

Dipôle moteur

Nouveaux programmes de première S

Expérience de cours assistée par ordinateur

par Georges ANDRÉ
Lycée P. Mendès France - 13127 Vitrolles

1. INTRODUCTION

Les programmes des premières Scientifiques antérieurs à 1994 comportent l'étude des dipôles récepteurs : électrolyseur, moteur, Bilan de puissance et rendement.

Les manuels présentent de nombreuses expériences de cours ou de travaux pratiques relatives aux récepteurs électrochimiques mais peu ou pas relatives aux récepteurs électromécaniques.

Cette expérience fait suite à l'article :

«**Étude à l'ordinateur d'un petit moteur électrique**» paru dans le B.U.P. n° 745 (juin 1992), elle utilise le même principe, les mêmes notations et le même motoréducteur.

Mais, au lieu d'effectuer successivement chaque mesure, la consigner dans un tableau, faire les calculs puis tracer les courbes, ce qui constitue la démarche habituelle en travaux pratiques, on propose ici d'**acquérir en temps réel** quelques deux cents mesures, de placer immédiatement à l'écran les points représentatifs sur le graphe, puis de tracer les courbes de régression.

Cette manipulation **dure moins d'une minute**. Sa réalisation et son exploitation sont donc commodes pour **illustrer une leçon**.

Elle est tout particulièrement adaptée aux nouveaux programmes prévus pour les premières scientifiques à la rentrée 1994 tant pour la partie électrique que pour la partie mécanique.

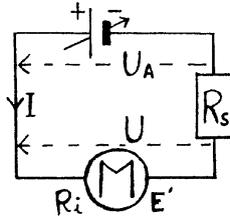
Ces programmes réservent une belle part aux **électromoteurs**, appareils qui font partie de notre environnement quotidien.

On pourra d'autant mieux les étudier que la loi de Laplace sera connue dès la seconde.

2. PRINCIPE

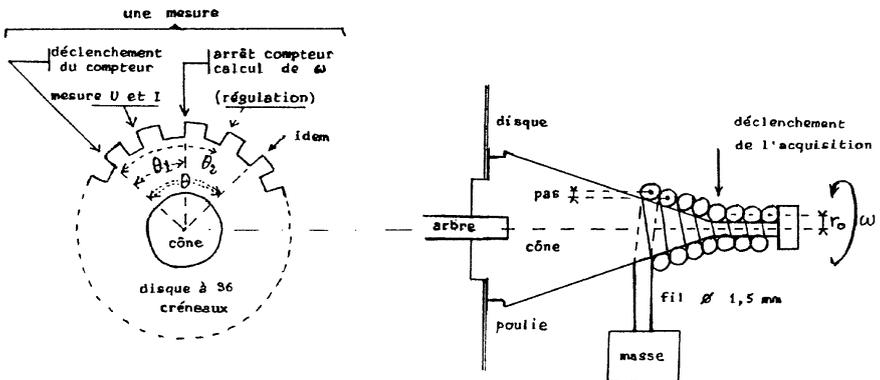
Les **quatre grandeurs à mesurer** qui permettent l'étude sont :

- la **tension U** aux bornes du moteur,
- l'**intensité I** qui le traverse,
- la **vitesse de rotation ω** en sortie de réducteur,
- le moment du **couple utile $M_u = m g r$** .



On peut modifier ces valeurs en agissant sur la tension d'alimentation U_A et sur le couple utile M_u .

Lorsque le moteur tourne d'un angle θ , le fil supportant la masse suspendue s'enroule sur une poulie conique et le couple utile M_u varie par l'intermédiaire du rayon $r = r_0 + \text{pas} \cdot \theta / 2\pi$.



U et I sont saisis par les deux entrées analogiques de la carte d'acquisition candidus.

L'angle de rotation θ est repéré par une entrée logique.

Connaissant le rayon initial r_0 et le pas, l'ordinateur calcule à chaque mesure le couple utile M_u .

D'autre part le timer donne la durée correspondant à la rotation θ_1 et on en déduit la vitesse angulaire ω .

Les constantes du motoréducteur sont :

- la résistance interne : $R_i = 20 \Omega$,
- le rapport de réduction : $C_r = 64 = \omega_1/\omega$.

Au moment opportun on pourra effectuer une régulation en donnant une commande sur le quatrième créneau.

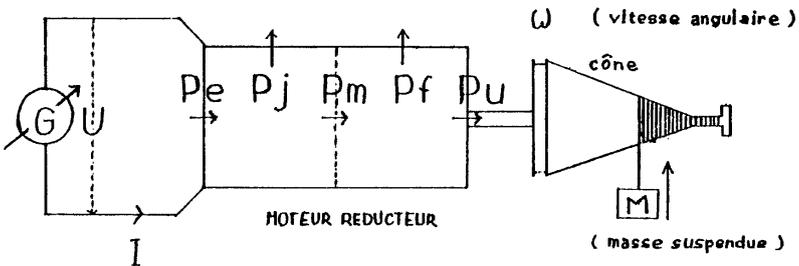
3. CHAÎNE ÉNERGÉTIQUE TRANSFERTS D'ÉNERGIE

On fait une acquisition et on constate que sans régulation de vitesse, lorsque le moteur tourne, le fil s'enroule sur le cône alors : M_u augmente, ω diminue, I augmente et U diminue.

Entre deux mesures successives le rayon d'enroulement ne varie que de soixante-dix micromètres.

Les accélérations étant très faibles et le rotor ayant une très petite inertie, (voir paragraphe 13) le régime est à chaque instant quasi permanent.

A vitesse constante, il n'y a pas de variation d'énergie cinétique. Le régime est permanent.



Conservation de l'énergie par unité de temps, c'est-à-dire de la puissance : $P_e = P_j + P_m$ et $P_m = P_f + P_u$.

Pour chaque mesure l'ordinateur calcule :

- puissance électrique reçue par l'appareil : $P_e = U I$
- puissance consommée par effet joule : $P_j = R_i I^2$
- puissance consommée autrement que par effet joule : $P_m = P_e - P_j$
- puissance consommée par frottements : $P_f = P_m - P_u$
- puissance utile : $P_u = M_u \omega$

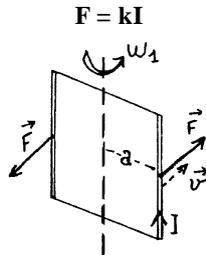
On en déduit :

- la f.c.e.m instantanée $E' = P_m/I$,
- les couples correspondants ainsi que les Rendements :
 - électrique : $R_e = P_m/P_e = E'/U$
 - mécanique : $R_m = P_u/P_m = M_u/E' I$
- général : $R_g = R_e \cdot R_m$

On peut demander au logiciel d'afficher toutes ces valeurs pour chaque mesure choisie.

4. LOI DE LAPLACE ET CONSÉQUENCE

Les nouveaux programmes de seconde mettent en évidence la proportionnalité de la force électromagnétique, agissant sur un conducteur non ferreux, avec l'intensité du courant qui le traverse :



On pourra alors, en première, calculer le moment $F \cdot a$ par rapport à l'axe de la force agissant sur un «brin actif de fil» et pour n tours du bobinage, le couple électromagnétique du moteur :

$$M = 2 n F a = (2 n k a) I = K I$$

$k = 15,6 \cdot 10^{-3} \text{ N m/A} = \text{Constante pour le moteur étudié.}$

Conséquence :

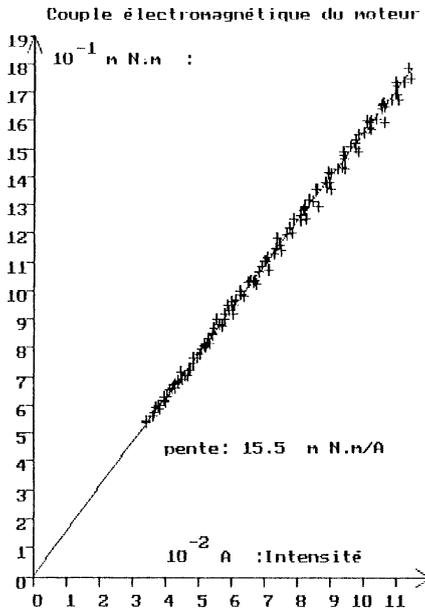
- Puissance électromagnétique élémentaire : $F \cdot v = k I v$.
- Pour n tours, Puissance électromagnétique du moteur : $2 n k I v$
c'est la puissance consommée autrement que par effet joule :

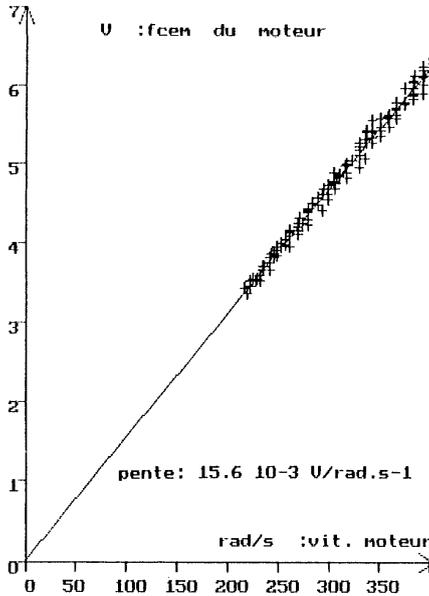
$$P_m = E' I \quad \text{d'où} \quad E' = 2 n k v = 2 n k a \omega_1 = K \omega_1$$

La f.c.e.m d'un moteur électrique à courant continu est proportionnelle à sa vitesse de rotation.

Ces résultats restent valables quelle que soit la forme du bobinage avec un champ radial.

Vérifications expérimentales des conséquences de la loi de Laplace :





5. RÉGULATION DE LA VITESSE

Pour fixer E' il faut donc travailler à vitesse constante.

Pour maintenir ω à la valeur initiale choisie, il faut, lorsque M_u varie, agir la tension d'alimentation U_A .

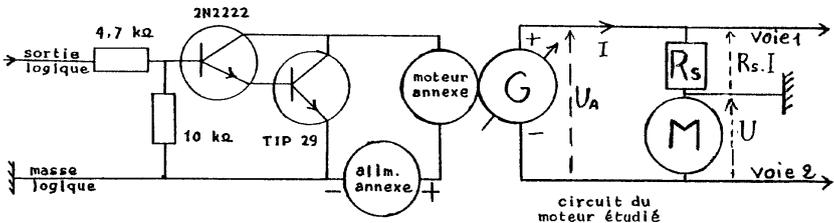
On peut pour cela utiliser l'une des deux méthodes suivantes :

a - L'électronique

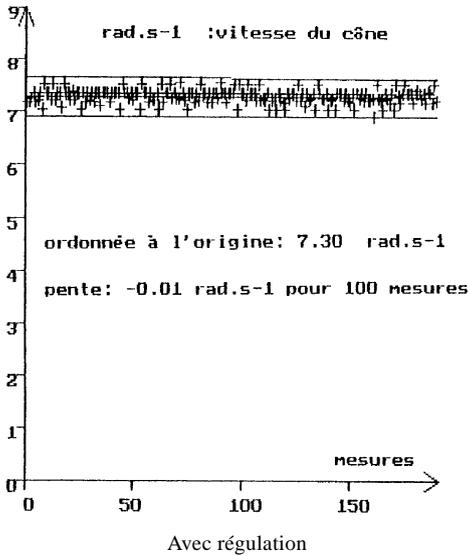
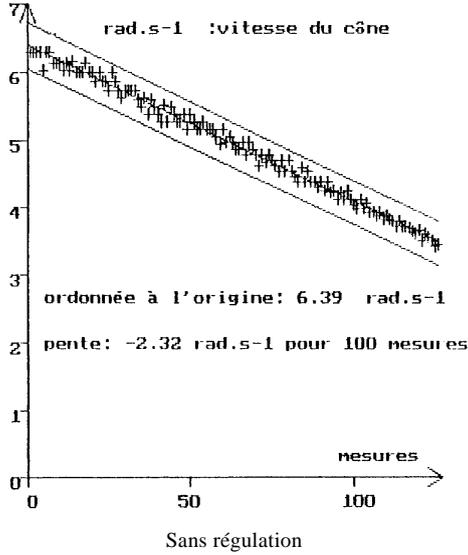
Montage proposé par Monsieur l'Inspecteur Général MORAUD dans le B.U.P. n° 705.

b - L'informatique

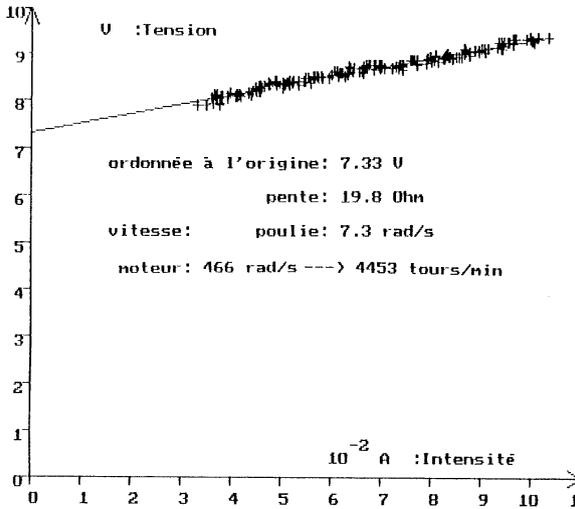
A chaque angle de rotation θ_2 , on compare la valeur de la vitesse de rotation ω à la valeur initiale. Si ω diminue, le logiciel commande par une sortie logique un petit moteur électrique annexe qui agit sur le potentiomètre de l'alimentation.



Courbes représentant l'évolution de la vitesse de rotation du cône et la bande $\pm 5\%$ de part et d'autre de la droite de régression au cours de l'acquisition.



6. TRACÉ DE LA CARACTÉRISTIQUE



Loi d'Ohm

A vitesse constante la caractéristique du moteur est linéaire.

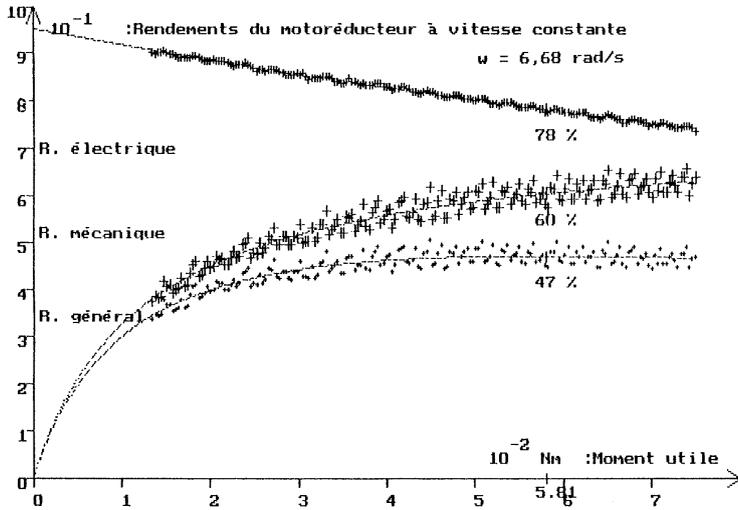
La courbe $U = f(I)$ est une droite d'équation $U = E' + R_i I$
 L'ordonnée à l'origine est la f.c.e.m E'
 du moteur pour la vitesse ω choisie.
 La pente est sa résistance interne R_i .

De part sa conception : rotor sans fer, très faible inertie, pas de position préférentielle d'arrêt, faible constante de temps mécanique, pas de pertes hystérésis ni de courant de Foucault, très faibles frottements balais collecteur, le type du moteur choisi se prête bien à ces expériences.

L'étude suivante est relative au rendement du motoréducteur, elle doit tenir compte des contraintes sur les dentures du **réducteur de vitesse** ainsi que des frottements au niveau du moteur et du réducteur.

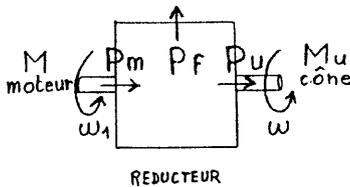
Cette étude peut être proposée en *activité support*.

7. COURBES DE RENDEMENTS



8. RÉDUCTEUR OU BOÎTE À VITESSE

La vitesse de rotation en entrée de réducteur est ω_1 c'est la vitesse de rotation du moteur. La vitesse de rotation en sortie de réducteur est $\omega = \omega_1/C_r$.



Rapport de transmission des vitesses : $\omega/\omega_1 = 1/C_r = 1/64$

Couple mécanique en entrée de réducteur : $M = P_m/\omega_1$.

Couple utile en sortie de réducteur : $M_u = P_u/\omega$.

S'il n'y avait pas de frottement mécanique, on aurait :

$$P_u/P_m = 1 \quad \text{et} \quad M_u/M = P_u/P_m \cdot \omega_1/\omega = C_r = 64$$

Mais il y a des frottements importants dans le réducteur P_f n'est pas nul et $R_m = P_u/P_m < 1$.

Par exemple au maximum de rendement général on a :

$$R_m = P_u/P_m = 60 \% \quad \text{et} \quad M_u/M = P_u/P_m \cdot C_r = 0,60.64 = 38$$

Rapport de transmission des couples : $M_u/M = C_r \cdot R_m$

Le réducteur diminue la vitesse de rotation, le coefficient de réduction de vitesse est constant quel que soit le régime d'utilisation.

Le réducteur augmente le couple, mais le coefficient d'accroissement du couple dépend des frottements qui ne sont pas constants.

Le coefficient d'accroissement du couple varie avec le régime d'utilisation.

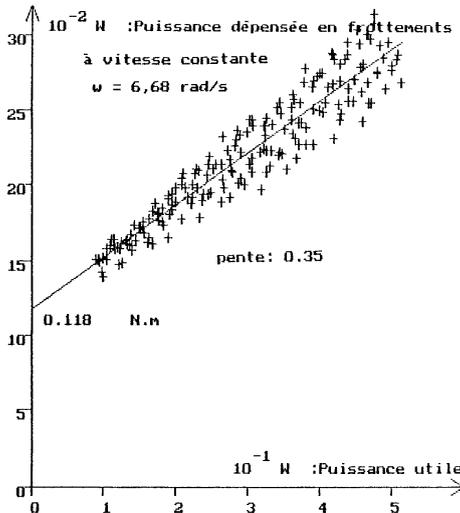
9. PUISSANCE DÉPENSÉE EN FROTTEMENTS

L'expérience montre que, la puissance P_f dépensée en frottement augmente avec les contraintes sur les dentures du réducteur.

P_f augmente avec la puissance utile P_u .

P_f dépend également des frottements des arbres sur les paliers et les balais sur le collecteur.

P_f augmente avec la vitesse ω .



A vitesse constante :

$$P_f = \alpha P_u + \beta$$

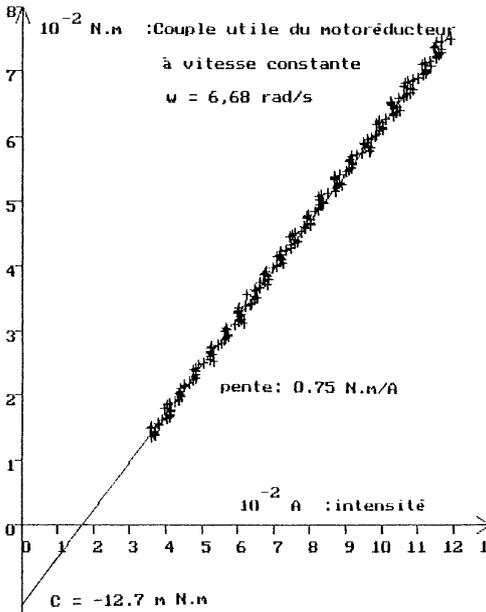
α constante du réducteur

$$\beta = \beta_{\text{réducteur}} + \beta_{\text{moteur}}$$

β dépend de la vitesse.

Conséquences :

$$P_m = P_f + P_u = P_u (\alpha + 1) + \beta$$



Calcul du couple électromagnétique du moteur :

$$M = M_u (\alpha + 1) / C_r + \beta / \omega_1 = K I$$

D'où le couple utile :

$$M_u = (K C_r / (\alpha + 1)) I - \beta / \omega / \alpha + 1$$

de la forme $M_u = K_u I - C$

K_u est une constante du motoréducteur étudié.

C dépend de ω

L'expression : $I = (M_u + C) / K_u$ montre que : **l'augmentation du couple utile crée un appel d'intensité.**

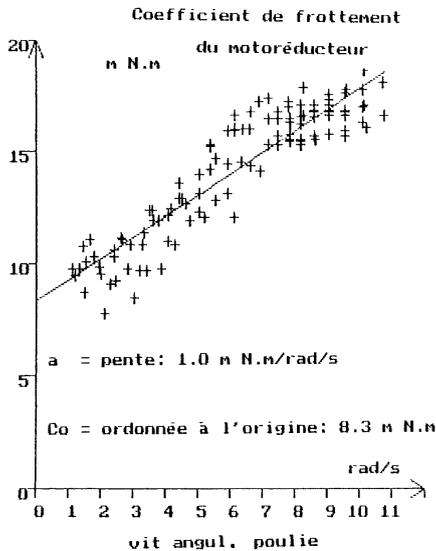
Les courbes $M_u = f(I)$ ont toutes la même pente K_u à vitesse constante mais l'ordonnée à l'origine dépend de la vitesse.

Remarque : sans réducteur

$$\alpha = 0 \rightarrow C_r = 1 \rightarrow K_u = K$$

alors $M_u = f(I)$ et $Mf(I)$ ont la même pente.

10. COEFFICIENT DE FROTTEMENT



$$C = K_u I - M_u = \beta/\omega/(\alpha + 1)$$

On fixe M_u en faisant enrouler le fil sur une poulie de diamètre constant et on fait varier la vitesse de rotation ω en demandant au logiciel d'envoyer une impulsion à l'alimentation du moteur auxiliaire à chaque mesure.

C est une fonction pratiquement linéaire de ω

$$C = a\omega + C_o$$

C_o couple de frottement solide

$a\omega$ couple de frottements visqueux

11. ÉQUATIONS DES COURBES DE RENDEMENT

A vitesse de rotation constante, expressions des rendements en fonction du couple utile.

Nous avons vu comme conséquence de la loi de Laplace qu'à la sortie du moteur, c'est-à-dire en entrée de réducteur le couple électromagnétique vaut : $M = K I$.

D'autre part en sortie de réducteur le couple utile a pour expression : $M_u = K_u I - C$.

On calcule alors :

– rendement électrique : $R_e = P_m/P_e = E'/U = 1/(1 + R/E' \cdot I)$

$$R_e = 1 / \left[1 + (M_u + C) \cdot R / (E' K_u) \right]$$

– rendement mécanique : $R_m = P_u/P_m = M_u/M C_r$

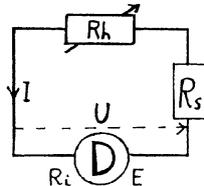
$$R_m = K_u M_u / \left[K C_r (M_u + C) \right]$$

– rendement général : $R_g = R_e \cdot R_m$

12. ÉTUDE DU DIPÔLE FONCTIONNANT EN GÉNÉRATEUR

Lorsque la masse descend, elle entraîne le «moteur» qui se comporte alors comme une génératrice de courant continu, c'est une dynamo qui débite dans un rhéostat Rh.

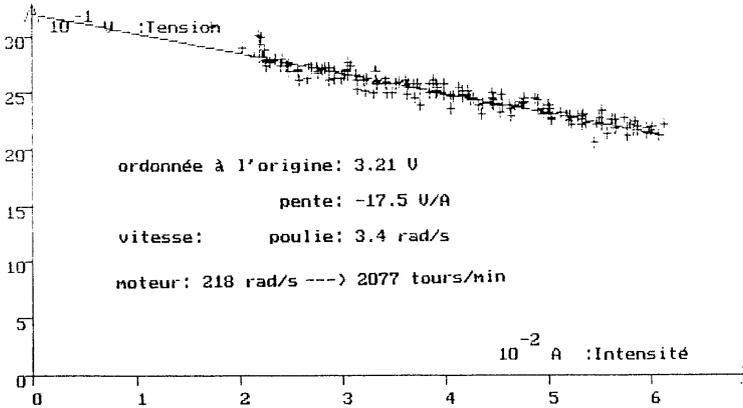
En commandant par ordinateur la valeur de Rh on peut réguler la vitesse de rotation.



Loi d'Ohm

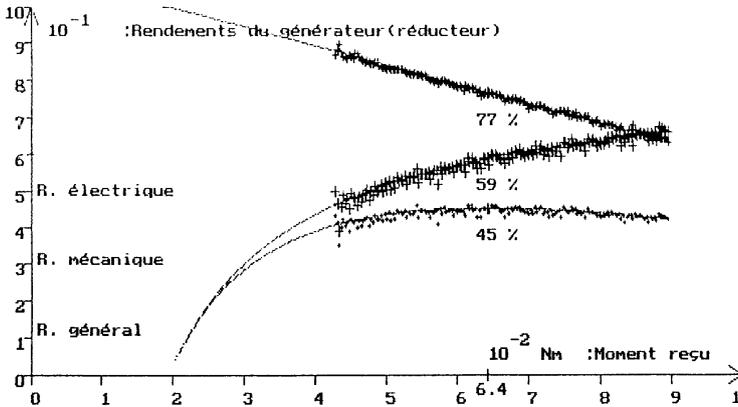
A vitesse constante la caractéristique de la génératrice est une droite :

$$U = E - R_i \cdot I$$



Courbes de rendement

Elles sont analogues à celles du moteur mais pour entraîner la dynamo il faut un couple minimum supérieur au couple de frottements statiques.



13. CARACTÉRISTIQUES DU MOTEUR DONNÉES PAR LE CONSTRUCTEUR

FEM à 1000 t/min 1,6 V donc $E'/\omega_1 = 15,3 \cdot 10^{-3}$ S.I

Constante du couple moteur : $15,5 \cdot 10^{-3}$ Nm/A

Résistance du bobinage : $R_1 = 20,8 \Omega$

Inertie du rotor : $I = 2,1 \cdot 10^{-7}$ kgm²

Sans régulation

La vitesse angulaire du cône varie de 3 à 7 rad/s pendant la durée de l'expérience soit environ un minute.

Accélération du moteur : $d\omega_1/dt = 64 \cdot (7 - 3)/60 = 4 \text{ rad/s}^2$

Le couple d'inertie $I \cdot d\omega_1 / dt = 8 \cdot 10^{-7} \text{ Nm}$ est négligeable devant le couple électromagnétique qui est alors compris entre $5 \cdot 10^{-4}$ et $20 \cdot 10^{-4} \text{ Nm}$.

Inductance du bobinage : $L = 0,9 \text{ mH}$.

Le courant variant de $4 \cdot 10^{-2}$ à $11 \cdot 10^{-2}$ en une minute, la f.é.m. induite $L \cdot di/dt$ est de l'ordre de 10^{-6} volts donc négligeable devant la f.é.m. du moteur.

Le logiciel «**MOTEUR**»
accompagné d'un fascicule d'utilisation est édité par **la MAFPEN**
de l'Académie d'Aix-Marseille.

Les possibilités de ce logiciel, axé sur les travaux pratiques, et particulièrement adapté aux nouveaux programmes des classes de premières scientifiques, sont parues dans le B.U.P. n° 745 (juin 1992).

Pour tout renseignement s'adresser à :