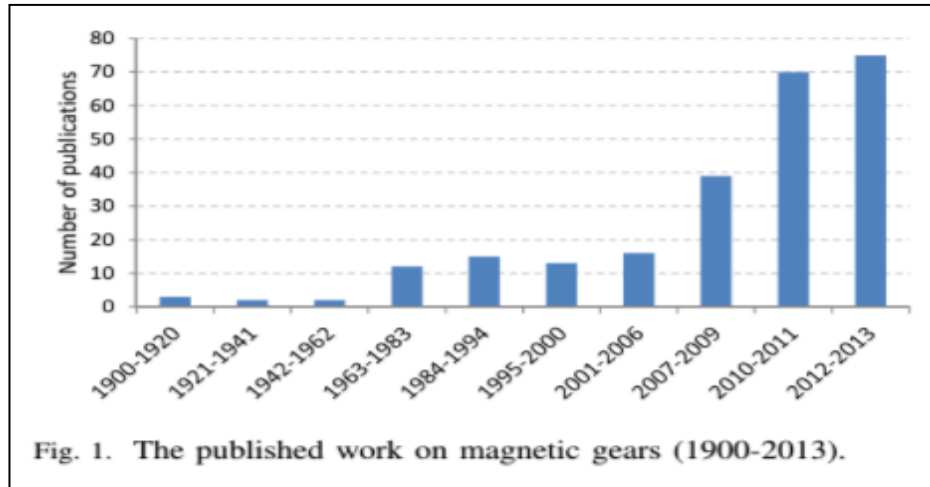


Engrenage magnétique



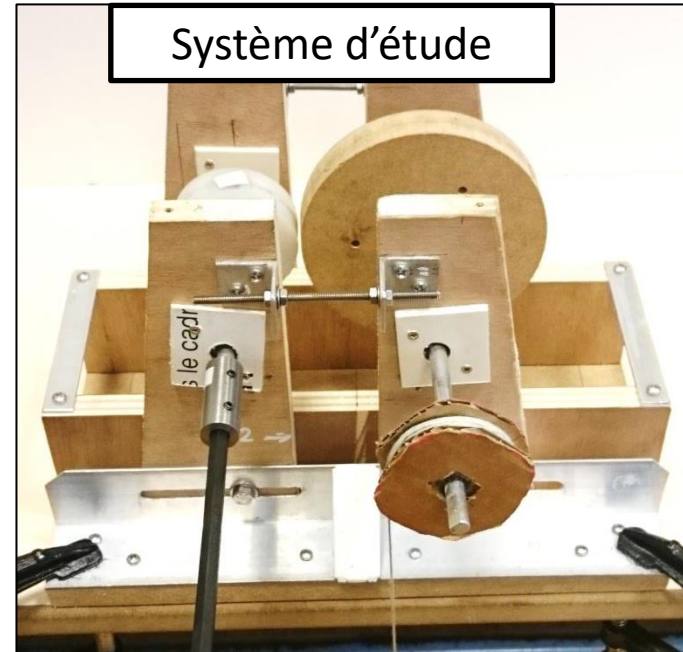
De **Magnetic Gear Technologies: A Review**
P.M. Tlali, R-J. Wang, S. Gerber

Système industriel MAGSPLIT®



Magmatics®

Système d'étude



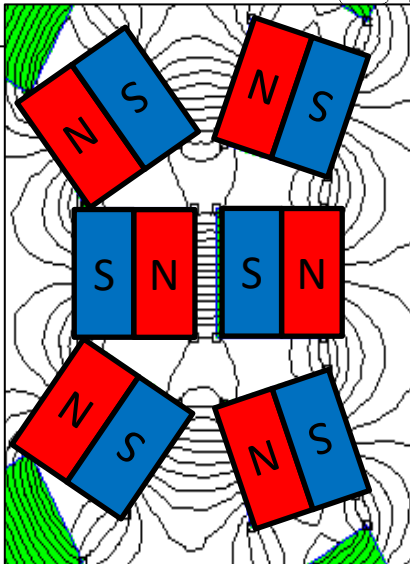
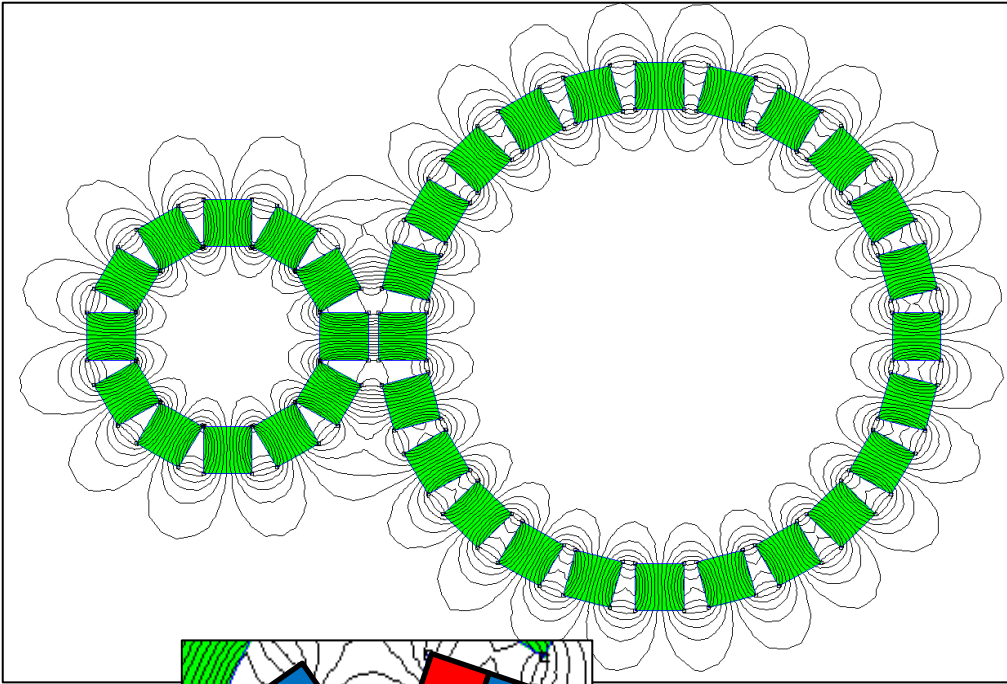
1-Problématique

- étudier et réaliser un engrenage magnétique simple.*
- Valider et comparer ses performances.*
- Déterminer les paramètres influant ses performances.*

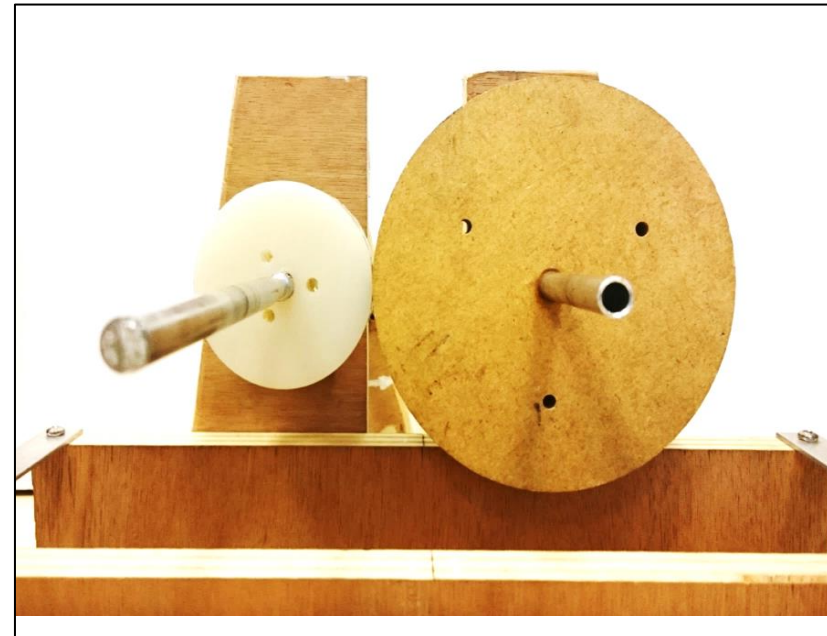
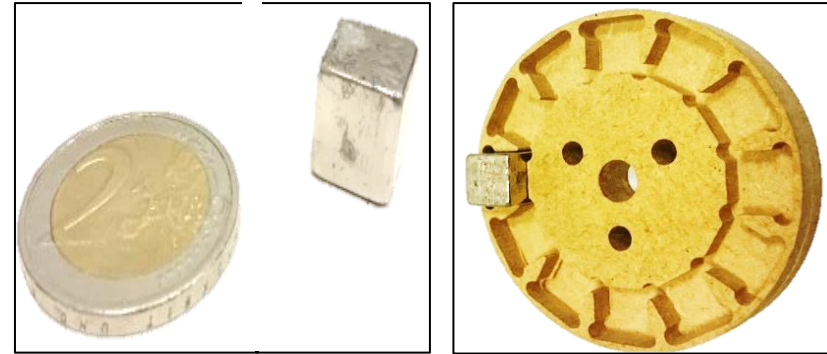
sommaire

- 1-Problématique
- 2-Présentation du système
- 3-Comparaison avec les engrenages mécaniques
- 4-Détermination des paramètres physique des moteurs
- 5-Analyse des performances

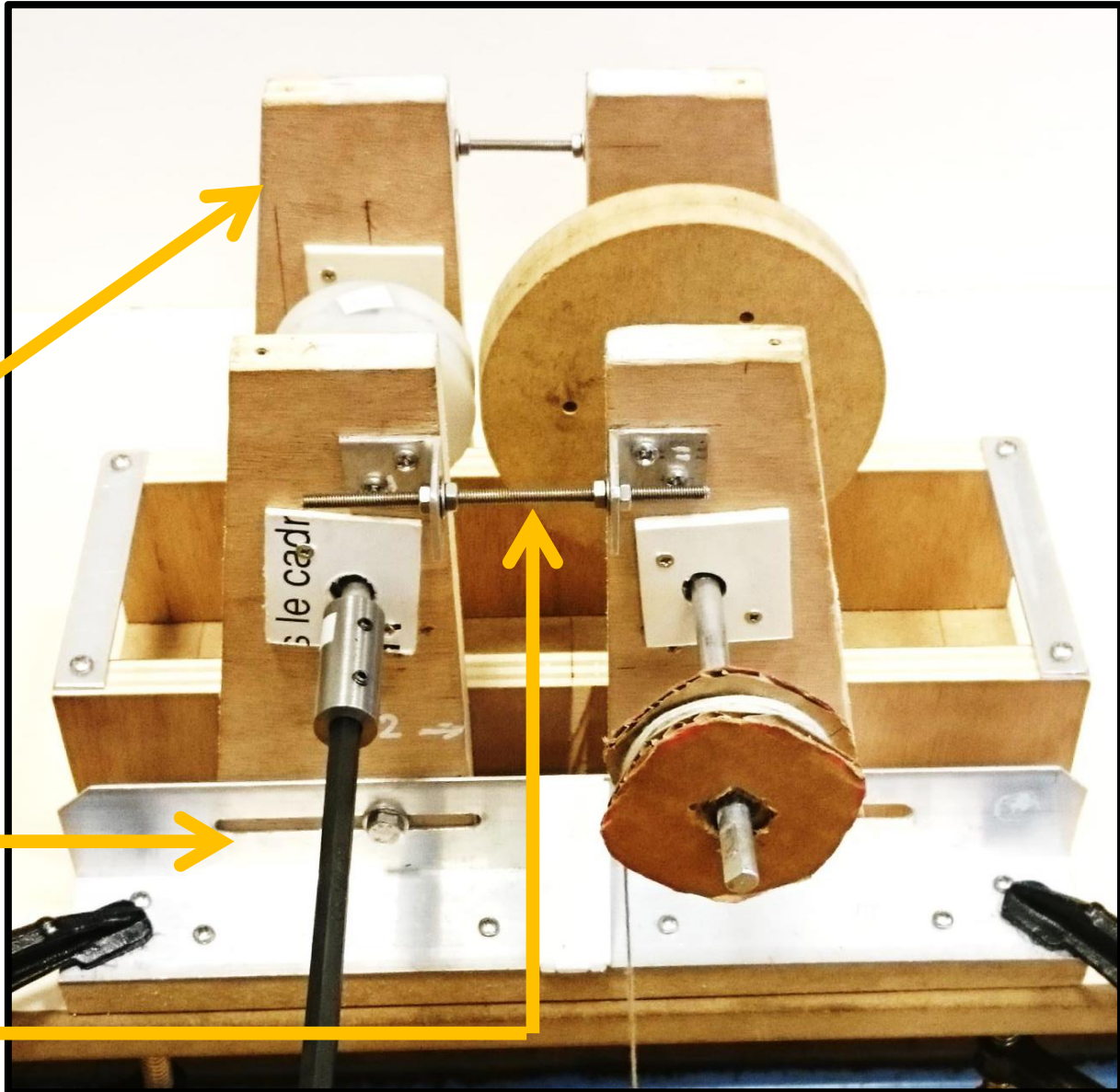
2-Présentation du système



Logiciel FEMM

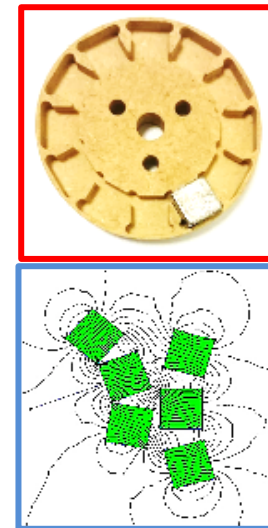
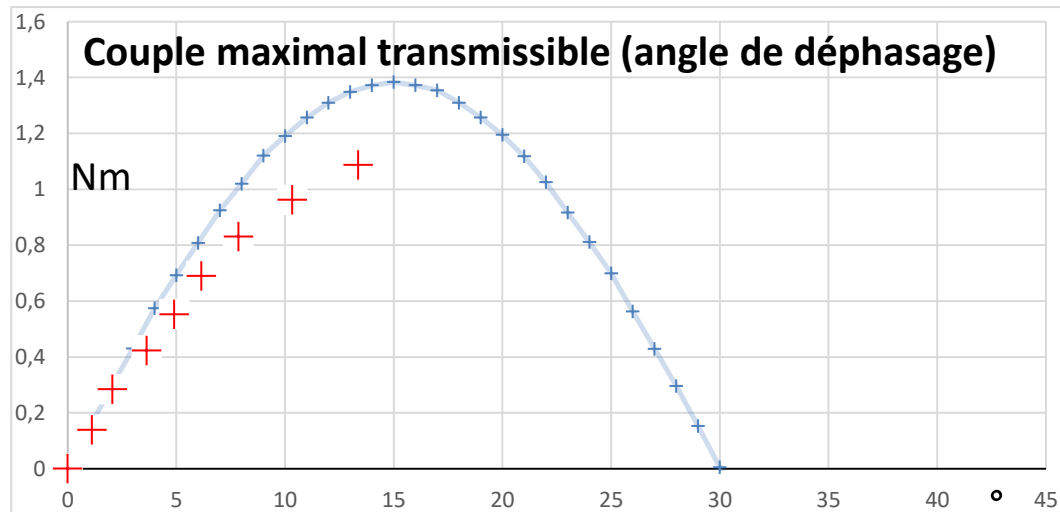
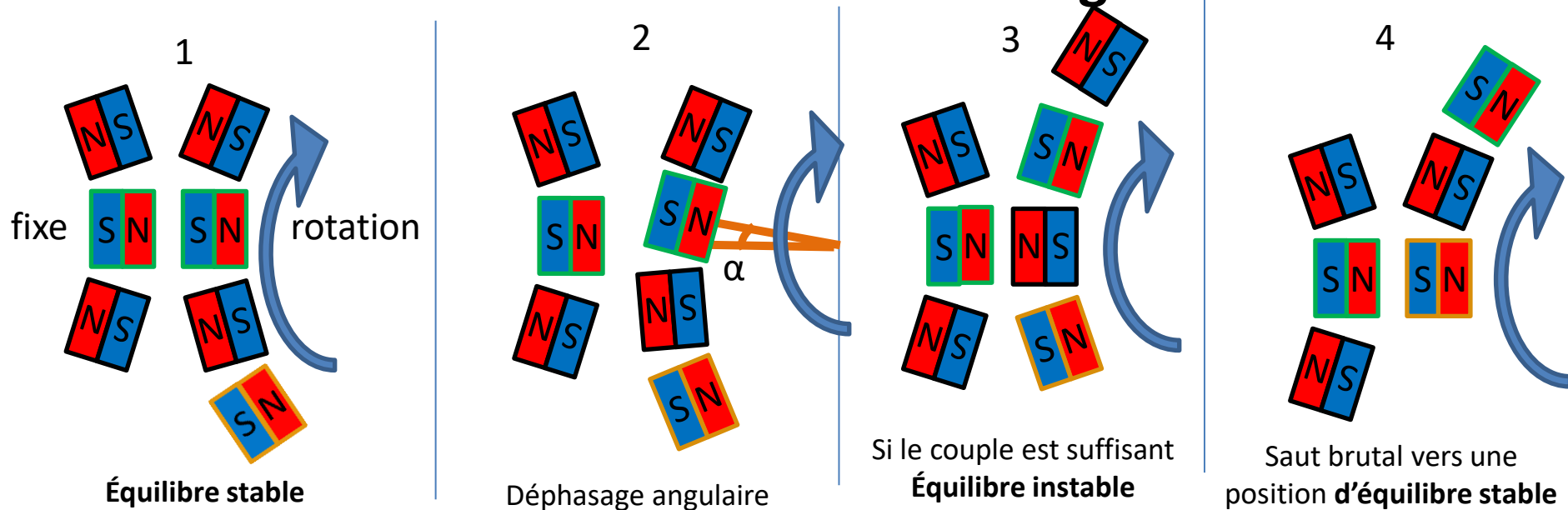


2-Présentation du système



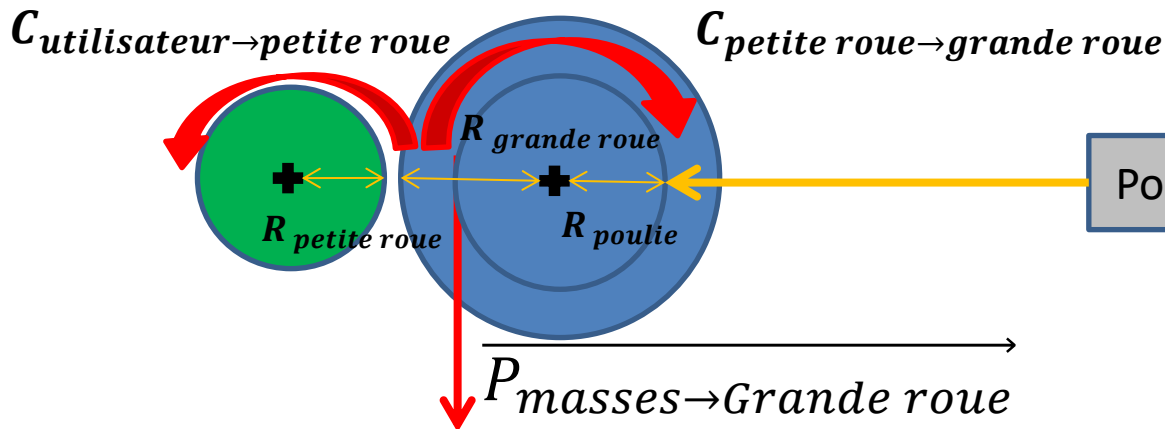
3-Comparaison avec les engrenages mécaniques

Phénomène de « décrochage »



3-Comparaison avec les engrenages mécaniques

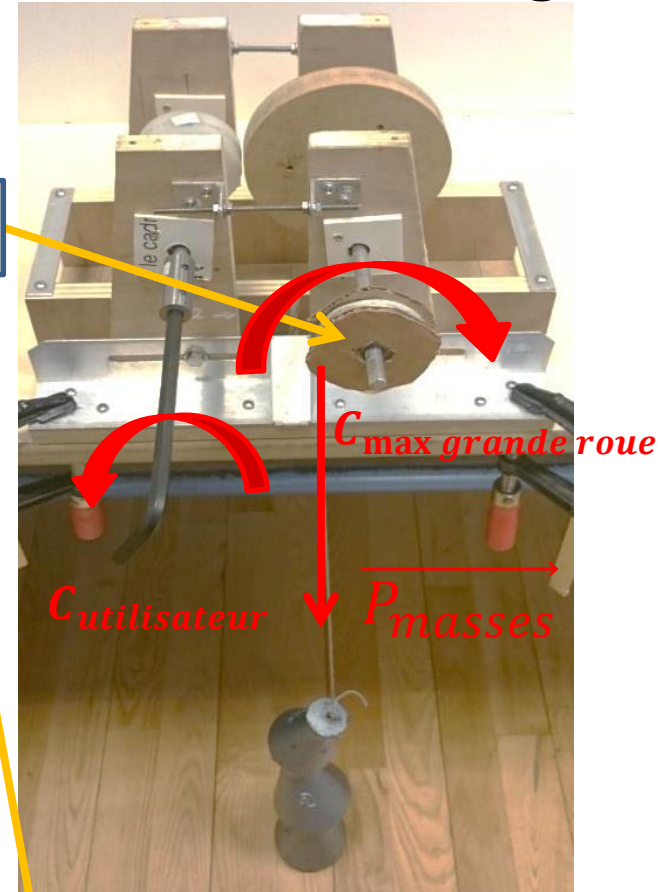
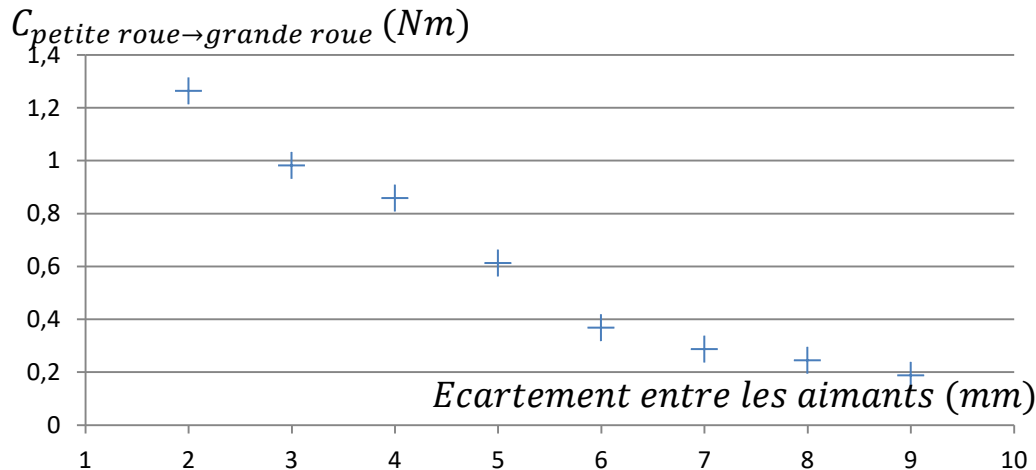
Mesure du couple maximale en statique avant décrochage



TMS sur l'ensemble {poulie; axe; grande roue} son axe de rotation.

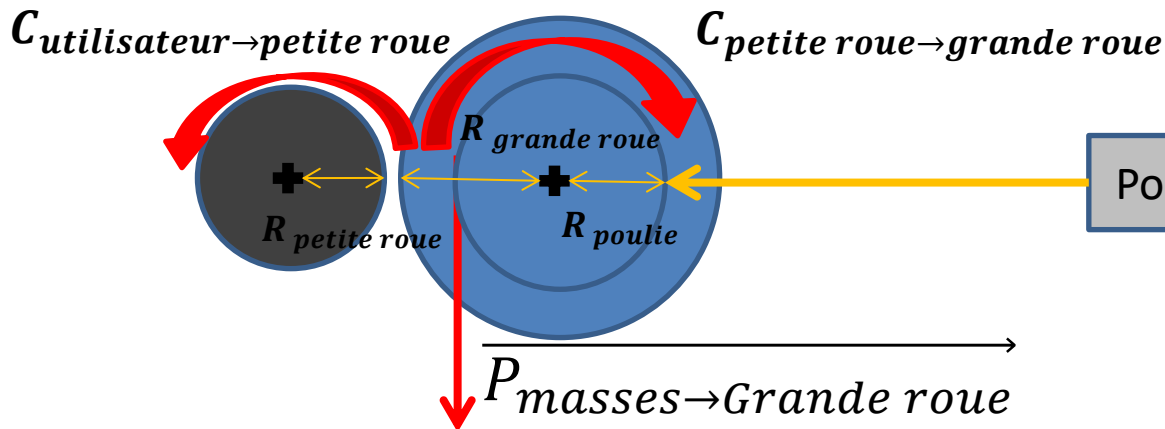
$$C_{\text{max petite roue} \rightarrow \text{grande roue}} = R_{\text{poulie}} \cdot m_{\text{max}} \cdot g$$

$C_{\text{petite roue} \rightarrow \text{grande roue}}$ (Ecartement entre les aimants)



3-Comparaison avec les engrenages mécaniques

Mesure du couple maximale en statique avant décrochage



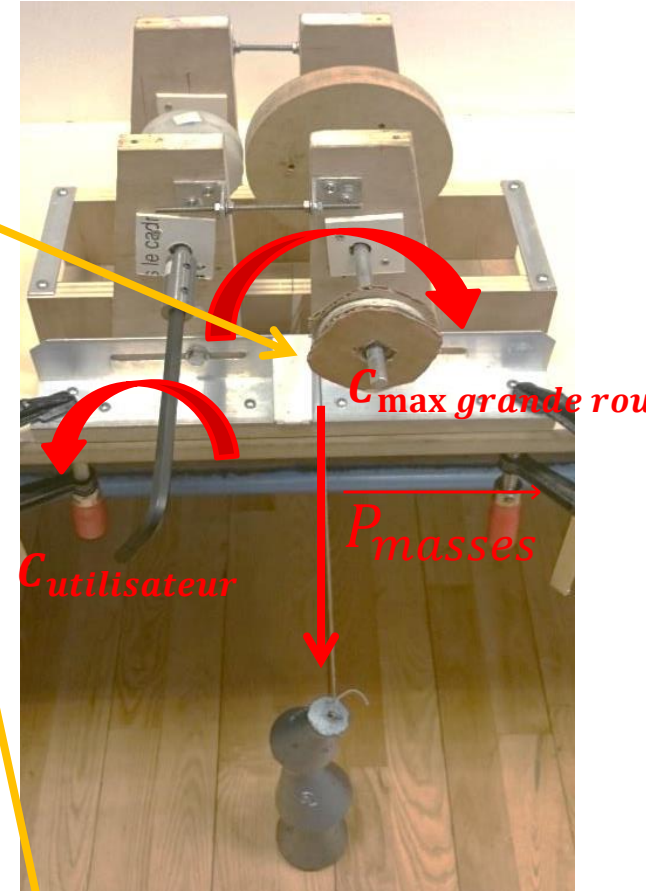
TMS sur l'ensemble {poulie; axe; grande roue} son axe de rotation.

$$C_{\text{max petite roue} \rightarrow \text{grande roue}} = R_{\text{poulie}} \cdot m_{\text{max}} \cdot g$$

Poids maximum soulevé avant décrochage : **5,15kg**
(Ecartement minimal $\approx 2\text{mm}$)

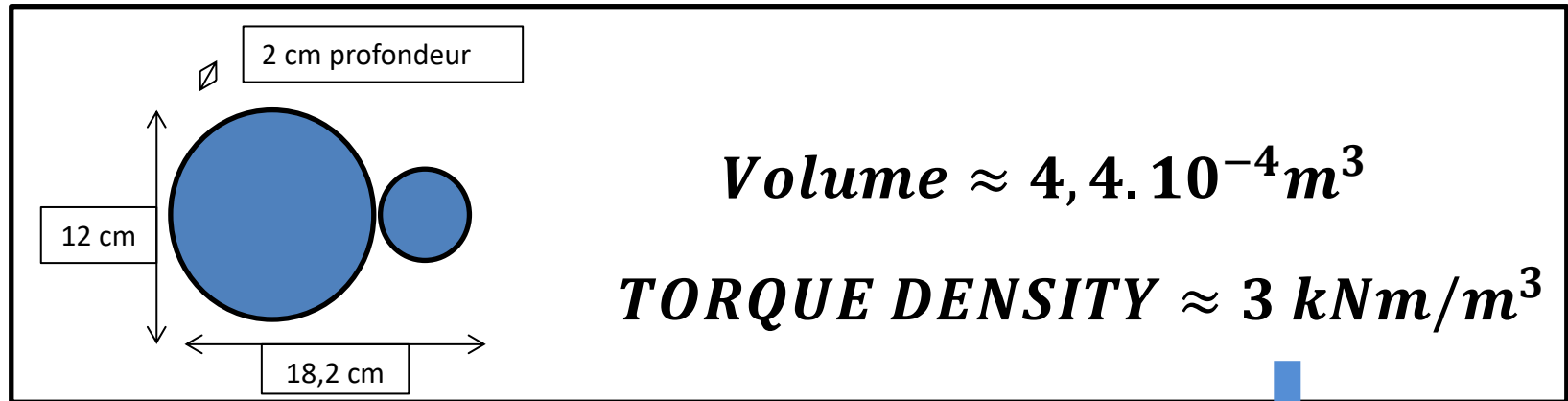
$$C_{\text{max petite roue} \rightarrow \text{grande roue}} \approx 1,3 \text{ Nm}$$

$C_{\text{max petite roue} \rightarrow \text{grande roue}} \searrow$ si écartement \nearrow



3-Comparaison avec les engrenages mécaniques

Comparaison du couple maximal transmissible sur l'encombrement



De Magnetic Gear Technologies: A Review

P.M. Tlali, R-J. Wang, S. Gerber

TABLE I
TORQUE DENSITY OF DIFFERENT GEARS [29]

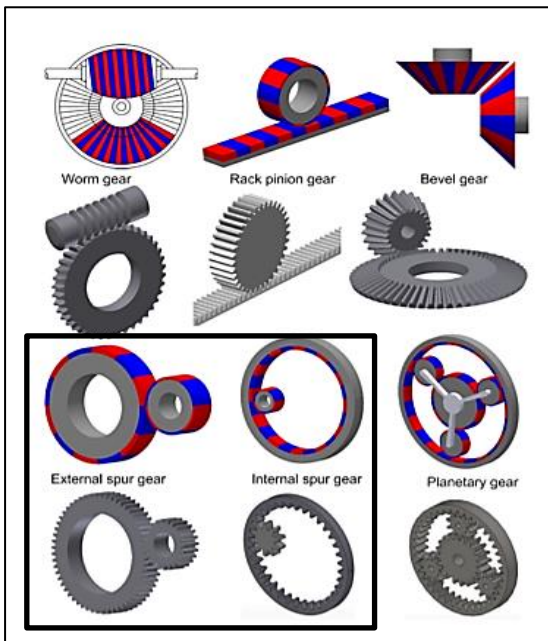
Gear Type	Torque density (kNm/m ³)
Mechanical spur gear [30]	100-200
Mechanical helical gear(3G)	50-150
Magnetic worm gear [9]	<2
Magnetic bevel gear	<5
Magnetic spur gear	10-20
Magnetic harmonic gear(1G)	140-180
Magnetic harmonic gear(2G)	75
Magnetic planetary gear [26]	≈100
Concentric magnetic gear	70-150

Optimisation:

-aimants peu puissants

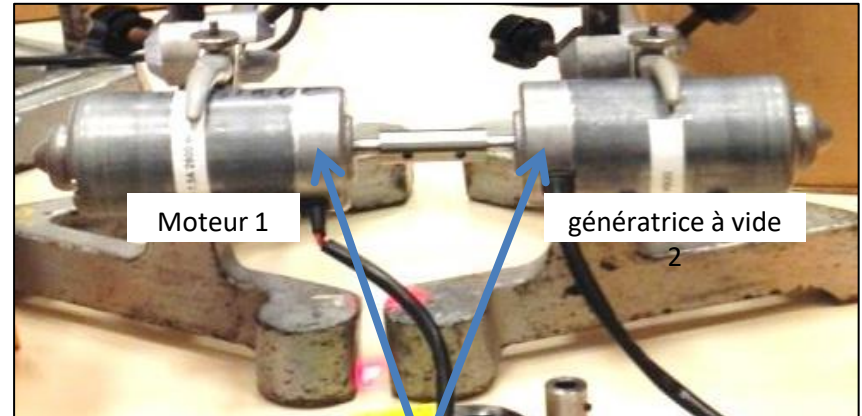
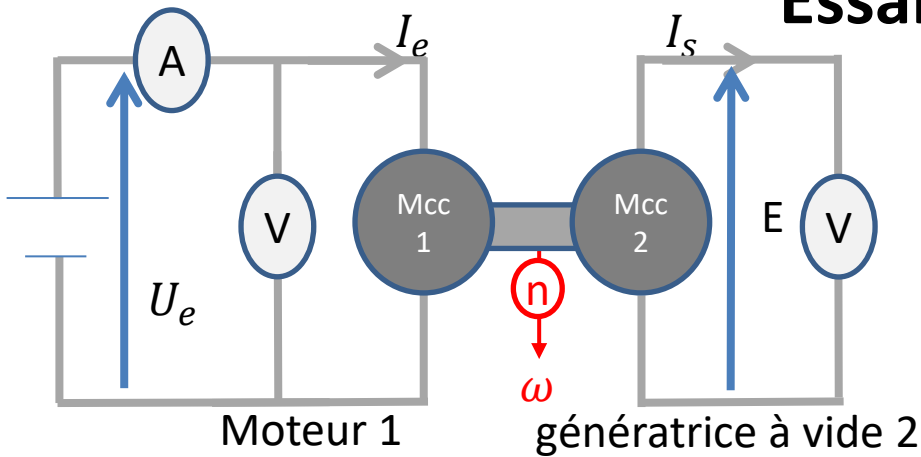
-écartement important

-géométrie des roues

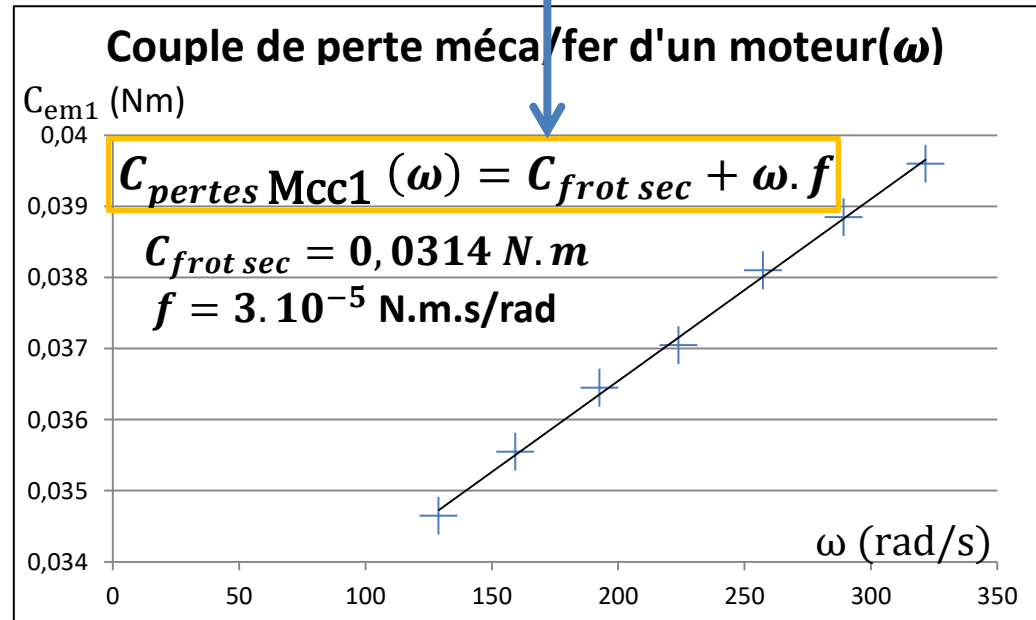
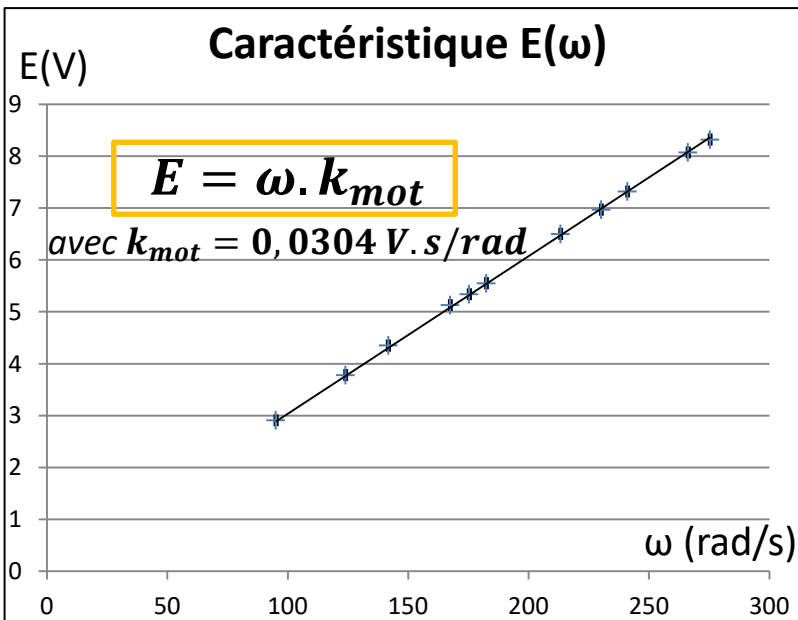


4-Détermination des paramètres physique des moteurs

Essai à vide

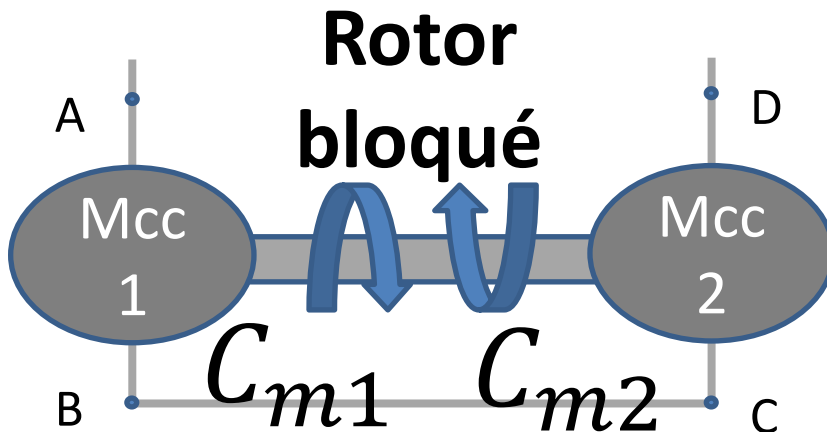
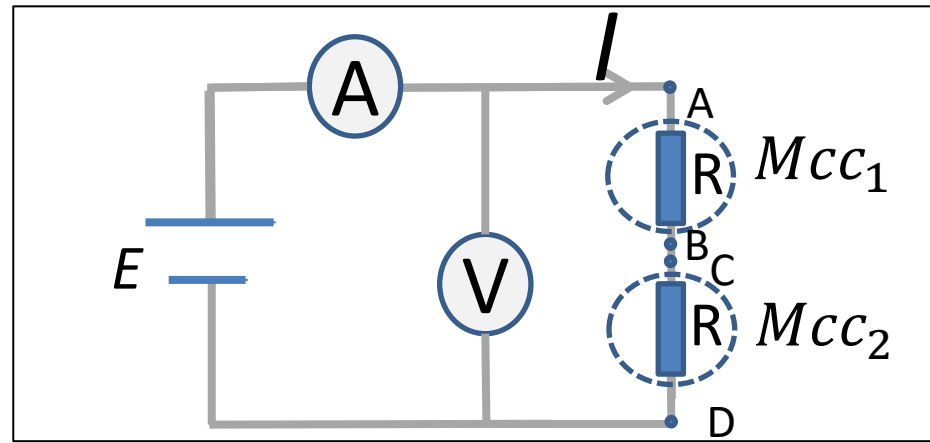
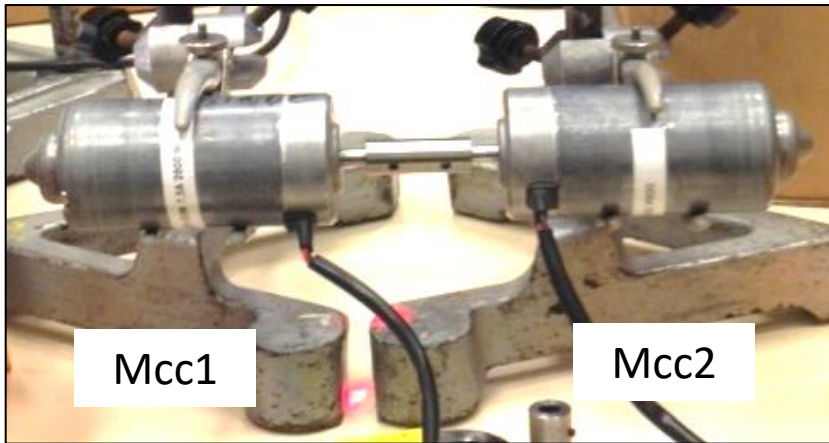


Roulements à billes



4-Détermination des paramètres physique des moteurs

Essai à rotor bloqué



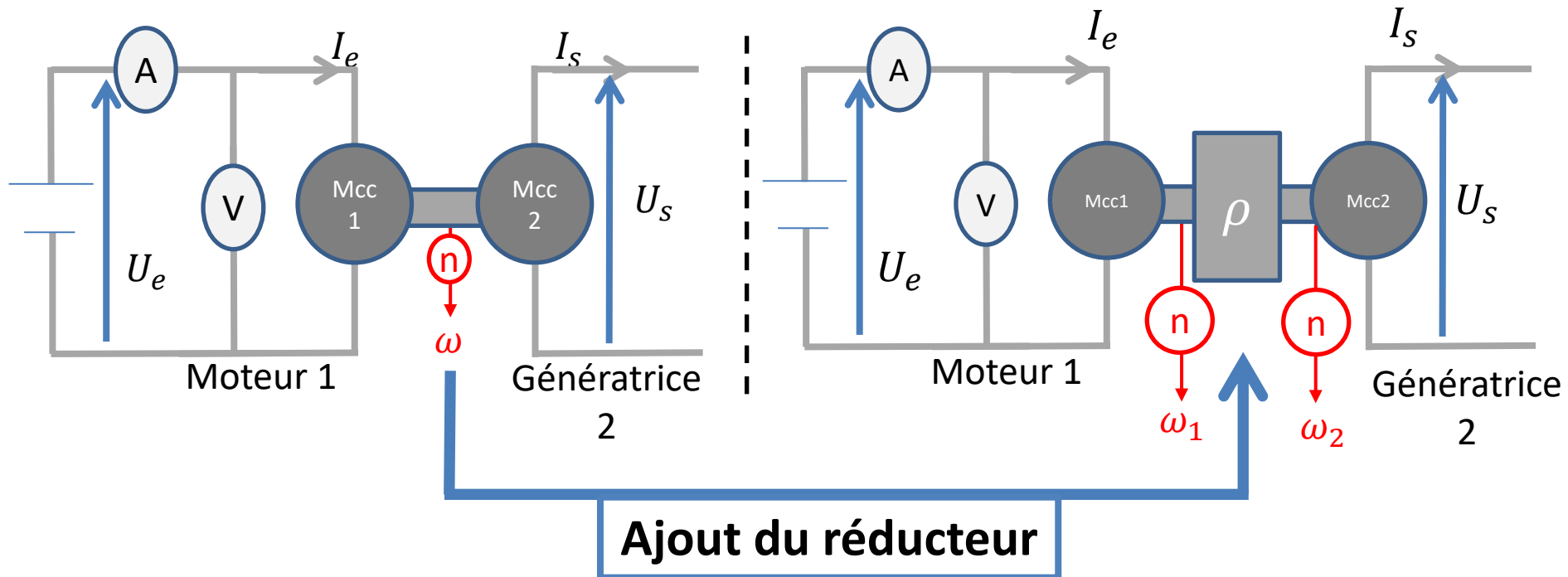
$$R = \frac{u}{2I}$$

Avec $u=2,311 \text{ V}$ et $i=3,085 \text{ A}$

$$R=0,375 \pm 0,001 \Omega$$

5-Analyse des performances

Objectifs

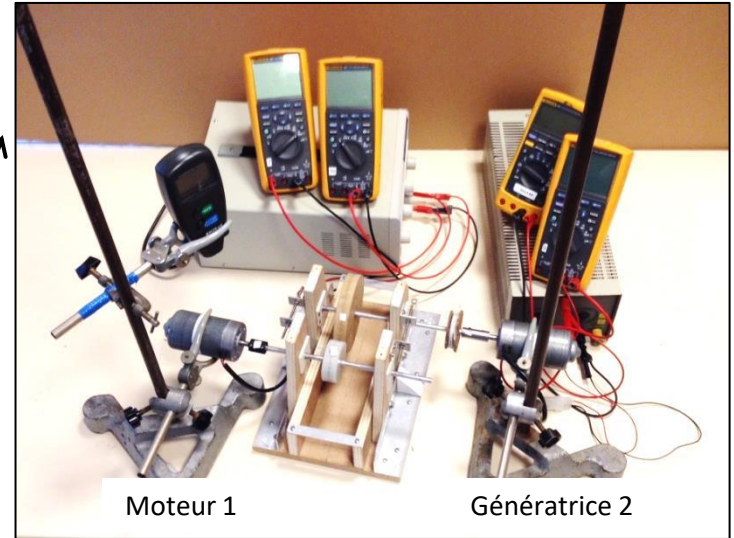
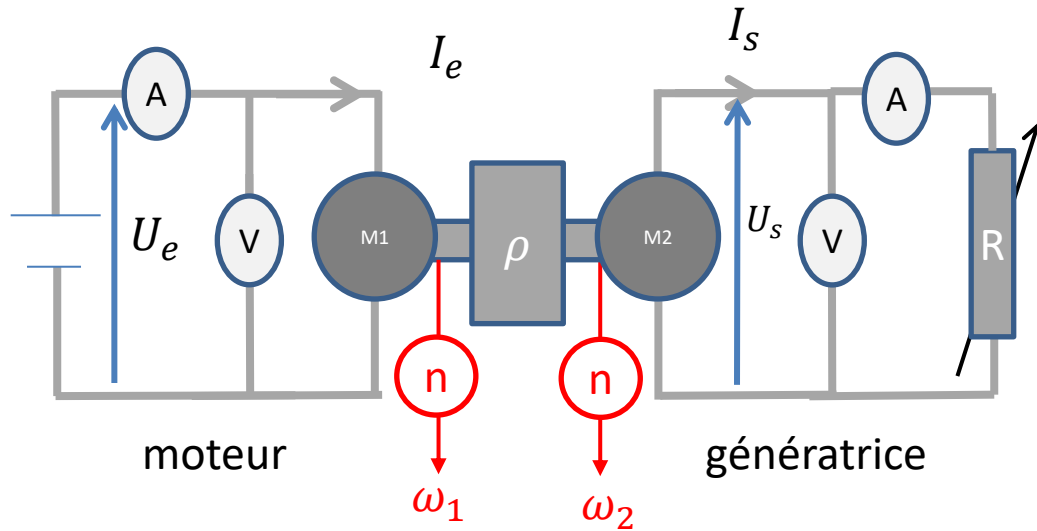


Connaissant les pertes extérieures au réducteur, on peut:

- **Mesurer** le couple résistant du réducteur seul
- **Mesurer** le rendement du réducteur seul

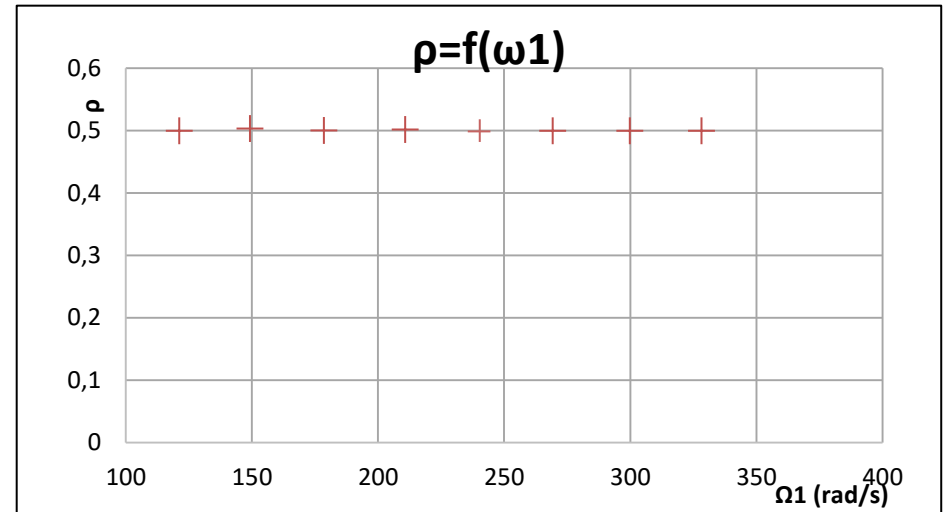
5-Analyse des performances

Mesure du rapport de réduction



$$\rho = \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

$$\rho \approx 0,5$$



5-Analyse des performances

Transmission de couple

En régime permanent :

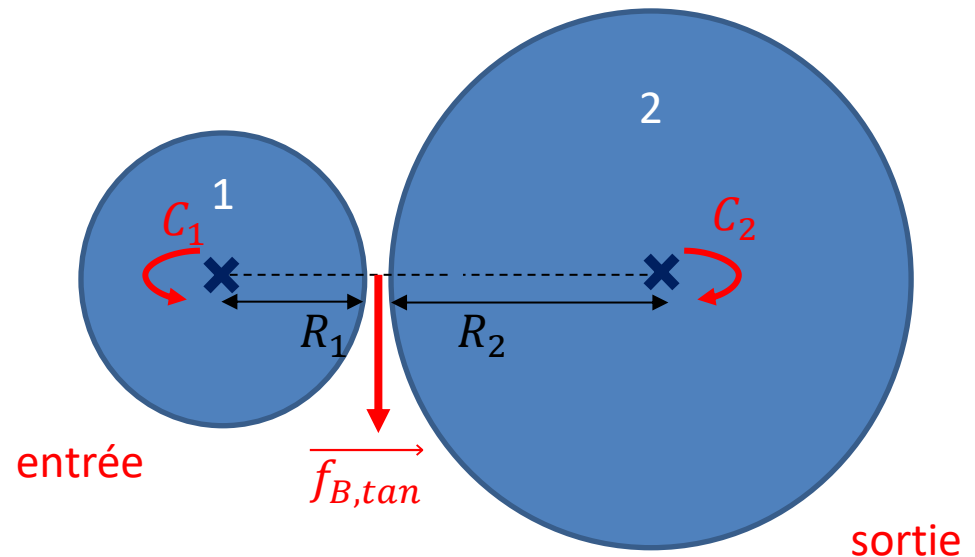
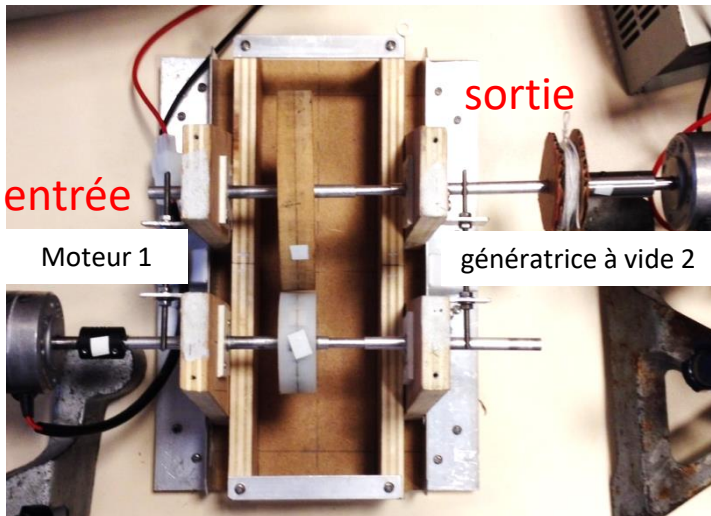
- TMC sur {1} : $f_{B,tan} = \frac{C_1}{R_1}$
- TMC sur {2} : $C_2 = R_2 * f_{B,tan}$

Exemple:

TMC sur {2} :

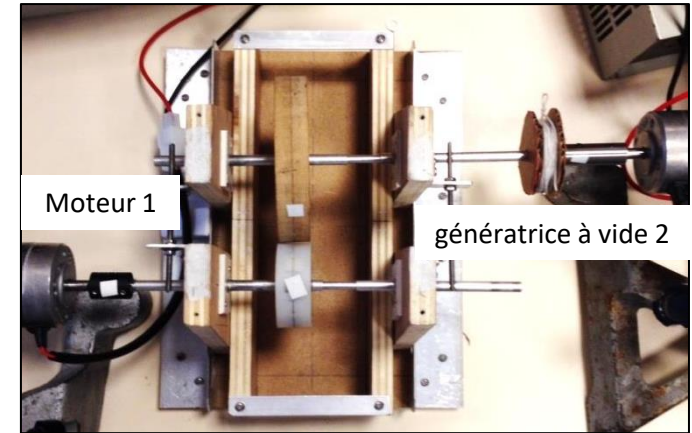
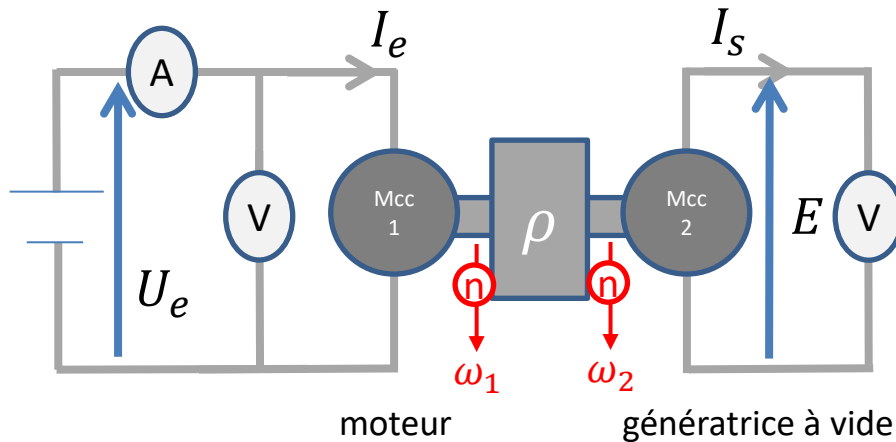
Le couple moteur sur l'axe1 crée sur l'axe 2 un couple $C_{1 \rightarrow 2}$

$$\text{Avec } C_{1 \rightarrow 2} = C_{moteur1} \cdot \frac{R_2}{R_1} = C_{moteur1} \cdot \frac{1}{\rho}$$



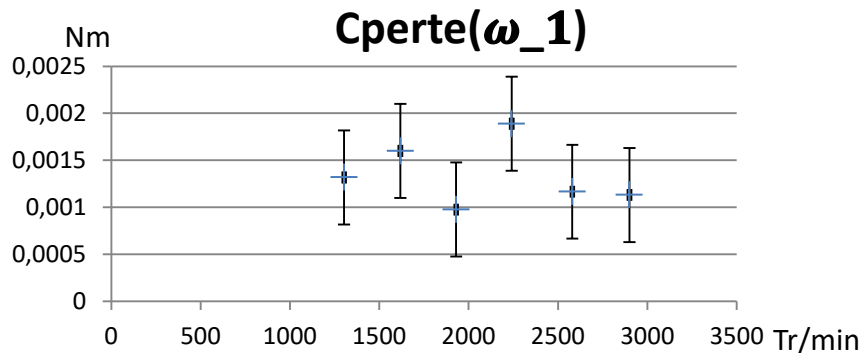
5-Analyse des performances

Rendement en fonction de la vitesse



Relations: sur l'axe d'entrée

$$C_{\text{pertes méca engrenage}} = \underbrace{C_{em1}}_{\text{Couple électromagnétique Mcc1}} - \underbrace{C_{frot sec} - f * \omega_1}_{\text{Couple résistant Mcc1}} - \underbrace{\rho * (C_{frot sec} - f * \omega_2)}_{\text{Couple résistant Mcc2 (rapporté à l'axe du Mcc1)}}$$

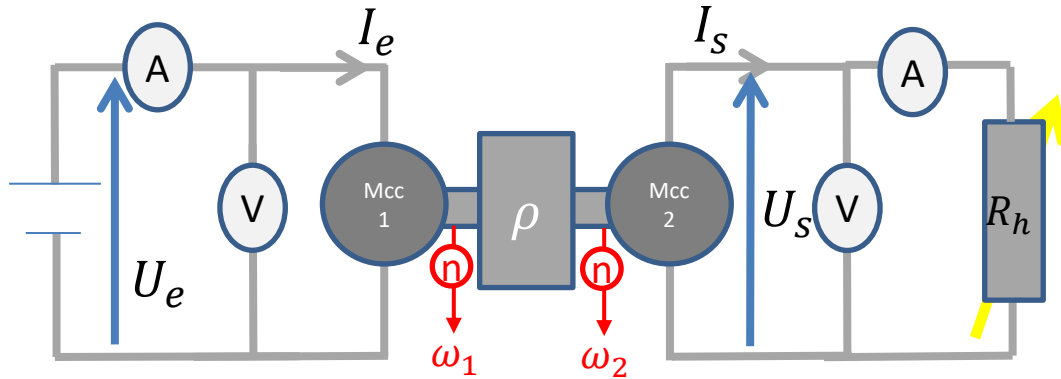


$C_{\text{pertes méca engrenage}} \approx 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}$
Faible devant les couples transmissibles
 $\approx 0,65 \text{ Nm (1,3 Nm en sortie)}$

Couple résistant imputable
 aux 4 roulements à billes

5-Analyse des performances

Rendement en fonction de la vitesse

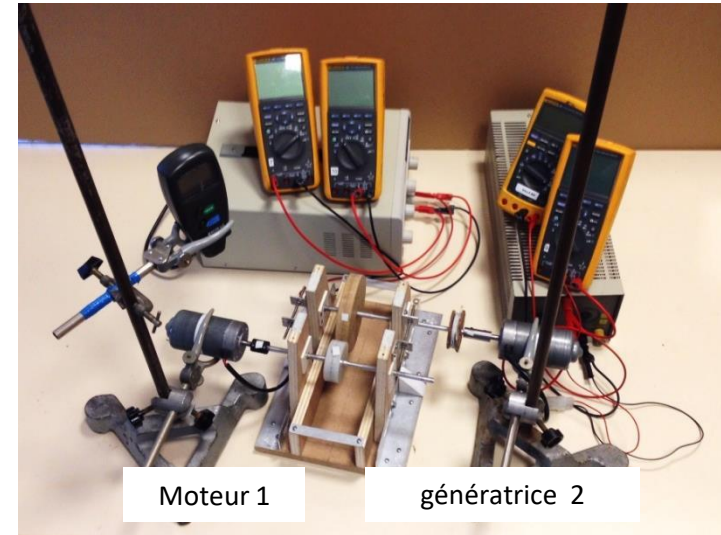


Moteur sur petite
roue

Génératrice sur
grande roue

$$P_{\text{entrée axe}} = U_e \cdot I_e - R \cdot I_e^2 - C_{\text{frot sec}} \cdot \omega_e - \omega_e^2 \cdot f$$

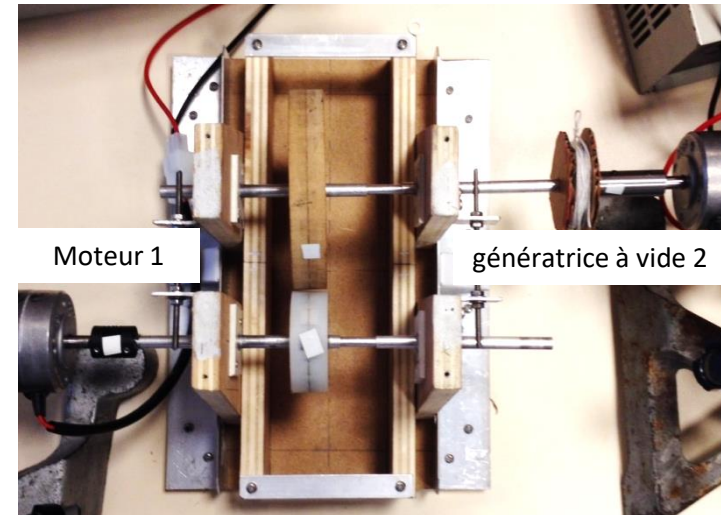
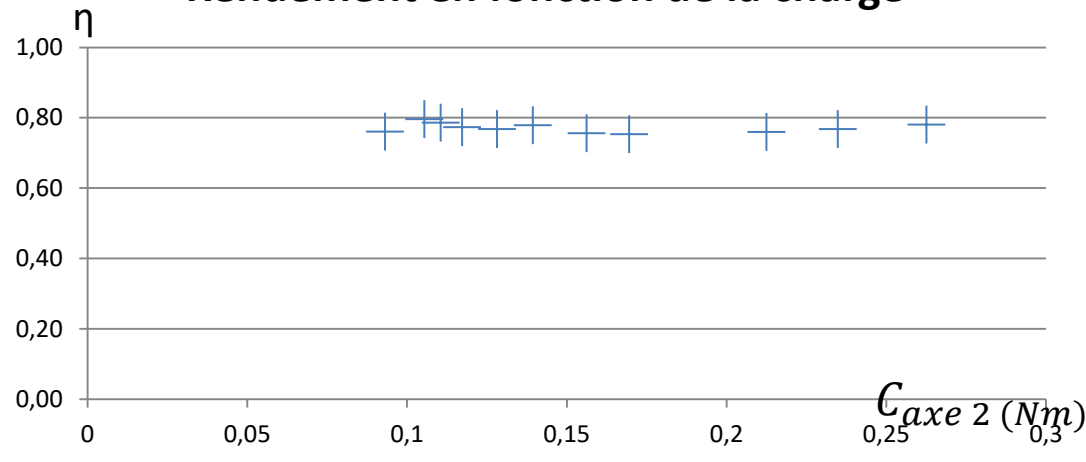
$$P_{\text{sortie axe}} = U_s \cdot I_s + R \cdot I_s^2 + C_{\text{frot sec}} \cdot \omega_s + \omega_s^2 \cdot f$$



Moteur 1

génératrice 2

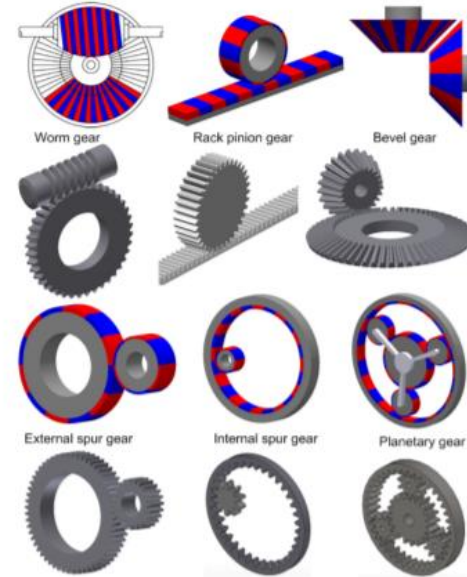
Rendement en fonction de la charge



Moteur 1

génératrice à vide 2

Conclusion



- Bon rendement
- Comportement semblable à un engrenage standard
- Couple transmissible maximal limité
- Limitation du couple
- Existence de technologies plus performantes:

TABLE I
TORQUE DENSITY OF DIFFERENT GEARS [29]

Gear Type	Torque density (kNm/m ³)
Mechanical spur gear [30]	100-200
Mechanical helical gear(3G)	50-150
Magnetic worm gear [9]	<2
Magnetic bevel gear	<5
Magnetic spur gear	10-20
Magnetic harmonic gear(1G)	140-180
Magnetic harmonic gear(2G)	75
Magnetic planetary gear [26]	≈100
Concentric magnetic gear	70-150

De Magnetic Gear Technologies: A Review

P.M. Tlali, R-J. Wang, S. Gerber

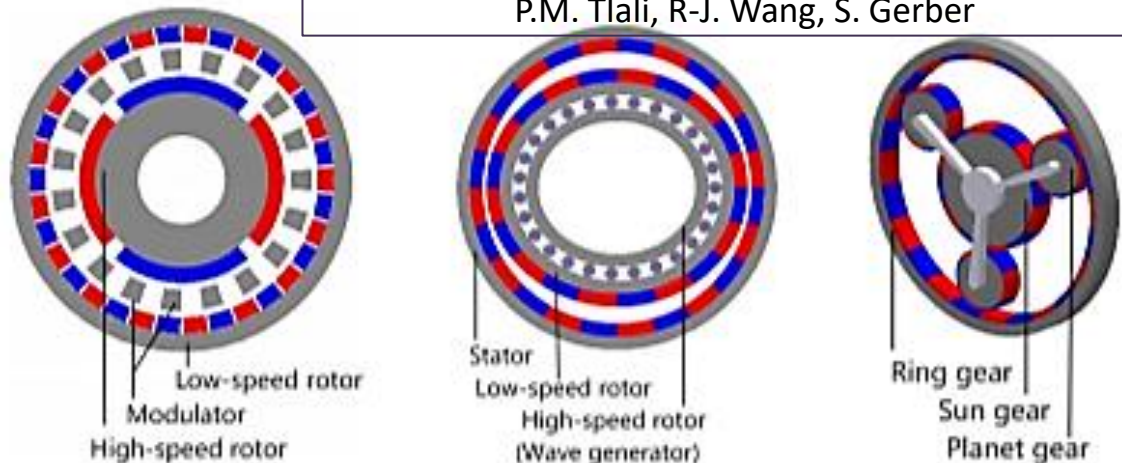
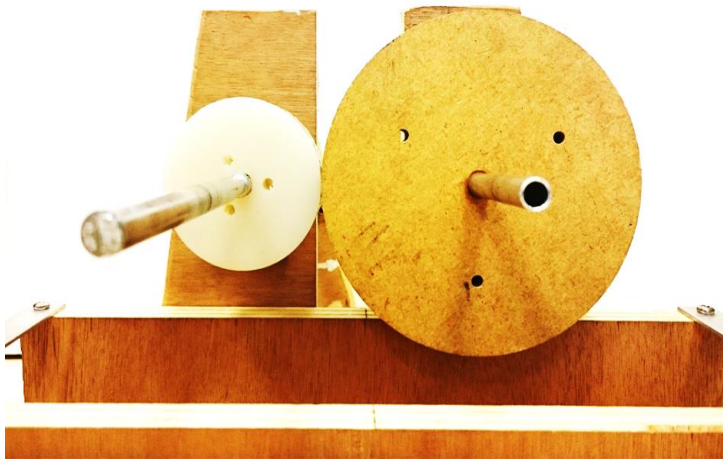
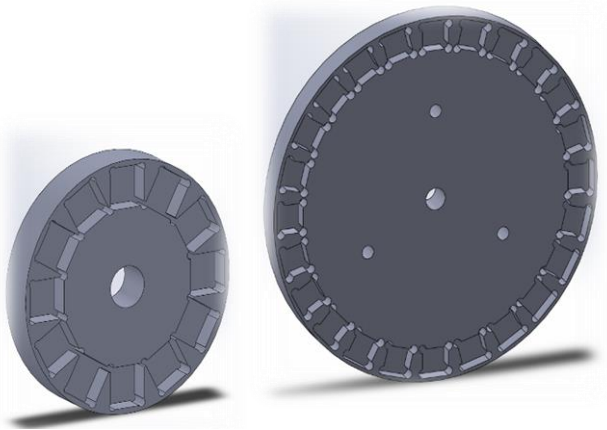


Fig. 3. Concentric, harmonic and planetary magnetic gears.

Annexes

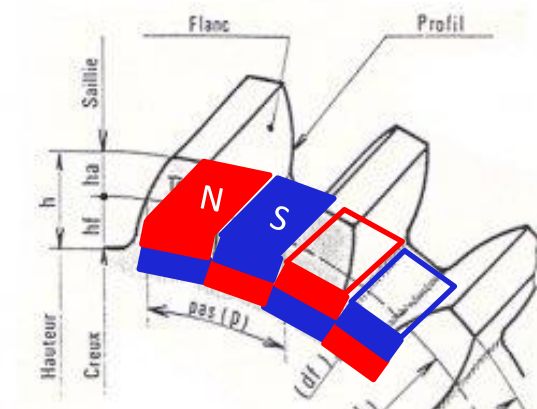
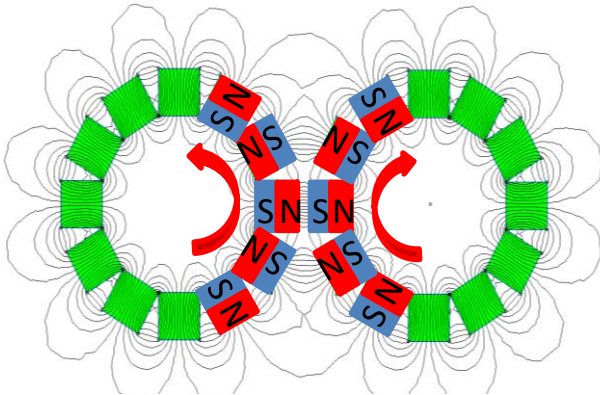
Plexiglas



Annexes

Principe de fonctionnement et condition d'engrènement

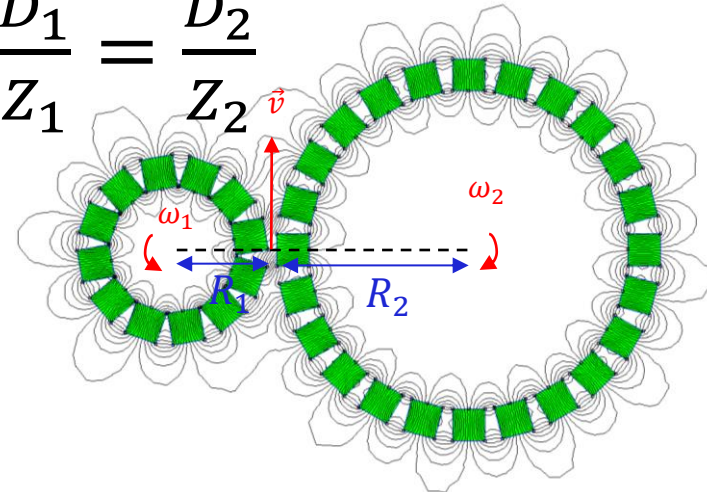
Nom du logiciel : FEMM → Finite Element Method Magnetics



- Condition d'engrènement

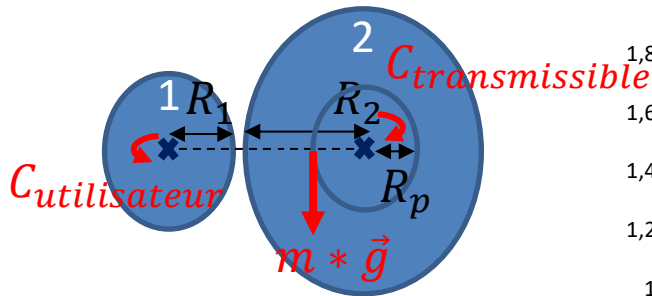
Même module :

$$\frac{D_1}{Z_1} = \frac{D_2}{Z_2}$$



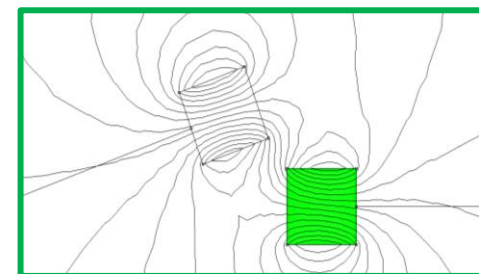
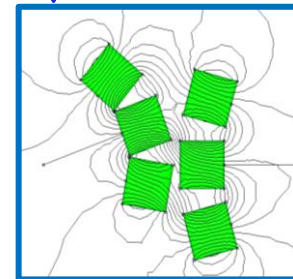
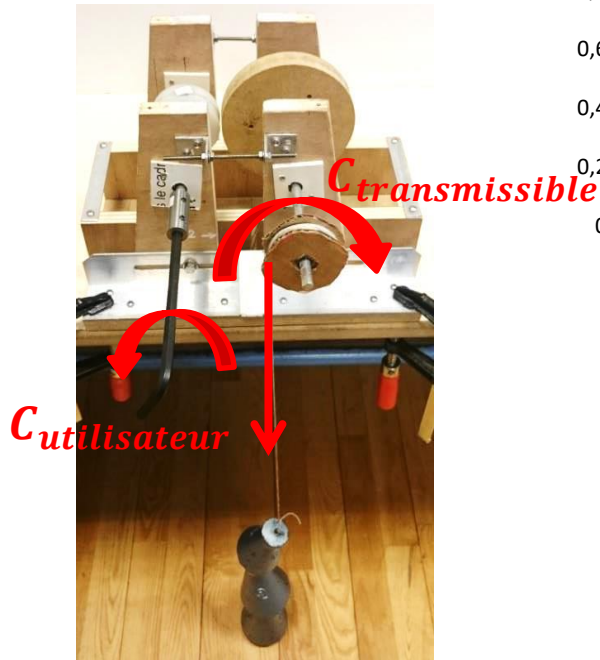
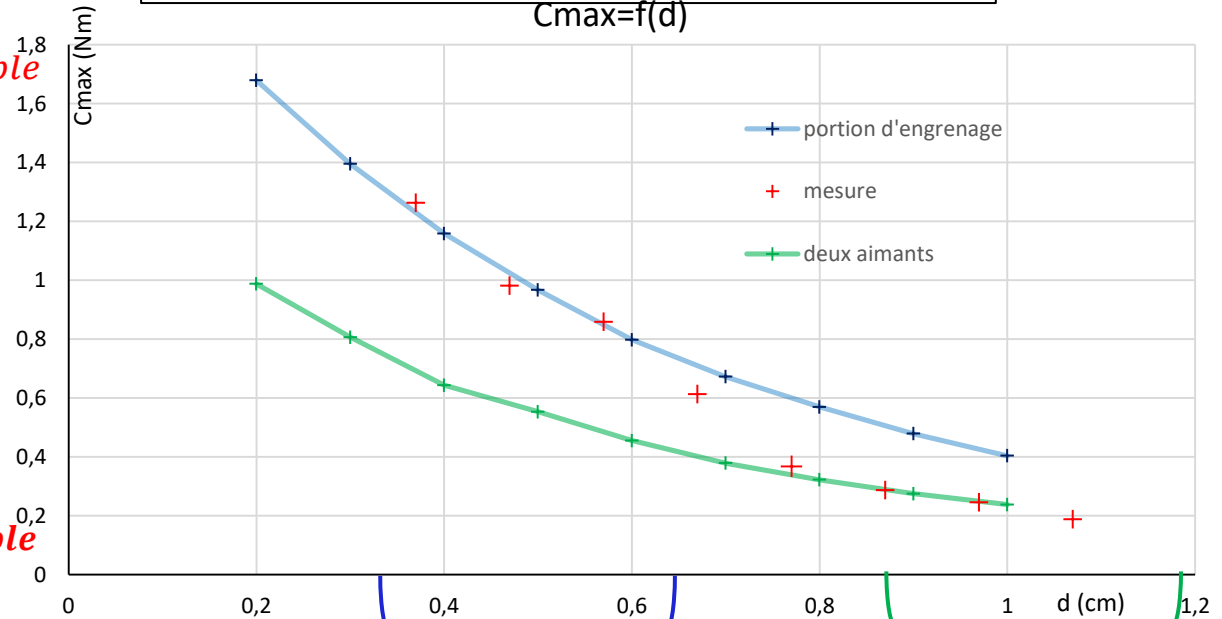
Annexes

Mesure du couple maximal en fonction de la distance



$$TMS : C_{transmissible,max} = R_p \cdot m_{max} \cdot g$$

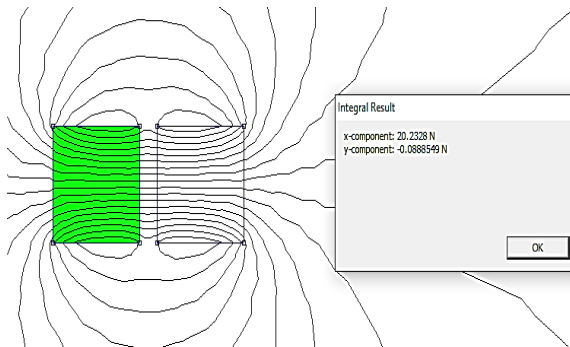
$C_{max}=f(d)$



Annexes

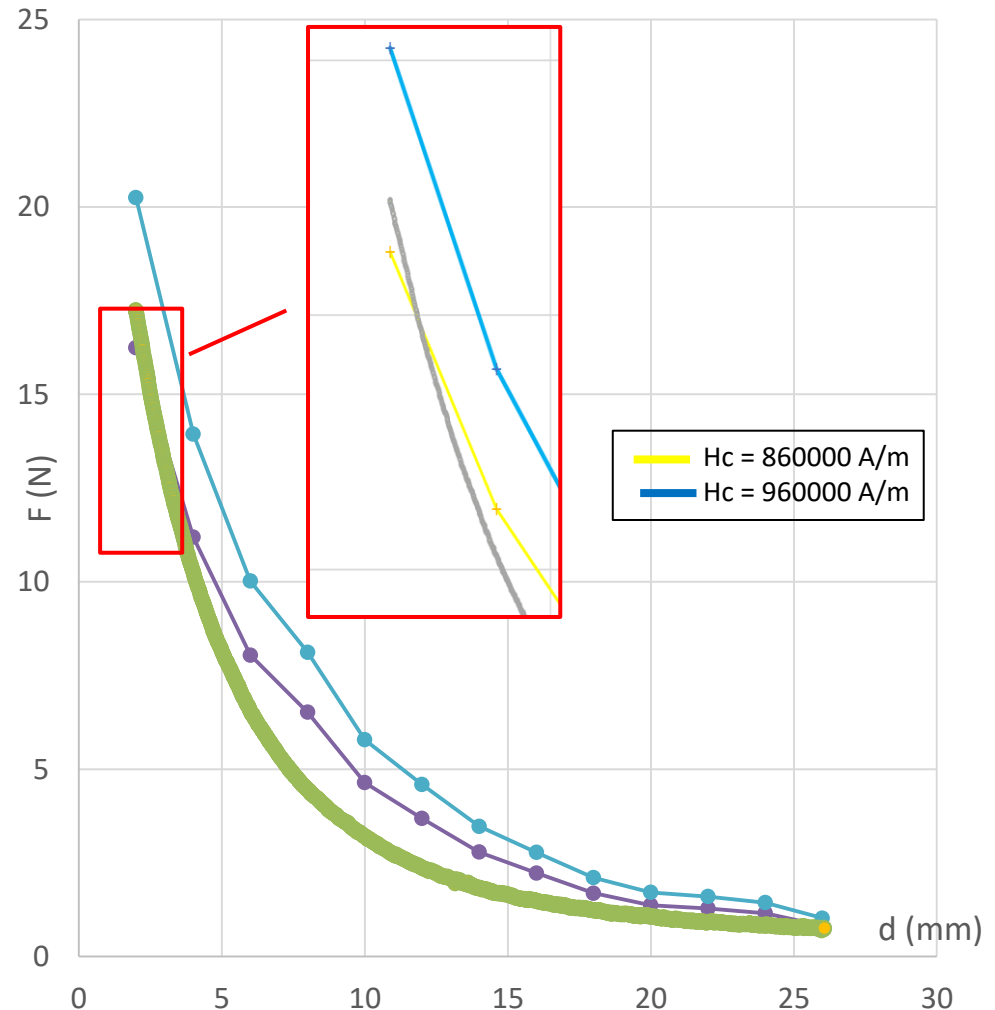
Caractérisation de H_c de l'aimant

- Simulation FEMM



Dans l'intervalle de d correspondant au système, on a

$H_c = 860000 \text{ A/m}$



Annexes

Incertitudes:

- $u_R = \frac{1}{2} \cdot R \cdot \sqrt{\left(\frac{u_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{u_I}{I}\right)^2}$
- $u_{k_{mot}} = k_{mot} \cdot \sqrt{\left(\frac{u_E}{E}\right)^2 + \left(\frac{u_\omega}{\omega}\right)^2}$
- $u_{C_{em1}} = C_{em1} \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{k_{mot}}}{k_{mot}}\right)^2 + \left(\frac{u_I}{I}\right)^2}$

$$u_\omega = \frac{d}{\sqrt{12}} \text{ d résolution du tachymètre } d=10 \text{ tr/min}$$

$$u_{tension \text{ ou intensité}} = \frac{t_{tolérance \text{ fournie}}}{\sqrt{3}}$$

$$t_{tolérance \text{ voltmètre}} = 0,025\% \cdot U + 0,002 \text{ V}$$

$$t_{tolérance \text{ ampèremètre}} = 0,3\% \cdot I + 0,001 \text{ A}$$