



**UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**



Groupe de Recherche en Energie
Electrique de Nancy

Les engrenages magnétiques et leur association aux machines électriques tournantes

S. Mezani

Cachan, le 09 janvier 2019

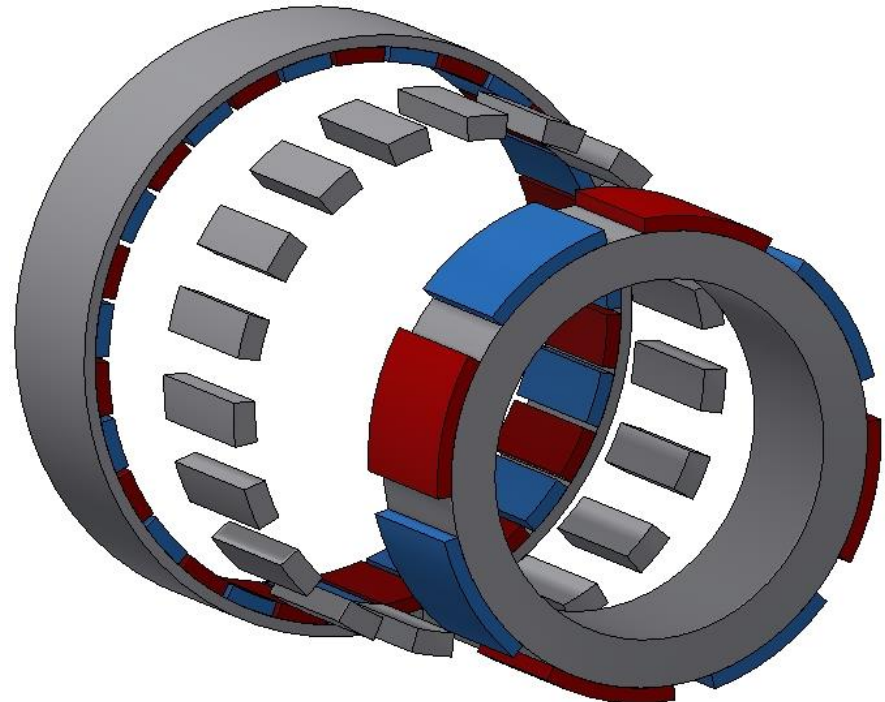
Plan de la présentation

- **Historique sur le « Magnetic Gear »**
- **Principe et modélisation d'un Gear**
- **Performances**
- **Solutions intégrées moteur-gear**
 - **Entrainement par machine synchrone « PDD »**
 - **Entrainement par machine asynchrone « MaGIM »**

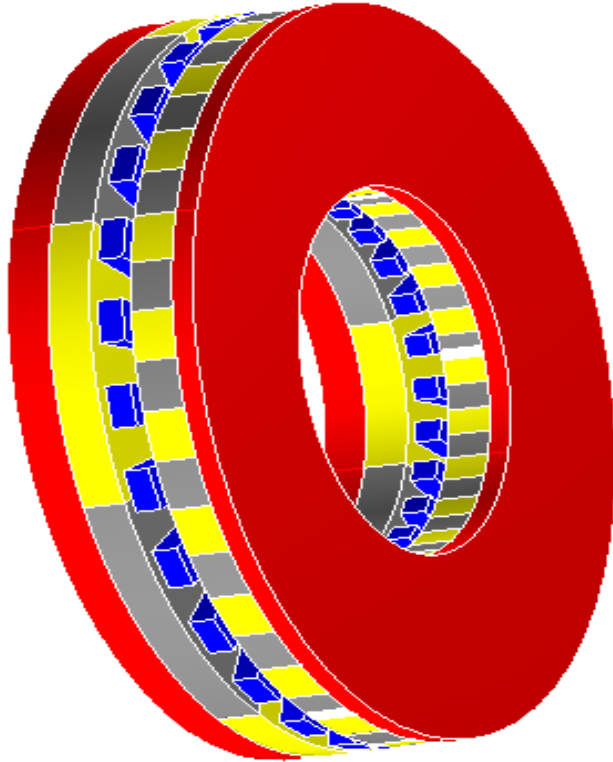
Le « Magnetic Gear »

- Remplacer un engrenage mécanique par un engrenage magnétique présente certains avantages (pas de frottement, pas d'usure, pas de lubrification, protection contre les surcharges...)
- L'avènement d'aimants permanents à forte énergie spécifique (NdFeB, SmCo) a rendu possible le développement de réducteurs magnétiques performants (couple volumique $> 100 \text{ Nm/L}$)

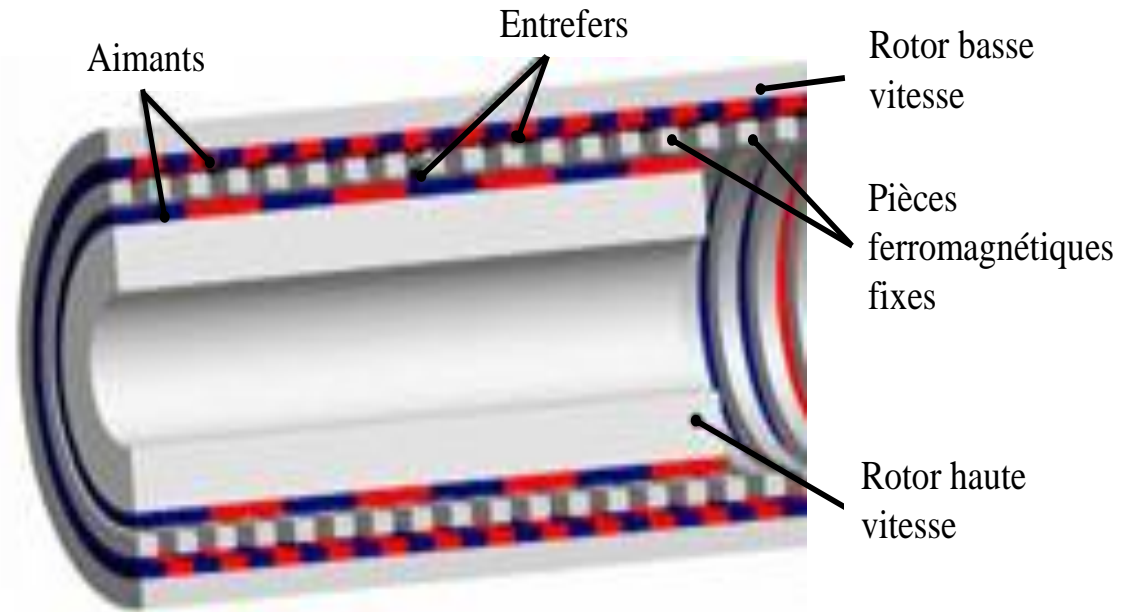
- La première topologie à flux radial a été proposée par K. Atallah (Université de Sheffield, UK) en 2001.



Autres topologies



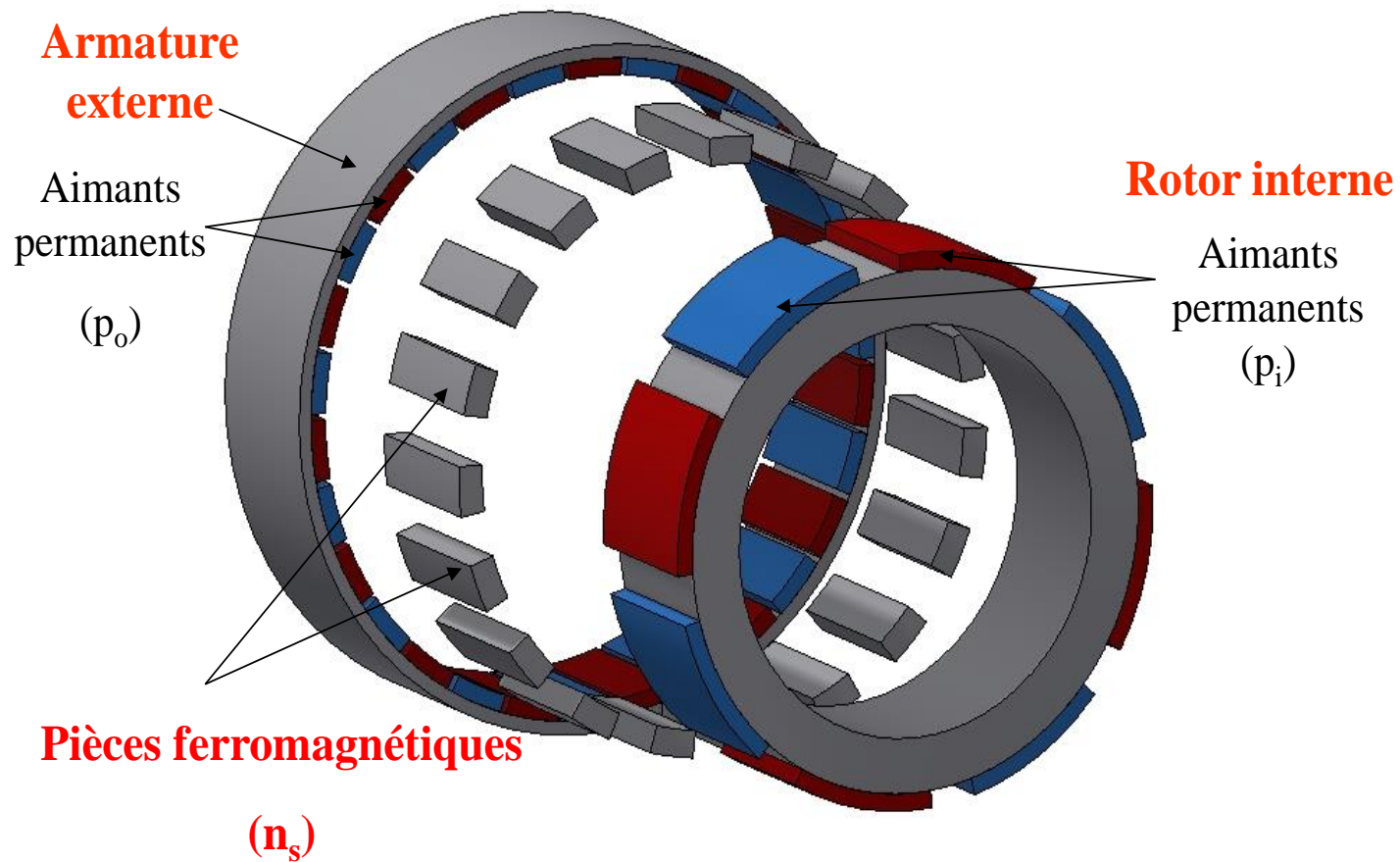
Réducteur à flux axial



Réducteur linéaire tubulaire

Principe de fonctionnement

Transmission de couple « synchrone » mettant en jeu deux harmoniques d'espaces obtenus par la modulation du champ par des pièces ferromagnétiques (effet Vernier)



Principe de fonctionnement

Champ créé par le rotor interne à p_i paires de pôles, modulé par n_s pièces ferromagnétiques

$$B_r(r, \theta) = \underbrace{\left(\sum_{m=1,3,5,\dots} b_{m}(r) \cos (m p(\theta - \Omega_r t) + m p \theta_0) \right)}_{\text{Densité de flux sans pièces ferromagnétiques}} \times \underbrace{\left(\lambda_{r0}(r) + \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{rj}(r) \cos (j n_s(\theta - \Omega_s t)) \right)}_{\text{fonction de modulation}}$$

Les harmoniques d'espace: $p_{m,k} = |m p + k n_s|$ $m = 1, 3, 5, \dots, \infty$
 $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm \infty$

$m = 1$ et $k = -1$ conduit aux plus grandes valeurs d'induction

Il suffit donc d'adopter **$p_e = n_s - p_i$** pour l'armature externe pour transmettre le couple à une vitesse différente

Ω_s : vitesse de rotation des pièces ferromagnétiques

Ω_i : vitesse de rotation du rotor interne

Ω_e : vitesse de rotation de l'armature externe

Rapport de réduction

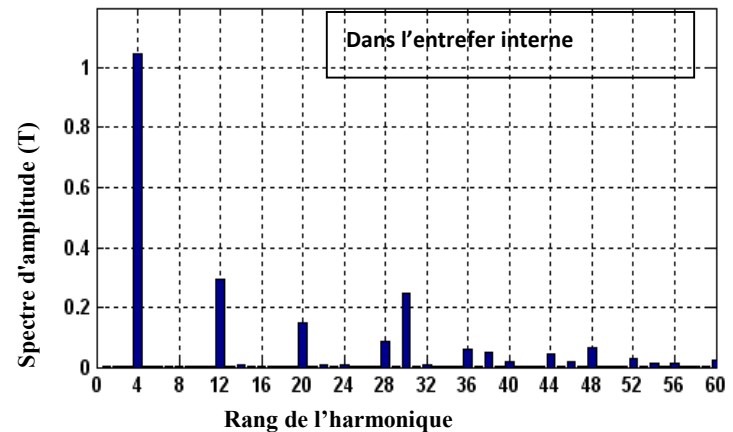
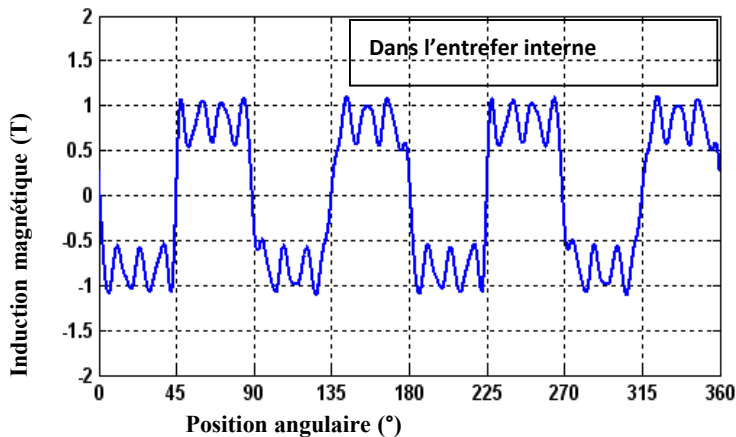
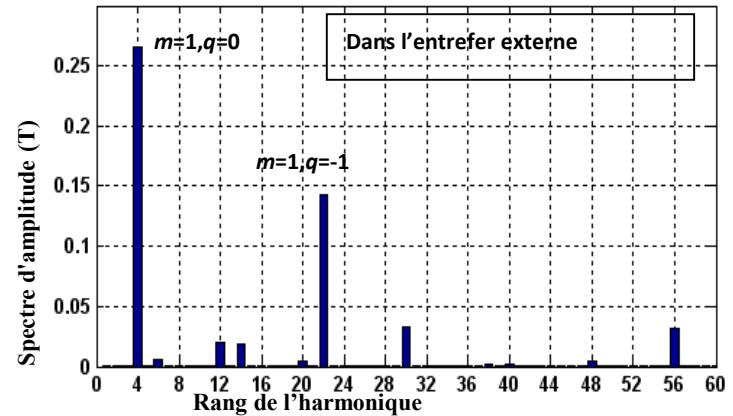
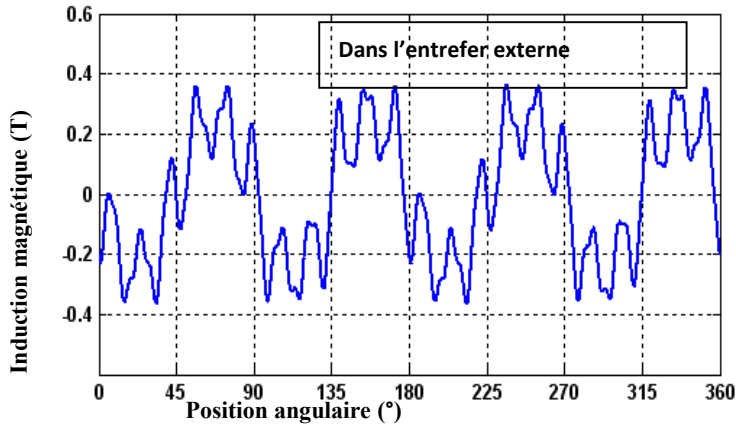
$$\Omega_s = 0 : k = -\Omega_i / \Omega_e = -p_e / p_i$$

$$\Omega_e = 0 : k = \Omega_i / \Omega_s = n_s / p_i$$

Principe de fonctionnement

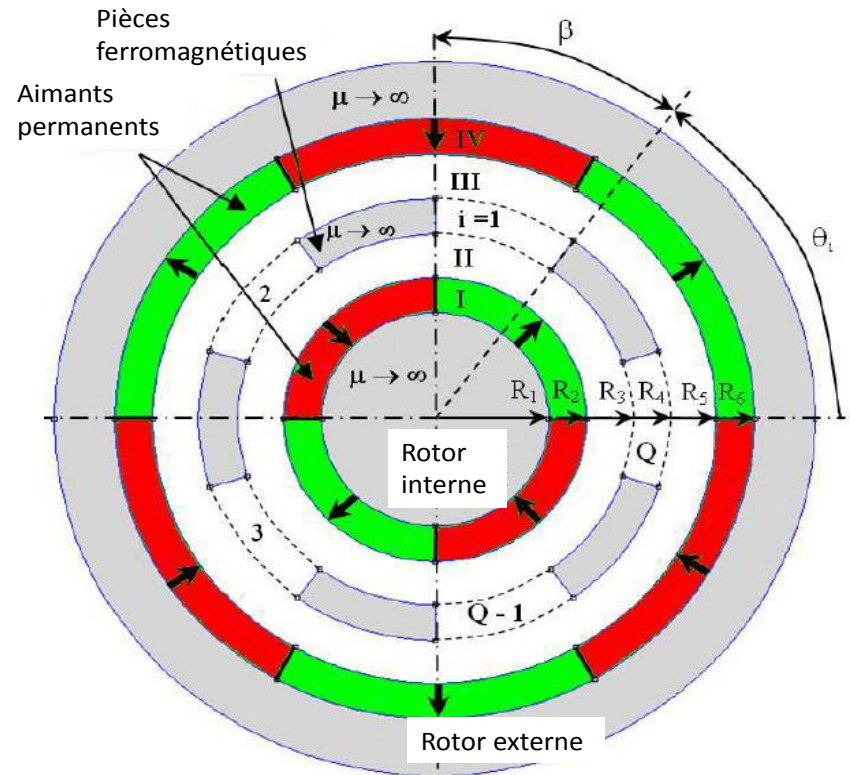
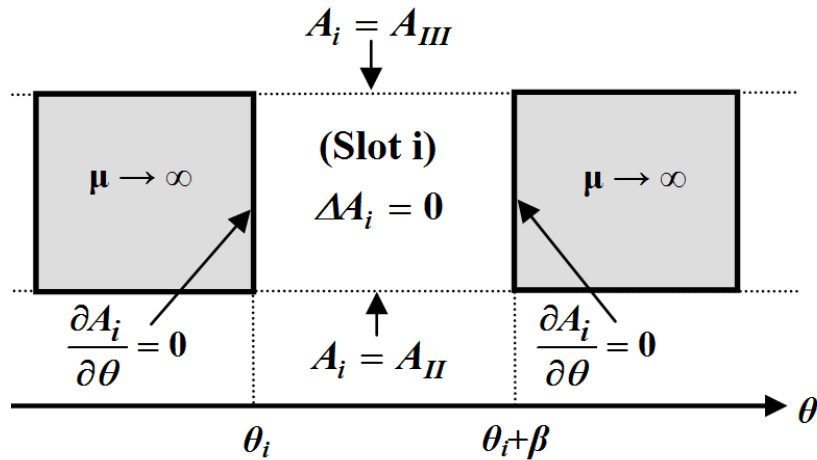
Induction radiale créée par les aimants du rotor interne seulement

$$p_i=4, n_s=26$$



Modélisation analytique

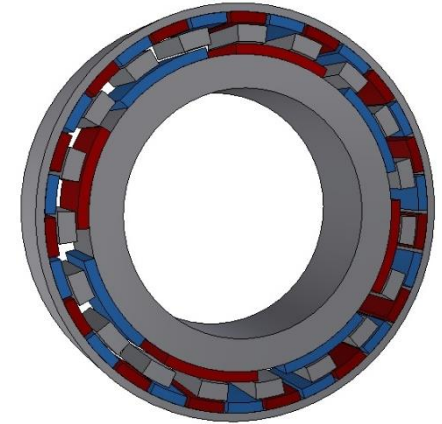
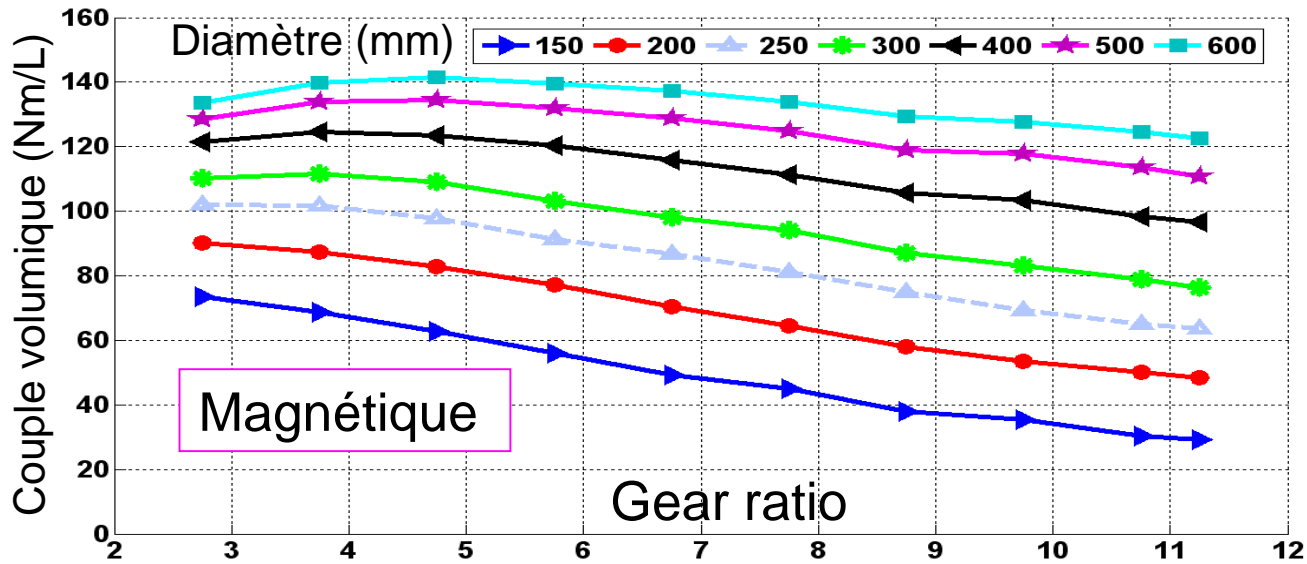
Méthode des sous-domaines



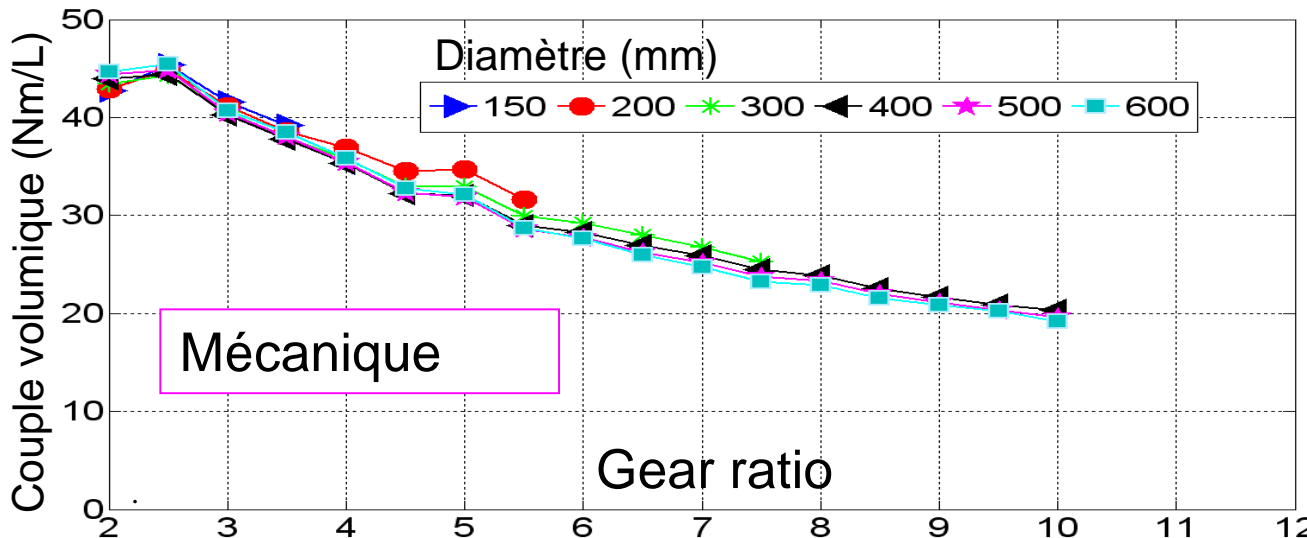
$$A_{II}(r, \theta) = A_0^{II} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n^{II} r^{-n} + B_n^{II} r^n \right) \cos(n\theta) + \left(C_n^{II} r^{-n} + D_n^{II} r^n \right) \sin(n\theta)$$

$$A_i(r, \theta) = A_0^i + B_0^i \ln r + \sum_{k=1}^{\infty} \left(A_k^i r^{-k \frac{\pi}{\beta}} + B_k^i r^{k \frac{\pi}{\beta}} \right) \cos \left(k \frac{\pi}{\beta} (\theta - \theta_i) \right)$$

Performances



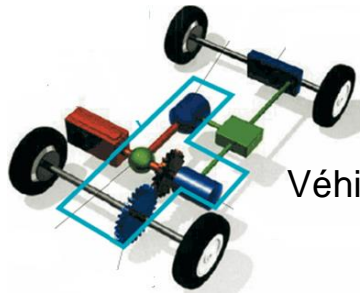
Magnétique



Mécanique

Performances

- Les applications sont nombreuses (éolien, automobile ...)
- Le coût des aimants est un inconvénient important



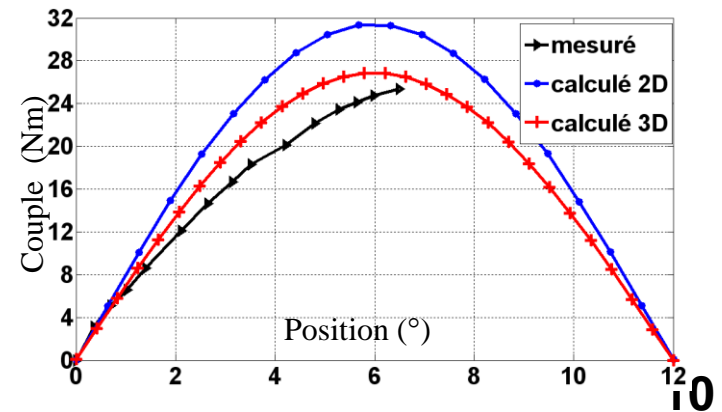
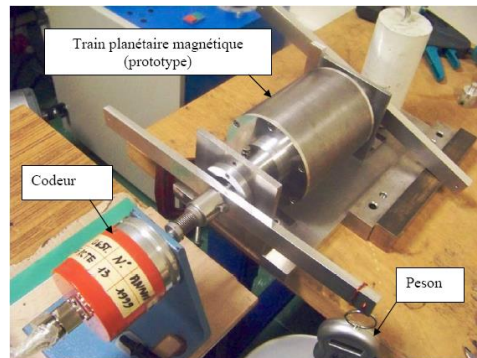
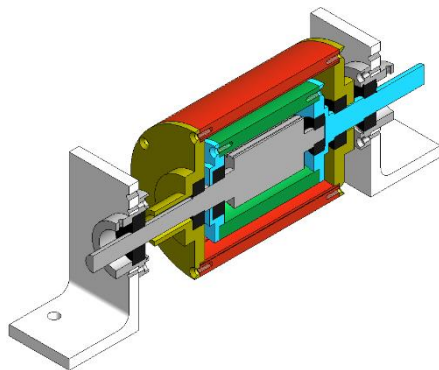
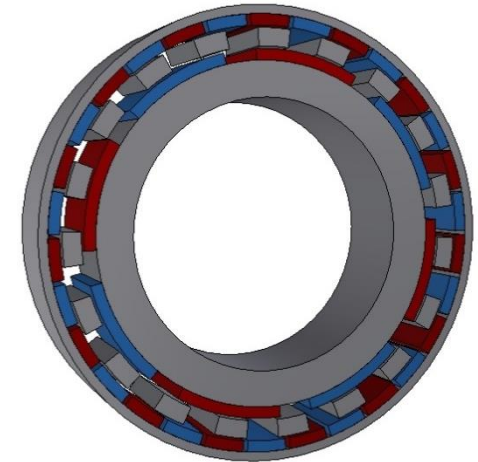
Véhicule hybride



Eolienne

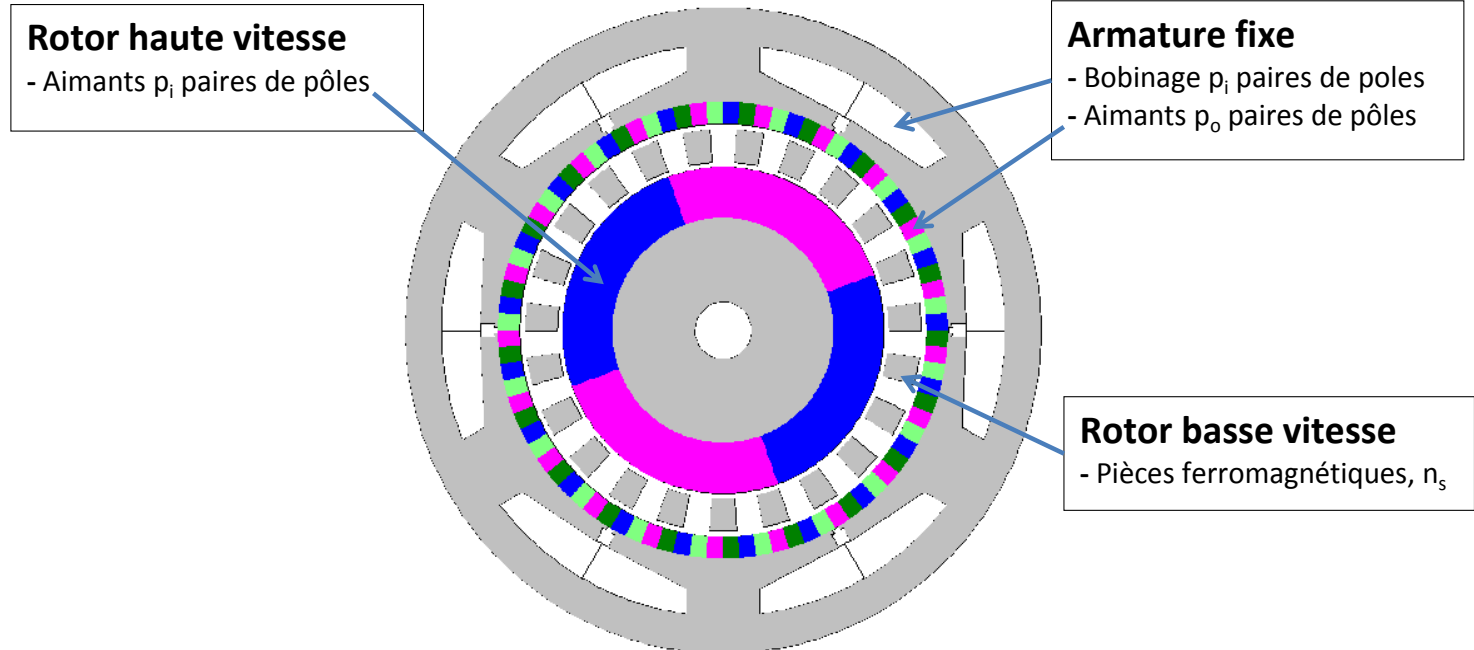


Train épicycloïdal
(planétaire) mécanique



Solutions intégrées MSAP-GEAR (PDD)

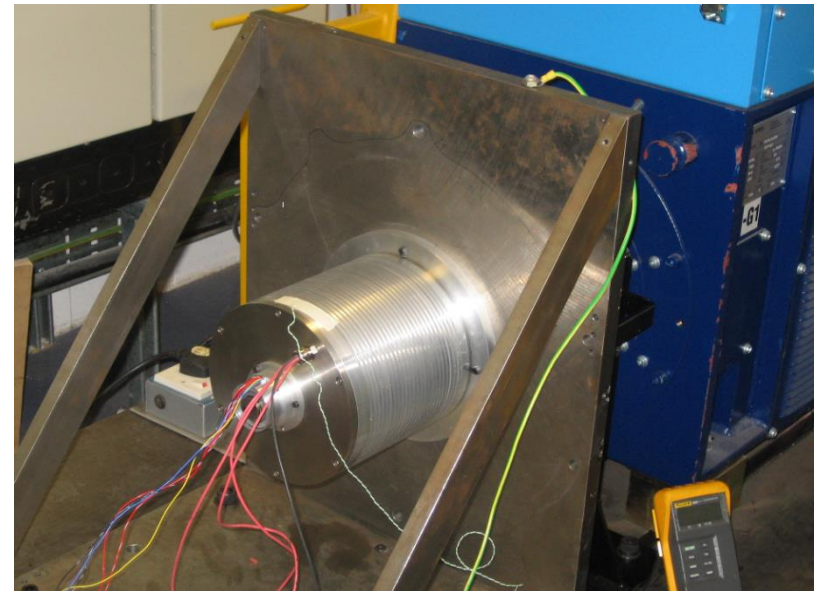
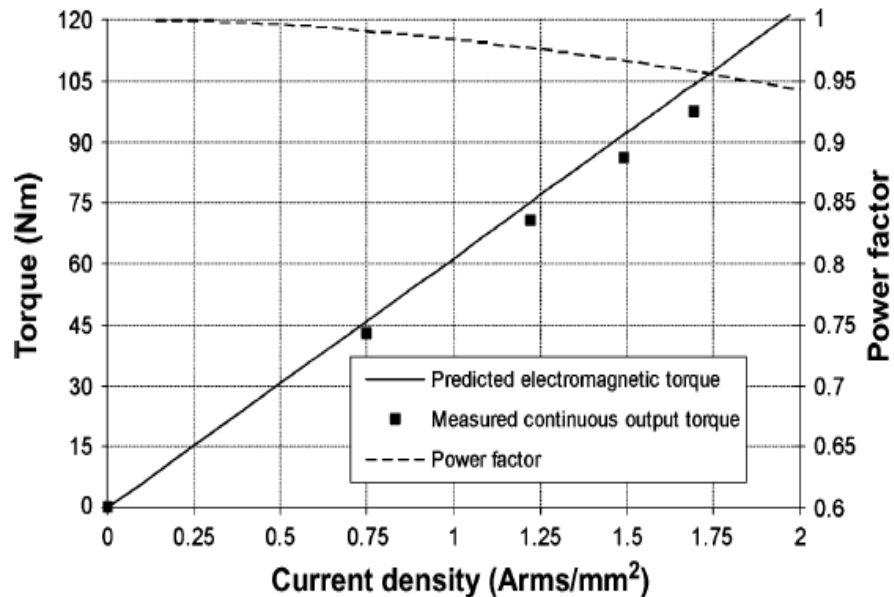
- Le PDD (Pseudo Direct Drive) combine un gear et une MSAP
- Le rotor haute vitesse est commun à la MSAP et au Gear
- On obtient des densités de couple dépassant les **100 Nm/L** en particulier pour les applications forte puissance / basse vitesse (propulsion marine, éolien), mais c'est aussi intéressant pour les véhicules
- **Un des inconvénients concerne la limitation du couple par le gear (impossible de fonctionner en surcharges transitoires notamment)**



Solutions intégrées MSAP-GEAR (PDD)

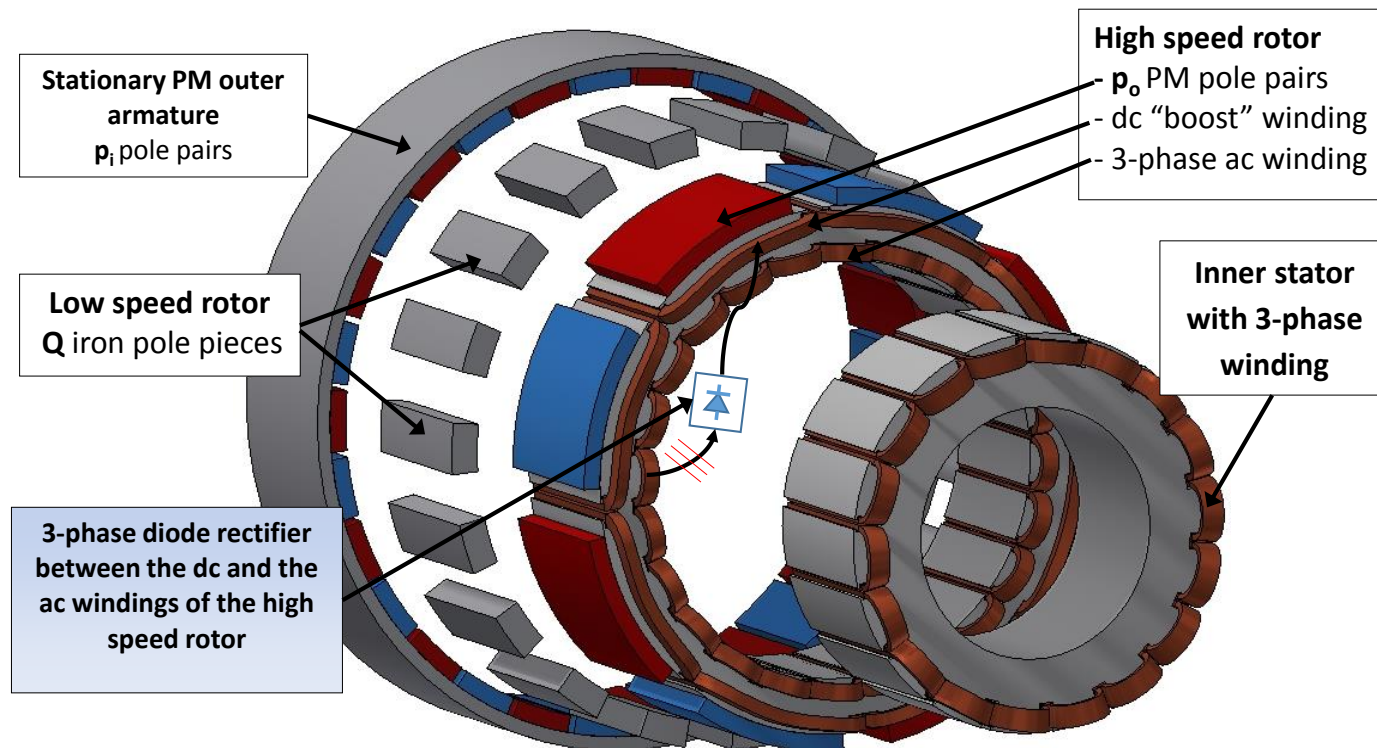
PDD de 3 kW - 250 tr/mn - 120 Nm

- Densité de couple de 60 Nm/L (2 fois celle d'une MSAP à attaque directe)
- Le couple nominal de 120 Nm est obtenu pour 2 A/mm²
- $H = 145$ A/cm, soit un « heating factor » de l'ordre de 600.
- **Aucune ventilation forcée n'est requise pour refroidir ce PDD.**



Solutions intégrées MAS-GEAR (MaGIM)

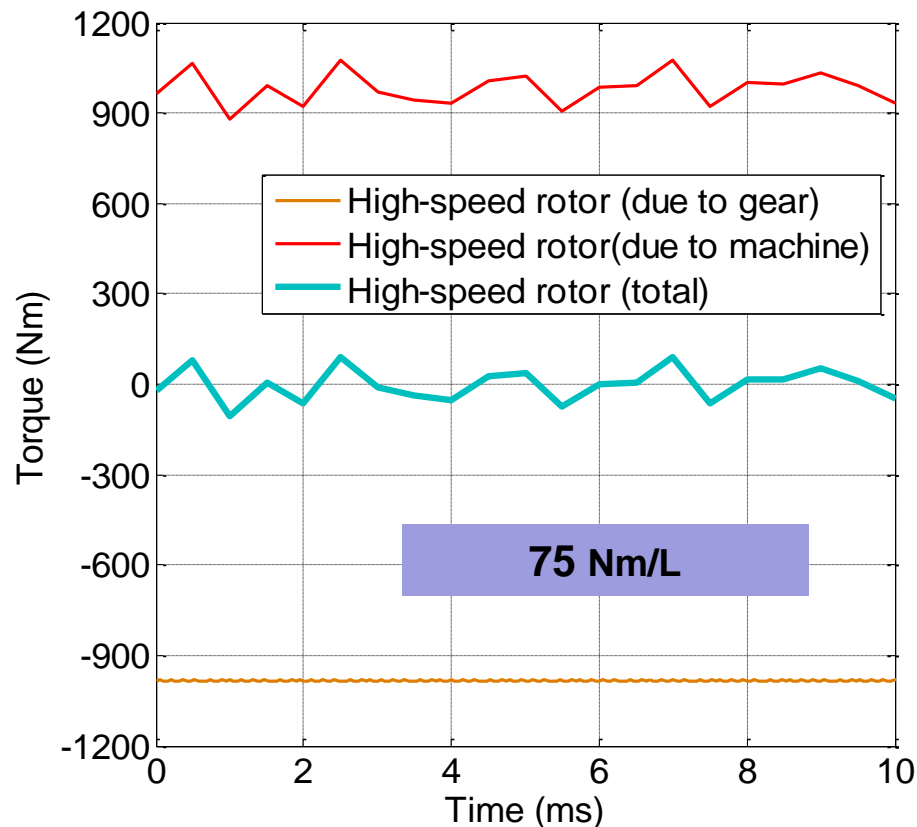
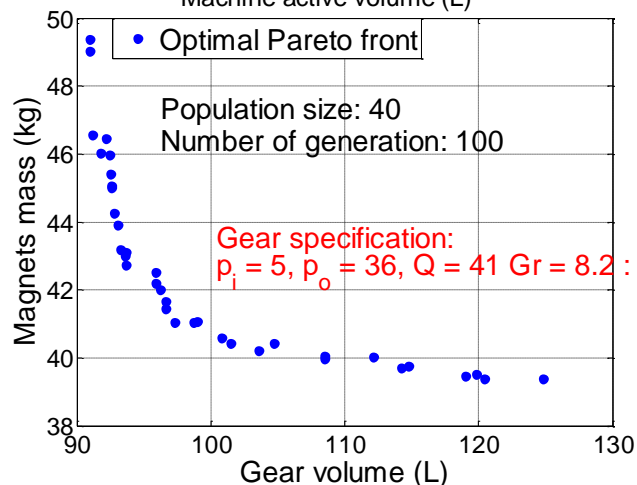
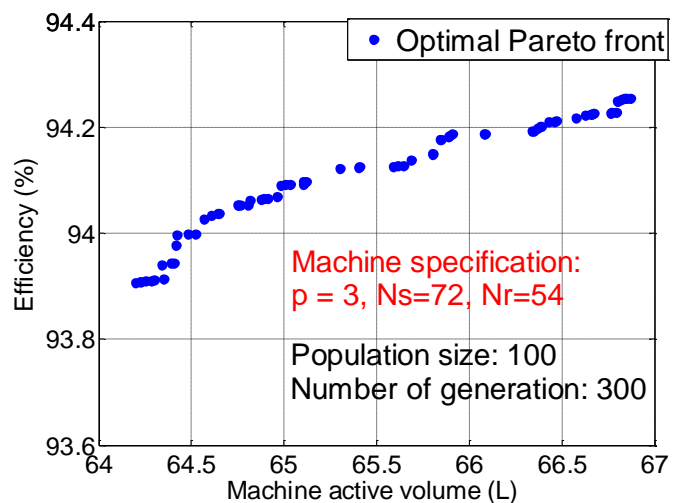
- MAS à rotor bobiné avec stator interne
- Le Gear est monté sur la surface externe du rotor (le couple est transmis via les pièces ferromagnétiques)
- **Un bobinage dc est relié au bobinage ac par un pont de diodes tournantes**
- On obtient alors un configuration avec un « boost » de couple
- La transmission par moteur asynchrone permet un fonctionnement direct sur le réseau pour des applications à vitesse constante



Solutions intégrées MAS-GEAR (MaGIM)

Exemple d'un MaGIM 100 kW, 120 tr/mn 400 V - 50 Hz

- Optimisation par AG du Gear (sans boost) et de la MAS
- Le heating factor est limité à $2000 \text{ A}^2/(\text{cm} \cdot \text{mm}^2)$ pour un refroidissement à air avec $h = 100 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$



La transmission par le GEAR élimine les ondulations de couple dues à la MAS

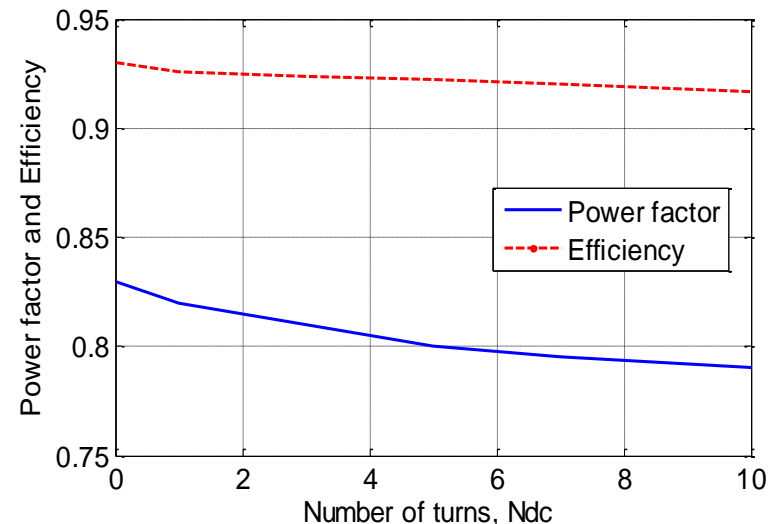
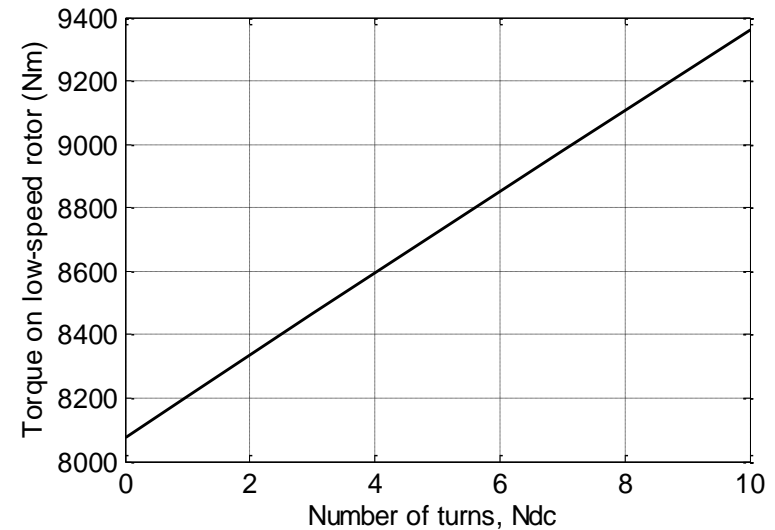
Solutions intégrées MAS-GEAR (MaGIM)

Introduction du « Boost » :

- Le bobinage dc comporte N_{dc} spires en série par encoche
- Le pont de diode introduit des perturbations, le choix de N_{dc} doit être optimisé

Pour $N_{dc} = 10$:

- Le facteur de puissance passe à 0,79 et le rendement à 0,92
- Le couple transmis est de 9300 Nm, soit une densité de couple de l'ordre de 90 Nm/L



**MERCI POUR
VOTRE ATTENTION**