

Journées du club EEA « Avion et électricité », 18-19 mars 2004

Actionneurs linéaires directs et indirects : performances limites

H. Ben Ahmed, B. Multon, P.E. Cavarec

'nom'@bretagne.ens-cachan.fr

Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Énergie
(SATIE, UMR CNRS 8029)

ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE de CACHAN
Antenne de Bretagne

Journées du club EEA « Avion et électricité », 18-19 mars 2004

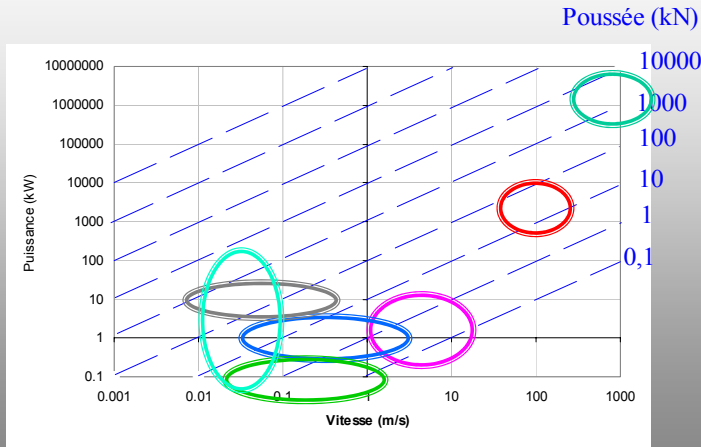
Sommaire

- **Introduction**
- **Classification descriptive**
- **Actionneurs EM directs**
 - Couplages polaires
 - Couplages fractionnés
- **Actionneurs EM indirects**
- **Actionneurs électro-hydrauliques**
- **Conclusion**

Journées du club EEA « Avion et électricité », 18-19 mars 2004

Introduction

Domaines de performances attendues



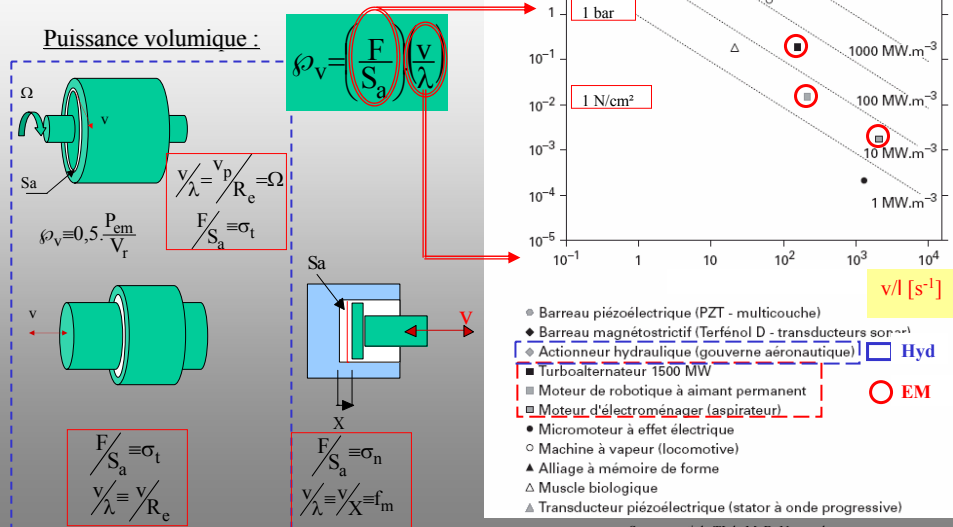
- Lanceurs EM
- Prop. magn.
- Convoyeurs
- Outils
- Robotique
- domotique
- Aéronautique

Source : A. Cassat all., LDIA'2003

Journées du club EEA « Avion et électricité », 18-19 mars 2004

Introduction

Comparaison de # technologies

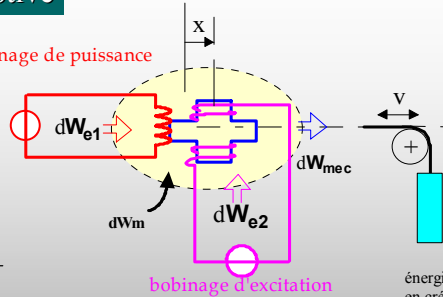


Journées du club EEA « Avion et électricité », 18-19 mars 2004

2 Classification descriptive

➤ Généralités

bobinage de puissance



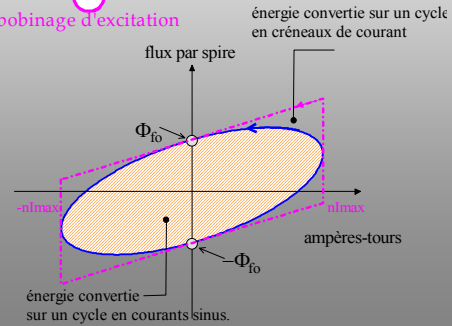
Poussée moyenne :

$$F_j(x_j) = \frac{\partial W_m}{\partial x_j} \Rightarrow \bar{F} = \frac{\Delta W_m}{2\tau}$$

$$\bar{F} \approx N_b S_p k_{imoy} \frac{\bar{B}_{f0} n I_{max}}{2\tau}$$

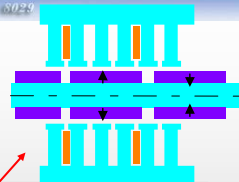
Avec :

- N_b : nb. total de bobines
- S_p : section de flux par pôle
- B_{f0} : densité de flux d'excitation sous un pôle
- k_{imoy} : coeff. De forme courant
- τ : période mécanique de conversion



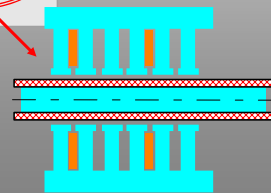
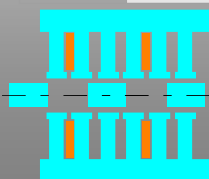
2 Classification descriptive

➤ Sources d'excitation



Source d'excitation		Non-dissipative	Dissipative
Produite	Aimantation	MS et MCC à AP	***
	Courant	MS bobinée (supra)	MCC et MS bobinées et MAS généralisée
Induite	Aimantation	MRV pure	Machine à hystérésis
	Courant	***	MAS à rotor en CC

Source : article TI de M. B. Nogaredo

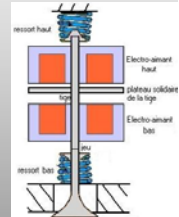
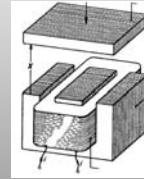
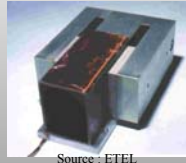
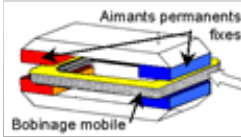
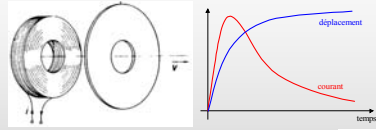


2 Classification descriptive

Alimentation / course

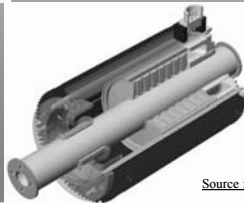
Alimentation mono-pas :

$$\tau/X \approx 1$$



Alimentation multi-pas :

$$\tau/X \ll 1$$



Source : F.G. Jacek, LDIA'2003

Cas développé par la suite

2 Classification descriptive

Surface d'entrefer



Source : ETEL

Mono-surface plane

F_n non-compensé
Pb. guidage
Frottements



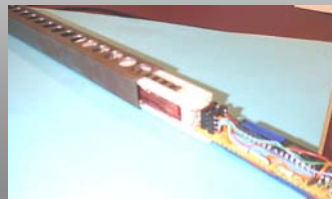
Source : LinearDrives

Mono-surface cylindrique (tubulaire)



Source : Trilogy

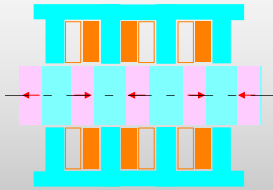
Bi-surfaces planes



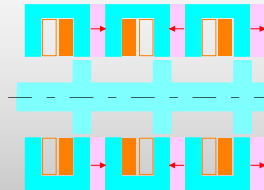
Source : SATIE

2 Classification descriptive

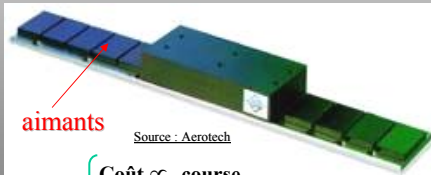
Composition du rail



À rail actif



À rail passif



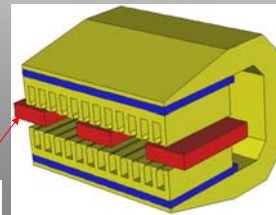
aimants

Source : Aerotech

Coût ∝ course



Protection rail guidage

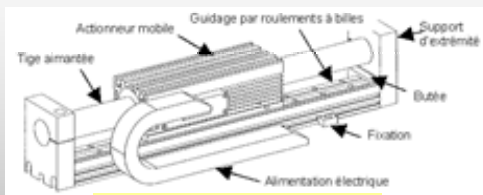


plots

Source : Henneberger, ICM 1996

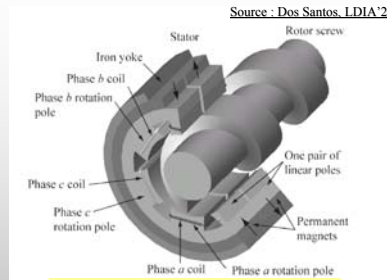
2 Classification descriptive

Degrés de liberté du mouvement



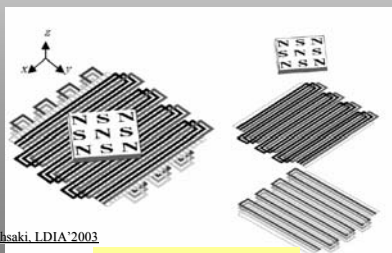
Source : LinearDrives

1 degré : translation (classique)



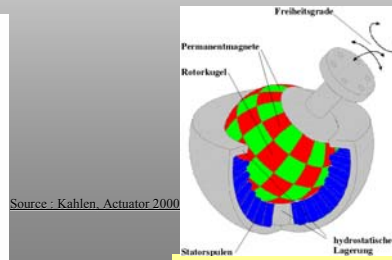
Source : Dos Santos, LDIA'2003

2 degrés : translation et rotation



Source : Ohsaki, LDIA'2003

2 degrés : translations

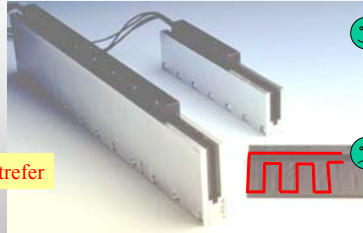


Source : Kahlen, Actuator 2000

3 degrés : rotation 3 axes

2 Classification descriptive

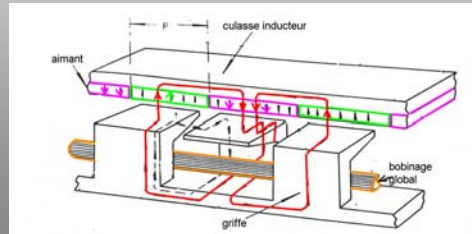
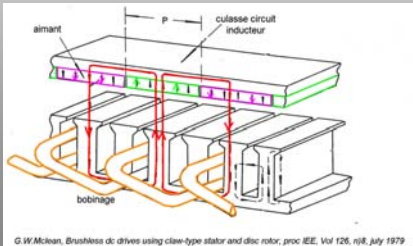
>>> Type de bobinage



Bobinage dans l'entrefer

- 😊 Faible inertie – Gde dynamique
- 😊 Force transversale réduite
- 😊 Gde intégration mécanique
- 😊 Pertes dans le CM réduites
- ☹️ Refroidissement difficile
- ☹️ Poussée réduite

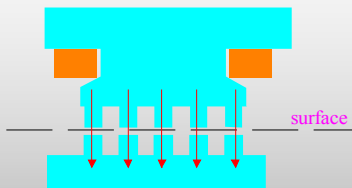
Source : ETEL



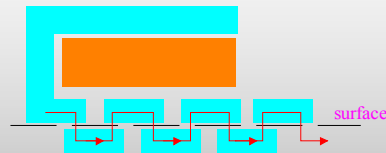
Bobinage dans les encoches

2 Classification descriptive

>>> Trajet du flux d'entrefer



Flux transversal



Flux longitudinal



Source : SATIE



Source : SATIE

2 Classification descriptive

Couplages électromagnétiques

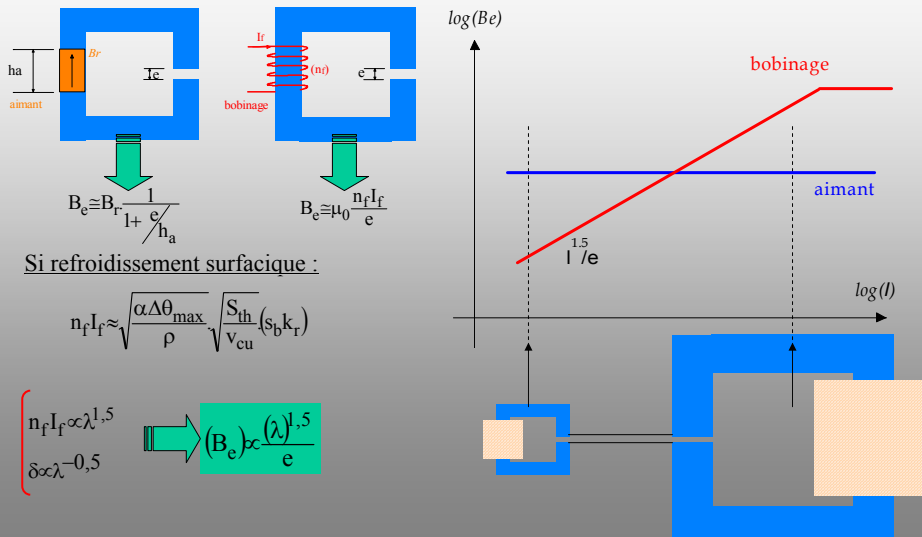
Bobinage de puissance / $(\tau/\tau_p) = 4$ classes de machines élémentaires

Caractéristiques	Bobinage de puissance	
	<u>réparti</u>	<u>centralisé</u>
Couplages polaires $\frac{\tau}{\tau_p} \approx 1$	classique 	Vernier grosses dents (2)
Couplages fractionnés $\frac{\tau}{\tau_p} \ll 1$	Vernier petites dents (2) 	Global (3)

Journées du club EEA « Avion et électricité », 18-19 mars 2004

3 Entraînement EM directs : Performances

Excitations bobinée ou par aimants



Journées du club EEA « Avion et électricité », 18-19 mars 2004

3 Entraînement EM directs : Performances

>> Poussée - formalisme

Hypothèses :

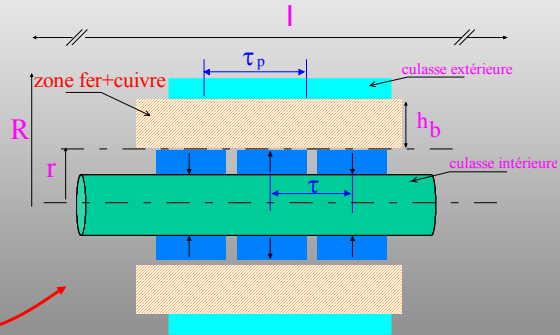
- Matériaux magn. en limite de saturation
- Pas d'effet d'encoches
- Structure tubulaire à aimants en surface
- Effets d'extrémité négligés
- Refroidissement surfacique : $(A_L \delta) \approx \frac{\alpha \Delta \theta_{max}}{\rho}$

$$\bar{F} \approx N_b S_p k_{imoy} \frac{B_{f0} n l_{max}}{2\tau}$$

$$n l_{max} \approx \frac{1}{N_b} k_{ieff} \sqrt{\frac{\alpha \cdot \Delta \theta_{max}}{\rho}} \sqrt{\frac{S_{th} \cdot S_b}{\lambda_b}} \cdot k_r$$

$$\begin{cases} S_{th} \approx 2\pi R \cdot \lambda \\ S_b \approx h_b \lambda k_{fc} \\ \lambda_b \approx 2\pi \left(r + \frac{h_b}{2} \right) \\ S_p \approx 2\pi r \tau_p \\ R \approx r \left(1 + \frac{h_b}{r} \right) \end{cases}$$

Structure générale tubulaire

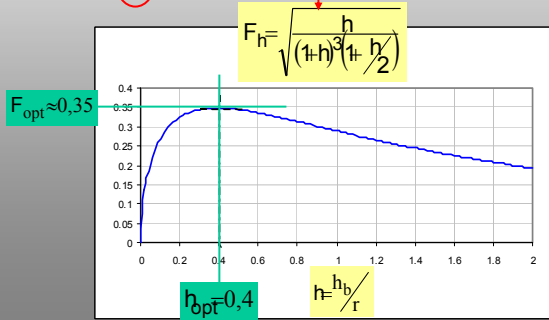


3 Entraînement EM directs : Performances

>> Poussée - formalisme

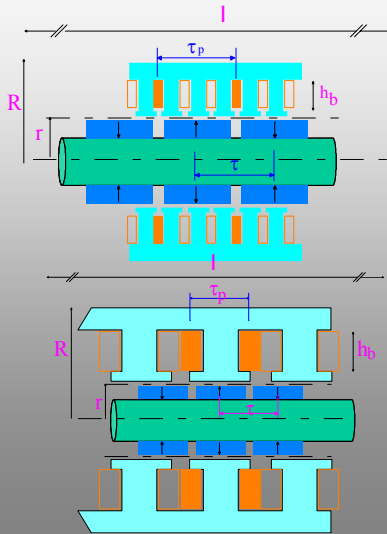
$$\begin{cases} \bar{F} \approx K_r (A_L \delta)^{0.5} B_{f0} \left(\frac{\tau_p}{\tau} \right) \lambda r^2 \\ \frac{\bar{F}}{V_a} \approx K_{fv} (A_L \delta)^{0.5} B_{f0} \left(\frac{\tau_p}{\tau} \right) \frac{1}{\sqrt{r}} \\ K_{fv} \approx k_{imoy} \cdot k_{ieff} \sqrt{k_{gr}} \cdot F_{op} \end{cases}$$

mode de couplage



3 Entraînement EM directs : Performances

➤➤ Poussée volumique – couplages polaires



$$\frac{\tau_p}{\tau} \approx 1$$

$$\begin{cases} \bar{F} \propto \lambda r^{\frac{3}{2}} \\ \bar{F} \propto r^{-0,5} \\ \bar{F} \propto r^{-0,5} \end{cases} \text{ avec : } r \propto R$$

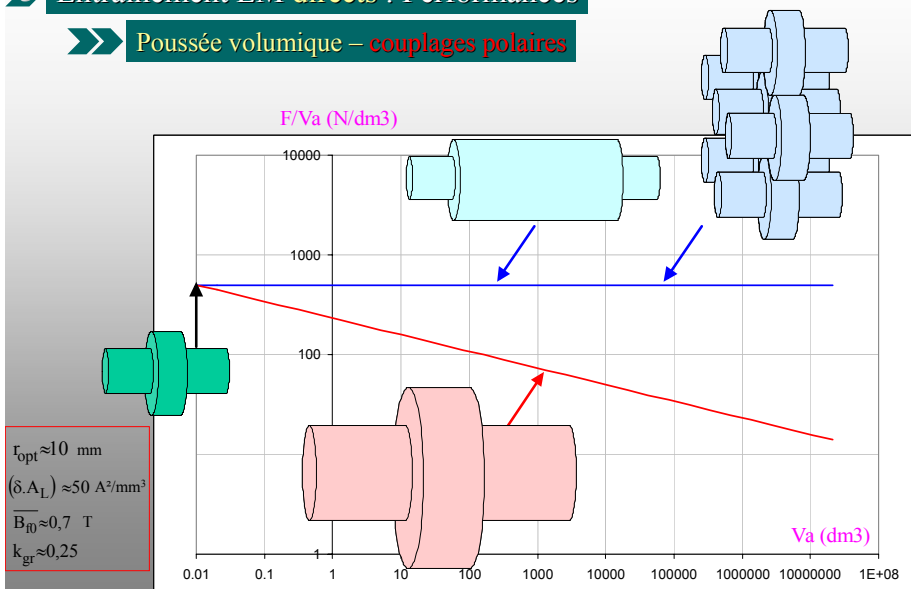
$$\frac{\bar{F}}{V_a} \approx K_{IV} (A_L \delta)^{0,5} \bar{B}_{f0} (r_{opt})^{-0,5}$$

r_{min} : pas d'effet d'échelle

- $F \propto l$ ➔ Actionneur long ou multi-moteurs
- F/V indépendant de l

3 Entraînement EM directs : Performances

➤➤ Poussée volumique – couplages polaires

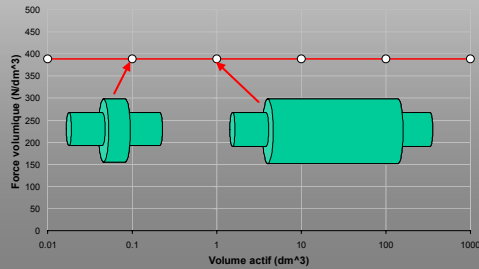
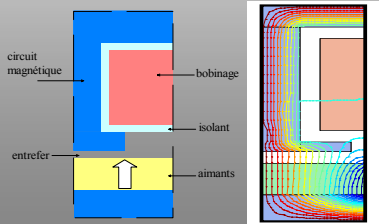
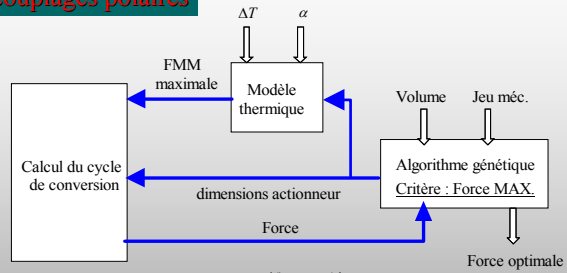


3 Entraînement EM directs : Performances

➤➤ Poussée volumique – couplages polaires

Vérification : EF/Optimisation

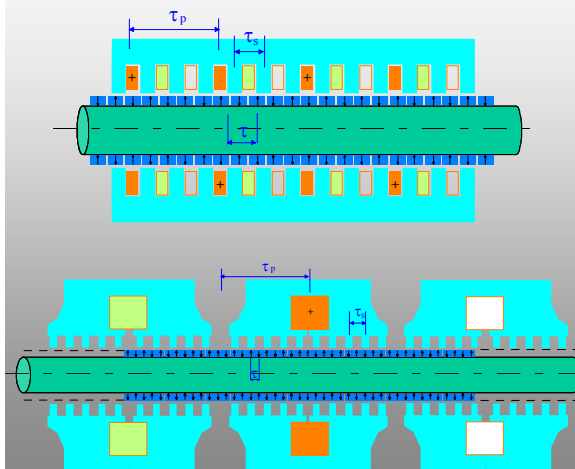
$B_r=1T, \alpha=10 W/m^2.K, \Delta\theta_{max}=100K, e=1 mm, B_{sat}=1.6T$



Journées du club EEA « Avion et électricité », 18-19 mars 2004

3 Entraînement EM directs : Performances

➤➤ Poussée volumique – couplages fractionnés



$$\frac{\tau_p}{\tau} \gg 1 \quad \tau_p \propto \lambda \quad \tau_{opt} \approx k_e \cdot e$$

$$\begin{cases} \bar{F} \approx K_f (A_L \delta)^{0.5} \frac{B_{f0}}{k_e \cdot e} \tau_p \lambda r^2 \\ \bar{F}_a \approx K_{fv} (A_L \delta)^{0.5} \frac{B_{f0}}{k_e \cdot e} \left(\frac{\tau_p}{\sqrt{r}} \right) \end{cases} \text{ avec : } r \propto R$$

$$\tau_p \propto r$$

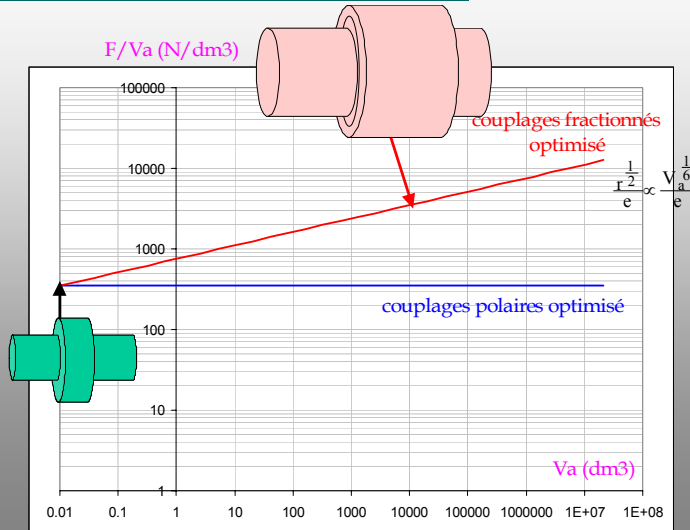
$$\frac{\bar{F}}{V_a} \propto \left(\frac{\sqrt{r}}{e} \right) \propto \frac{1}{e} (\bar{F})^{\frac{1}{7}}$$

Effet d'échelle > 0

Journées du club EEA « Avion et électricité », 18-19 mars 2004

3 Entraînement EM directs : Performances

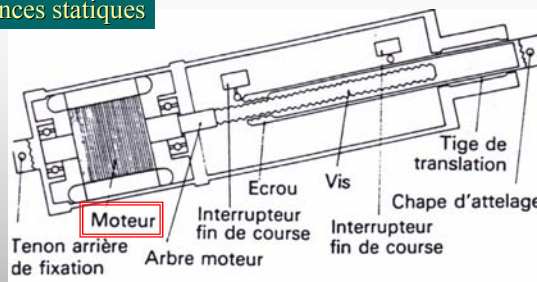
>>> Poussée volumique – couplages fractionnés



Journées du club EEA « Avion et électricité », 18-19 mars 2004

4 Entraînement EM indirects : Performances

>>> Performances statiques



$$F = C_m \cdot \eta_t \cdot k_t \quad \text{avec} : k_t = \frac{\Omega}{V}$$

Moteur tournant cylindrique classique

à aimants en refroid. surfacique : $\tau_p \propto \lambda \propto r \propto R$

$$C_m \propto A_L \cdot B_{f0} \cdot V_r \propto (\lambda)^{3,5}$$

$$\frac{F}{V_a} \propto F^{\frac{1}{7}} \cdot (k_t \cdot \eta_t)^{\frac{6}{7}} \quad \text{Hors volume système de transformation}$$

Journées du club EEA « Avion et électricité », 18-19 mars 2004

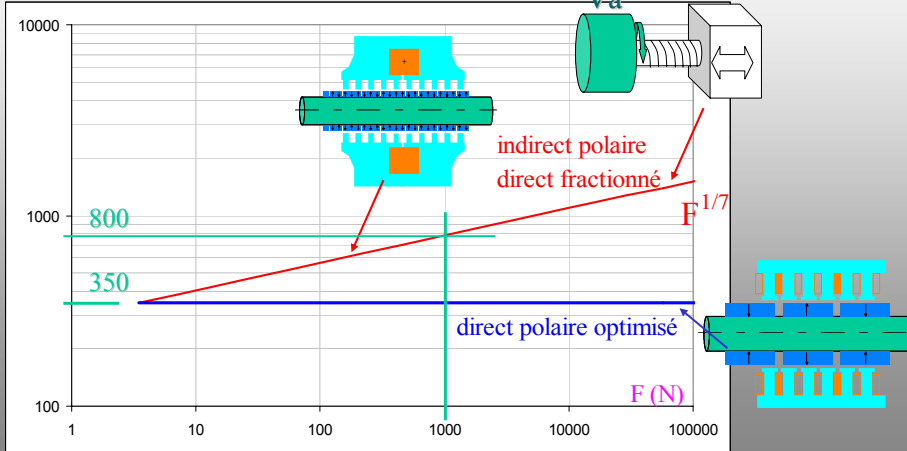
4 Entraînement EM indirects : Performances

Performances statiques



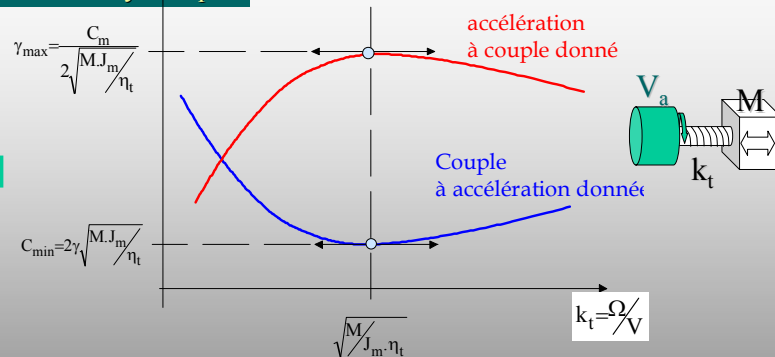
Volume transmission !

F/V_a (N/dm³)



4 Entraînement EM indirects : Performances

Performances dynamiques



Pour l'entraînement indirect :

$$\begin{cases} J_m \propto (\lambda)^5 \\ C_m \propto (\lambda)^{3,5} \\ V_a \propto (\lambda)^3 \end{cases} \quad \tau_p \propto \lambda \propto R \quad \begin{cases} V_a \propto (\gamma_{max})^3 \cdot M^{+3/2} \\ k_{t_opt} \propto (\gamma_{max})^{-5/2} \cdot M^{-3/4} \end{cases}$$

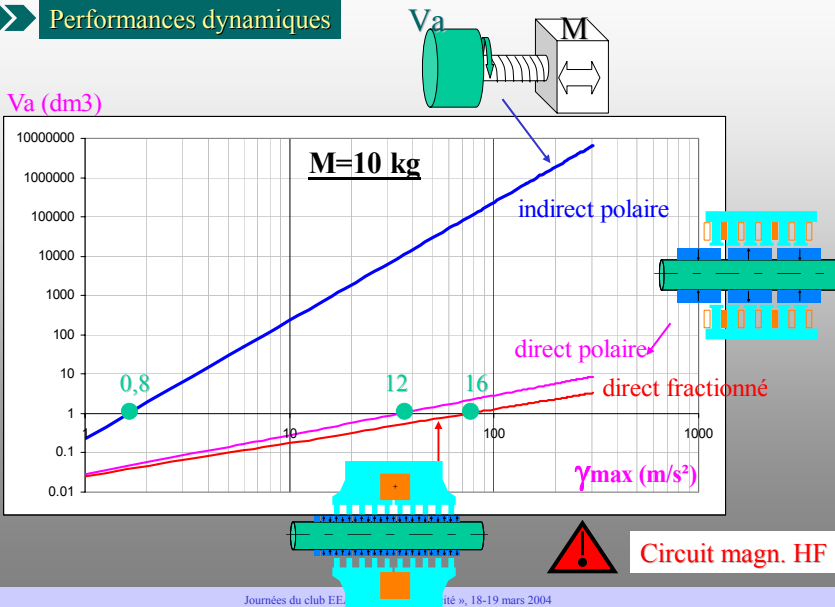
Hors volume système de transformation

Pour l'entraînement direct :

$$\begin{cases} V_a = \gamma_{max} \cdot M & \text{: Couplage polaire} \\ V_a = (\gamma_{max})^6 \cdot M^6 & \text{: Couplage fractionné} \end{cases}$$

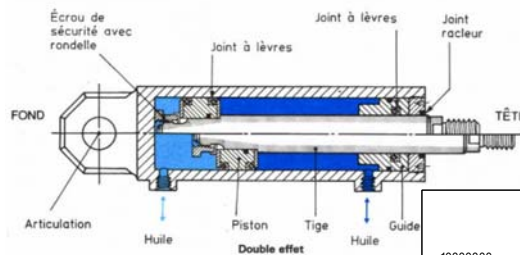
4 Entraînement EM indirects : Performances

Performances dynamiques



5 Entraînement électro-hydrauliques

Performances statiques intrinsèques



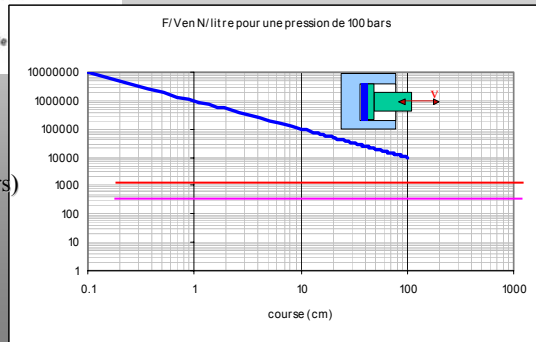
Poussée :

$$F = \sigma_n \cdot S$$

σ_n : Pression (qlq. 100 bars)
 S : Section piston ou tige

$$\frac{F}{v_a} = \frac{\sigma_n}{\Delta X}$$

$v_a = S \cdot \Delta X$: volume de la chambre



5 Entraînement électro-hydrauliques

Performances dynamiques

Chaîne complète :

Moteur tournant :

$$C_m \cdot \Omega_m = \frac{F \cdot v}{\eta_{conv}}$$

$$C_m \propto \lambda^{3,5}$$

$$\Omega_m = \frac{v_p}{R_r} \propto \lambda^{-1}$$

$$v_m \propto [F \cdot v]^{6/5}$$

Pompe :

$$v = \frac{Q}{S} \quad Q : \text{débit } (\sim 1000 \text{ litres/min})$$

Cas d'une pompe volumétrique :

$$v_p = \frac{Q}{\Omega_p} \propto \frac{F \cdot v}{\sigma_n \cdot \Omega_p}$$

Réservoir :

On prend : $v_{res} \approx 2 \cdot Q \cdot t_0$ $t_0 \approx 1 \text{ min}$

$$v_{res} \propto \frac{F \cdot v}{\sigma_n}$$

(F.v) et ΔX faibles

Actionneur très compact

5 Entraînement électro-hydrauliques

Exemple

Actionneur EHA (A320)

Moteur/pompe

Fixation

Actionneur hydraulique

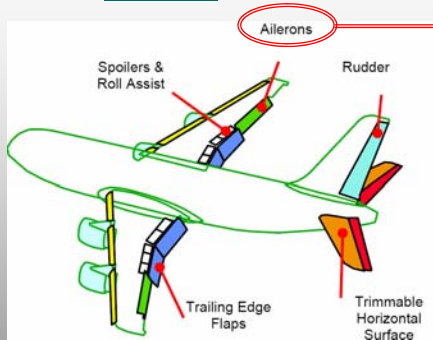
Charge

Accumulateur

20 kN, course ~ 45 mm
Vitesse ~ 0,04 m/s

5 Entraînement électro-hydrauliques

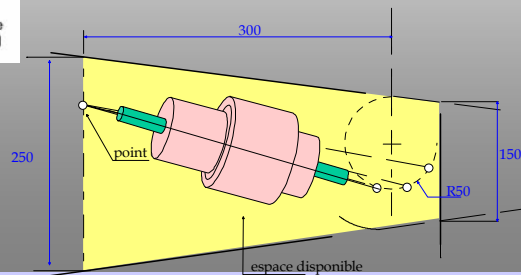
Exemple



P.A. Robson, EPE'2003

Systèmes	Désignation	Caractéristiques	
		Couple [kN.m] Vitesse angulaire [°/s]	Débattement [°]
Cde de vol	Aileron	1 à 20	50 à 80 max
	Dir. profondeur	30 à 40 max	
	Bec / Volet	10 à 40 2 à 5	30 max
Train d'atterrissage	Plan horiz. réglable	60 à 400 0.5 à 1	20 max
	Avant Principal	15 à 40 15 max	90 max
Inverseur de poussée	Porte	2.5 à 5 40 max	80 max
Portes	Cargo	0.5 10	120 max
	Trappes train d'atterrissage	1.2 à 2.5 60 max	90 max

20 kN, course ~ 45 mm
Vitesse ~ 0,04 m/s



Journées du club EEA « Avion et électricité », 18-19 mars 2004

6 Conclusion

Entraînements EM synchrones directs :

- 😊 Simplification de la chaîne de conversion
- 😊 Guidage, capteur position, réalisation CM, banc d'essai, ...

Couplage polaire (classique) :

- ➡ Pas d'effet d'échelle ~ 400 N/litre en conditions usuelles
- ➡ Indépendance de la longueur vis à vis de F/V optimal

Couplage fractionné :

- 😊 Effet d'échelle $F/V \sim V^{1/6} \sim F^{1/7}$ (1 kN / 800 N/l)
- 😊 Circuit magnétique HF ou actionneurs très basse vitesse

Entraînements EM synchrones indirects :

- 😊 Effet d'échelle $F/V < F^{1/7}$
- 😊 Éléments standards
- 😊 Système de transformation : volume, bruit, usure, précision, fiabilité, réversibilité
- 😊 A volume et masse charge donnés, limitation des accélérations

Entraînements électro-hydrauliques :

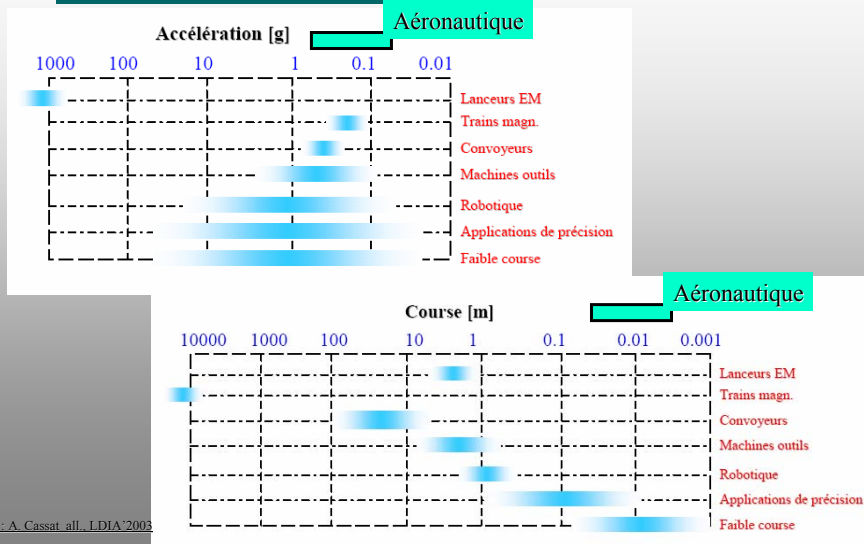
- 😊 Poussées spécifiques très importantes : actionneurs très compacts pour v et ΔX faibles
- 😊 Dynamiques mécaniques limitées

Approche très simplifiée

Compléments

1 Introduction

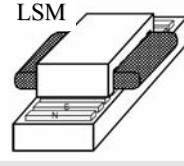
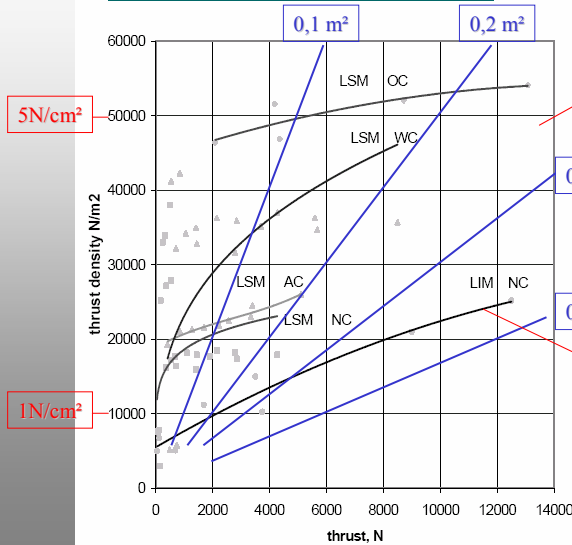
>>> Domaines de performances attendues



Source : A. Cassat all., L.DJA'2003

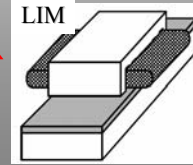
Entraînement EM directs : Performances

Poussée – effet du refroidissement



Modes de convection :

- NC : naturelle
- AC : forcée AIR
- OC : forcée HUILE
- WC : forcée EAU



Source : F.G. Jaeck, LDIA 2003

Classification descriptive

Surface d'entrefer

Multi-surfaces : polyentrefers



Source : SATIE/Radio Énergie

Multi-surfaces planes



Source : SATIE

Multi-surfaces cylindriques