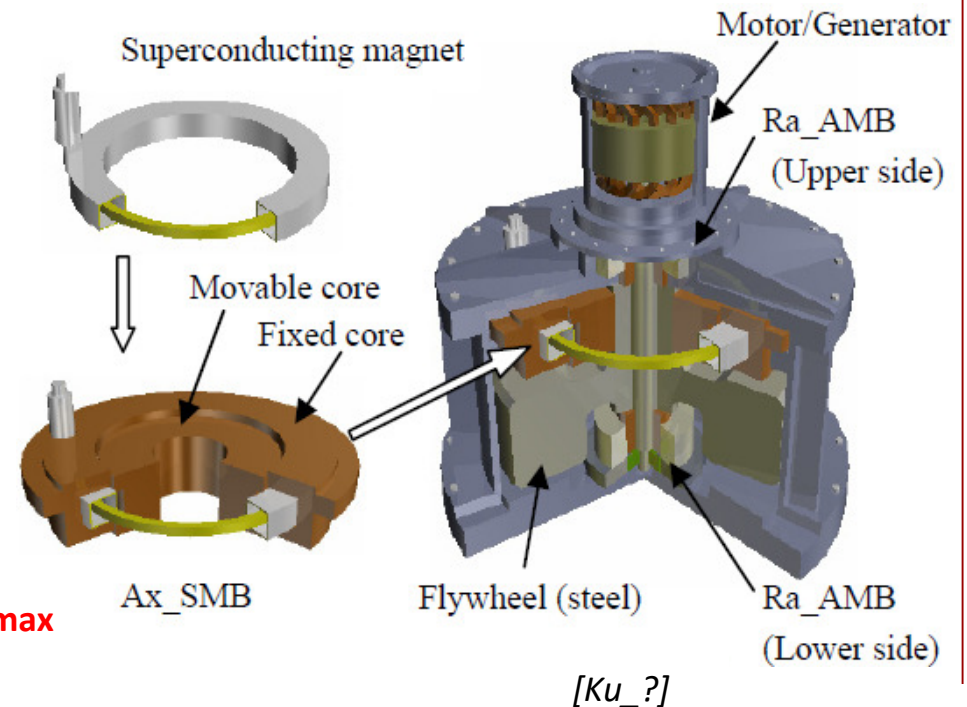
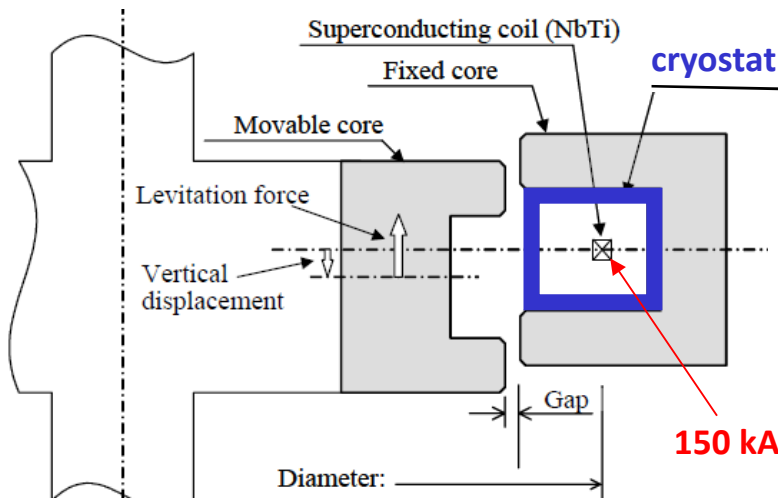
### Projet Japonais :

(New Energy and Ind. Tech. Development Org.)

Volant 25 T

Energie 50 kWh - Puissance 1000 kW

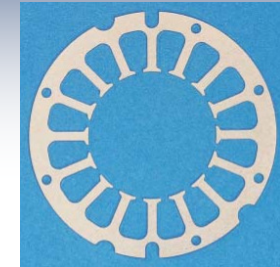
vitesse : 1000 - 2000 tr/mn



Dispositif de lévitation (force axiale)

## Les matériaux ferromagnétiques

### Fonctionnement à hautes fréquences



- Tôles à **6.5 % de Si** : perméabilité max et magnétostriction min, conductivité faible
- Les poudres de fer (hautes fréquences de conversion, > qq kHz)

■ Comparison of magnetic characteristics (JFE in-house data) : Rolling direction, shear cross-section

Material	Thickness (mm)	Specific resistance ( $\mu\Omega\cdot m$ )	DC max relative permeability	Saturation magnetization (T)	Magnetic flux density $B_s$ (T)	Magnetic flux density $B_{25}$ (T)	Magnetostriction $\lambda_{10/400}$ ( $\times 10^{-6}$ )	Core loss (W/kg)						
								W10/50	W10/400	W10/1k	W5/2k	W2/5k	W1/10k	W0.5/20k
<b>JNEX-Core</b>	<b>0.10</b>	<b>0.82</b>	<b>23,000</b>	<b>1.80</b>	<b>1.29</b>	<b>1.40</b>	<b>0.1</b>	0.5	5.7	<b>18.7</b>	13.7	11.3	8.3	6.9
Grain-oriented silicon steel	0.05	0.48	—	2.03	1.75	—	-0.8	0.8	6.4	17.2	13.5	9.2	7.1	5.2
	0.10		24,000		1.84	1.91		0.7	6.0	<b>22.7</b>	22.0	20.0	18.0	14.0
	0.23		92,000		1.92	1.96		0.3	7.8	33.0	33.0	33.0	30.0	32.0
	0.35		94,000		1.92	1.96		0.4	12.2	55.0	49.5	49.5	47.0	49.0
Non-oriented silicon steel	0.10	0.57	12,500	2.05	1.58	—	7.8	0.8	8.5	27.1	22.4	16.5	13.3	—
	0.20		15,000	2.03	1.44	1.53		0.7	11.0	38.5	33.2	26.2	23.0	—
	0.35		18,000	1.96	1.45	1.56		0.7	14.4	62.0	50.2	38.0	33.0	—
Fe-based amorphous	0.025	1.30	300,000	1.50	1.38	—	27.0	0.1	1.5	5.5	8.1	4.0	3.6	3.3
Ferrite	Bulk	—	3,500	—	0.37	—	21.0	—	—	—	—	2.2	2.0	1.8

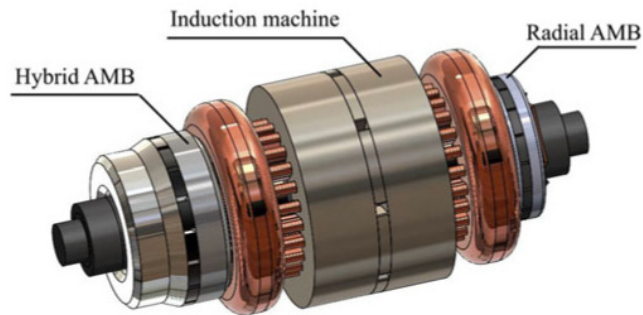
**JNEX-900 (0.1 mm)**

**1kHz – 1T**

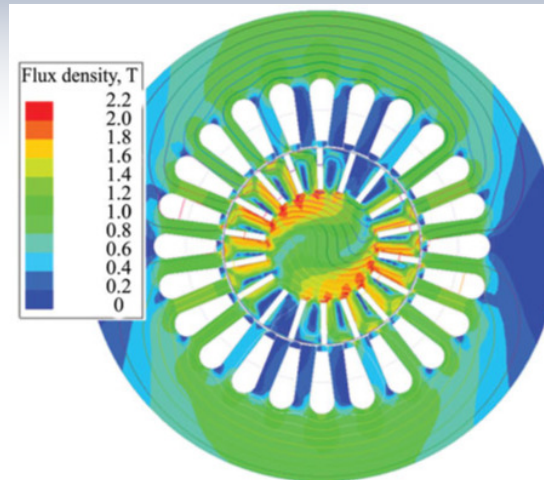
\* W10/50 is the core loss at 50Hz, 1T(=10kG) when the magnetic flux sine wave is excited.  
 \*  $B_s$  is the magnetic flux density at 800A/m.  
 \*  $\lambda_{10/400}$  is the magnetostviction at 400Hz, 1T when the magentic flux sine wave is excited.

## Machines

### ▪ Machines Asynchrones



$p = 1$   
225 kW – 50 000 tr/min [UZH\_17]



Loss Location	Losses, W	Loss Share, %
Copper	1192	17
Rotor	1665	24
Rotor outer surface	1616	24
Core	1746	26
Additional	600	9
Total	6819	100

Tenue en température plus élevée que MSAP

### ▪ Machines Synchrones à aimants

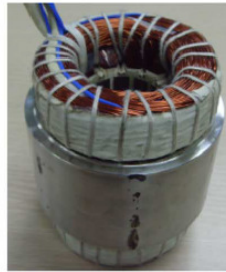
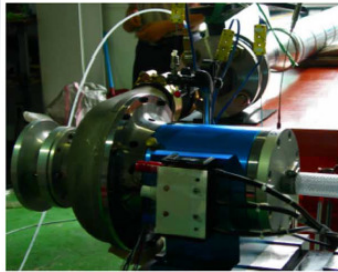
Densités de puissance les + élevées

Rendement élevé

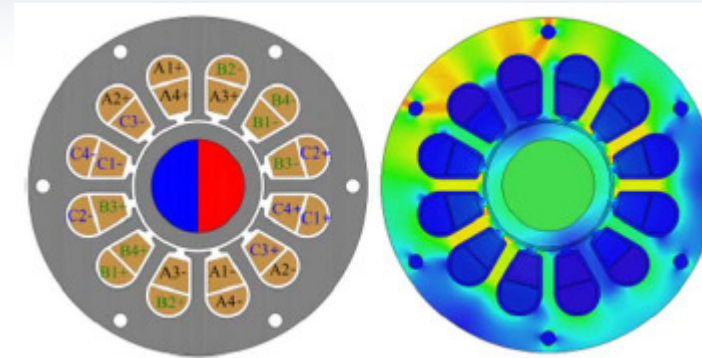
Pertes rotoriques « faibles » : refroidissement facilité

*Utilisation quasi systématique pour les petites machines*

## Slotted

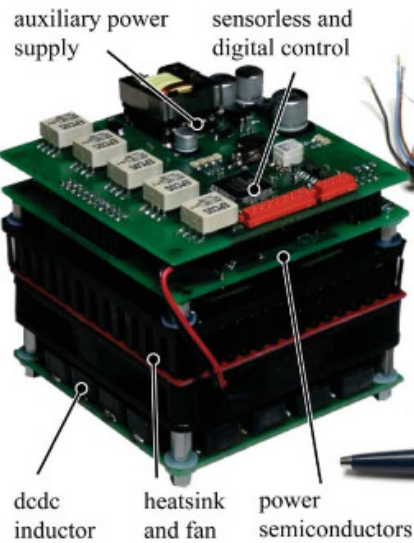


Rotor (frette métallique Inconel – 1100 MPa)



p = 1  
15 kW – 120 000 tr/min [HON\_12]

## Slotless



auxiliary power supply

sensorless and digital control

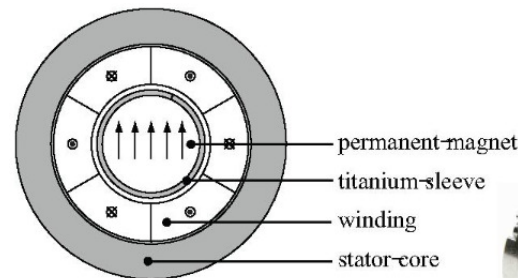
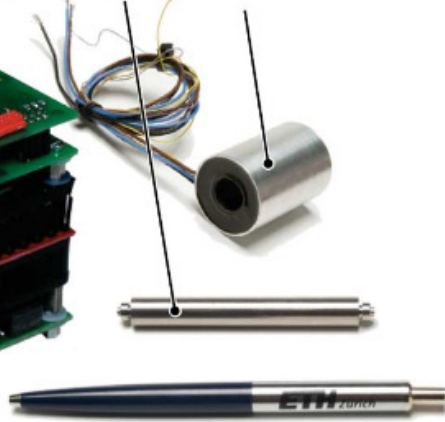
machine rotor

machine stator

dc/dc inductor

heatsink and fan

power semiconductors



permanent magnet

titanium sleeve

winding

stator core



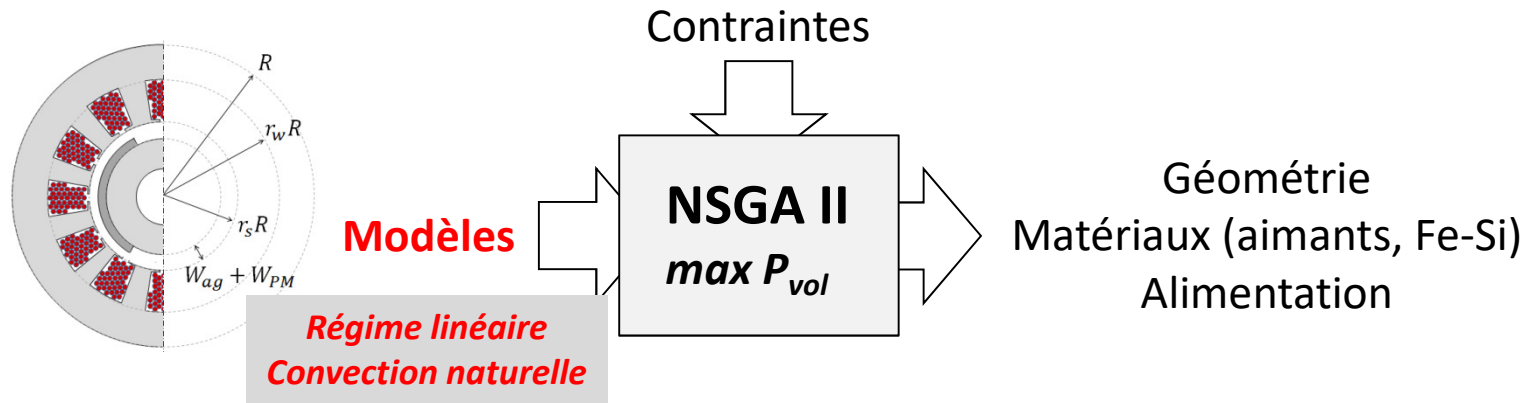
1 cm

p = 1  
1 kW – 500 000 tr/min [ZWY\_09]

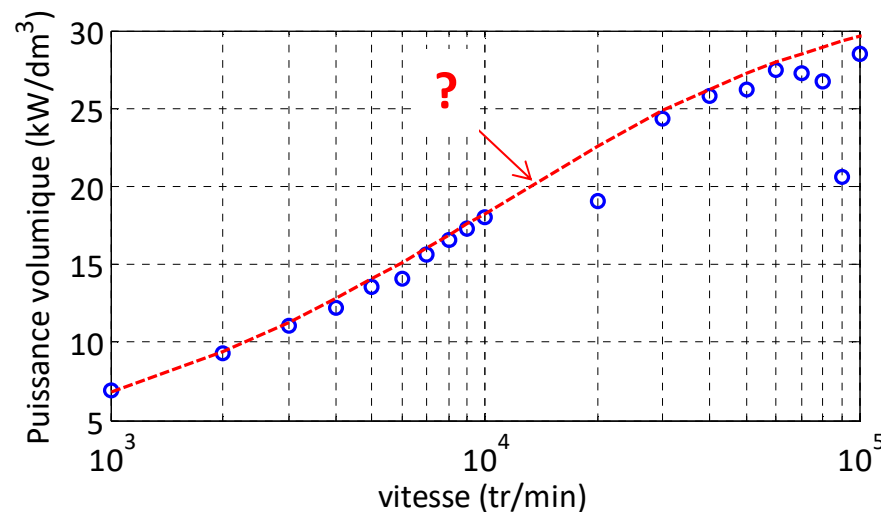
p = 1  
100 W – 1 000 000 tr/min [ZWY\_09]

### III. Dimensionnement

Actuellement : Modélisation analytique + algorithme d'optimisation



**Exemple :** Puissance volumique des MSAP rapides (à pôles lisses)



**Les limites**

- Lois générales de dimensionnement ?
- Influence de la précision du modèle ?

## Recherche d'une solution sous forme analytique [BER\_16]

### Variables d'optimisation

- 5 variables géométriques  $\rightarrow p, r_s, r_w, R, L$
- 1 variable d'excitation  $\rightarrow B_{fm}$
- 2 variables d'alimentation  $\rightarrow F_s, \psi$

### Modèle électromagnétique

#### Couple électromagnétique

$$C_{em} = \alpha B_{fm} F_s \cos \psi$$

#### Pertes cuivre

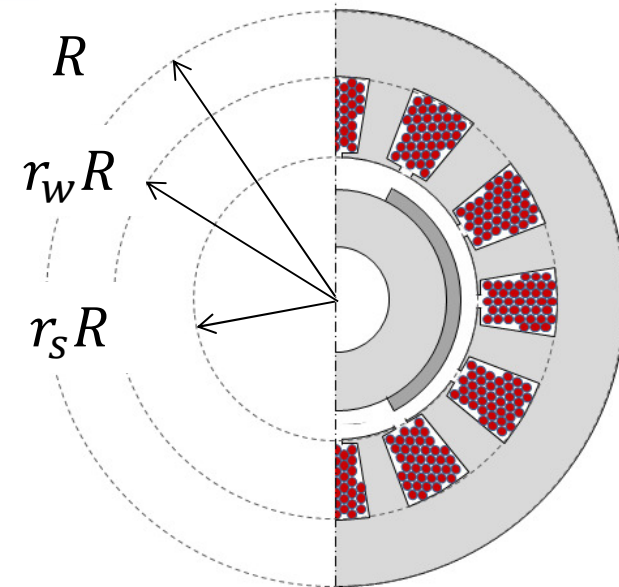
$$P_c = \beta F_s^2$$

#### Pertes fer (Foucault + Hystérésis)

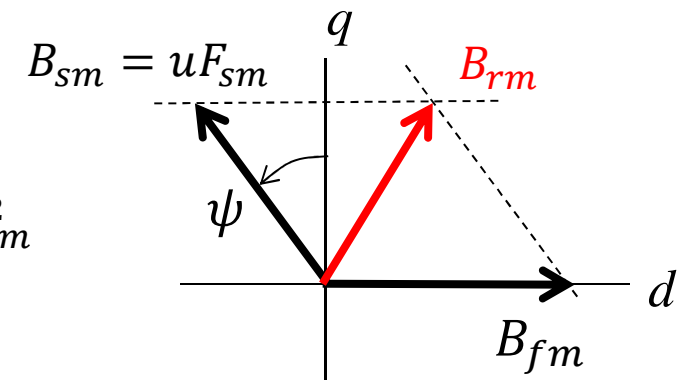
$$P_{mg} = \gamma k_{ad} [k_{ec} p^2 \Omega^2 + k_h p \Omega] \eta_d^2 B_{rm}^2 = \gamma_0 B_{rm}^2$$

### Contrainte

$$\Delta\theta_{max} = \frac{P_c + P_{mg}}{h S_{th}}$$



$$\alpha, \beta, \gamma, u \rightarrow f^\circ(p, r_s, r_w, R)$$



## Expression du volume avec pertes minimales

- ① Expressions de  $F_s$  et  $\psi$  qui minimisent les pertes

$$F_s = \sqrt{\frac{h S_{th} \Delta T}{2\beta}} \quad \psi = a \sin \sqrt{\frac{u^2}{\beta + u^2 \gamma_0}}$$

- ② Expression de  $B_{fm}$  qui minimisent les pertes

$$B_{fm} = \sqrt{\frac{h S_{th} \Delta T}{2 \gamma_0}} \sqrt{1 + u^2 \frac{\gamma_0}{\beta}}$$

- ③ Expression du volume à alimentation optimale (pertes minimales)

$$Vol = \frac{\sqrt{2} C_{em} \Omega}{h \Delta T} \frac{\frac{L}{xR}}{1 + \frac{L}{xR}} \sqrt{\frac{k_L}{\sigma_c k_f k_w^2}} \sqrt{k_{ad} \left( k_{ec} + \frac{k_h}{p\Omega} \right)} \sqrt{\frac{1 + r_w}{(1 - r_w)(r_w^2 - r_s^2)} + \frac{k_\sigma^2 p^2}{k_t r_s^2}}$$

« thermique »

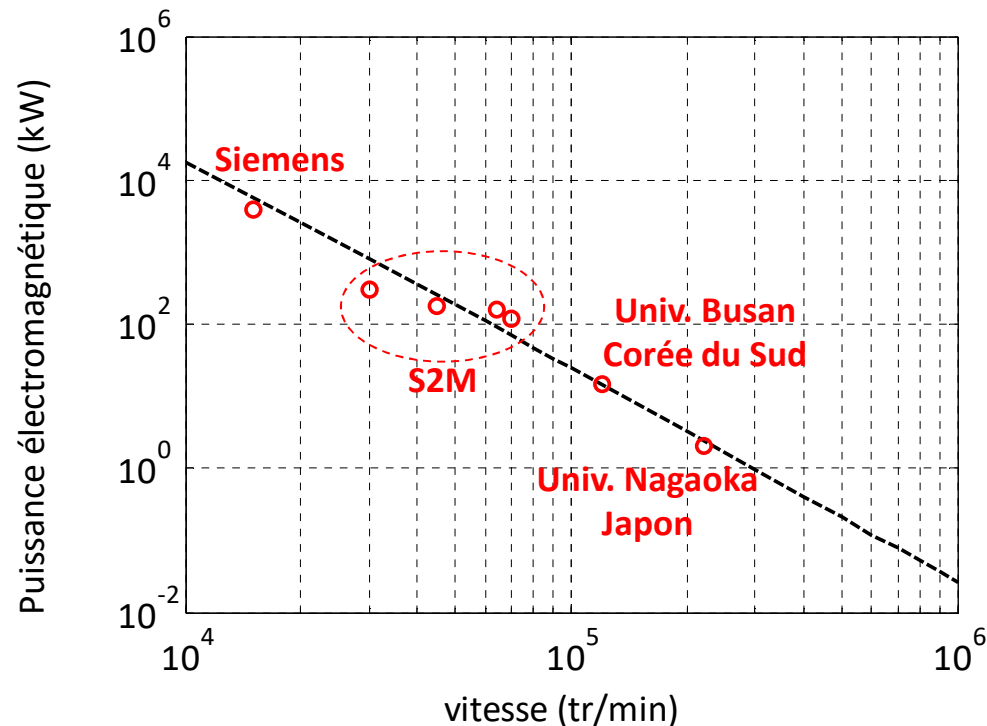
« cuivre »

« fer »

« géométrie »

## Maximisation de la puissance volumique des machines « rapides »

- MSAP montés en surface avec encoches
- Vitesse périphérique : **250 m/s**
- Convection forcée :  **$h = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$**



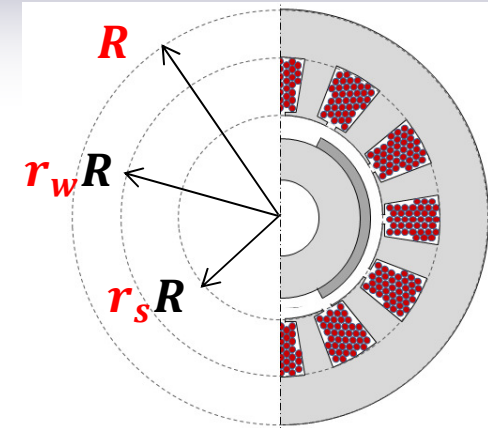
- ✓ Puissance max. = limite sur  $V_p$
- ✓ Machines non saturées
- ✓ 1 paire de pôles
- ✓ Machines homothétiques

**Fréquence optimale de conversion : égalité pertes fer/pertes cuivre**



## Etude des machines rapide (pôles lisses)

Maximisation de  $H_t B_n$  à échauffement max donné

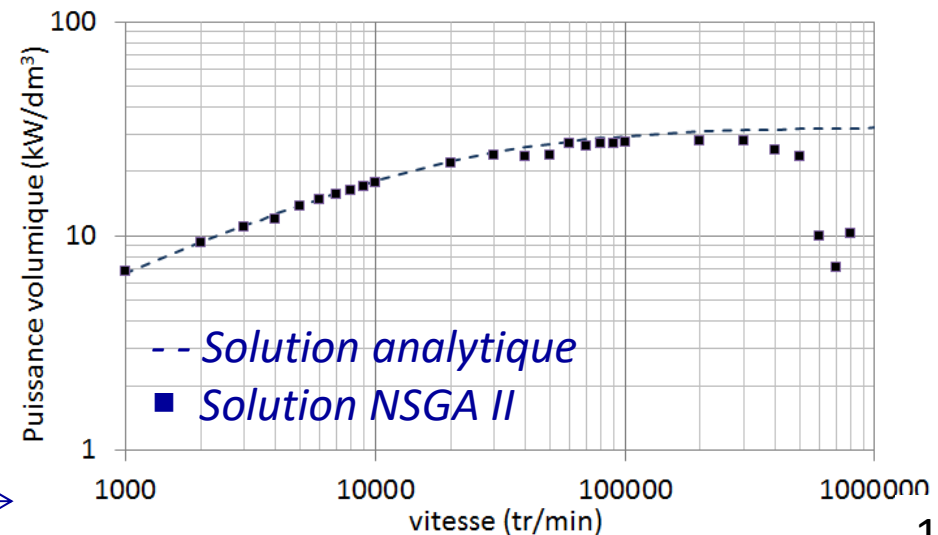


→  $\left. \begin{matrix} B_{fm\ opt} \\ F_{s\ opt} \\ \psi_{opt} \end{matrix} \right\} f^\circ(\text{géométrie})$

→ 
$$P_{em\ max} = \frac{h\Delta T_{max}}{\sqrt{2}} \underbrace{\left( \frac{\pi \tau_L V_p^3}{\Omega^3} \right)}_{r_s^2 Vol} \sqrt{\frac{\sigma_c k_{f0} k_w^2}{k_L}} \sqrt{\frac{1}{k_{ad} \left( k_{ec} + \frac{k_h}{p\Omega} \right)}} \sqrt{\frac{1 - k_t}{\frac{(1 + r_w) r_s^4}{(1 - r_w)(r_w^2 - r_s^2)} + \frac{k_\sigma^2 r_s^2 p^2}{k_t}}}$$

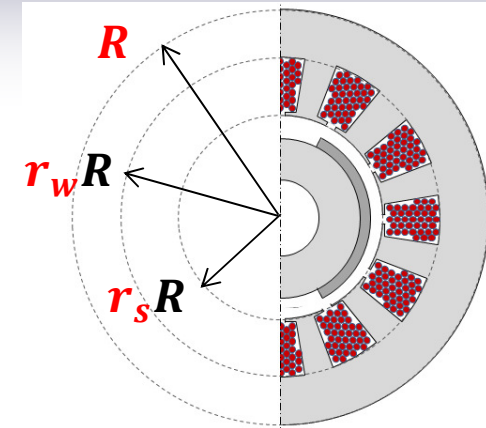
- $V_p = 150$  m/s
- $\Delta T_{max} = 120^\circ\text{C}$
- $h = 100$  W/m<sup>2</sup>K (Convection forcée)
- Tôles Fe-Si (0,3 mm)

Puissance volumique →



## Etude des machines rapide (pôles lisses)

Maximisation de  $H_t B_n$  à échauffement max donné

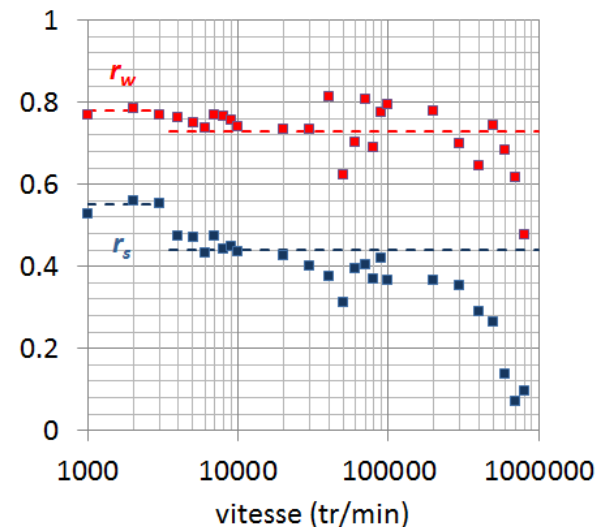


→  $\left. \begin{matrix} B_{fm\ opt} \\ F_{s\ opt} \\ \psi_{opt} \end{matrix} \right\} f^\circ(\text{géométrie})$

→ 
$$P_{em\ max} = \frac{h\Delta T_{max}}{\sqrt{2}} \left( \frac{\pi \tau_L V_p^3}{\Omega^3} \right) \sqrt{\frac{\sigma_c k_{f0} k_w^2}{k_L}} \sqrt{\frac{1}{k_{ad} \left( k_{ec} + \frac{k_h}{p\Omega} \right)}} \sqrt{\frac{1 - k_t}{\frac{(1 + r_w) r_s^4}{(1 - r_w)(r_w^2 - r_s^2)} + \frac{k_\sigma^2 r_s^2 p^2}{k_t}}}$$

- $V_p = 150$  m/s
- $\Delta T_{max} = 120^\circ\text{C}$
- $h = 100$  W/m<sup>2</sup>K (Convection forcée)
- Tôles Fe-Si (0,3 mm)

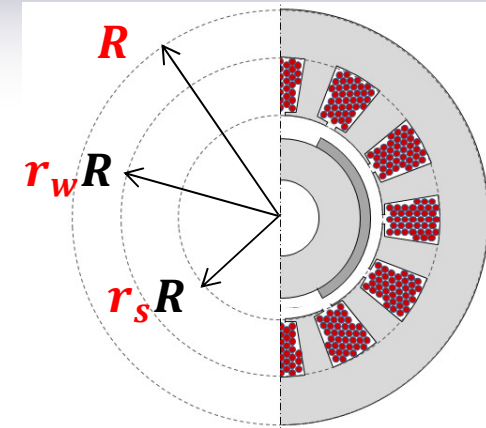
Géométrie →



## Etude des machines rapide (pôles lisses)

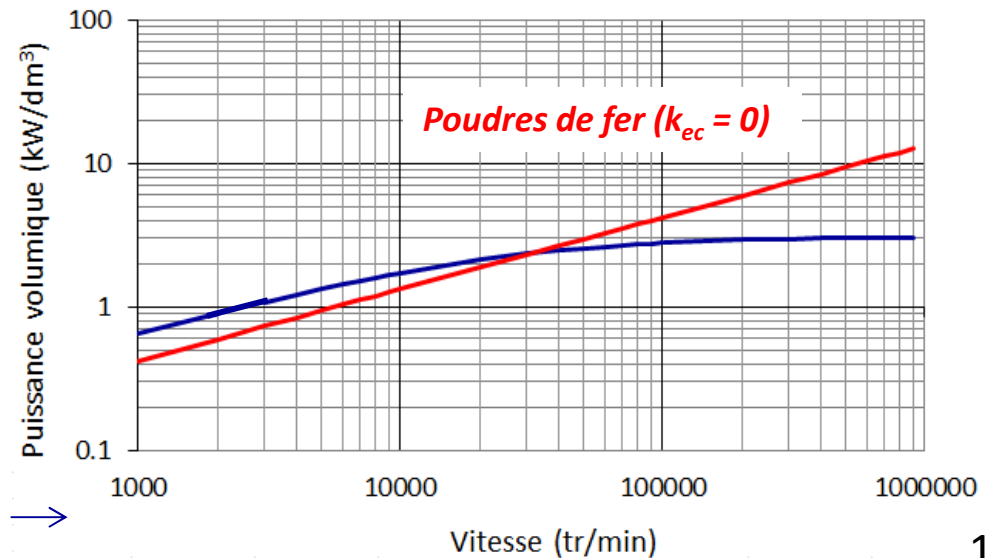
Maximisation de  $H_t B_n$  à échauffement max donné

→  $\left. \begin{matrix} B_{fm\ opt} \\ F_{s\ opt} \\ \psi_{opt} \end{matrix} \right\} f^\circ(\text{géométrie})$



→ 
$$P_{em\ max} = \frac{h\Delta T_{max}}{\sqrt{2}} \left( \frac{\pi \tau_L V_p^3}{\Omega^3} \right) \sqrt{\frac{\sigma_c k_{f0} k_w^2}{k_L}} \sqrt{\frac{1}{k_{ad} \left( k_{ec} + \frac{k_h}{p\Omega} \right)}} \sqrt{\frac{1 - k_t}{\frac{(1 + r_w) r_s^4}{(1 - r_w)(r_w^2 - r_s^2)} + \frac{k_\sigma^2 r_s^2 p^2}{k_t}}}$$

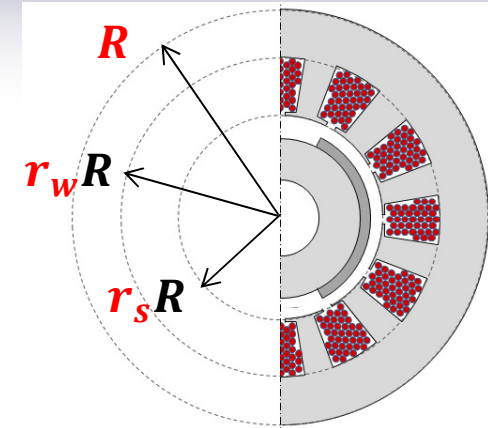
- $V_p = 150$  m/s
- $\Delta T_{max} = 120^\circ\text{C}$
- $h = 100$  W/m<sup>2</sup>K (Convection forcée)
- Tôles Fe-Si (0,3 mm)  
et poudre de fer



Matériau magnétique →

## Etude des machines rapide (pôles lisses)

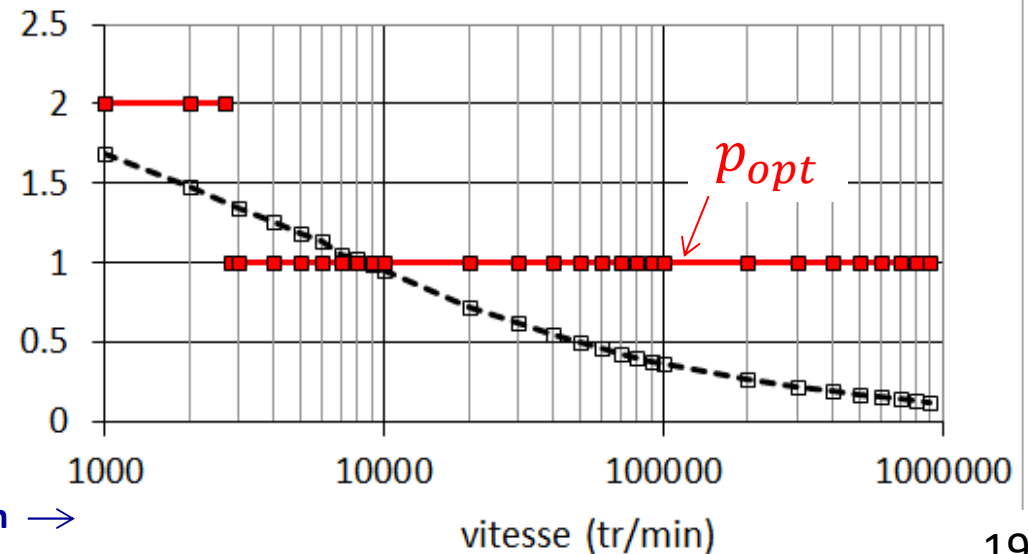
Maximisation de  $H_t B_n$  à échauffement max donné



→  $\left. \begin{matrix} B_{fm\ opt} \\ F_{s\ opt} \\ \psi_{opt} \end{matrix} \right\} f^\circ(\text{géométrie})$

→ 
$$P_{em\ max} = \frac{h\Delta T_{max}}{\sqrt{2}} \left( \frac{\pi \tau_L V_p^3}{\Omega^3} \right) \sqrt{\frac{\sigma_c k_{f0} k_w^2}{k_L}} \sqrt{\frac{1}{k_{ad} \left( k_{ec} + \frac{k_h}{p\Omega} \right)}} \sqrt{\frac{1 - k_t}{\frac{(1 + r_w) r_s^4}{(1 - r_w)(r_w^2 - r_s^2)} + \frac{k_\sigma^2 r_s^2 p^2}{k_t}}}$$

- $V_p = 150$  m/s
- $\Delta T_{max} = 120^\circ\text{C}$
- $h = 100$  W/m<sup>2</sup>K (Convection forcée)
- Tôles Fe-Si (0,3 mm)



Fréquence de conversion →

## ▪ Machines « rapides » au laboratoire IREENA

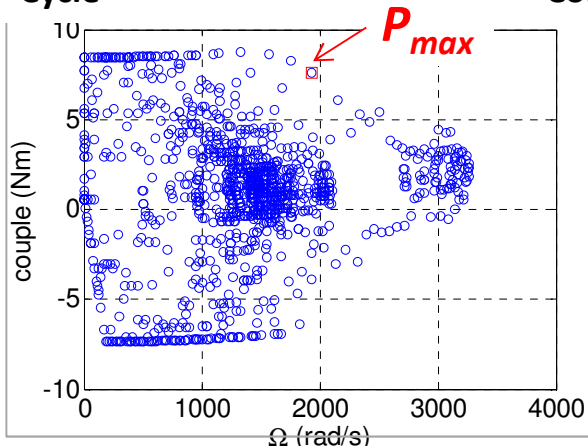
- Modélisation spécifique  
(Pertes dans les aimants, thermique, mécanique...)
- Réalisation d'un banc d'essai
- Méthodologie de dimensionnement sur cycle  
Approche analytique (Modèle 1D)  
Prise en compte du défluxage

$$\left( \frac{1}{T_{cycle}} \int pertes dt \right)_{min}$$

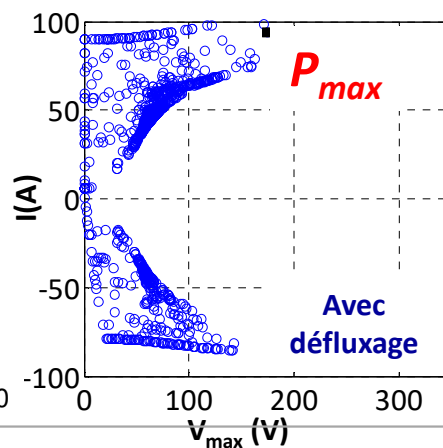


Banc 30 kW – 30 000 tr/min

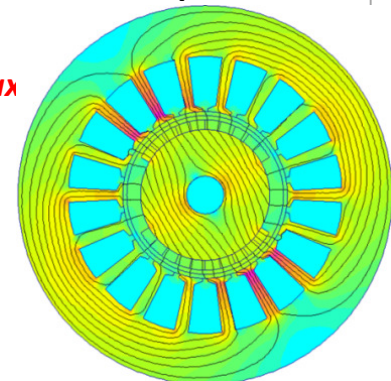
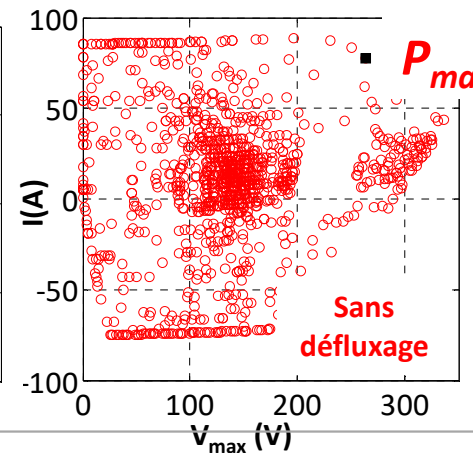
Cycle



Commande optimale



Géométrie optimale



[DAN\_17]

## Conclusion

- Apports récents : matériaux
- Modélisations multi-physiques  
(utilisation de modèles « simples » )

## Positionnements futurs

- Tendance à l'étude complète des chaînes de conversion  
(optimisation avec convertisseur de puissance)
- Dimensionnement sur cycle

## Références

[BER\_16] BERNARD N., MISSOUM R., L. DANG, N. BEKKA, H. BEN AHMED, ZAÏM E. H., "Design Methodology for High-Speed Permanent Magnet Synchronous Machines", IEEE trans. on Energy Conversion, Vol. 31, Issue : 2, pp 477 – 485, 2016.

[DAN\_17] DANG L., BERNARD N., BRACIKOWSKI N., BERTHIAU G., " Design optimization with flux-weakening of High-Speed PMSM for electrical vehicle considering the driving cycle", IEEE trans. on Industrial Electronics, VOL. 64, NO. 12, DECEMBER 2017.

[BIN\_06] Andreas Binder, Tobias Schneider, and Markus Klohr, « Fixation of Buried and Surface-Mounted Magnets in High-Speed Permanent-Magnet Synchronous Machines », IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 42, NO. 4, JULY/AUGUST 2006.

[BOR\_13] A. Borisavljević, Limits, Modeling and Design of High-Speed Permanent Magnet Machines, Springer Theses, DOI: 10.1007/978-3-642-33457-3\_2, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013.

[GER\_14] David Gerada, Abdeslam Mebarki, Neil L. Brown, Chris Gerada, Andrea Cavagnino and Aldo Boglietti, « High-Speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments », IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 61, NO. 6, JUNE 2014.

[GIE\_14] Jacek F. Gieras, « Design of Permanent Magnet Brushless Motors for High Speed Applications », 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Oct. 22-25, 2014, Hangzhou, China

[HON\_12] Hong D.-K., Woo B.-C., Jeong Y.-H., Koo D.-H., Cho Y.-H. , « The performance analysis of ultra high-speed PM type of synchronous motor-generator for micro turbine », International Journal of Modern Physics, Vol. 6 (2012), 461-466.

[UZH\_13] Nikita Uzhegov, Juha Pyrhonen, Sergey Shirinskii, « Loss Minimization in High-Speed Permanent Magnet Synchronous Machines with Tooth-Coil Windings », <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6699601>

[UZH\_17] Uzhegov, Nikita; Smirnov, Alexander; Park, Cheol Hoon Park; Ahn, Ji Hun; Heikkinen, Janne; Pyrhönen, Juha

[ZHA\_18] Weiduo Zhao, Xuejiao Wang, Chris Gerada, He Zhang, Chuan Liu, and Yinli Wang, « Multi-Physics and Multi-Objective Optimization of a High Speed PMSM for High Performance Applications », IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 54, NO. 11, NOVEMBER 2018.

[ZWY\_09] Christof Zwysig, Johann W. Kolar and Simon D. Round, « Megaspeed Drive Systems: Pushing Beyond 1 Million r/min », IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 14, NO. 5, OCTOBER 2009

### **Prototypes (Recherche académique)**

[CEN\_10] Centner M., Schäfer U., « Optimized Design of High-Speed Induction Motors in Respect of the Electrical Steel Grade », IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 57, No 1, January 2010.

[HON\_12] Hong D.-K., Woo B.-C., Koo D.-H., Ahn C.-W., « Unbalance Analysis of 15 kW, 120 krpm, Ultra High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor », International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications (ICEF), 19-21 June 2012, Dalian, Liaoning, China.

[HON\_12] Hong D.-K., Woo B.-C., Jeong Y.-H., Koo D.-H., Cho Y.-H. , « The performance analysys of ultra high-speed PM type of synchronous motor-generator for micro turbine », International Journal of Modern Physics, Vol. 6 (2012), 461-466.

[HUA\_16] Huang Z., Fang J., « Multiphysics Design and Optimization of High-Speed Permanent-Magnet Electrical Machines for Air Blower Application », IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 63, No 5, Mai 2016.

[JAN\_08] Jang S.-M., Ko K.-J., Park J.-H., Lee S.-H., « Design Criteria and Electromagnetic Analysis of a High-Speed Permanent Magnet Synchronous Machine », International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS, 17-20 Oct. 2008, Wuhan, China.

[KIM\_12] Kim T.-H., Lee S.-H., Ahn J.-W., « Design of High-Speed SR Drive System for Fuel Pump of Fuel Cell Electric Vehicle », Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 9-12 Oct. 2012, Seoul, South Korea.

[LEE\_13] Lee D.H., Pham T. H., Ahn J.-W., «Design and Operation Characteristics of Four-Two Pole High-Speed SRM for Torque Ripple Reduction », IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 60, Issue: 9, Sept. 2013.

[LI\_17] Li X., Erd N., Binder A., « Design and Calculation of a 130 kW High-Speed Permanent Magnet Synchronous Machine in Flywheel Energy Storage Systems for Urban Railway Application », International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 27-29 June 2017, Santa Margherita Ligure, Italy.

[LIM\_15] Lim M.-S., Chai S.-H., Yang J.-S., Hong J.-P., « Design and Verification of 150-krpm PMSM Based on Experiment Results of Prototype », IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 62, Issue: 12, Dec. 2015.

[LIY\_08] Liyi L., Baoquan K., Jiwei C., Liangliang Z., « Optimization Design of Permanent Magnet Synchronous Motor for the Electrical Spindle », International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS, 17-20 Oct. 2008, Wuhan, China.

[PAR\_15] Park J.-H., Lee T.-Y., Kim J.-M., « Analysis and Design of High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor or Turbo Blower System », International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), 1-5 June 2015, Seoul, South Korea.

[PYR\_10] Pyrhönen P., Nerg J., Kurronen P., Lauber U., « High-Speed High-Output Solid-Rotor Induction-Motor Technology for Gas Compression », IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 57, Issue: 1, Jan. 2010.

[RIE\_10] Riemeier B., Leßmann M., Hameyer K., « Rotor Design of a High-Speed Permanent Magnet Synchronous Machine rating 100,000 rpm at 10kW », Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 12-16 Sept. 2010, Atlanta, GA, USA

[UZH\_13] Uzhegov N., Pyrhonen J., Shirinskii S., « Loss Minimization in High-Speed Permanent Magnet Synchronous Machines with Tooth-Coil Windings », 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 10-13 Nov. 2013, Vienna, Austria.