

# Comparaison du couple massique de diverses architectures de machines tournantes à aimants

**B. MULTON, H. BEN AHMED, M. RUELLAN, G. ROBIN**  
Antenne de Bretagne de SATIE – ENS de Cachan



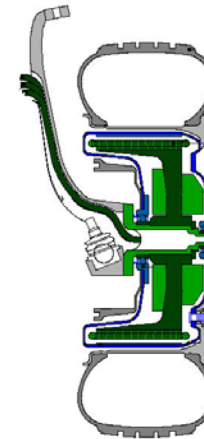
## Structures à aimants :

- meilleur potentiel pour obtenir un couple massique élevé

(moteurs-roue, aérogénérateurs...)

- divers agencements magnétiques

couplages polaires ou dentaires,  
bobinages polaires ou globaux



Johnston,  
Technologies M4 Inc.,  
EVS2000



Jeumont Industries,  
J48, 750 kW

## Etude limitée :

- aux architectures cylindriques à champ radial et à rotor intérieur

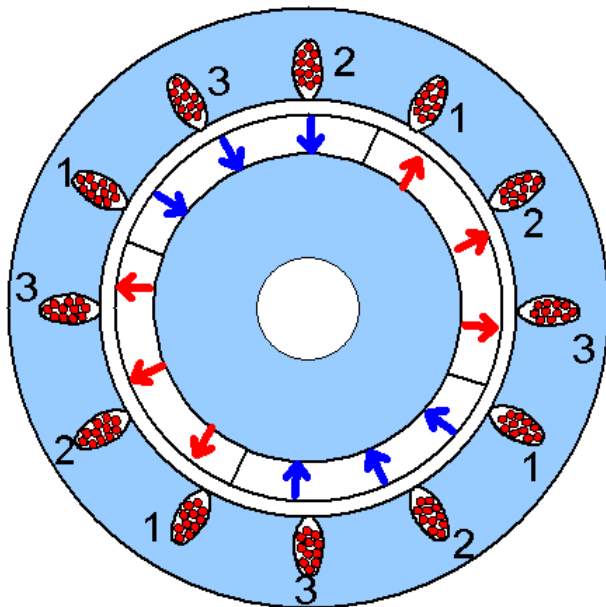
- au couple à basse vitesse (pertes magnétiques non considérées)

- à une analyse des effets d'échelle, partiellement validée

# Architectures magnétiques comparées

## Bobinages et couplages polaires

changement d'échelle à nombre de pôles  $2p = C^{te}$



Pression magnétique tangentielle :  $\sigma_T = K \cdot A_L \cdot \overline{B_e}$

Echauffement dû aux pertes Joule :  $\Delta T = \frac{K_T \cdot k_L \cdot \rho}{\alpha} \cdot A_L \cdot \delta$

Couple électromagnétique :  $C = \sigma_T \cdot 2\pi \cdot R^2 \cdot L$

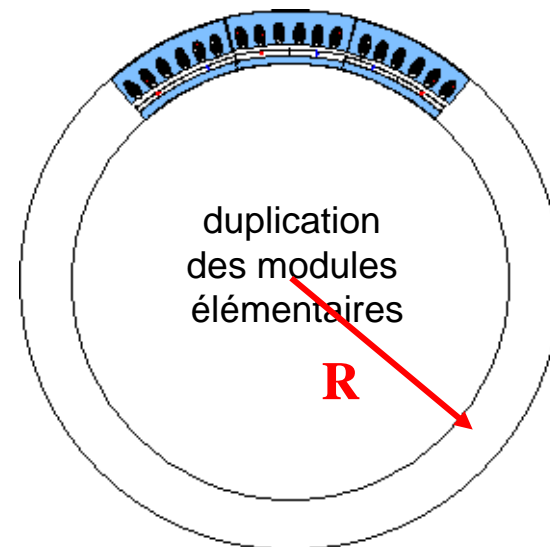
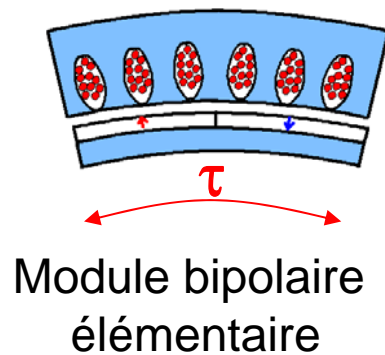
Masse active :  $M_a = K_M \cdot R^2 \cdot L$

# Architectures magnétiques comparées

## Bobinages et couplages polaires

changement d'échelle à **p** croissant

### Structure annulaire



Nombre de paires de pôles :  $p = \frac{\pi.R}{\tau}$

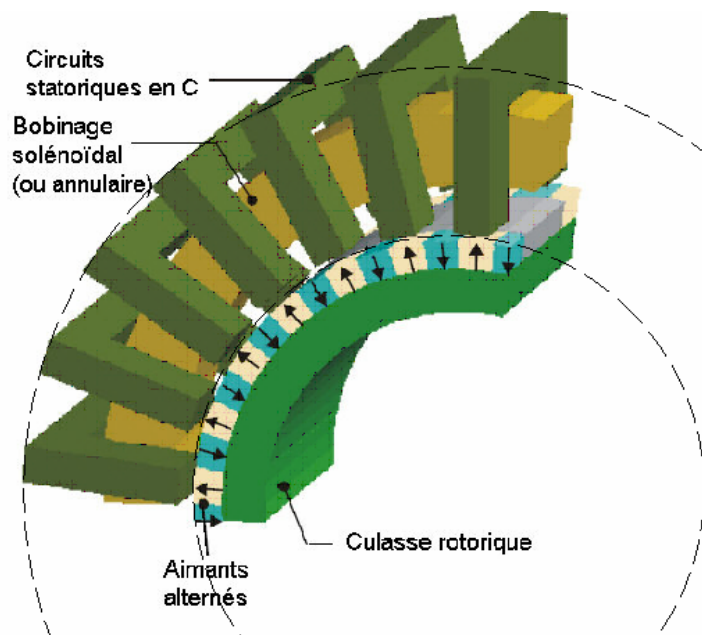
Masse active :  $M_a = K'_M . R . L$

# Architectures magnétiques comparées

## Bobinages globaux et couplages dentaires

### changement d'échelle à **p** croissant

(structures généralement multi-monophasées  
à flux transverses, à griffes...)



Ensemble de motifs  
élémentaires

(principe)

G. KASTINGER,  
ICEM 2002

A échauffement donné :

pression tangentielle accrue  
aux dépens du facteur de puissance

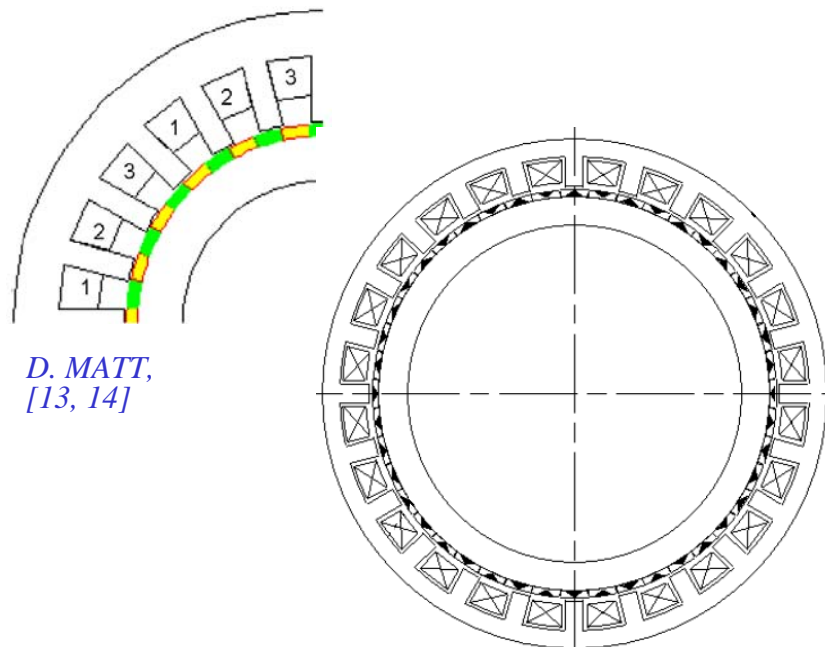
Masse active :  $M_a = K'_M \cdot R \cdot L$

# Architectures magnétiques comparées

## Bobinages polaires et couplages dentaires

### changement d'échelle à **p croissant**

(phases imbriquées,  
structures Vernier à aimants)



A échauffement donné :

pression tangentielle accrue  
aux dépens du facteur de puissance

Masse active :  $M_a = K'_M \cdot R \cdot L$



## Application des lois de similitude sur le couple massique « actif »

À échauffement constant (pertes Joule seules, dissipation surfacique radiale)

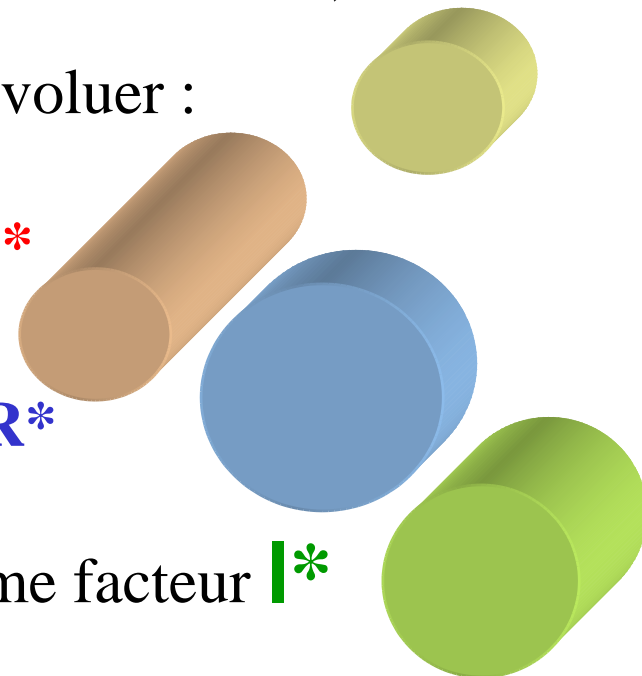
« Effets 3D » non considérés (notamment têtes de bobines)

Analyse des effets d'échelle en faisant évoluer :

les dimensions axiales : facteur  $L^*$

les dimensions radiales : facteur  $R^*$

toutes les dimensions avec le même facteur  $l^*$



# Lois de similitude sur le couple massique

## Bobinages et couplages polaires

Structure cylindrique, densités de courant :  $A_L \propto nI.(R^*)^{-1}$   
 $\delta \propto nI.(R^*)^{-2}$

A échauffement et paramètres de refroidissement donnés :

$$\text{D'après } \Delta T = \frac{K_T.k_L.\rho}{\alpha}.A_L.\delta \quad : \quad A_L.\delta \propto nI^2.R^{*-3} = C^{te}$$

Donc :  $nI \propto R^{*3/2}$  et  $A_L \propto R^{*1/2}$

A induction d'entrefer constante :  $C \propto R^{*5/2}.L^*$

Au-delà d'une valeur « critique » du rayon,

$A_L$  atteint une limite de désaimantation, alors :  $C \propto R^{*2}.L^*$



## Lois de similitude sur le couple massique

### Bobinages et couplages polaires et $p = C^{te}$

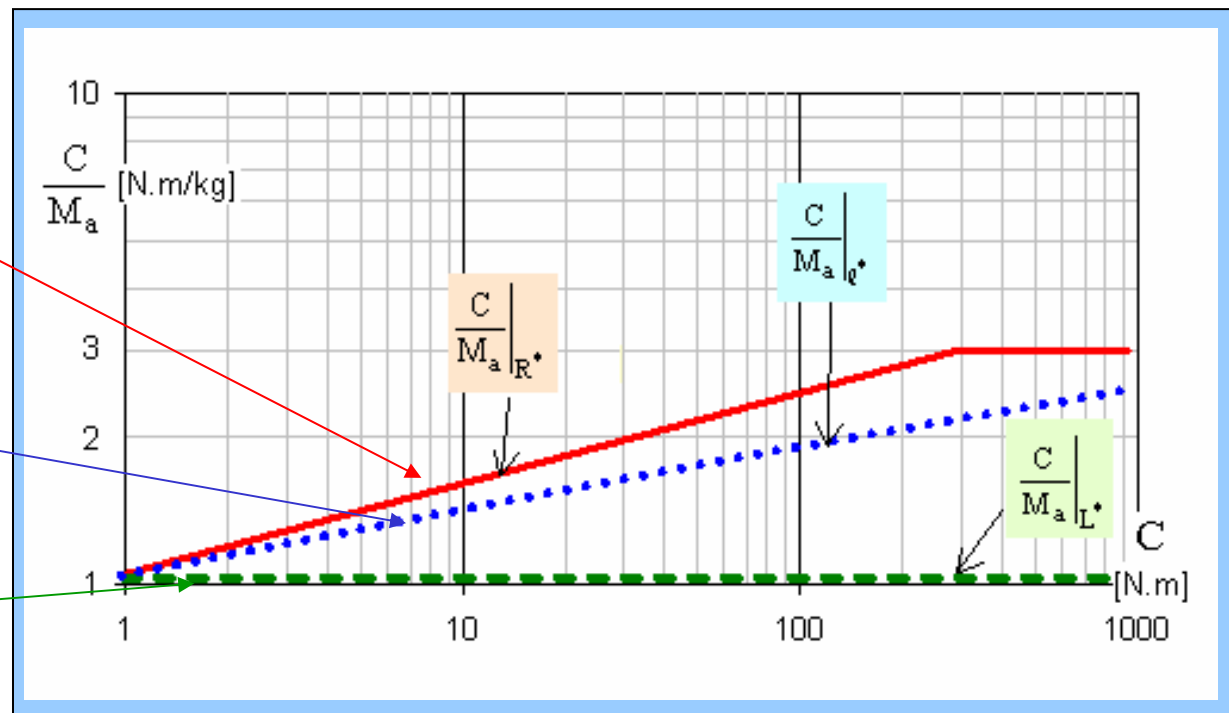
La masse active évolue en :  $M_a \propto R^{*2} \cdot L^*$

On obtient :

$$\frac{C}{M_a} \Big|_{R^*} \propto \begin{cases} C^{1/5} & \text{pour } A_L < A_{LMax} \\ C^0 & \text{pour } A_L > A_{LMax} \end{cases}$$

$$\frac{C}{M_a} \Big|_{l^*} \propto C^{1/7}$$

$$\frac{C}{M_a} \Big|_{L^*} \propto C^0 = C^{te}$$

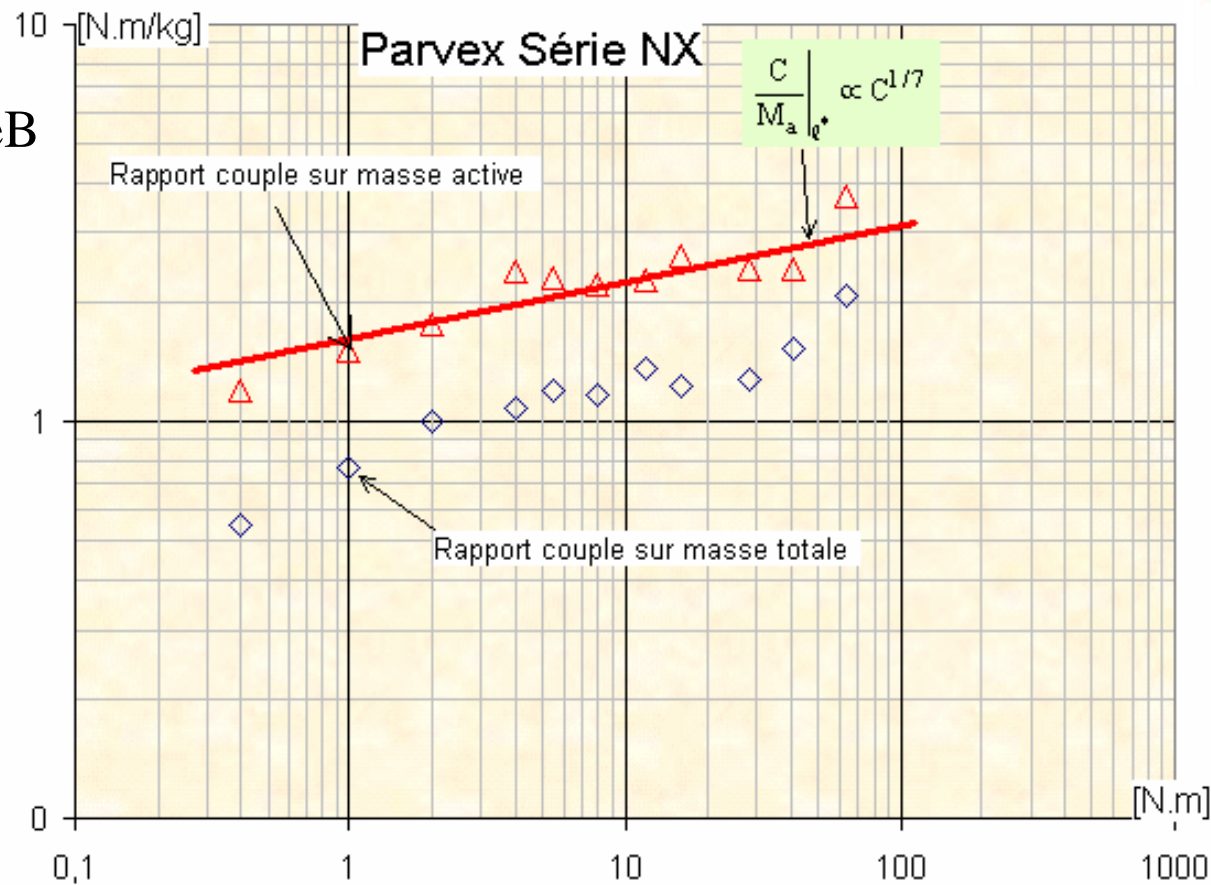


# Observation sur série NX de Parvex



[www.parvex.com](http://www.parvex.com)

10 pôles NdFeB  
masse totale  
et  
masse active



# Architectures annulaires à bobinages et couplages polaires

## Observation sur série TMB d'ETEL

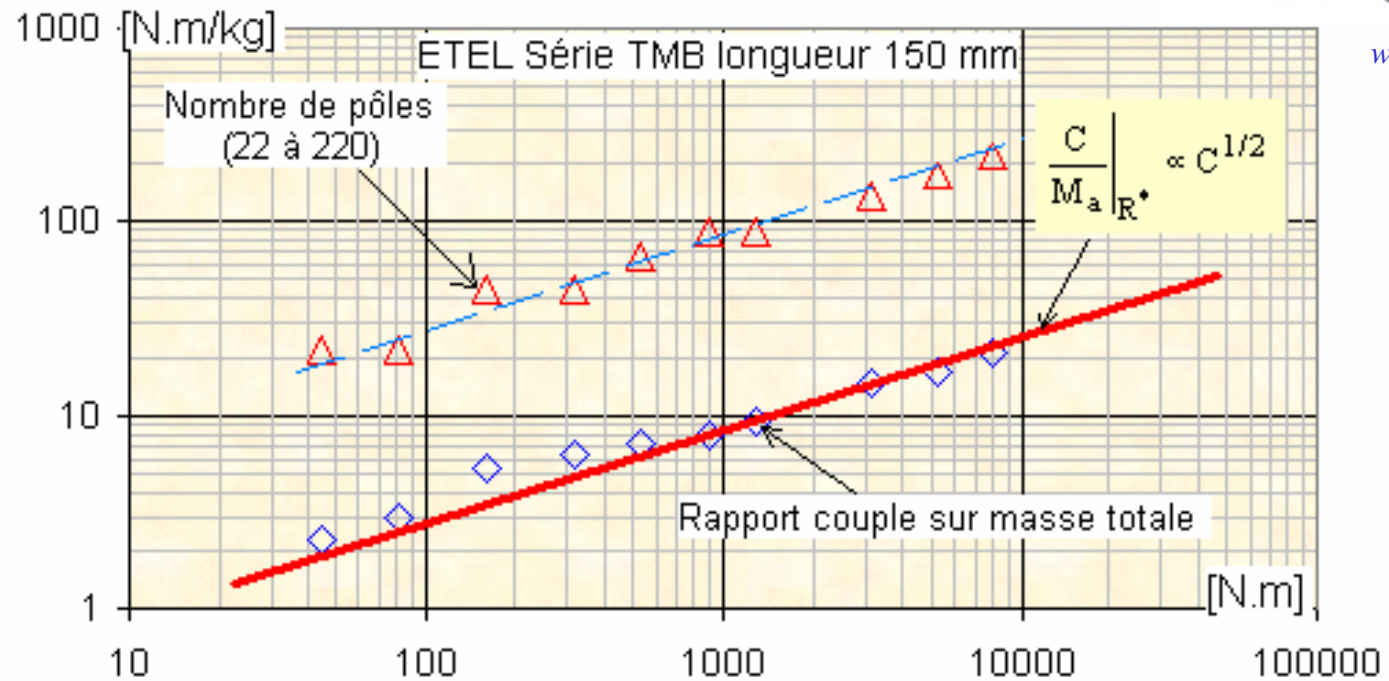
(longueur constante 150 mm  
refroidissement à air)



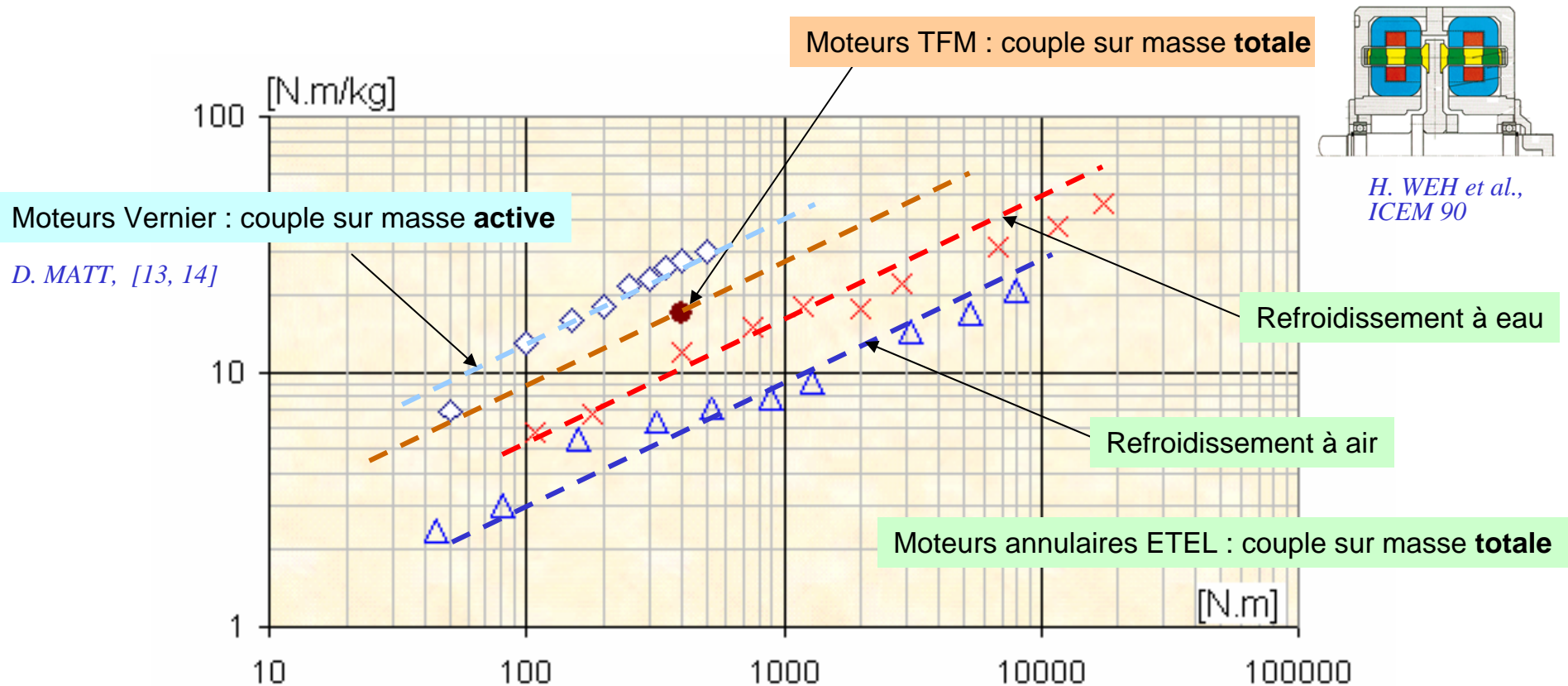
[www.etel.ch](http://www.etel.ch)

$$\frac{C}{M_a |_{R^*}} \propto C^{1/2}$$

$$p |_{R^*} \propto C^{1/2}$$



# Comparaison des 3 familles d'architectures à fort couple massique



## Conclusion

Le couple massique peut atteindre des valeurs élevées :  
par exemple 100 N.m/kg pour 100 000 N.m

Les machines à couplages dentaires offrent des couples massiques supérieurs, mais au prix d'un facteur de puissance plus faible (non démontré ici)

Les lois de similitudes (validées sur des architectures à couplages polaires) rendent plutôt bien compte de la réalité

Le couple massique est un critère parmi d'autres

Les architectures doivent normalement être optimisées...