

Essais sur un banc de machines à courant continu

- Travail expérimental et rédaction du document :

Jean-Baptiste Desmoulin (P.R.A.G.)

mail : desmouli@physique.ens-cachan.fr

Ce travail présente quelques expériences réalisables sur un banc associant deux machines à courant continu sur le même axe de rotation. On notera que la plupart de ces expériences tournent autour des puissances mises en jeux dans ce genre de système. On pourra donc chercher à recouper différentes approches pour mettre en valeur certains résultats obtenus. Ces essais ont été réalisés sur le banc suivant :

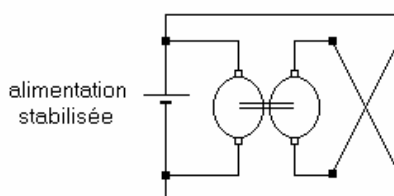


I. Etude de quelques caractéristiques importantes d'une machine à courant continu.

Pour pouvoir exploiter les caractéristiques qui concernent les puissances mises en jeux dans la machine, il est nécessaire de connaître certaines caractéristiques des machines utilisées.

1.1. La « résistance » d'induit.

Pour obtenir la résistance de la machine, il faut parvenir à l'alimenter en continu sans qu'elle puisse tourner. En effet dans ce cas, seule la résistance d'induit sera prise en compte (pas de force électromotrice à vide et inductance d'impédance nulle en continu). Sachant que nous travaillons avec des machines à aimants identiques associées deux à deux, on peut procéder de la façon suivante :

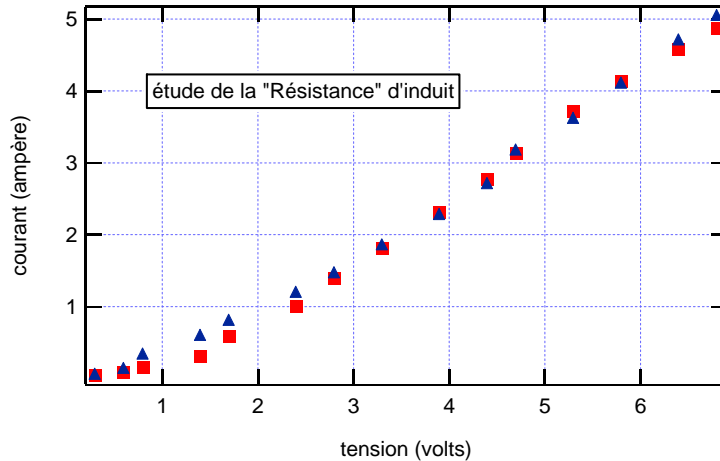


L'arbre ne tourne pas car les couples des deux machines s'opposent et ont même valeur absolue. Pour faire la mesure, on se place à un courant voisin du courant auquel ou travaillera (même température et même état des balais...).

rq : On pourrait également réaliser une association série, si on ne dispose pas d'une alimentation montant assez haut en courant. L'important, c'est que les deux couples moteurs s'opposent.

rq : il ne faut surtout pas faire de mesure à l'ohmmètre sous peine de trouver des valeurs beaucoup trop fortes (le courant injecté par l'ohmmètre est très faible et le contact entre rotor et stator n'a rien à voir avec ce qu'il serait dans les conditions normales d'utilisation... de plus on ne travaille pas à même température...).

Il peut être plus judicieux de relever, dans un premier temps, la caractéristique $U(I)$ de la machine pour se rendre compte que cette dernière n'a pas un comportement purement ohmique, notamment pour les faibles valeurs de courant. Expérimentalement, sur le banc PARVEX, on obtient des caractéristiques de la forme suivante :



Il faut noter que l'effet de seuil au niveau des balais est susceptible d'être modifié lors de la rotation de la machine...

Globalement, on peut modéliser cet ensemble par la mise en série d'une vraie résistance (le bobinage d'induit) avec une tension constante (le seuil), soit une caractéristique pouvant s'écrire

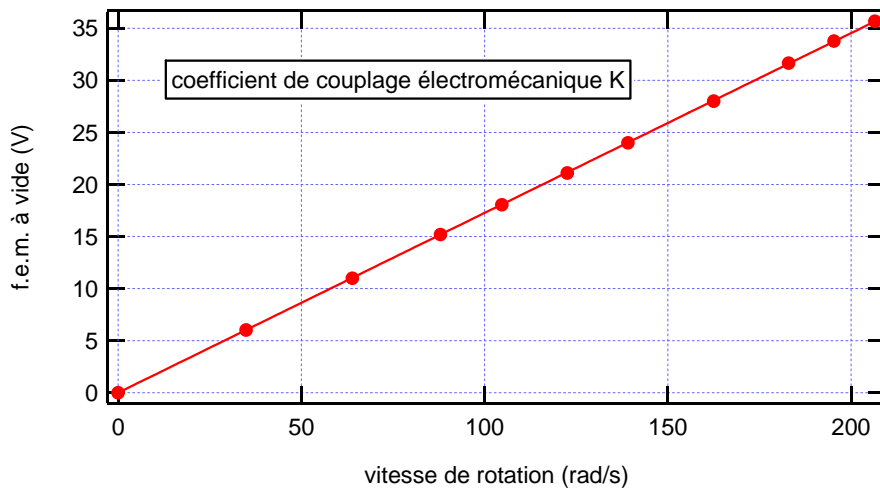
$$U = V_{\text{seuil}} + R_{\text{mcc}} \cdot I$$

avec une tension $V_{\text{seuil}} = 1.2\text{V}$ et $R_{\text{mcc}} = 0.88\Omega$

1.2. Le coefficient de couplage électromécanique.

Si on suppose que les deux machines du banc sont identiques (même coefficient K pour chacune d'entre-elles), on alimente la première machine avec une alimentation stabilisée (tension de sortie E), la seconde fonctionnant à vide. On relève la tension E_v aux bornes de la machine à vide en fonction de la vitesse (donnée par la dynamo tachymétrique) pour plusieurs valeurs de E. Le coefficient de proportionnalité entre la tension à vide et la vitesse donne K.

Expérimentalement, pour le banc PARVEX, on trouve



En ajustant, on trouve une relation de la forme

$$E_v = 0.173 \cdot \Omega \quad (\text{avec } \Omega \text{ en rad/s})$$

rq : ne pas mesurer la tension aux bornes de l'alimentation stabilisée, car elle diffère de la tension à vide en raison du caractère résistif de l'induit .

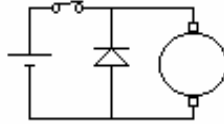
1.3. Les paramètres mécaniques : moment d'inertie et coefficient de frottement sec.

Pour obtenir ces paramètres, on peut réaliser deux essais de lâché dans des conditions de charges notablement différentes. Cependant, l'analyse des résultats obtenus par cette approche ne sera pas très satisfaisante. C'est pourquoi un autre essai, portant sur les puissances mises en jeux lors d'un essai à vide, semble nécessaire pour obtenir une valeur correcte des paramètres recherchés.

a/ les essais de lâché.

Il faut tout d'abord noter qu'il existe forcément des frottements secs...la machine aurait du mal à s'arrêter seule dans le cas contraire... Sur les machines de faible puissance, les frottements secs sont souvent prépondérants devant les frottements fluides.

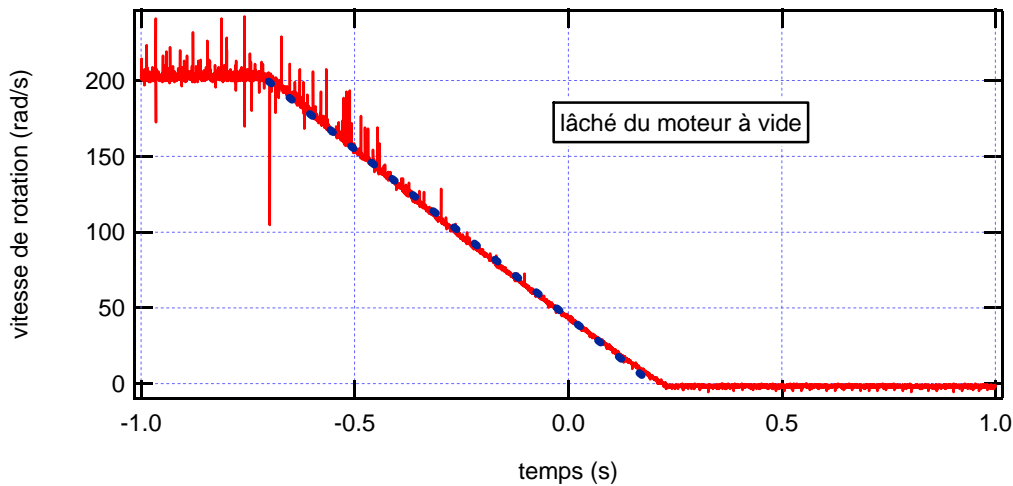
• Dans un premier temps, on va travailler avec la seconde machine à vide. On alimente la première machine sous une tension continue puis on ouvre manuellement l'interrupteur. Pour éviter tout risque de surtension résultant de l'interruption brutale du courant dans un circuit inductif, on place une diode (diode de roue libre comme dans un hacheur). On peut aisément vérifier que le courant tend vers 0 beaucoup plus vite que la vitesse.



On relève la réponse de la dynamo tachymétrique. Si les frottements secs sont dominants, on est ramené à l'équation différentielle suivante

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = -C_0 \quad \text{d'où} \quad \Omega(t) = -\frac{C_0}{J} \cdot t + \Omega(0)$$

Expérimentalement, on récupère une décélération d'allure suivante

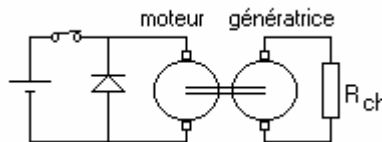


Elle valide l'hypothèse d'une prédominance des frottements secs. La pente de la droite obtenue nous donne C_0/J . En ajustant, on trouve que

$$C_0/J = 222 \pm 10 \text{ s}^{-2}$$

On remarque cependant que la courbe commence à s'incurver légèrement, ce qui signifie qu'il subsiste des frottements fluides même si ceux-ci sont d'influence négligeable.

• Dans un deuxième temps, on va laisser la deuxième machine en charge sur une résistance R_{ch} (cette dernière englobe en fait la résistance d'induit si on est plus rigoureux). Le rhéostat choisi représente 2.8Ω et l'induit 0.9Ω on a donc au total $R_{ch}=3.7 \pm 0.1 \Omega$ (on néglige l'effet de seuil). On fera en sorte que le courant à travers les machines, quand l'interrupteur est fermé, soit voisin de la valeur nominale (forte charge). On va alors ouvrir l'interrupteur et observer la décélération.



Si la génératrice débite un courant suffisant, on est ramené aux équations suivantes

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = -C_0 - K \cdot i(t) \quad \text{et} \quad K \cdot \Omega(t) = R_{ch} \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

On va supposer que le terme lié à l'inductance dans la seconde équation est négligeable

$$\text{alors} \quad i(t) \approx \frac{K}{R_{ch}} \cdot \Omega(t)$$

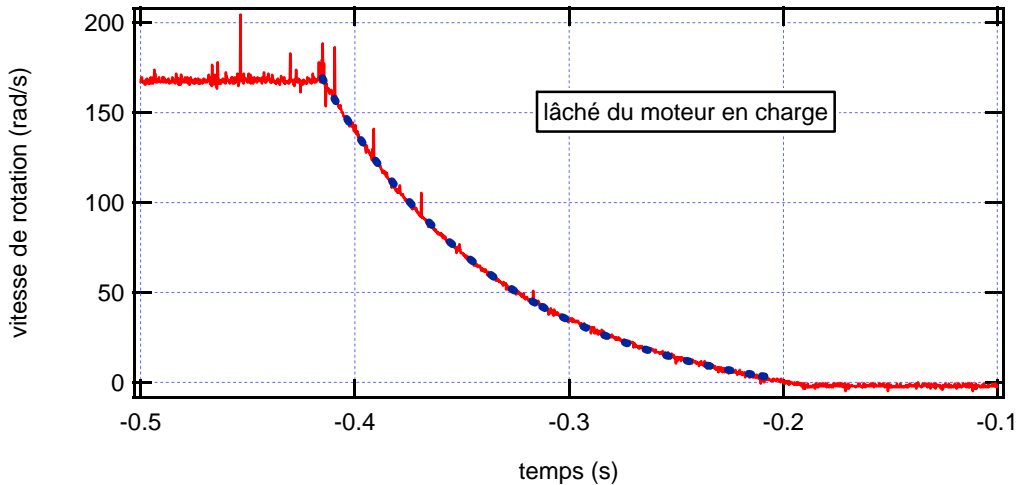
La première équation devient

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} \approx -C_0 - \frac{K^2}{R_{ch}} \cdot \Omega(t)$$

On voit apparaître un terme de frottement sec et un couple résistant équivalent à un frottement fluide. Avant de s'annuler, la vitesse va évoluer de la façon suivante

$$\Omega(t) = \left[\Omega(0) + \frac{C_0 \cdot R_{ch}}{K^2} \right] e^{-\frac{K^2 \cdot t}{J \cdot R_{ch}}} - \frac{C_0 \cdot R_{ch}}{K^2}$$

Expérimentalement, un relevé en monocoup nous donne l'évolution suivante



Nous allons ajuster les données expérimentales sur un modèle de type

$$\Omega(t) = A \cdot e^{-(t+0.415)/\tau} - B \quad (\text{attention à la position de l'origine des temps!})$$

L'ajustement donne $A=181.9 \pm 0.2 \text{ s}^{-1}$, $B=13.0 \pm 0.3 \text{ s}^{-1}$ et $\tau = 0.0856 \pm 0.0004 \text{ s}$

Sur le graphe précédent, il est représenté en pointillés.

Connaissant τ , K et R_{ch} on en déduit

$$J = \frac{K^2 \cdot \tau}{R_{ch}} = 6.9 \cdot 10^{-4} \pm 0.3 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$$

Connaissant la vitesse au moment du lâché ($\Omega(t=-0.415) = 168 \pm 2 \text{ s}^{-1}$), le coefficient de couplage K et la résistance placée sur la génératrice (à laquelle il faut penser à ajouter la résistance d'induit de la machine pour trouver la résistance R_{ch} effective soit $R_{ch}=3.7 \pm 0.1 \Omega$), on peut trouver C_o , soit

$$C_o = \frac{K^2 \cdot (A - \Omega(t = -0.415))}{R_{ch}} = 0.11 \pm 0.02 \text{ N.m}$$

On obtient notamment $C_o/J = 160 \pm 40 \text{ s}^{-2}$. Le résultat obtenu par cette méthode est du même ordre de grandeur de celui obtenu lors de l'essai à vide mais les intervalles de valeur ne se recoupent pas. Compte tenu du nombre d'intermédiaires avec la méthode en charge, on peut supposer qu'il est préférable d'exploiter le C_o/J de l'essai à vide (une seule mesure). Pour remonter à J , on peut se fier à la constante de temps obtenue par l'ajustement. Pour C_o , il est peut être préférable de prendre les deux résultats précédents pour conclure soit

$$C_o = J \cdot (C_o/J)_{\text{essai à vide}} = 0.15 \pm 0.02 \text{ N.m}$$

rq : Il ne reste plus à vérifier l'hypothèses faites sur l'influence négligeable de l'inductance de la génératrice

Si on écrit $R_{ch} \cdot i(t) \approx K \cdot \Omega(t)$ et si on néglige le rôle de C_o , alors $L \cdot \frac{di(t)}{dt} \approx -\frac{L \cdot K^3}{J \cdot R_{ch}^2} \cdot \Omega(t)$ donc négliger le rôle

de l'inductance revient à dire que

$$1 \gg A = \frac{L \cdot K^2}{J \cdot R_{ch}^2}$$

AN : $L \approx 1 \text{ mH}$; $K=0,173 \text{ V} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s}$; $J=6.9 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$; $R_{ch} \approx 3.7 \Omega$ et On trouve $A = 3.2 \cdot 10^{-3}$ ce qui justifie l'hypothèse.

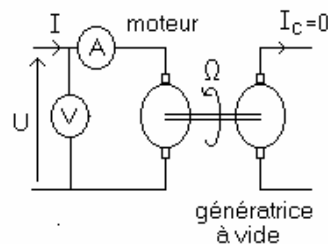
Bilan : Globalement, cette approche est assez indirecte et les résultats obtenus ne donnent qu'un ordre de grandeur des paramètres recherchés. Pour être plus précis, on peut rechercher directement C_o par un essai à vide.

b/ Essai complémentaire : Etude des pertes du banc à vide.

rq : *Quelle est l'origine de C_o ?* Ce « frottement sec » a une origine en partie mécanique. C'est principalement le défaut d'accouplement entre les deux machines (difficulté à les placer toutes les deux exactement dans le même axe). Cependant, il a également une origine magnétique car dans une machine à aimant, lors d'un lâché, il y aura des pertes fer pendant toute la décélération (le rotor mobile est placé dans un champ magnétique permanent). Ces pertes sont à l'origine d'un couple résistant. Celui-ci étant constant, c'est que les pertes magnétiques sont simplement proportionnelles à la vitesse de rotation, ou alors qu'elles sont trop faibles pour avoir une incidence notable sur l'évolution des pertes avec la vitesse de rotation.

On suppose que l'on connaît la résistance d'induit de la première et de la seconde machine (avec une méthode volt-ampèremétrique et surtout pas avec un ohmmètre !) ainsi que le seuil dû aux balais. On appellera les résistances R_{mcc} et les tensions de seuil V_{seuil} .

Nous allons étudier le système à vide. Dans ce cas, aucune énergie électrique n'est transmise en sortie. L'intégralité de l'énergie absorbée l'est sous forme de pertes. Le montage réalisé est le suivant



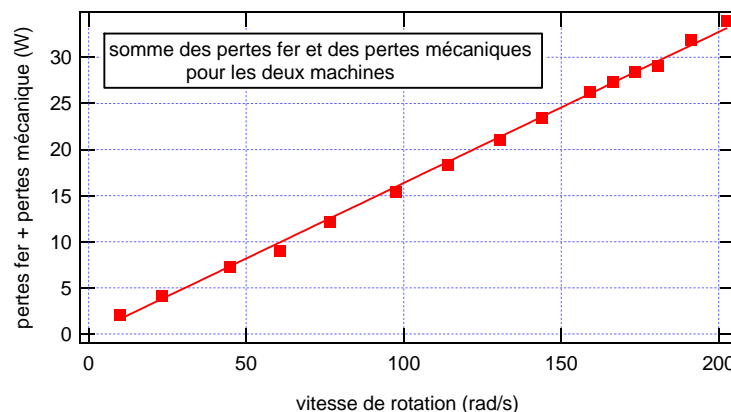
En augmentant la tension U , on va augmenter la vitesse. On mesurera la puissance absorbée ($P_a=U.I$) en fonction de la vitesse. Pour chaque tension U appliquée en entrée, on relèvera donc U, I, Ω .

Reste à analyser ce terme. On peut réaliser la décomposition suivante, en supposant que les différentes causes de pertes son découlées :

$$P_a = (V_{seuil} + R_{mcc}.I).I + P_{f1} + P_{m1} + P_{f2} + P_{m2}$$

P_{f1} et P_{f2} représentent respectivement les pertes fer dans la première et la seconde machine. Si les deux machines sont réalisées de la même façon (c'est légitime dans notre cas), on peut supposer que ces deux termes sont égaux. Compte tenu de la structure des MCC que nous utilisons, les pertes fer ne dépendent à priori que du champ inducteur (constant dans la mesure où il s'agit de machines à aimants), et de la vitesse de rotation (qui donne la fréquence de variation de flux vu par le rotor). Pour nos machines, les pertes fer ne dépendent donc à priori que de la vitesse de rotation. P_{m1} et P_{m2} représentent les pertes mécaniques sur chacune des machines (frottements liés à la rotation et éventuellement à la ventilation). Là encore on va supposer que ces pertes se répartissent équitablement entre les deux machines et que $P_{m1} = P_{m2}$.

En relevant $P_a - (V_{seuil} + R_{mcc}.I).I$ en fonction de la vitesse, on obtient une caractéristique de la forme suivante



La linéarité de la courbe précédente confirme que le couple de pertes est essentiellement un couple de frottements secs.

En ajustant, on trouve une relation de la forme

$$P_{f1} + P_{m1} + P_{f2} + P_{m2} = 0.164.\Omega \quad \text{avec } \Omega \text{ en rad/s (attention aux unités...)}$$

On peut donc en déduire un moment couple de pertes global pour les deux machines $C_o = 0.164 \pm 0.006 \text{ N.m}$.

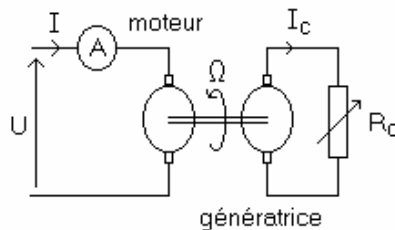
Bilan : Cette valeur est du même ordre que ce qui a été trouvé lors des essais de lâché, mais les barres d'erreur ne se recoupent pas. Cette approche étant plus directe que la précédente, qui repose sur l'ajustement de fonction assez complexe, il est préférable de conserver cette valeur de C_o , de préférence à celle obtenue lors des essais de lâché, et de déduire J par l'essai de lâché à vide, qui donne C_o/J par une mesure directe.

rq : Pour connaître les pertes d'une seule machine, on peut légitimement diviser par deux la valeur globale obtenue, dans la mesure où les deux machines sont identiques. Il faudra cependant garder à l'esprit qu'une bonne partie des pertes d'origine purement mécaniques est liée à la qualité de l'accouplement, et non aux machines à proprement parler.

rq : Avec une machine à aimants, on ne pourra pas séparer les pertes fer et les pertes mécaniques, car il n'est pas possible de couper le champ exciteur. Les deux phénomènes sont donc inextricablement liés.

II. Rendements et bilans de puissance dans ce système.

• *Présentation de l'expérience :* Pour pouvoir discuter de la courbe de rendement, il est préférable de travailler à vitesse constante, afin d'avoir des pertes fer et des pertes mécaniques constantes. Si tous les paramètres évoluent en même temps, ces courbes ne sont plus interprétables et perdent tout intérêt.



On utilise, pour R_c un rhéostat $12\Omega/5A$. Expérimentalement, on relève la puissance en entrée du moteur et en sortie de la génératrice, ainsi que les courants dans les deux machines, en faisant en sorte que u_Ω délivrée par la dynamo tachymétrique reste constante quand on modifie la charge R_c . Pour cela, il sera nécessaire d'ajuster la tension U .

• *Notations :* Pour ce qui concerne les notations, la puissance absorbée est notée P_a et la puissance de sortie fournie à la résistance de charge est notée P_s . La puissance utile en sortie du moteur, disponible sur l'arbre de rotation est notée P_u et est donnée par

$$P_u = P_s + P_{f2} + P_{m2} + P_{j2}$$

On supposera que les pertes fer sont les mêmes sur les deux machines et que les pertes mécaniques se répartissent équitablement, ce qui signifie que $P_{f2} + P_{m2} = (P_f + P_m)/2$

Le rendement de la mise en cascade des deux machines sera donné par

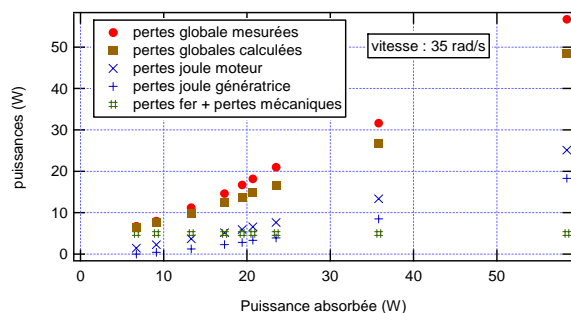
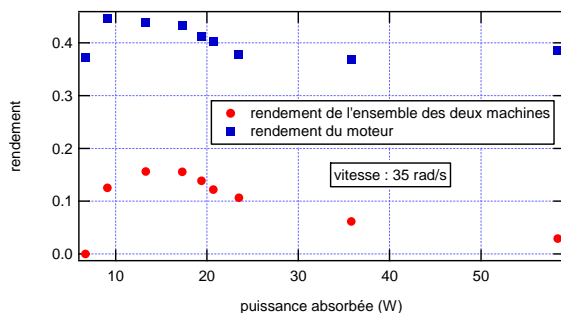
$$\eta_g = \frac{P_s}{P_a}$$

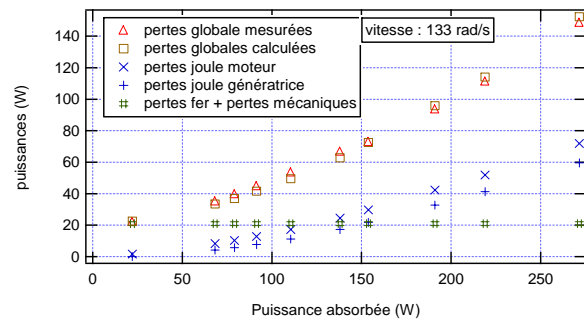
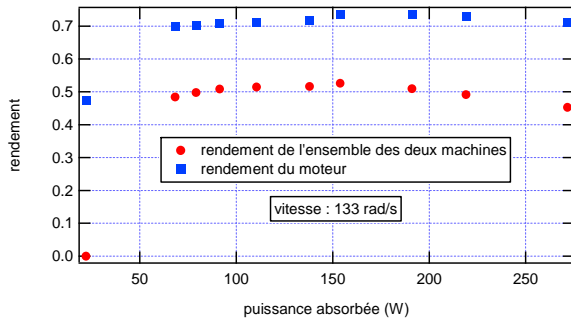
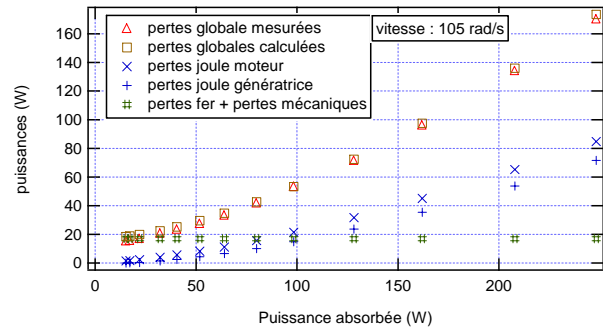
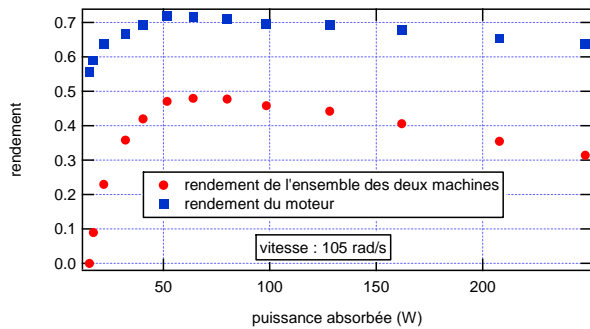
Le rendement électromécanique du seul moteur, sera lui, défini comme étant

$$\eta_1 = \frac{P_u}{P_a}$$

• *Résultats expérimentaux :*

Pour trois vitesses de rotation, on a relevé les puissances et les courants mis en jeu dans le système. Tout a été représenté en fonction de la puissance absorbée par le moteur. Les courbes sont les suivantes :





• **Interprétation :**

- On constate que pour les faibles vitesses, les rendements sont plus faibles. En Effet, pour un niveau de courant donné, les pertes Joule sont les mêmes quelle que soit la vitesse de rotation, le couple électromécanique est également le même et c'est la vitesse qui va déterminer la puissance. Plus cette dernière est grande plus la puissance utile transférée sera importante et moins les pertes Joule auront d'incidence sur le rendement global. L'augmentation des pertes mécaniques et des pertes fer ne perturbe pas cette tendance, car leur augmentation avec la vitesse est trop faible.

- Le rendement optimal d'un moteur se situe au voisinage de 70 % ce qui est convenable pour des machines de faible puissance. Le rendement décroît après un optimum en raison de l'augmentation rapide des pertes Joule.

- Lorsque l'on fait un bilan de puissance, on constate que les pertes globales mesurées correspondent bien à la somme des pertes Joules et des pertes fer des deux machines avec les pertes mécaniques des deux machines et de l'accouplement. Pertes fer et pertes mécaniques ne peuvent pas être séparées avec un moteur à aimant. On a supposé que chaque machine contribue de la même façon en terme de pertes fer (même vitesse de rotation dans le même champ magnétique) et en terme de pertes mécaniques, ce qui nous a permis d'en déduire le rendement du moteur. La somme des pertes fer et des pertes mécaniques est obtenue par l'essai à vide du I.3.b. en tenant compte de la vitesse lors des essais.

On remarque que le bilan de puissance fonctionne moins bien lorsque les transferts mettent en jeu de faibles puissances, comme c'est le cas pour l'essai à 333 t/min (35 rad/s). Il s'agit peut être d'un problème d'erreur systématique sur les wattmètres lors du bilan de puissance.

• **Vocabulaire :** augmenter la charge signifie augmenter la puissance transférée sur l'arbre mécanique vers la génératrice, ce qui signifie, lorsque l'on travaille à vitesse constante, que l'on augmente I_c . Dans ce cas, augmenter la charge, c'est diminuer la résistance !

Liste de matériel.

Un banc de 2 machines à courant continu avec dynamo tachymétrique.

Une alimentation continue réglable 40V/10A.

2 wattmètres identiques (ou 2 ampèremètres et un voltmètre)

un voltmètre pour la vitesse de rotation

un capteur de courant

un oscilloscope numérique

un rhéostat de charge 50Ω/8A, un 50Ω/5A et un 180Ω/2A