

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

29/88

2ea

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

## THEME

ETUDE DE FREINAGE ELECTRIQUE  
DU MOTEUR A COURANT CONTINU  
ALIMENTE PAR UN HACHEUR

PROPOSÉ PAR :

MR. O. TOUHAMI

O. MAAZI

ETUDIÉ PAR :

KAMEL DERMOUNE

TAYEB GOZIM

DIRIGE PAR :

MR. O. TOUHAMI

A. MAAZI

PROMOTION : JUIN 1988

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

# THEME

ETUDE DE FREINAGE ELECTRIQUE  
DU MOTEUR A COURANT CONTINU  
ALIMENTE PAR UN HACHEUR

PROPOSÉ PAR :

MR. O. TOUHAMI  
O. MAAZI

ETUDIÉ PAR :

KAMEL DERMOUNE  
TAYEB GOZIM

DIRIGE PAR :

MR. O. TOUHAMI  
A. MAAZI

PROMOTION : JUIN 1988



## TABLE DES MATIERES

	NOMENCLATURE DES SYMBOLES	
	INTRODUCTION .....	1
	RAPPEL .....	2
1	Fonctionnement du hacheur utilisé en traction électrique.....	2
2	Hacheur série.....	5
2.1	Conduction continue.....	5
2.2	Conduction discontinue.....	8
3	Hacheur parallèle.....	11
	Chapitre I IDENTIFICATION DE LA MACHINE UTILISEE.....	14
I.1	Mesure de résistances.....	14
I.1.1	Résistance d'induit.....	15
I.1.2	Résistance de l'inducteur série.....	15
I.2	Mesure des inductances.....	15
I.3	Calcul du moment d'inertie.....	17
I.3.1	Détermination des pertes mécanique.....	17
I.3.2	Calcul de la constante de temps mécanique.....	19
I.4	Relation entre $K\phi$ et le courant d'excitation.....	20
I.4.1	Moteur à excitation séparée.....	20
I.4.2	Moteur à excitation série.....	22
	Chapitre II FREINAGE RHEOSTATIQUE.....	25
II.1	Etude théorique.....	25
II.1.1	Principe de fonctionnement.....	26
II.1.2	Critère de stabilité.....	27
II.1.3	Choix de la résistance de freinage.....	28
II.1.4	Détermination du temps de freinage.....	29



II.2	Résultats expérimentaux.....	30
II.2.1	Moteur à excitation séparée.....	30
II.2.2	Moteur à excitation série.....	48
II.3	Comparaison des résultats expérimentaux.....	63
	Chapitre III FREINAGE PAR RECUPERATION.....	64
III.1	Etude théorique .....	64
III.1.1	Principe de fonctionnement.....	64
III.1.2	Critère de stabilité.....	66
III.2	Résultats expérimentaux.....	67
III.3	Comparaison des résultats expérimentaux.....	70
	CONCLUSION.....	71
	Annexe .....	72
	Bibliographie .....	79



## REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier Mr.O.Touhami et Mr.A.Maazi pour avoir accepté de nous encadrer et pour les conseils et les encouragements qu'il nous ont prodigué.

Nos sincères remerciements à Melle. Chaib Naçéra.

Nous remercions également les membres de la sonelgaz et plus particulièrement:

- Mr. Barbache
- Mme. zaoui
- Mr. Hamouni
- Mr. Hammidouche
- Melle Toumi

Toute notre gratitude à nos enseignants qui nous ont guidé au cours de notre formation.

K.Dermourie et T.Gozim

## DEDICACES

Je dédie ce modeste travail:

- A la mémoire de cher père
- A ma très chère mère  
pour sa compréhension et ses sacrifices consentés
- A mes frères et à ma belle soeur  
pour l'affection qu'ils m'ont donné
- A toute ma famille grand et petit
- A mes amis
- A mon petit neveu ACHOUR
- A mon très cher ABDERRAHMANE
- A tous ceux qui suivent le droit chemin
- A ma soeur, mon beau frere et leurs enfants

D.Kamel.



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# NOMENCLATURE

## NOMENCLATURE DES SYMBOLES

- E' : F.c.e.m du moteur
- D : Diode de roue libre
- E : F.e.m du moteur
- U : Tension d'alimentation
- L ,L : Inductances de la self
- R : Résistance de la self lissage
- R : Résistance de l'enroulement série
- R : Résistance de l'induit
- $\beta$  : Rapport cyclique dans le cas de la conduction discontinue
- U : Tension aux bornes du hacheur
- t : temps de freinage
- C : Constante de temps
- $\alpha$  : Rapport cyclique
- $\theta$  : Durée de conduction du hacheur
- C : Couple résistant
- C : Couple moteur
- f : Coefficient de frottement
- J : Moment d'inertie
- $\phi$  : Flux d'excitation du moteur
- S : Constante reliant le courant  $I_{max}$  au courant  $I_{min}$  dans la méthode A.C.E.C
- R : Résistance de freinage
- L : Inductance du moteur
- $P_m$  : Pertes mécaniques de la machine
- I : Courant de la self



# **INTRODUCTION**

INTRODUCTION

Il est nécessaire de réduire le temps de freinage d'un moteur à courant continu pour des raisons économiques.

Une modernisation des dispositifs de traction (ou freinage), faisant largement appel à l'électronique de puissance, peut introduire une diminution de temps par rapport aux anciens systèmes (systèmes mécaniques dont les organes de freinage s'usent rapidement. ex:patins...)

Pour le freinage électrique du moteur à courant continu,nous avons fait appel à un dispositif électronique que l'on appelle hacheur(découpeur de courant continu).

L'avantage d'un tel système consiste à maintenir constant le courant dans l'induit pendant le freinage.Ce principe sert à faire fonctionner les moteurs de traction en-génératrices avec une excitation convenable et de les faire débiter:

\_ Soit sur des résistances placées parallèlement aux bornes du hacheur;c'est le freinage rhéostatique.

\_ Soit sur la ligne de contact,donc sur le réseau d'alimentation ou sur les autres moteurs opérant en traction dans le même secteur;c'est le freinage par récupération.



**RAPPEL**

## HACHEUR

Le hacheur est un interrupteur électronique qui transforme une tension continue fixe en une tension continue réglable permettant la commande d'un moteur à courant continu.

Suivant le mode de branchement utilisé, il peut être abaisseur de tension s'il est placé en série ou élévateur de tension s'il est placé en parallèle.

Le hacheur est constitué soit par des thyristors ou soit par des transistors. Il fonctionne avec l'un des trois procédés fondamentaux suivants:

- Fréquence fixe (  $f = \frac{1}{T}$  ), temps de conduction  $\theta$  variable.
- Fréquence variable (  $f = \frac{1}{T}$  ), temps de conduction  $\theta$  variable.
- Fréquence variable (  $f = \frac{1}{T}$  ), temps de conduction  $\theta$  fixe.

Dans notre étude, on se limite au premier cas car celui-ci est le plus utilisé dans la pratique.

### I.1 FONCTIONNEMENT DU HACHEUR UTILISE EN TRACTION ELECTRIQUE

On peut bloquer un thyristor par une décharge de condensateur, à la condition que le thyristor reste sous tension inverse pendant un temps supérieur au temps de désamorçage ( ou récupération ).



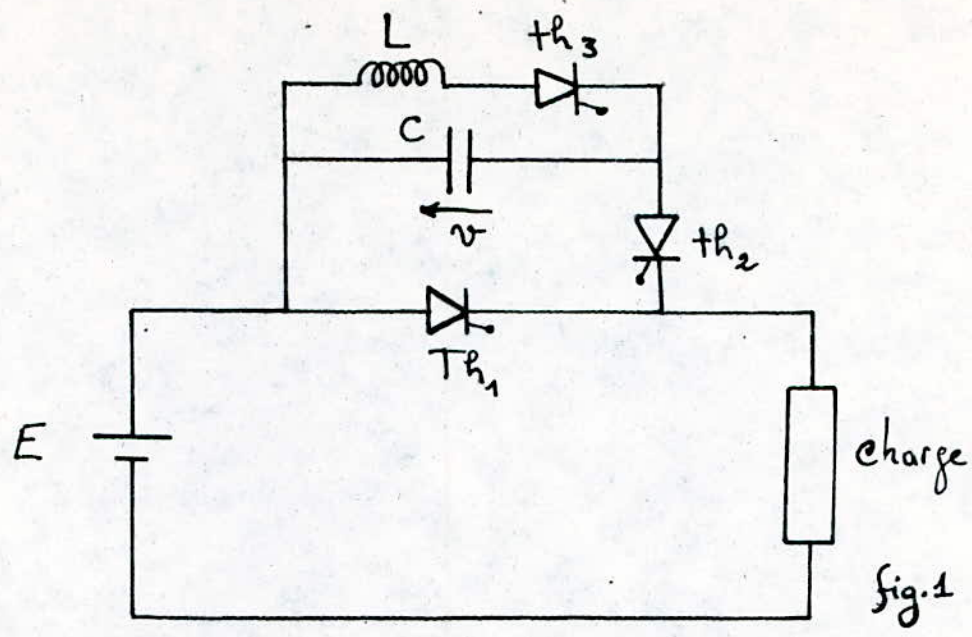


fig.1

a) première mise sous-tension: au départ, le condensateur (C) est déchargé, il ne faut pas allumer le thyristor principal ( $th_1$ ) car on ne pourrait plus le bloquer. il faut allumer le thyristor auxilliaire ( $th_2$ ), ce qui donne dans la charge un courant très bref, et charge le condensateur (C) à une tension  $V = + E$ .

b) on donne une impulsion à la gachette du thyristor ( $th_3$ ), le condensateur (C) a alors tendance à se décharger à travers l'Inductance (L), ce qui donne le circuit suivant:

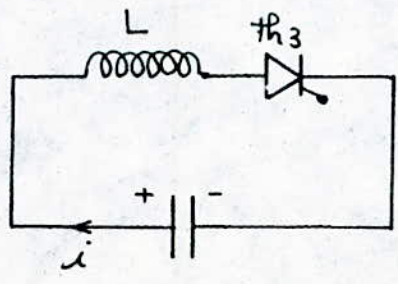


fig.2

d'où l'équation:

$$L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = 0$$

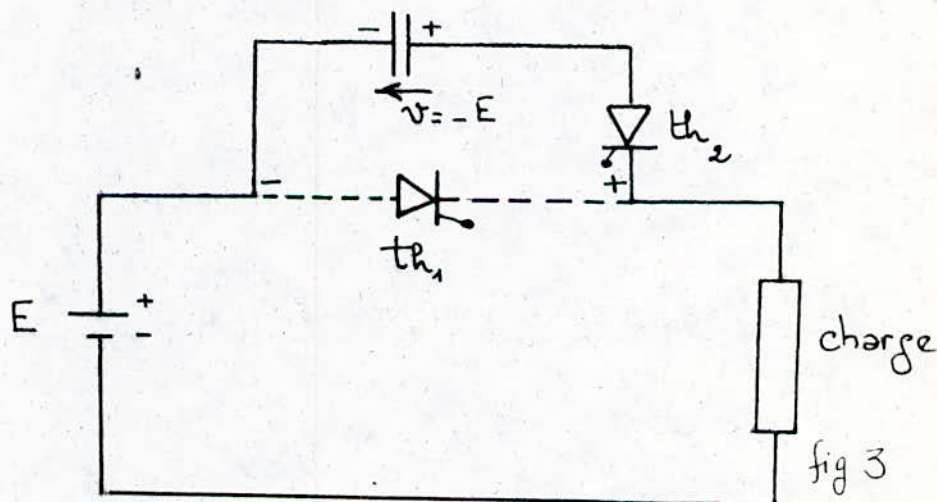
On pose  $i = c \frac{dv}{dt}$

$$d'où \quad LC \frac{d^2v}{dt^2} + v = 0 \Rightarrow \frac{d^2v}{dt^2} = - \frac{v}{LC}$$

L'intégrale de cette équation est de la forme

$$V = V_0 \cos ( \omega t + \varphi ) \quad \text{avec} \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Au bout d'une demi-période, le condensateur se retrouve chargé dans l'autre sens, sous une tension égale ( en valeur absolue ) à  $E$  (  $|V| \approx E$  ) ou un peu inférieure.  $Th_3$  se bloque de lui même car la tension à ses bornes est négative.



On peut donc amorcer ce thyristor principal  $Th_1$ , ce qui donne un courant constant dans la charge.

Pour bloquer  $Th_1$ , il suffit tout simplement d'allumer  $Th_2$ ; et le cycle recommence .



## 2 HACHEUR SERIE:

Pour que la source de tension  $E$  puisse lui fournir de la puissance, il faut que la tension  $E'$  soit inférieure à  $E$ .

soit le montage suivant:

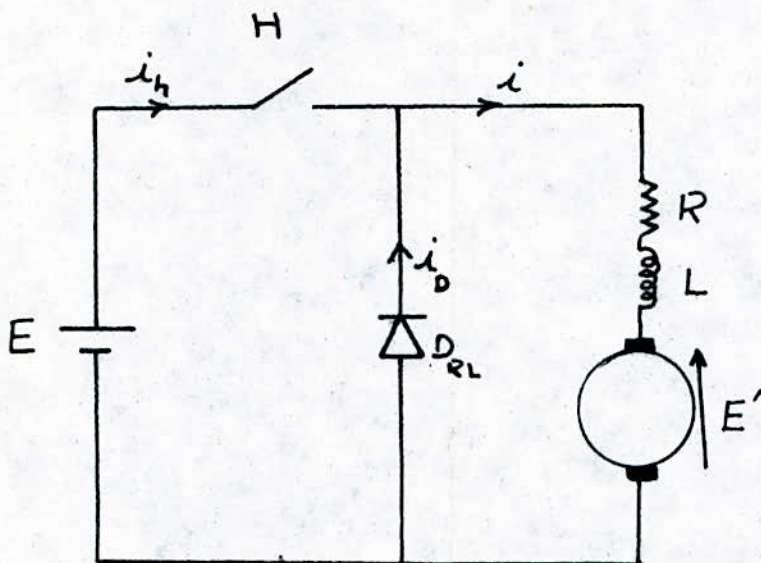


fig 4:

Le montage présente deux modes de conductions:

- Conduction Continue
- Conduction Discontinue

### 2.1 Conduction Continue:

Dans le cas où le courant n'est pas égal à zéro, il sera compris entre  $I_{\min} < I_{\text{moy}} < I_{\max}$ .

d'où l'équation générale:

$$E = E' + R i + L \frac{di}{dt}$$

on intègre les deux membres pendant la durée d'une période.

$$E dt = E' dt + R i dt + L di$$

$$\int_0^T E dt = \int_0^T E' dt + R i \int_0^T dt + L \int_{I_{\min}}^{I_{\min}} di$$

$$\Rightarrow U_c T = E' T + R I T$$

$$\Rightarrow E \theta = (E' + R I) T$$

$$I_{\text{moy}} = \frac{E \alpha - E'}{R}$$

Donc la tension aux bornes de la charge est:

$$U_c = E \alpha = R I_{\text{moy}} + E'$$

Ondulation du courant:

Pour simplifier les calculs nous supposons que  $L\omega$  soit très grand devant la résistance  $R$ .

$0 < t < \theta$ : Hacheur fermé, Diode bloquée

on a:

$$E = E' + L \frac{di}{dt}$$

$$\Rightarrow \frac{E - E'\theta}{L} = i(\theta) - i(0) = I_{\max} - I_{\min}$$

$$\text{donc } I_{\max} = \frac{E - E'\theta}{L} + I_{\min}$$

$0 < t < T$ : Hacheur ouvert, Diode conductrice

$$0 = E' + L \frac{di}{dt}$$

$$\Rightarrow -\frac{E'}{L}(T - \theta) = i(T) - i(\theta) = I_{\min} - I_{\max}$$

$$\Rightarrow I_{\min} = -\frac{E'}{L}(T - \theta) + I_{\max}$$



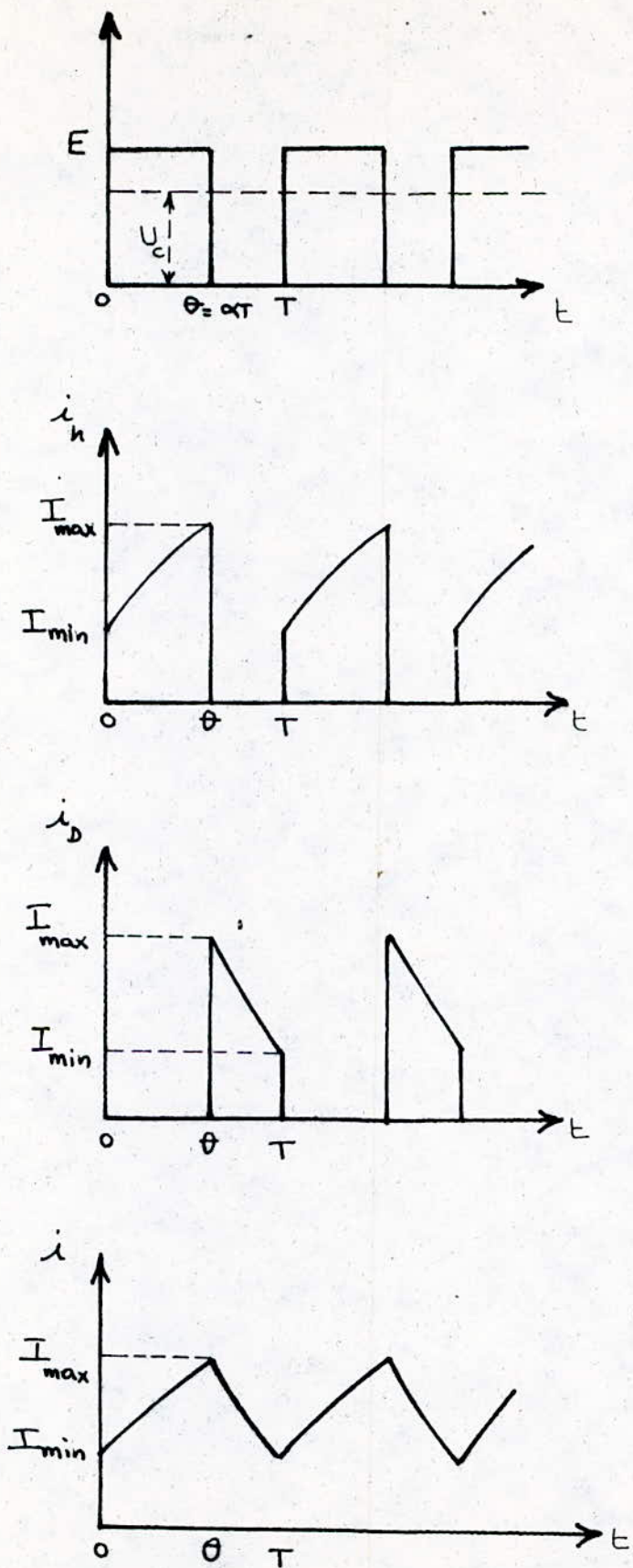


fig 5

## 2.2 Conduction discontinue:

La conduction discontinue a lieu lorsque l'inductance de lissage est faible et que la période est grande.

Résolution de l'équation:

$0 < t < \alpha T$ : Hacheur fermé, Diode bloquée.

on a l'équation:

$$E - E' = L \frac{di}{dt}$$

$$\frac{E - E'}{L} \theta = i(\theta) - i(0)$$

$$\Rightarrow I_{\max} = \frac{E - E'}{L} \theta = \frac{E - E'}{L} \alpha T \quad (1)$$

$\alpha T < t < \beta T$ : Hacheur ouvert, Diode conductrice

on a:

$$E' = -L \frac{di}{dt}$$

$$\Rightarrow \frac{E'}{L} (t - \alpha T) = i(t) - i(\alpha T)$$

Comme  $i(\alpha T) = I_{\max}$

$$i(t) = -\frac{E'}{L} (t - \alpha T) + I_{\max}$$

$$\text{et comme } i(\beta T) = 0 \Rightarrow i(\alpha T) = I_{\max} = \frac{E'}{L} (\beta - \alpha) T \quad (2)$$

$\beta T < t < T$ :

Le courant est nul, tandis que la tension aux bornes de la charge est égale à la f.c.e.m  $E'$ .



donc  $i = 0$

$$E - E' = 0 \Rightarrow E = E' = U.$$

Il est possible de calculer la valeur moyenne de la tension ( $U_{\text{moy}} = U_c$ ) aux bornes de la charge.

$$U_c T = E \alpha T + (1 - \beta) E' T$$

$$U_c = E \alpha + (1 - \beta) E' = E'$$

Comme on a négligé la résistance  $R$ , la valeur moyenne de la tension est égale à la f.c.e.m.  $E'$ :

On peut calculer la valeur moyenne du courant puisque le graphe est un triangle.

$$I_c T = (I_{\text{max}} \beta T) / 2 = \frac{\beta(E - E') \theta T}{2L}$$

$$\Rightarrow I_c = (\beta/2) \cdot \frac{E - E'}{L} \cdot \theta.$$

On sait qu'à partir de la relation (1) et (2) on tire:

$$\Delta I = I_{\text{max}} = \frac{E - E'}{L} \alpha T = E' (\beta - \alpha) T$$

$$\Rightarrow \beta = \frac{E \alpha}{E'}$$

donc  $I_c$  devient de la forme

$$I_c = \frac{E \alpha}{E'} \cdot \frac{E - E'}{2L} \alpha T = \frac{E \alpha^2 T}{2L} \left( \frac{E}{E'} - 1 \right)$$

On constate que pour  $I_c = 0$  on a  $E = E'$ .

Donc en régime discontinu la courbe représentative est une hyperbole qui passe par le point:

$$I_c = 0, E = E'$$

Le régime passe de l'état discontinu à l'état continu pour

$$\beta T = T, \text{ soit } E' = E \alpha$$

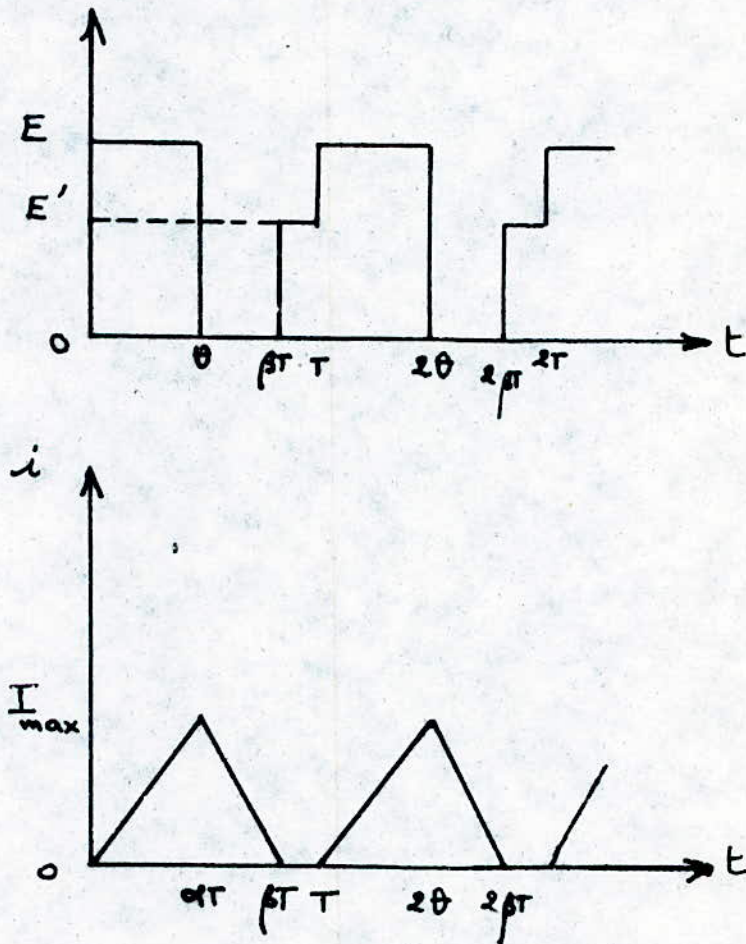


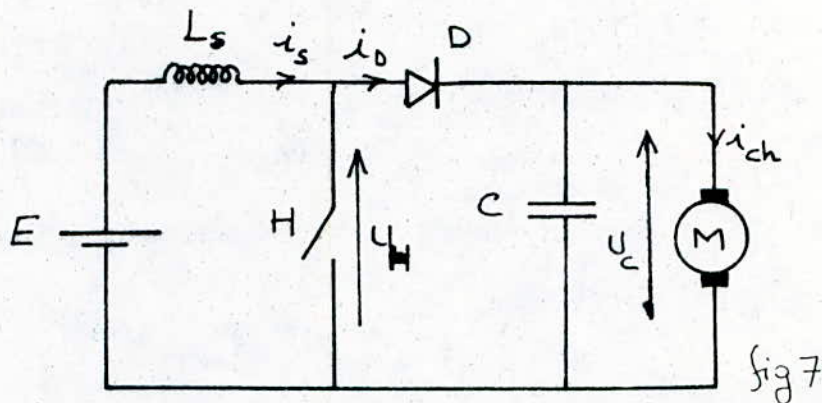
fig 6



### 3 HACHEUR PARALLELE

Le hacheur parallèle consiste à mettre périodiquement en court circuit la charge (Moteur) pendant un intervalle de temps bien déterminé  $\theta = \alpha T$ .

Soit le montage suivant:



Pour assurer le survoltage du hacheur il faut une capacité très grande en parallèle avec la charge.

La diode (D) empêche le condensateur (C) de se décharger dans le côté amont du circuit pendant la durée de conduction du hacheur .

$0 < T < \theta$ : H fermé, D bloquée

$$U_H = 0, i_D = 0$$

à l'entrée du circuit  $E = -L_s (di_s / dt)$

d'où l'expression du courant est  $i_s(t) = \frac{E}{L_s} t + I_{\min}$

à  $t = 0 \implies i_s(0) = I_{\min}$

La valeur maximale du courant quand  $t = \theta$  :

$$i_s(\theta) = I_{\max} = \frac{E}{L_s} \theta + I_{\min}$$

$0 < t < T$ : H ouvert,

LA continuité du courant dans la bobine d'inductance  $L_s$  impose la mise en conduction de la diode D ( $i_{ch} = i_D$ )

Donc l'énergie emmagasinée dans l'inductance  $L_s$  se divise dans le condensateur et dans la charge.

D'où l'expression de la tension d'entrée est:

$$E = L \left( \frac{di_s}{dt} \right) + U_c$$

$$(U_c - E) dt = -L di_s$$

$$\Rightarrow i_s(t) = I_{\max} + \frac{E - U_c}{L} (t - \alpha T)$$

$$\text{On sait que } I_{\max} = \frac{E \theta}{L_s} + I_{\min} \Rightarrow I_{\min} - I_{\max} = -\frac{E \theta}{L_s}$$

$$\text{d'où } (U_c - E)(T - \theta) = -L(I_{\min} - I_{\max}) = -\frac{E \theta}{L_s}$$

$$\Rightarrow (U_c - E)(T - \theta) = E \theta$$

$$\Rightarrow (U_c - E)(1 - \alpha) = E \alpha$$

$$\Rightarrow U_c - E = U_c \alpha$$

$$\Rightarrow E = U_c (1 - \alpha)$$

$$\Rightarrow U_c = \frac{E}{1 - \alpha}$$

Ainsi nous pouvons conclure que le hacheur parallèle est équivalent à un transformateur à courant continu élévateur de tension.

Une des particularités du hacheur survolteur qui consiste à freiner le moteur rhéostatiquement ou par récupération, fait l'objet de notre étude dans les trois chapitres suivants.



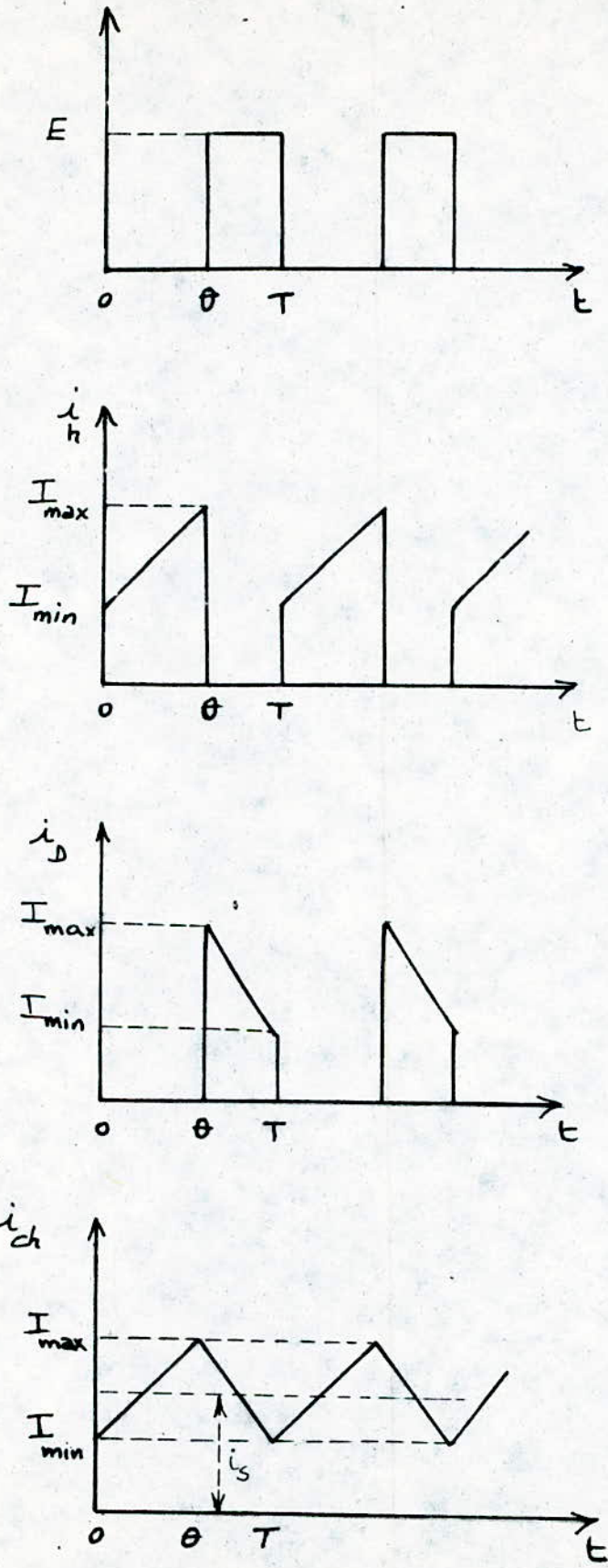


fig. 8



# CHAPITRE

## I.



## I. IDENTIFICATION DE LA MACHINE UTILISEE

Dans cette partie, nous procédons à l'identification de la machine à courant continu.

La plaque signalétique nous donne les caractéristiques suivantes:

Tension:	$U_n = 120V$
Vitesse:	$N_n = 1425 \text{ Tr/mn}$
Puissance:	$P_n = 3,8 \text{ Ch}$
Courant d'induit:	$I_n = 29 \text{ A}$
Courant d'excitation:	$J_n = 0,8 \text{ A}$

Cette machine est accouplée à une génératrice à courant continu servant de charge variable.

Deux séries d'essais nous ont permis de déterminer les paramètres du modèle établi (essai mécanique- Essai électrique).

### I.1 MESURE DE RESISTANCES:

Le montage de principe est le suivant:

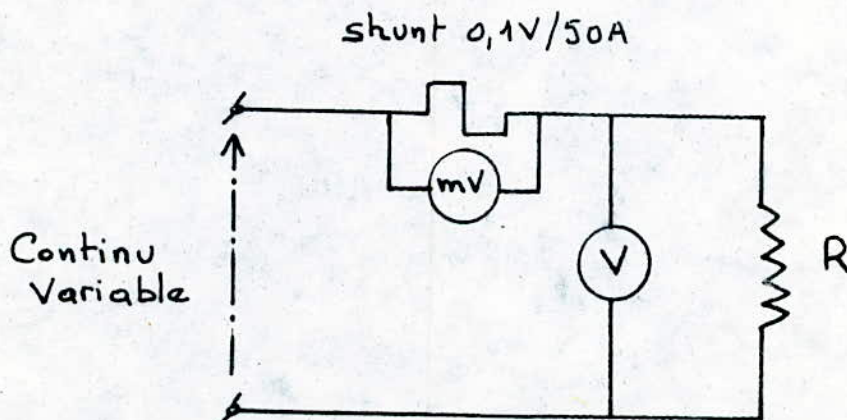


fig I.1

### I.1.1 RESISTANCE D'INDUIT:

La valeur de la résistance d'induit est déterminée à partir de plusieurs valeurs de courant et de tension pour différentes positions de l'arbre de l'induit.

La valeur moyenne s'évalue à :

$$R_i = 0.45 \Omega$$

### I.1.2 RESISTANCE DE L'INDUCTEUR SERIE:

La valeur moyenne de la résistance de l'enroulement inducteur série est égale à:

$$R_s = 0.08 \Omega$$

### I.1.3 MESURE DES INDUCTANCES:

Connaissant l'expression de l'énergie électromagnétique emmagasinée à tout instant par la self ( $W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$ ), il est possible d'en déduire l'inductance des enroulements de la machine, l'utilisation de ce principe pour la détermination des inductances est comme suit:

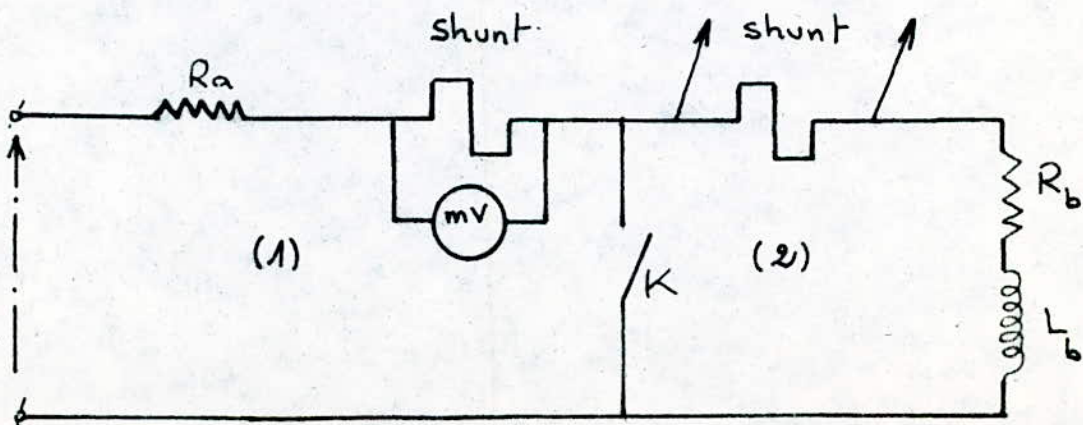


fig I. 2



La précaution préliminaire dont on a tenu compte est de limiter notre courant à 10A ( courant admissible par le bobinage ) dans la maille n°1, tout en ayant l'interrupteur K fermé.

Cette précaution étant prise, on ne touche plus à notre tension, puis on ouvre K, la source débite sur la bobine de résistance  $R_b$  et d'inductance  $L_b$ .

A la fin l'énergie emmagasinée par la bobine se dissipe dans la maille n°2.

L'équation de la maille n°2

$$R_b i + L_b \frac{di}{dt} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{di}{dt} + \frac{R_b}{L_b} i = 0$$

La solution de cette équation différentielle est:

$$i(t) = I_0 e^{-t/\tau} \quad (1)$$

Avec  $\tau$ : la constante de temps;  $\tau = L_b/R_b$

L'utilisation de l'oscilloscope nous a permis de déterminer la constante de temps  $\tau$ .

Pour un temps  $t = \tau$  l'équation (1) s'écrit:

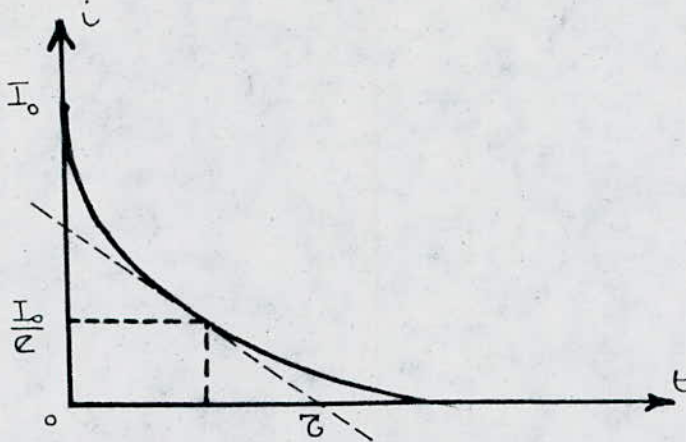
$$i(\tau) = I_1 = I_0 / e$$

et pour  $t = 0$   $i(0) = I_0$

On fait Le rapport de ces deux dernières équations:

$$i(\tau)/i(0) = I_1/I_0 = (1/e).100 = 36,78\% \simeq 37\%$$

C'est pour un courant de 37% de  $I_0$ , que nous avons déterminé la valeur de la constante de temps  $\tau$ .



Dans notre cas la constante de temps  $\tau$  s'évalue à 34,6ms pour l'induit et pour l'enroulement série  $\tau = 76$ ms.

\* Inductance d'induit:

$$L_i = \tau \cdot R_i = 34,6 \times 0,45 = 16,57 \text{ mH}$$

\* Inductance de l'inducteur série:

$$L_s = \tau \cdot R_s = 76 \times 0,08 = 6,08 \text{ mH}$$

### I.3 CALCUL DU MOMENT D'INERTIE:

#### I.3.1 DETERMINATION DES PERTES MECANIQUES:

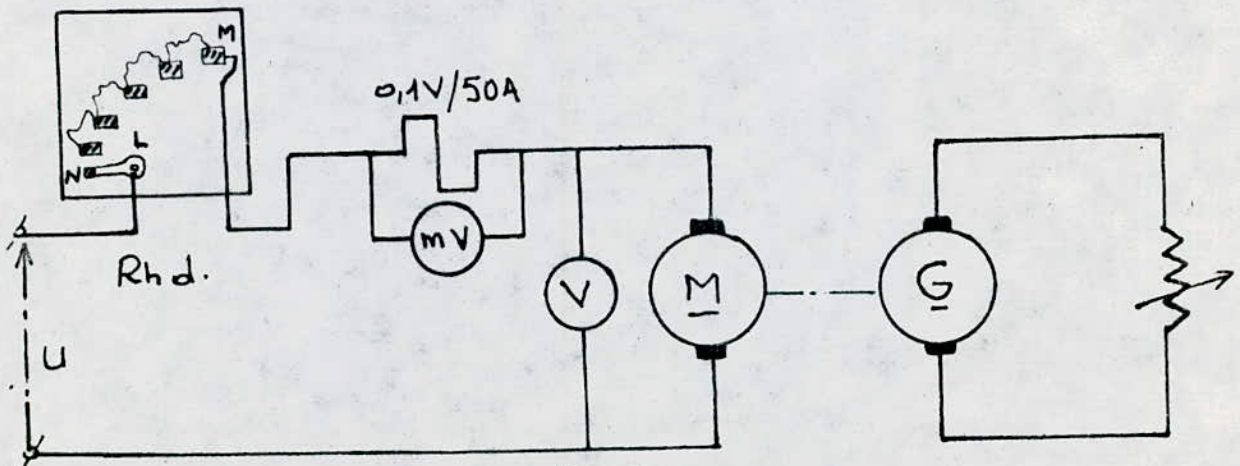


fig I.4



Rh : Rhéostat de démarrage

L : Ligne

E : Excitation

M : Moteur

Dans cet essai, nous avons utilisé notre machine en excitation série, et la génératrice débitant dans une charge résistive. En faisant varier la charge résistive, nous avons relevé la tension  $U$  et le courant  $I$  correspondant.

tension $U(V)$	84	70	65
Courant $I(A)$	22,5	20,5	19,5
Puissance $P_0(W)$ $P_0 = U \cdot I$	1890	1435	1267,5
$U^2(V^2)$	7056	4900	4225

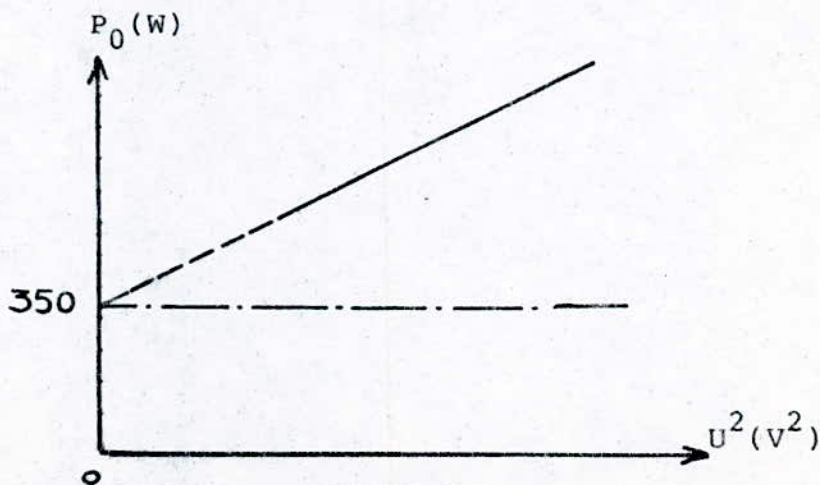


fig. I.5

Après avoir tracé la courbe  $P_0 (U^2)$  nous avons fait une extrapolation pour obtenir les pertes mécaniques.

$$P_m = 350 \text{ W}$$

### I.3.2 CALCUL DE LA CONSTANTE DE TEMPS MECANIQUE:

On fait tourner notre moteur à une vitesse de 1000 tr/mn puis on ouvre le circuit, ce qui veut dire que le couple moteur est égal au couple résistant; c'est ce qui nous a permis d'écrire l'équation mécanique suivante:

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = 0$$

$$\text{soit } \frac{d\Omega}{dt} + \frac{f}{J} dt = 0$$

La solution de cette équation est de la forme:

$$\Omega = A \cdot e^{-t/C_m}$$

Avec  $C_m = \frac{J}{f}$  : Constante de temps mécanique

On a pour un temps  $t = 0$ ,  $\Omega = \Omega_0$

d'où

$$\Omega = \Omega_0 \cdot e^{-t/C_m} \quad (2)$$

Nous avons pris deux points de la caractéristique  $\Omega(t)$  à l'aide d'une table traçante et nous avons relevé le temps de freinage pour chaque vitesse.

$$\Omega_1 = 1350 \text{ tr/mn} = 22,5 \text{ tr/s} \quad t_{f1} = 0,54 \text{ s}$$

$$\Omega_2 = 875 \text{ tr/mn} = 14,58 \text{ tr/s} \quad t_{f2} = 0,6 \text{ s}$$



de l'équation (2) on a:

$$\tau_m = (t_{f2} - t_{f1}) / \ln(\Omega_1 / \Omega_2)$$

$$\Rightarrow \tau_m = (0,6 - 0,54) / \ln(22,5 / 14,58) = 0,138 \text{ s}$$

f: le coefficient de frottement, on peut l'assimiler à  $\frac{P_m}{(\frac{\Omega}{2n})^2}$

$$\text{d'où } f = \frac{350}{\left(\frac{1425 \times 2 \pi}{60 \times 2}\right)^2} = 0,063 \text{ kg m}^2/\text{s}$$

de l'équation  $\tau_m = \frac{J}{f}$  on tire le moment d'inertie J

$$J = \tau_m \cdot f = 0,063 \times 0,138 = 0,01 \text{ kg m}^2.$$

En conclusion:

$$\tau_m = 0,138 \text{ s}$$

$$J = 0,01 \text{ kg m}^2$$

$$f = 0,063 \text{ kg m}^2/\text{s}$$

#### I.4 RELATION ENTRE $K\phi$ ET LE COURANT D'EXCITATION

##### I.4.1 MOTEUR A EXCITATION SEPARÉE:

Le moteur a été utilisé à vide avec un courant d'excitation constant  $J = 0,6 \text{ A}$

Soit le tableau de valeurs:

$E(V)$	120	110	100	90	80	70	60	50
$N(\text{tr/mn})$	1350	1230	1130	1015	900	800	680	575

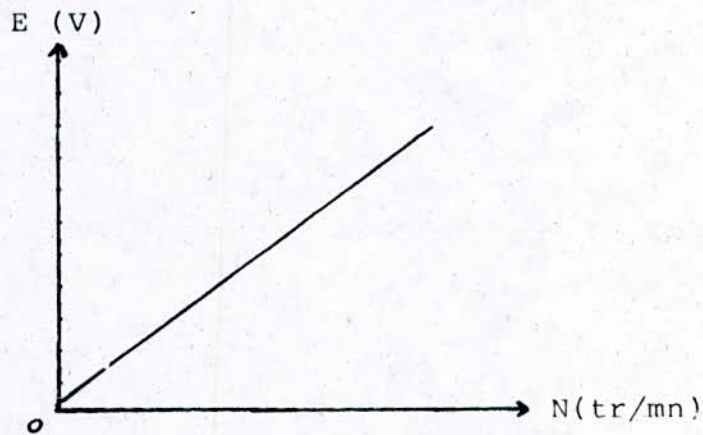


fig. I.6

Nous remarquons que la f.e.m est proportionnelle au courant d'excitation et le coefficient de proportionnalité est déterminé de l'équation suivante:

$$K = \frac{110 - 60}{1230 - 680} = 0,09$$

avec  $K = K\phi$

$K = \text{constante}$

$\phi = \text{flux d'excitation}$

Pour la caractéristique  $E = f(N)$  (voir annexe fig. A.1)



#### I.4.2 MOTEUR A EXCITATION SERIE:

Le moteur à excitation série n'est pas utilisable à vide alors pour avoir la caractéristique de magnétisation nous sommes obligés d'utiliser le moteur en génératrice entraîné à une vitesse constante de 1500 tr/mn et l'excitation est créée par l'enroulement série.

Le schéma de montage est le suivant:

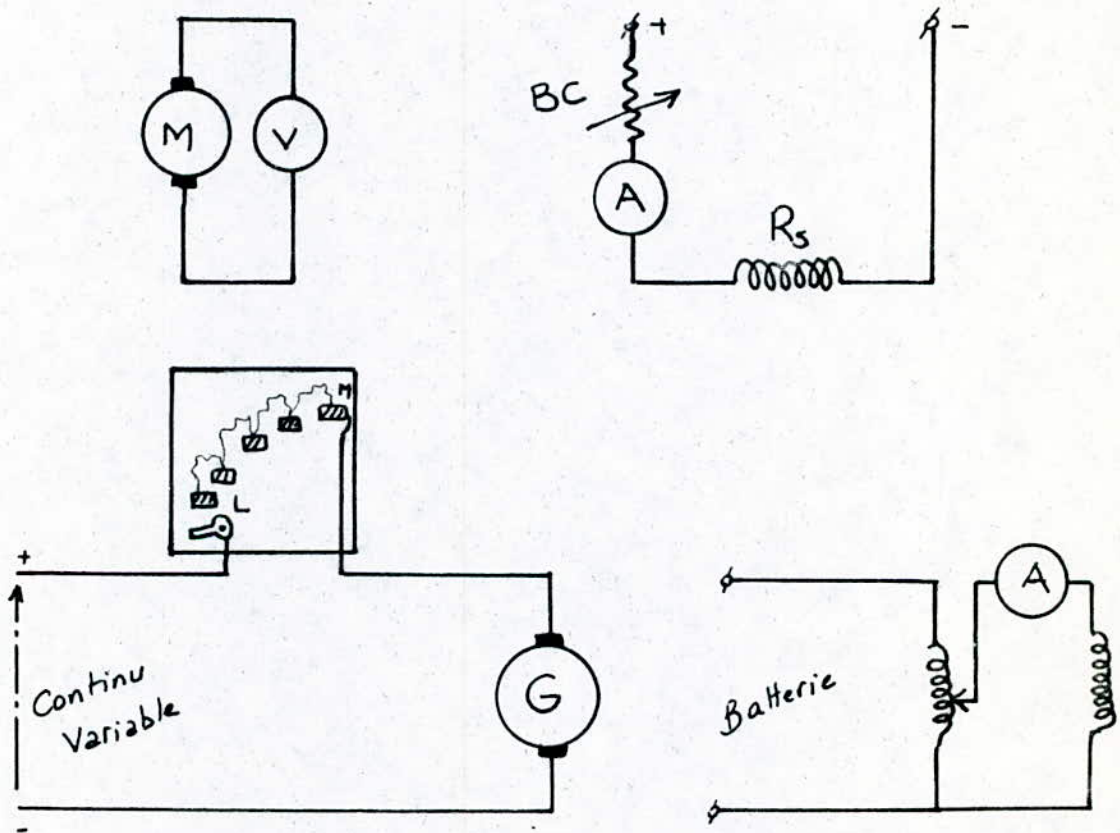


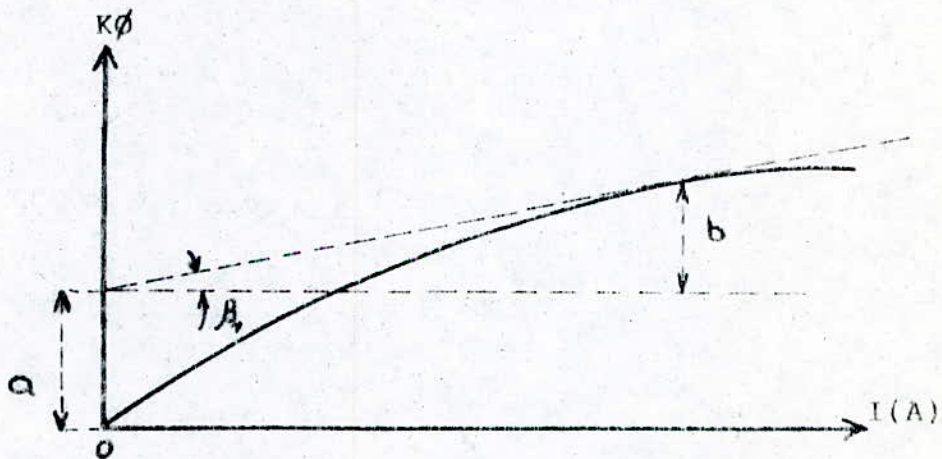
fig 1.7:

G: Génératrice utilisée en moteur à excitation séparée

M. Moteur utilisé en génératrice

BC: Boite de charge

$E(v)$	28	38	48	58	67	75	82	87	92	97
$I(A)$	5	10	13	16,5	19	22	25	27,5	30	32,5
$K\phi$	0,0186	0,0253	0,0320	0,0386	0,0446	0,0500	0,0546	0,0580	0,0613	0,646



Le flux d'excitation dépend essentiellement du courant appelé par le moteur  $I$ .

Pour cette caractéristique, nous distinguerons trois parties bien distinctes:

- partie I: Le flux est proportionnel à  $I$ .
- partie II: Correspond au coude de saturation.
- partie III: Saturation.



Notre étude s'effectue sur la partie II.

Nous avons fait une approche pour déterminer une formulation mathématique du  $K\phi$  en fonction du courant I.

Par construction: ( voir fig. I.8 )

$$b = t_g \beta = 0,0286.$$

$$a = 0,036.$$

$$\text{d'où} \quad K\phi = 0,036 + 0,0286 I$$

A partir de ces données nous avons tracé les caractéristiques théoriques. voir annexe ( fig. A.2 et fig. A.3 )



**CHAPITRE**  
**II**



## II. FREINAGE RHEOSTATIQUE

### II.1 ETUDE THEORIQUE

Le freinage électrique sur des locomotives pour retenir des trains dans les longues distances, ou pour maintenir la vitesse sans applications des sabots de freinage (freinage de maintien) est très utilisé sur des lignes accidentées. Mais ce type de freinage se conçoit en conjugaison avec le *freinage* pneumatique car les déccélérations réalisées en traction par les mêmes moteurs sont de loin très insuffisantes pour obtenir l'arrêt complet dans des distances normales.

L'emploi du freinage rhéostatique à existation serie convient bien pour un freinage de maintien. C'est un système simple en ce sens qu'il ne nécessite pas de groupe special d'excitation. Cependant pour le freinage d'arrêt, il a été jusqu'ici peu utilisé à cause des caractéristiques Force (Vitesse) très raides (  $\frac{dF}{dV}$  important ). Quand au freinage rhéostatique avec excitation separée, Les inducteurs sont alimentés par une excitatrice entraînée par un moteur à vitesse sensiblement constante . Sa génératrice est donc à éxcitation constante; sa f.e.m E sera proportionnelle à la vitesse (à la réaction d'induit près). L'intensité sera, elle aussi proportionnelle à la vitesse.

### II.1.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT:

Le Moteur à courant continu fonctionnant en génératrice est caractérisé par une self  $L_i$  et d'une résistance  $R_i$  et d'une f.e.m.  $E$ .

Le hacheur  $H$  et la résistance de freinage  $R_f$  sont disposés comme l'indique la figure II.1

Le hacheur est manoeuvré a une fréquence  $f = \frac{1}{T}$ , reste fermé pendant un temps égal à  $\alpha T$ , avec le rapport cyclique  $\alpha$  compris entre zéro et un ( $0 < \alpha < 1$ ).

Pendant la fermeture du hacheur, la tension aux bornes de la résistance de freinage  $R_f$  est nulle, pendant son ouverture elle est égale à  $R_f \cdot I_m$  ( $I_m$ : courant moyen).

La valeur moyenne de cette tension, sur une période de hachage, vaut:

$$(U_{rf})_{\text{moy}} = I_{\text{moy}} \cdot R_f (1 - \alpha)$$

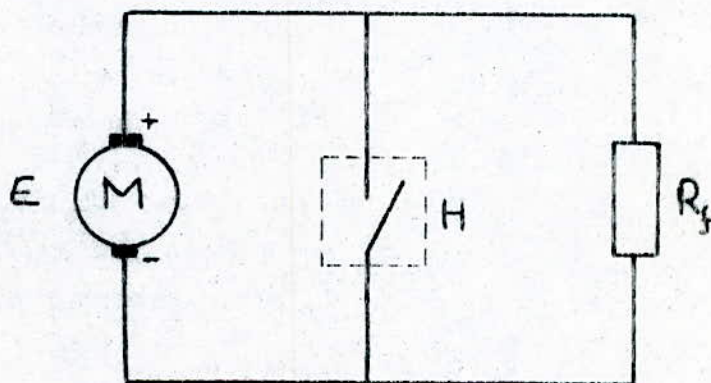


fig II.1 Schéma de principe du freinage rhéostatique avec hacheur.



Pour autant que  $(L_i / R_f) > T$ , tout se passe comme si la génératrice débitait sur une résistance de valeur  $R_f (1 - \alpha)$ . Ce dispositif permet de faire varier la valeur de la résistance équivalente du circuit d'une valeur nulle pour  $\alpha = 1$  à une valeur maximale égale à  $R_f$  pour  $\alpha = 0$ .

### II .1.2 CRITERE DE STABILITE:

On fait ce calcul pour le moteur à excitation serie seulement.

La relation entre le flux et le courant de la génératrice n'est pas linéaire à cause de la saturation du circuit magnétique.

Pour simplifier les calculs, on peut linéariser cette relation au point de fonctionnement, de la manière représentée à la fig.I.8

La f.e.m développée par la génératrice est égale à:

$$e = K\phi (I_{moy}) N = K N ( \phi (I_{moy}) ) = N( a + b I_{moy} )$$

le circuit est régi par les équations différentielles suivantes:

$$* \quad \text{à l'instant} \quad 0 < t < \alpha T; \quad H \text{ conduit}; \quad U_{rf} = 0$$

$$L_i (di_m / dt) + R_i i_m = N a + N b i_m$$

$$L_i (di_m / dt) + ( R_i - N b ) i_m = N a$$

qui a pour solution:

$$i_m = \frac{N a}{R_i - N b} + ( i_m - \frac{N a}{R_i - N b} ) e^{-t/\tau_1}$$

$$\text{avec } \tau_1 = L_i / (R_i - N b)$$

à l'instant  $\alpha T < t < T$  ; H ouvert ;  $U_{rf} = R_f \cdot i_{moy}$

$$L_i (di_m / dt) + R_i i_m + R_f i_m = N a + N b i_m$$

$$L_i (di_m / dt) + (R_i + R_f - N b) \cdot i_m = N a$$

avec  $t' = (1 - \alpha) t$

qui a pour solution:

$$i_m = \frac{N a}{R_i + R_f - N b} + (i_{max} - \frac{N a}{R_i + R_f - N b}) e^{-(1-\alpha)t/\tau_2}$$

avec  $\tau_2 = L_i / (R_i + R_f - N b)$

Pour que le fonctionnement soit stable, il faut que le courant  $i_m$  croisse pendant la fermeture de H puis décroisse de la même quantité pendant l'ouverture:

C'est à dire

$$\tau_1 < 0 \quad ==> R_i - N b < 0$$

$$\tau_2 > 0 \quad ==> R_i + R_f - N b > 0$$

d'où

$$R_i < N.b < R_i + R_f$$

### II.1.3 CHOIX DE LA RESISTANCE DE FREINAGE:

En général, lors du freinage, nous désirons pouvoir régler le courant de la génératrice entre une valeur maximale  $(I_m)_{max}$  et une valeur minimale  $\frac{1}{\epsilon} (I_m)_{max}$  (en pratique  $1 < \epsilon < 5$ ) méthode de A.C.E.C

De plus  $\frac{1}{\epsilon} (I_m)_{max}$  doit correspondre à la plus grande vitesse ( $N_{max}$ ); par suite  $\frac{1}{\epsilon} (I_m)_{max} = (I_m)_{min}$  pour  $t = 0$ , ceci donne:

$$N_{max} \cdot a + N_{max} \cdot b \left( \frac{1}{\epsilon} (I_m)_{max} \right) = (R_i + R_f) \frac{1}{\epsilon} (I_m)_{max}$$



soit:

$$R_f = \xi (N_{\max} \cdot a / (I_m)_{\max}) + N_{\max} \cdot b - R_i$$

Pour la variation de  $R_f$  en fonction de  $\xi$  (voir annexe fig. A.3)

La résistance de freinage est alors déterminée pour permettre le débit du courant minimal à la plus grande vitesse.

La tension aux bornes de la résistance de freinage, aux bornes du hacheur est maximale pour  $I_m = I_{\max}$   $(U_h)_{\max} = (U_{rf})_{\max}$

$$(U_h)_{\max} = R_f (I_m)_{\max} = N_{\max} \cdot a + N_{\max} \cdot b (I_m)_{\max} - R_i (I_m)_{\max}$$

Cette tension est supérieure à la f.e.m de la génératrice, la différence entre ces deux tensions est donnée par :

$$\begin{aligned} (U_h)_{\max} - (e_{\text{gén}})_{\max} &= N_{\max} \cdot a + N_{\max} \cdot b (I_m)_{\max} - R_i (I_m)_{\max} \\ &\quad - (a + b(I_m)_{\max}) N_{\max} \\ &= (\xi - 1) N_{\max} a - R_i (I_m)_{\max} \end{aligned}$$

Dans le cas d'une machine saturée on obtient la relation suivante:

$$(U_h)_{\max} = \xi \cdot (e_{\text{gén}})_{\max}$$

#### II.1.4 DETERMINATION DU TEMPS DE FREINAGE:

C'est le temps de passage d'une vitesse initiale  $\Omega_0$  à vitesse  $(\Omega_1 = 0)$  nulle.

Ce temps se détermine à partir de l'équation mécanique suivante:

$$\text{on a} \quad J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega + C_r = 0 \quad (1)$$

Solution générale de l'équation est de la forme:

$$\Omega(t) = A e^{-(f/J)t}$$

En introduisant  $A e^{-(f/J)t}$  dans l'équation (1) on obtient:

$$J \frac{dA}{dt} e^{-(f/J)t} + C_r = 0$$

$$\Rightarrow A = - C_r e^{(f/J)t} + B$$

avec la condition initiale:  $B = C_r / f$

d'où l'expression de la vitesse :

$$\Omega(t) = \Omega_0 e^{-(f/J)t} + (C_r/f) (e^{-(f/J)t} - 1)$$

A partir de cette équation on tire le temps de freinage:

$$t_f = \frac{J}{f} \ln \left( 1 + \frac{\Omega_0 f}{C_r} \right)$$

Pour la caractéristique  $t_f = f(N)$  voir annexe fig.A.4

## II.2. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Dans cette partie pratique nous désirons faire nos essais pour deux types d'excitations du moteur. (Excitations séparée et série).

Avant le commencement de notre travail, nous avons fait un essai (une manipulation) préliminaire qui servait à déterminer les limites de fonctionnement de notre hacheur.

### II.2.1 MOTEUR A EXCITATION SEPARÉE:

G → M: C'est à dire la génératrice travaille en moteur

M → G: c'est à dire le moteur travaille en génératrice



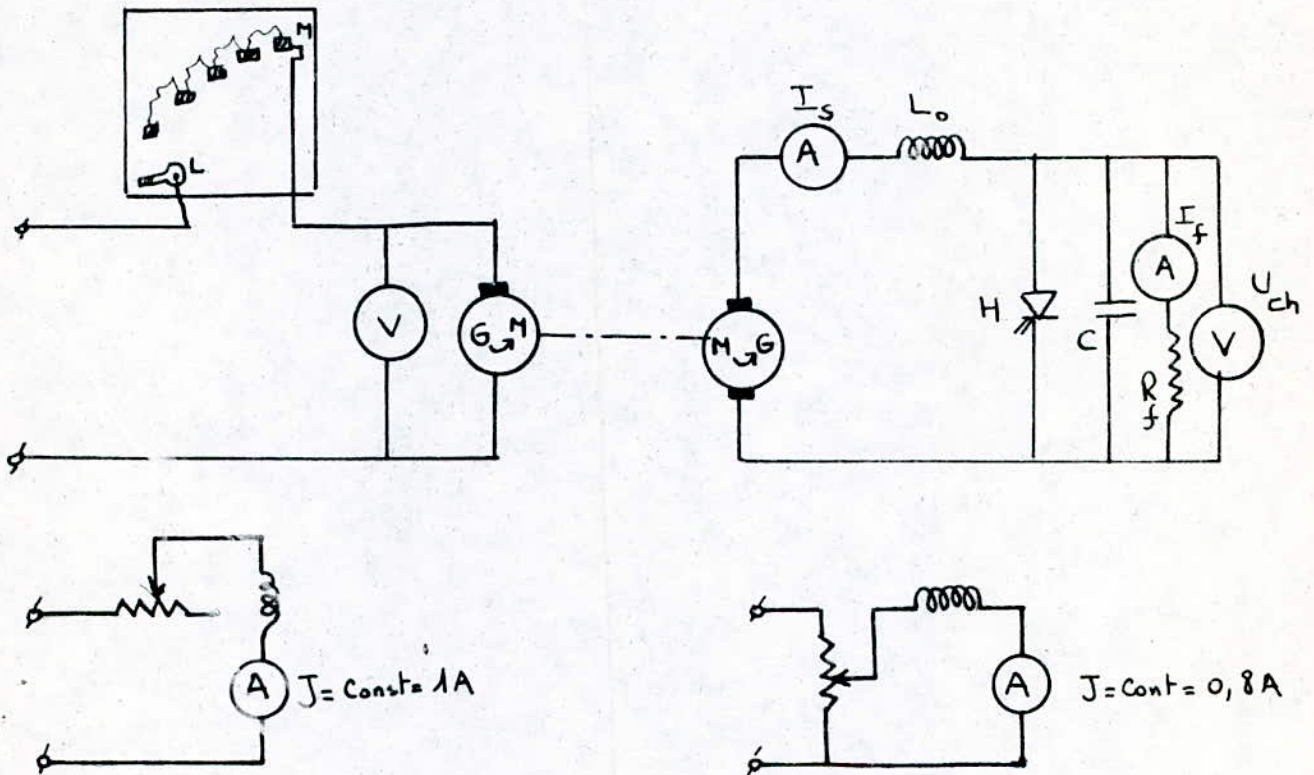


fig.II.2

Le déroulement de l'essai est comme suit:

nous avons fait varier le rapport cyclique  $\alpha$  de 0,3 à 0,8 avec un pas de 0,1.

A l'aide d'une table traçante placée aux bornes de l'induit nous avons pu relever l'allure de la courbe  $N(t)$  lors du freinage

(voir figure II.3).

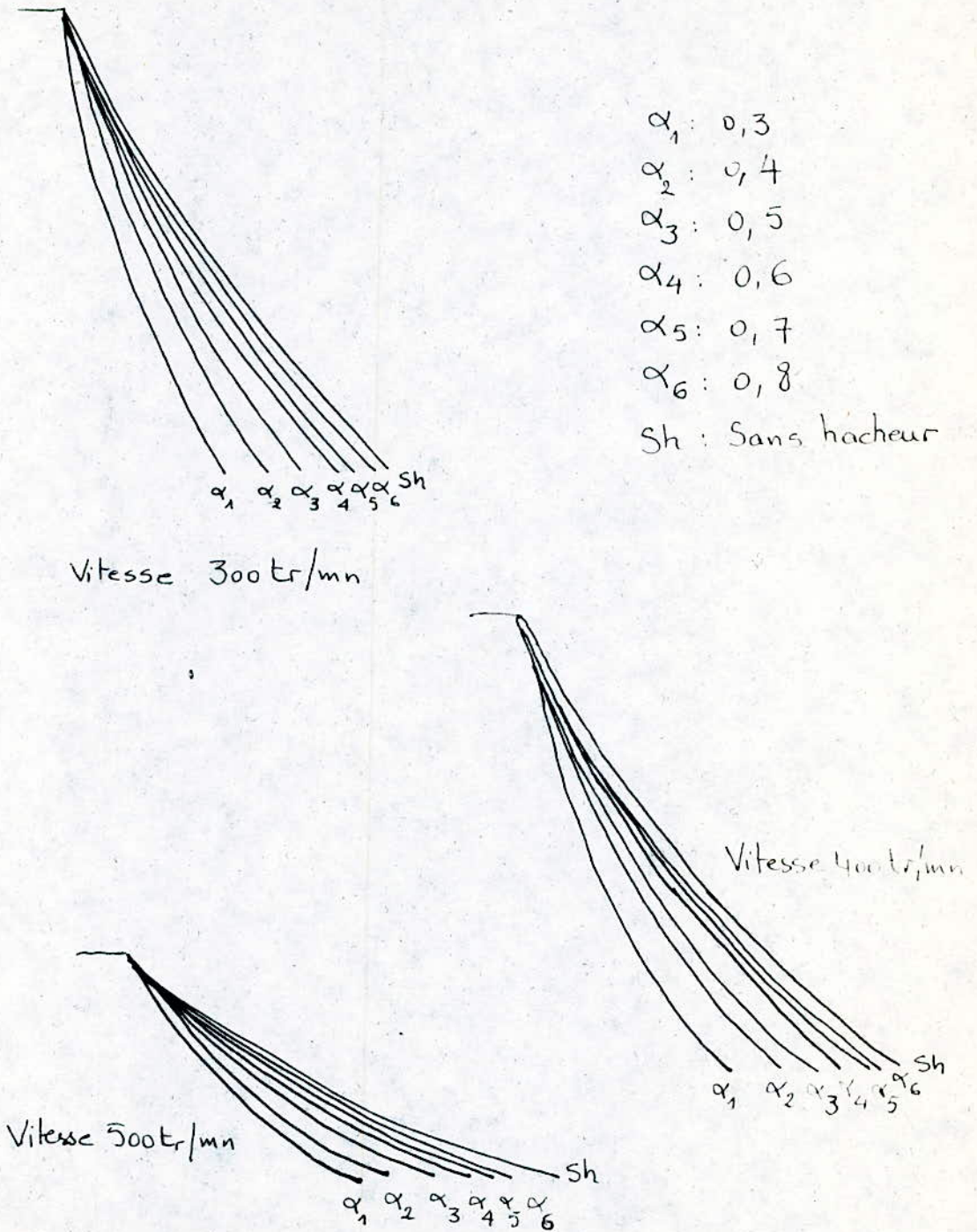


fig. II. 3



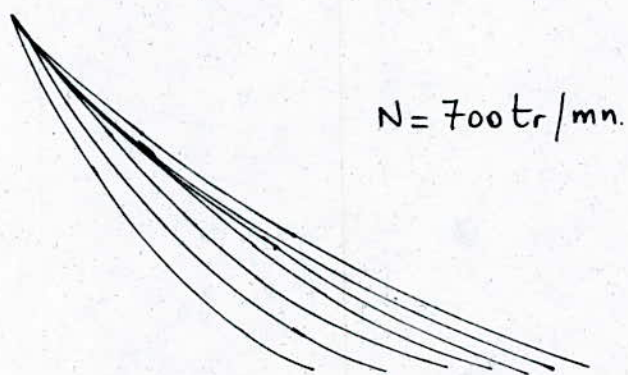
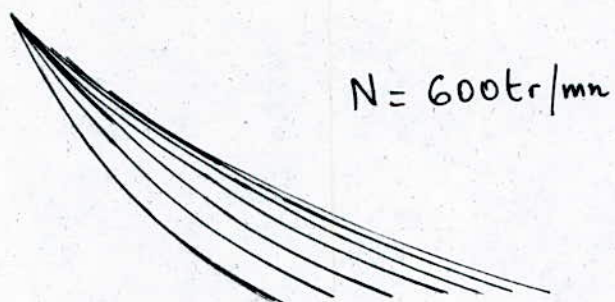


fig. II. 3

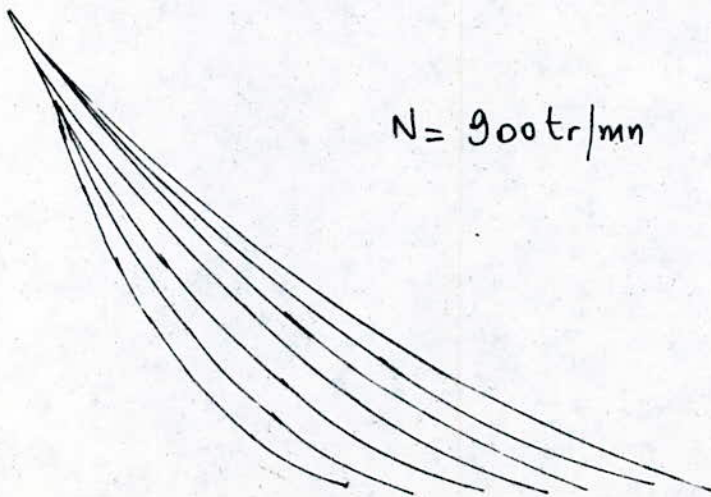
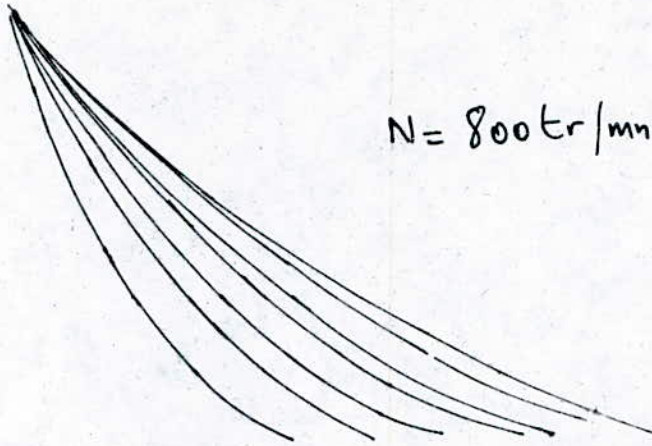
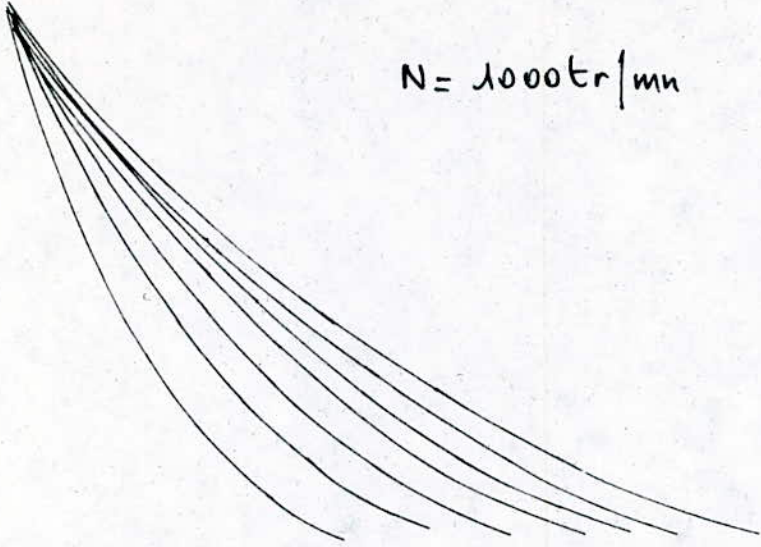
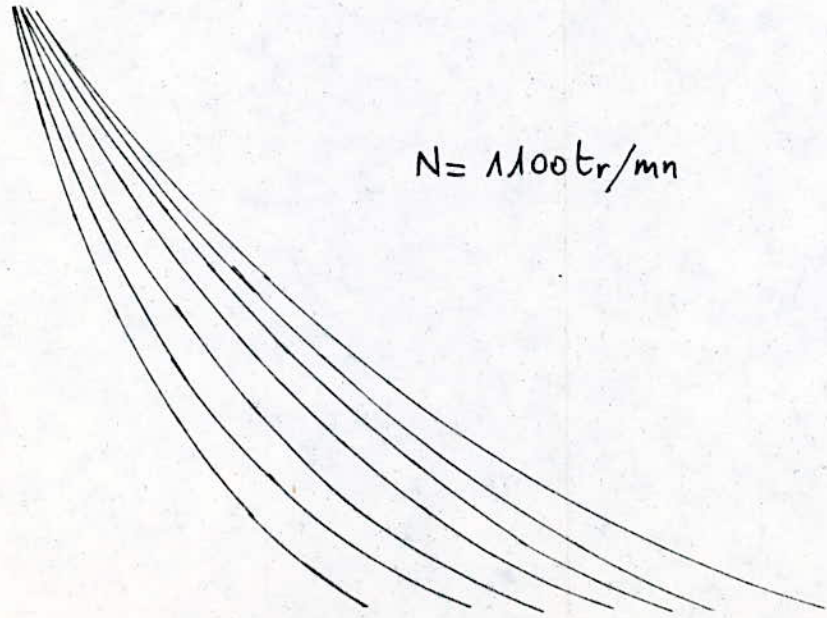


fig. II.3



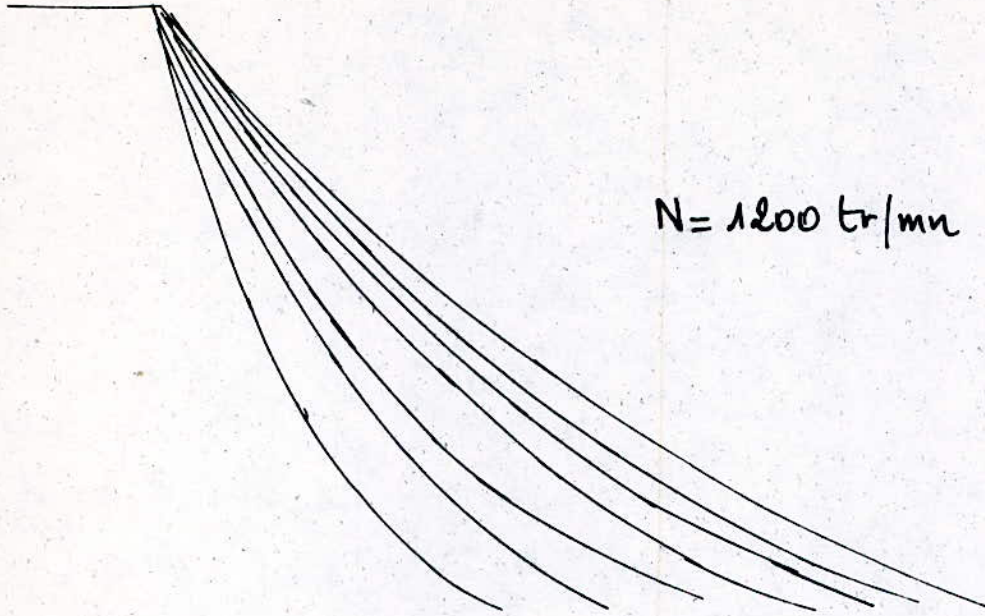


$$N = 1000 \text{ tr/mn}$$

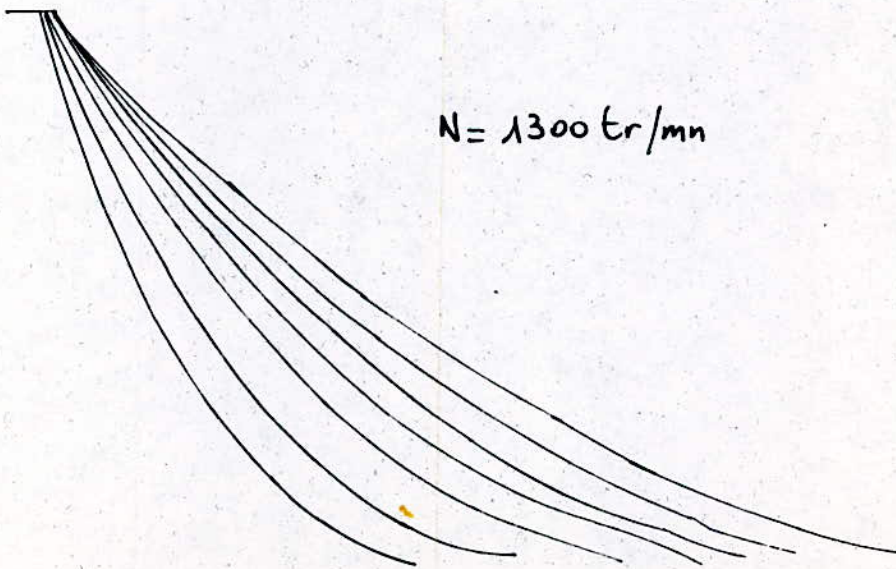


$$N = 1100 \text{ tr/mn}$$

fig. II.3



$N = 1200 \text{ tr/mn}$



$N = 1300 \text{ tr/mn}$

fig II.3



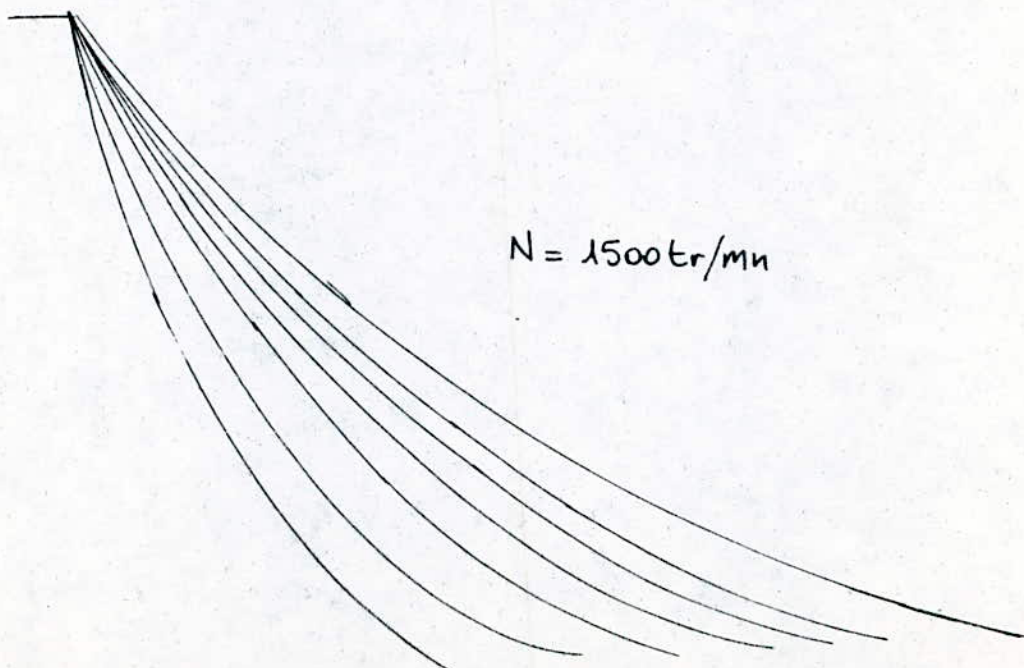
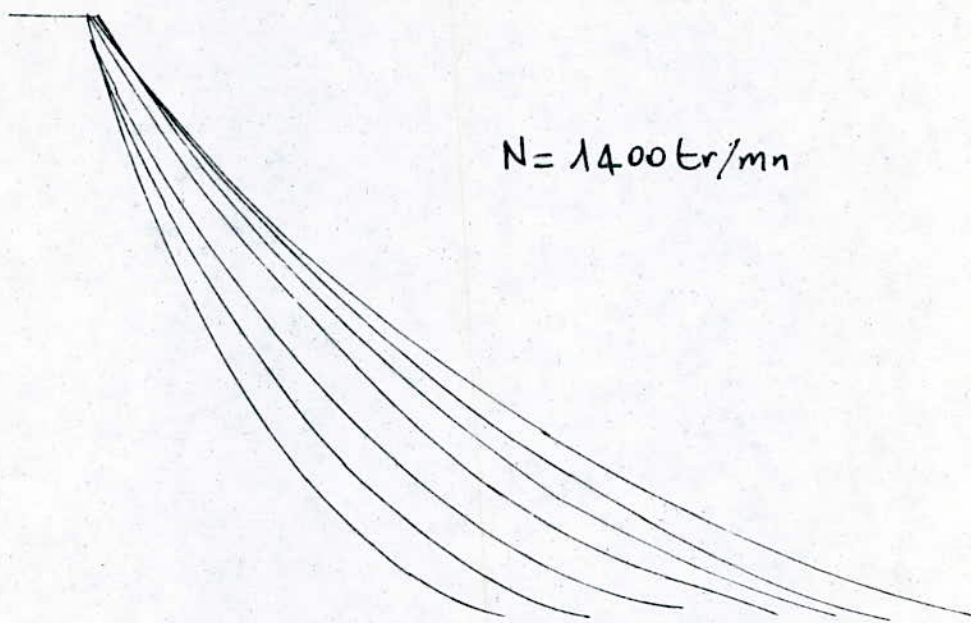


fig. II.3

N=1500 tr/mn

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
If(A)	4,6	4,1	3,5	3	2,7	2,4
Is(A)	18	10	7,5	5,1	3,8	3,25
Uch(V)	290	250	215	190	170	150
tf(s)	2,55	3,15	3,75	4,35	4,75	5,15

N=1400tr/mn

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
If(A)	4,4	3,8	3,25	2,8	2,5	2,3
Is(A)	15,1	10,8	7	4,75	3,6	3
Uch(V)	275	240	205	175	160	140
tf(s)	2,75	3,3	3,9	4,5	4,85	5,25

N=1300tr/mn

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
If(A)	4,1	3,6	3	2,6	2,35	2,1
Is(A)	13,8	10	6,5	4,5	3,6	2,8
Uch(V)	255	220	190	165	148	130
tf(s)	2,35	3,05	3,55	4,25	4,65	4,85



N=1200tr/mn

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
If(A)	3,8	3,3	2,8	2,4	2,2	2
Is(A)	12,6	9,3	6	4,25	3,35	2,6
Uch(V)	235	205	175	150	134	120
tf(s)	2,4	3,1	3,6	4,1	4,5	4,8

N=1100tr/mn

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
If(A)	3,5	3	2,55	2,2	2	1,8
Is(A)	11,5	8,5	5,5	3,9	3,05	2,4
Uch(V)	220	190	160	137	122	110
tf(s)	2,3	2,95	3,5	3,95	4,35	4,6

N=1000tr/mn

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
If(A)	3,2	2,75	2,3	2	1,8	1,6
Is(A)	11,2	7,8	5	3,5	2,8	2,15
Uch(V)	200	170	145	124	112	100
tf(s)	2,3	2,95	3,35	3,75	4	4,4

N=900tr/mn

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
If(A)	2,9	2,5	2,1	1,8	1,6	1,3
Is(A)	10,8	7	4,5	3,2	2,5	1,7
Uch(V)	180	155	130	112	100	78
tf(s)	2,2	2,75	3,25	3,65	3,85	4,1

N=800tr/mn

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
If(A)	2,6	2,2	1,85	1,6	1,4	1,3
Is(A)	9,6	6	1,85	2,8	2,2	1,1
Uch(V)	160	138	115	98	88	78
tf(s)	1,9	2,5	2,85	3,3	3,55	3,85

N=700tr/mn

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
If(A)	2,3	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1
Is(A)	8,4	5,4	3,45	2,45	1,9	1,5
Uch(V)	140	120	100	86	76	69
tf(s)	2	2,4	2,80	3,1	3,25	3,55



N=600tr/mn

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
If(A)	2	1,65	1,4	1,2	1	0,9
Is(A)	7	4,5	3	2,1	1,65	1,3
Uch(V)	120	100	86	72	64	59
tf(s)	1,8	2,2	2,5	2,9	2,95	3,2

N=500tr/mn

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
If(A)	1,6	1,4	1,15	1	0,85	0,8
Is(A)	6	3,7	2,5	1,75	1,35	1,1
Uch(V)	100	83	70	60	54	49
tf(s)	1,7	2,05	2,25	2,5	2,7	2,8

N=400tr/mn

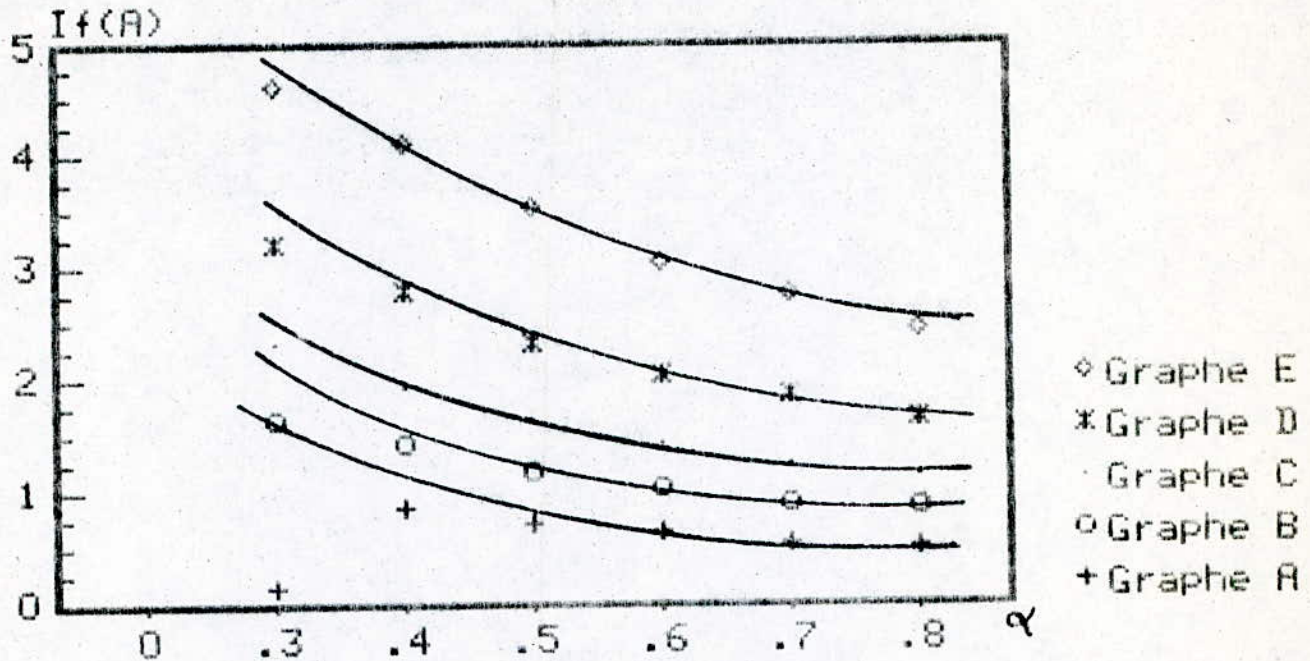
$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
If(A)	1,3	1,1	0,9	0,8	0,65	0,6
Is(A)	4,6	2,95	1,9	1,4	1,1	0,35
Uch(V)	77	66	54	48	42	38
tf(s)	1,55	1,85	2,15	2,25	2,25	2,5

N=300tr/mn

$a$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$I_f(A)$	0,9	0,8	0,65	0,6	0,5	0,45
$I_s(A)$	3,4	2,15	1,4	1	0,75	0,25
$U_{ch}(V)$	57	48	40	35	32	28
$t_f(s)$	1,45	1,55	1,8	2	2,1	2,2



LE COURANT DE FREINAGE EN FONCTION DU  
RAPPORT CYCLIQUE POUR DES VITESSES  
DONNEES

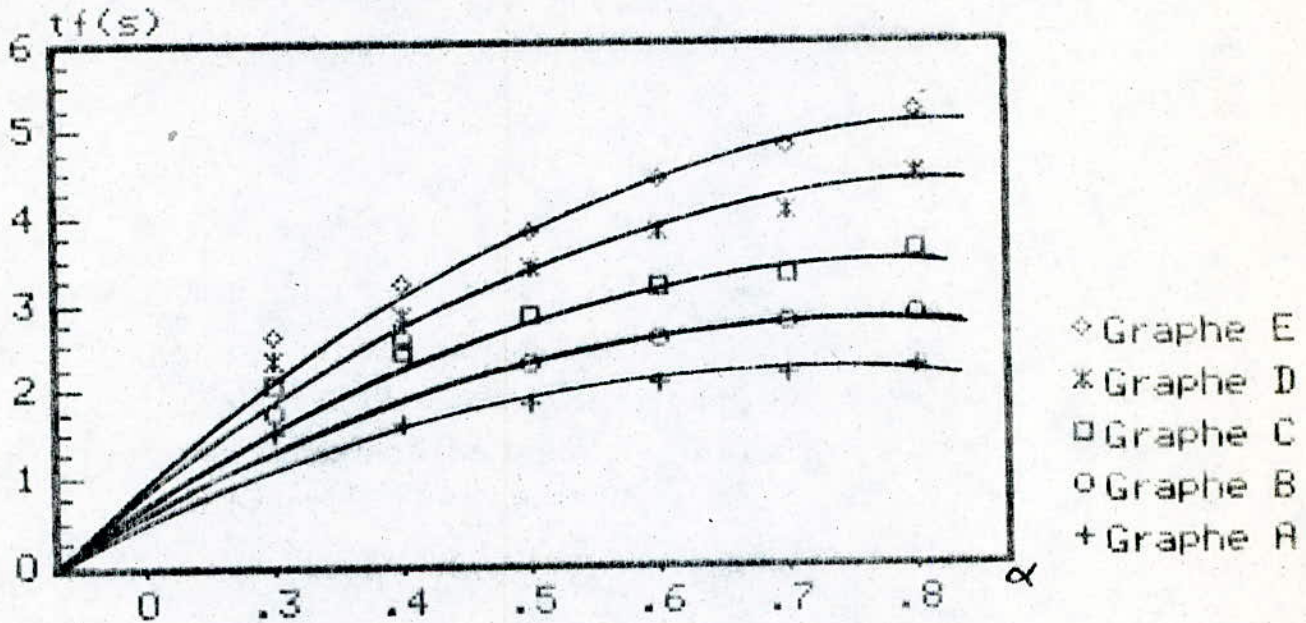


GRAPHE A : VITESSE 300 tr/mn  
 GRAPHE B : VITESSE 500 tr/mn  
 GRAPHE C : VITESSE 700 tr/mn  
 GRAPHE D : VITESSE 1000 tr/mn  
 GRAPHE E : VITESSE 1500 tr/mn

Cas du freinage rhéostatique du moteur à  
courant continu à excitation  
séparée

fig. II.4

LE TEMPS DE FREINAGE EN FONCTION DU  
RAPPORT CYCLIQUE POUR DES VITESSES  
DONNEES  
(HACHEUR PARALLELE)



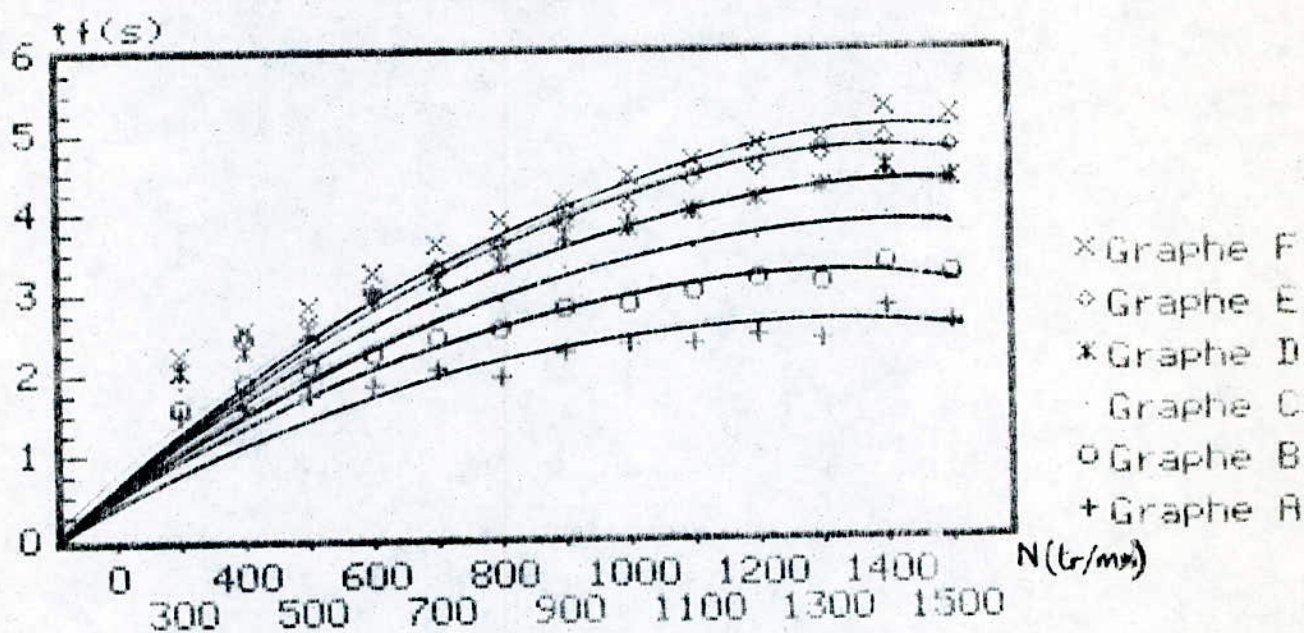
GRAPHE A : VITESSE 300 tr/mn  
 GRAPHE B : VITESSE 500 tr/mn  
 GRAPHE C : VITESSE 700 tr/mn  
 GRAPHE D : VITESSE 1000 tr/mn  
 GRAPHE E : VITESSE 1500 tr/mn

Cas du freinage rhéostatique du moteur à  
courant continu à excitation  
séparée

fig. II.5



LE TEMPS DE FREINAGE EN FONCTION DE LA  
VITESSE A DES VALEURS DU RAPPORT  
CYCLIQUE DONNEES  
(HACHEUR PARALLELE)



GRAPHE A : RAPPORT CYCLIQUE (  $\alpha$  ) : 0.3  
 GRAPHE B : RAPPORT CYCLIQUE (  $\alpha$  ) : 0.4  
 GRAPHE C : RAPPORT CYCLIQUE (  $\alpha$  ) : 0.5  
 GRAPHE D : RAPPORT CYCLIQUE (  $\alpha$  ) : 0.6  
 GRAPHE E : RAPPORT CYCLIQUE (  $\alpha$  ) : 0.7  
 GRAPHE F : RAPPORT CYCLIQUE (  $\alpha$  ) : 0.8

OK

Cas du freinage rhéostatique du moteur à  
courant continu à excitation  
séparée

fig. II.6

A partir des relevés et des courbes ainsi présentés, nous choisissons la valeur  $N = 1000 \text{tr/mn}$  pour valeur constante de la fréquence de rotation.

$\alpha$	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
$t_f$ (s)	4.40	4.00	3.75	3.35	2.80	2.30
$I_f$ (A)	1.6	1.8	2	2.3	2.75	3.2
$I_s$ (A)	2.15	2.8	3.5	5	7.8	11.2
E (V)	83.49	83.40	83.31	83.17	82.97	82.77
$R_f$ ( $\Omega$ )	62.5	62.2	62	63.1	61.8	62.4
$C_f$ (Nm)	1.71	2.23	2.79	3.97	6.18	8.85
$U_{ch}$ (V)	100	112	124	145	170	200

Pour les calculs de  $R_f$ , E et de  $C_f$ , nous avons utilisé les relations suivantes:

$$R_f = U_{ch} / I_f$$

$$E = U_g - R_i \cdot I_f$$

$$C_f = (E \cdot I_s) / \Omega \quad (\Omega \text{ (rd/s)})$$

Nous constatons d'après le tableau que la réduction maximale est celle qui correspond au courant  $I_s = 11.2 \text{ A}$ . Le temps de freinage est réduit de 52,27% du temps d'arrêt



normal c'est à dire que le couple de freinage est égal à zéro (temps de freinage correspondant est de 4,8s).

Lorsqu'on augmente la vitesse de notre moteur pour une résistance  $R_f$  donnée donc rapport cyclique donné le temps de freinage augmente avec une fonction logarithmique (voir chapitre II.1.4) et le courant  $I_f$  diminue.

## II.2.2 MOTEUR A EXCITATION SERIE:

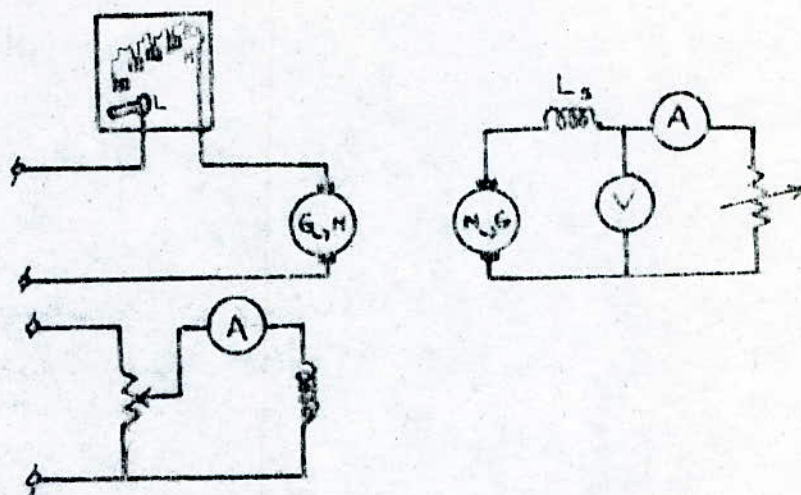


fig. II. 7

L'amorçage des moteurs en génératrices est possible grâce au magnétisme rémanent. Lorsque nous coupons le courant dans un moteur, les pôles inducteurs restent magnétisés ( grâce au flux rémanent) pour faire fonctionner un moteur en génératrice série sans changer le sens de rotation de l'induit, il faut amorçer la machine en utilisant le rémanent et en le renforçant par la circulation du courant produit dans le sens convenable, c'est à dire, celui qu'il avait dans les inducteurs pendant la marche en moteur.

Comme le sens du courant dans l'induit est, par définition, différent pendant la marche en moteur et la marche en génératrice, il faut inverser le sens du courant dans l'induit seulement, donc changer les connexions entre inducteur



et induit, le sens restant le même dans l'inducteur.  
C'est ce qui nous a permis de faire un essai préalable afin de déterminer le bon choix de la connexion entre l'enroulement inducteur et l'enroulement série pour laquelle la génératrice s'amorçe.

Remarque:

Pour éviter le problème de l'amorçage du moteur à courant continu (excitation série) nous procédons de la manière suivante:

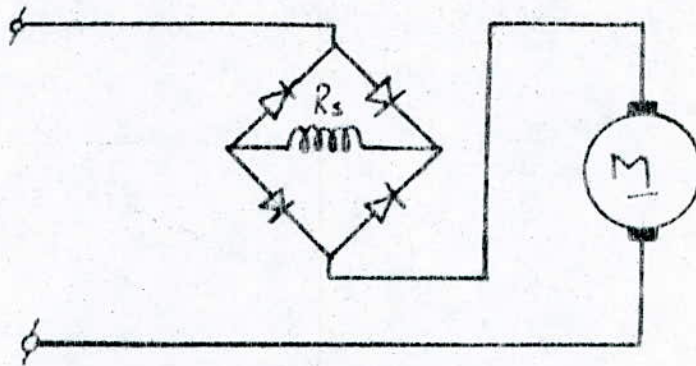


fig. II. 8

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	Sans Hacheur
$I_f$ (A)	3,5	2,5	2	1,5	1,4	1,2	0,9
$I_s$ (A)	12,5	6,5	4,2	2,5	2	1,6	1
$U_{ch}$ (V)	215	160	122	90	83	74	58
$t_f$ (s)	5	5,3	5,5	6,5	6,8	7	7,5

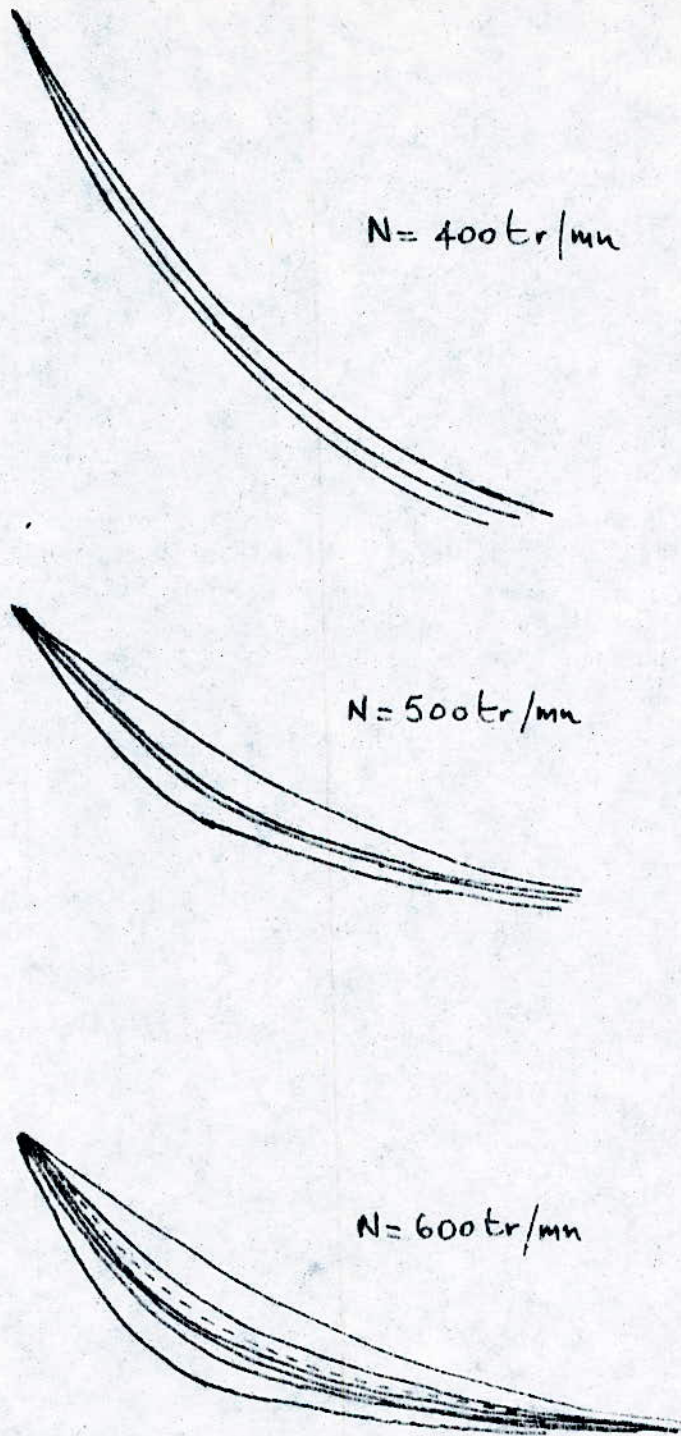


fig. II.9: Caractéristiques obtenues  
à partir de la table trisante pour  
différentes vitesses



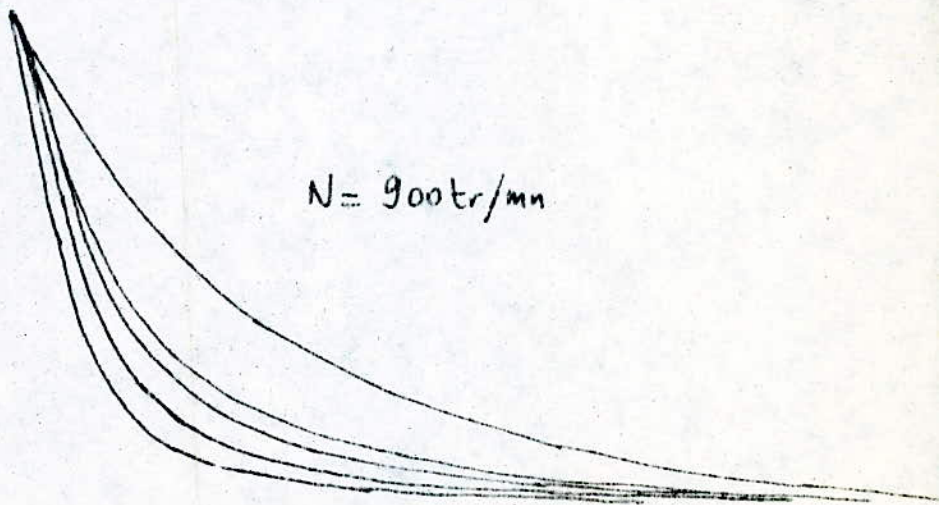
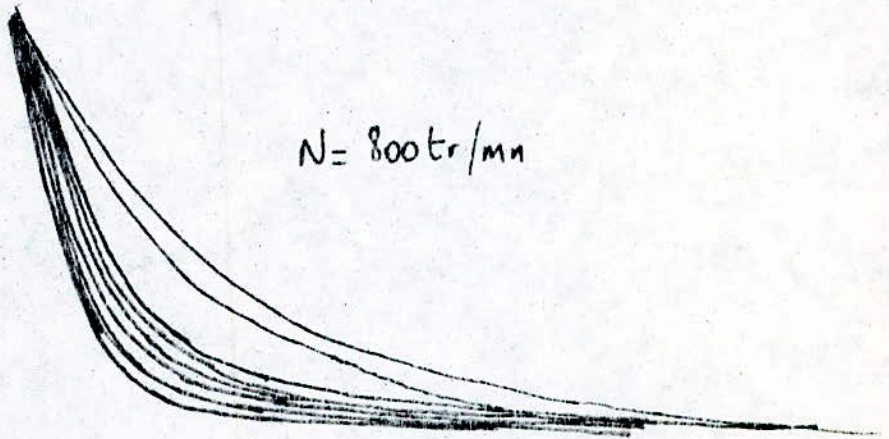
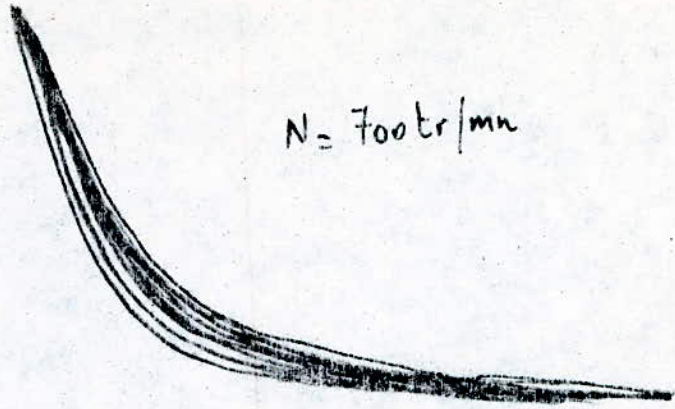


fig. II. 9

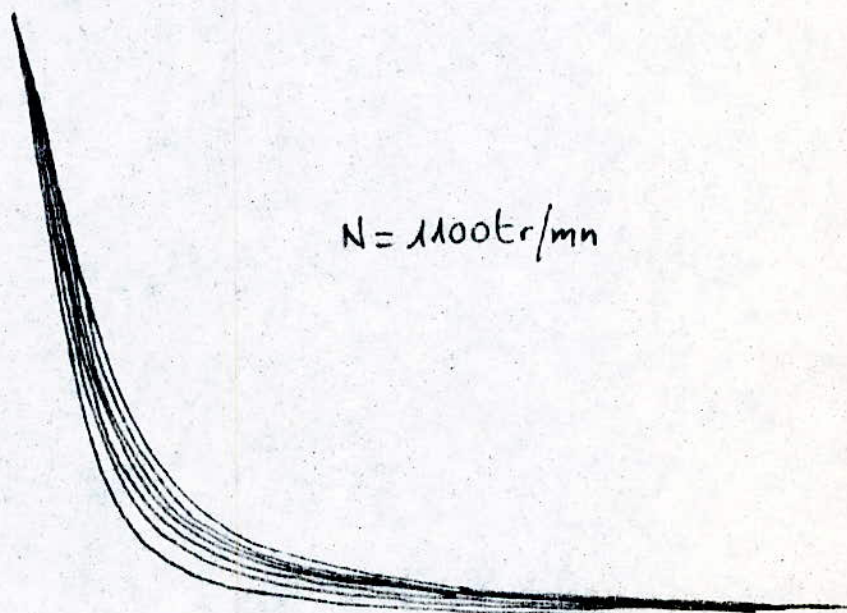
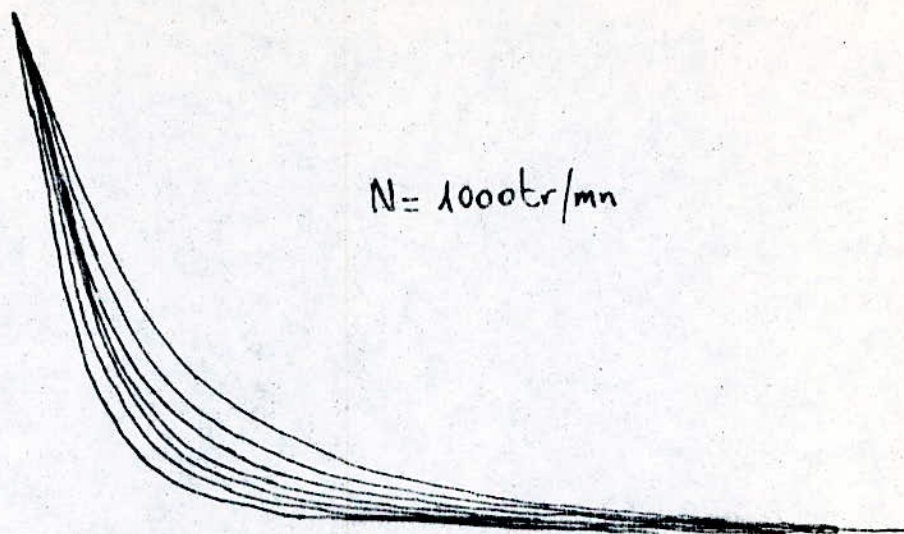


fig. II.9



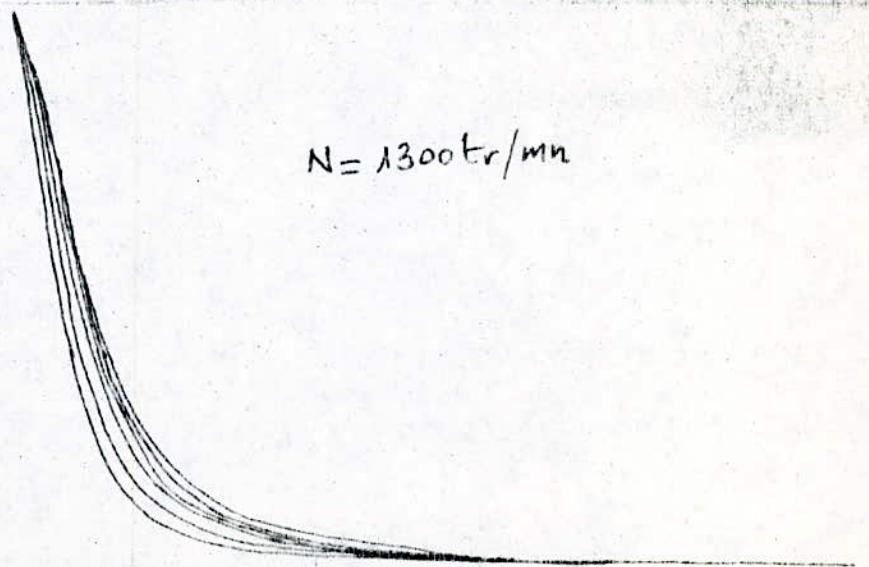
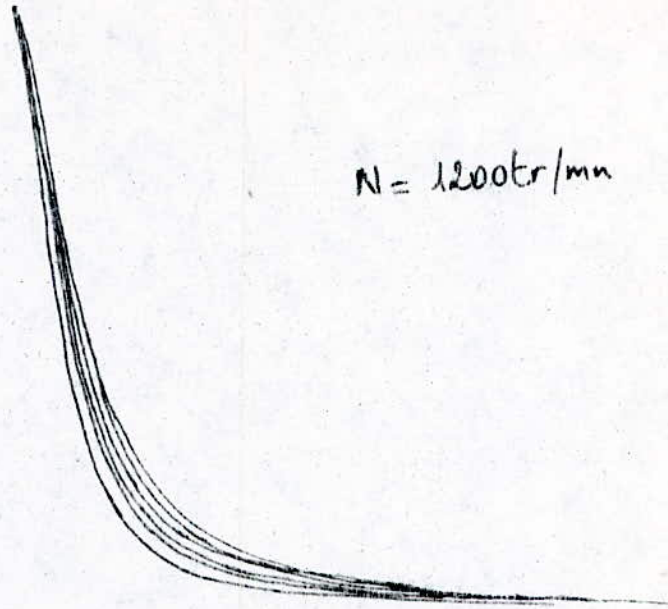


fig. II.9

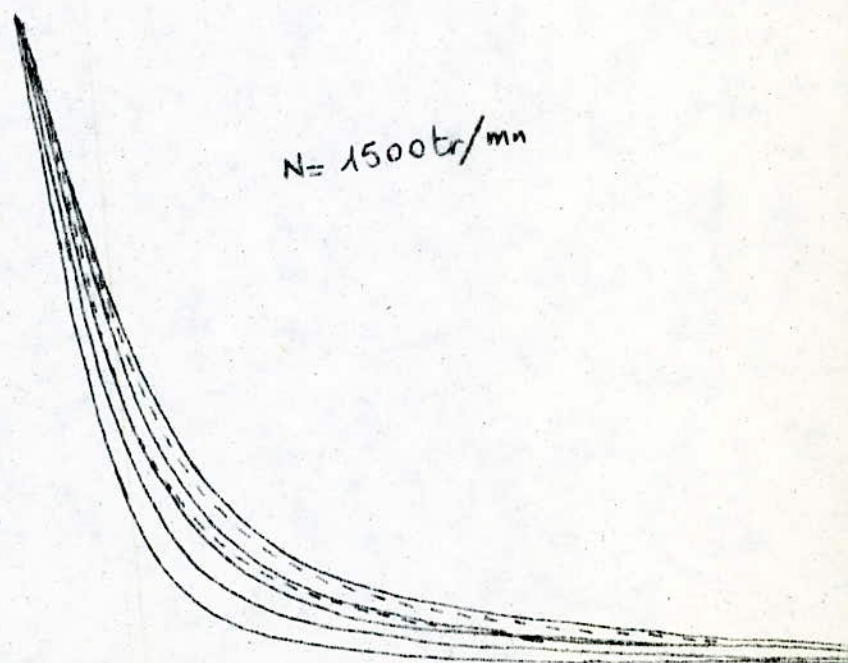
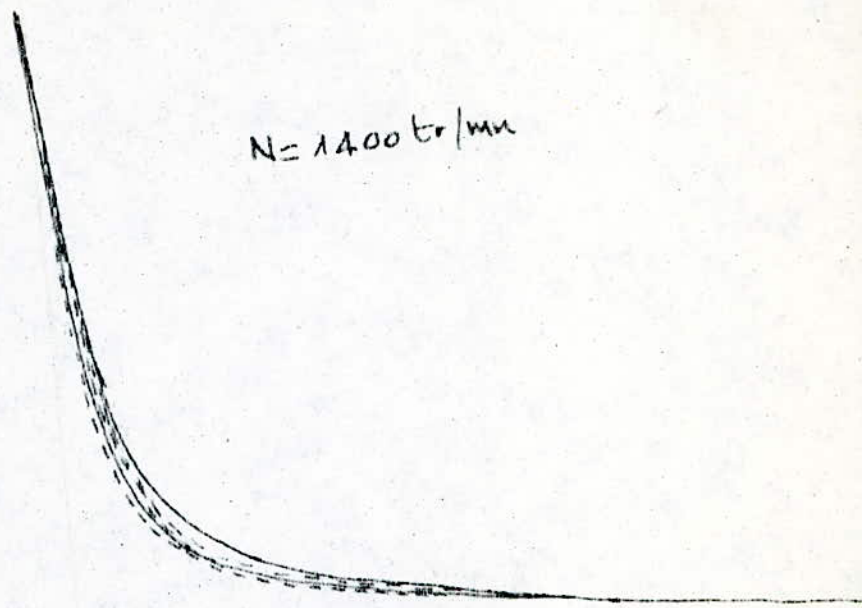


fig. II. 9



N=600tr/mn

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	sans Hac
If(A)	0,2	0,1					
Is(A)	1,9	0,8					
Uch(V)	32	18	13,5	10,5	7	4	3
tf(s)	3,6	3,9	4,1	4,2	4,25	4,4	4,45

N=700tr/mn

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	sans Hac
If(A)	0,35	0,8	0,2	0,15	0,1		
Is(A)	2,9	1,8	1	0,5	0,2		
Uch(V)	50	40	30	25	19	17	15
tf(s)	3,6	4	4,25	4,35	4,3	4,35	4,5

N=800tr/mn

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	sans Hac
If(A)	1,48	1,08	0,25	0,18	0,1	0,05	
Is(A)	5,5	2,9	1,7	1	0,5	0,2	
Uch(V)	92	66	48	35	27	16	11
tf(s)	3,6	4,1	4,3	4,75	4,70	4,8	5,25

N=900tr/mn

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	sans Hac
If(A)	1,54	1,1	0,75	0,5	0,3	0,2	0,26
Is(A)	5,4	3	1,6	1	0,36	0,25	0,4
Uch(V)	95	70	45	32	15	12	35
tf(s)	4,1	4,75	5,1	5,5	6,2		5,5

N=1000tr/mn

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	sans Hac
If(A)	1,9	1,5	1,15	0,9	0,7	0,5	0,18
Is(A)	6,6	4	2,5	1,6	1,1	0,7	0,45
Uch(V)	118	92	72	56	48	33	24
tf(s)	4,3	4,75	4,9	5,25	5,5	5,85	6,25

N=1100tr/mn

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	sans Hac
If(A)	2,5	1,86	1,46	1,18	1	0,85	0,72
Is(A)	9	5	3,2	2,15	1,55	1,15	0,8
Uch(V)	150	116	90	74	62	53	45
tf(s)	4,05	4,9	5	5,3	5,6	5,85	6



N=1200tr/mn

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	sans Hac
If(A)	2,8	2,3	1,8	1,5	1,3	1,1	0,98
Is(A)	10,5	6,75	4	2,65	2	1,5	1,1
Uch(V)	180	147,5	112	92	80	70	60
tf(s)	3,6	4	4,5	4,6	4,6	5	5,5

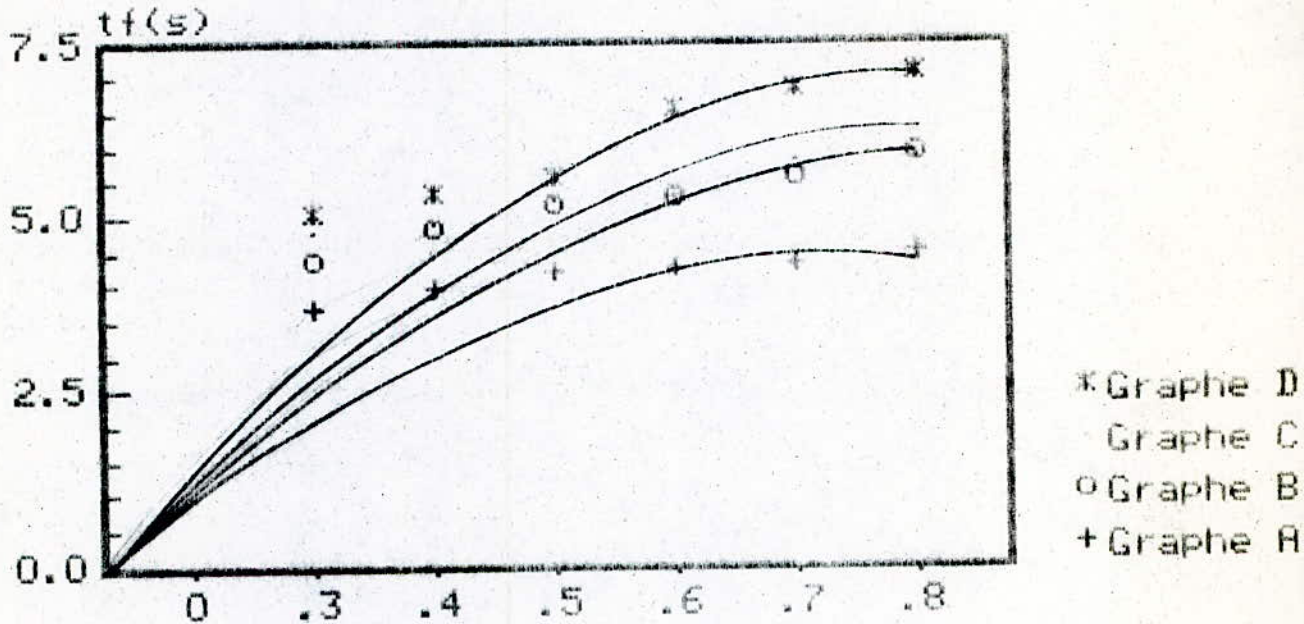
N=1300tr/mn

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	sans Hac
If(A)	3,2	2,6	2,1	1,7	1,5	1,3	1,1
Is(A)	12	7	4	3	2,2	1,6	1,21
Uch(V)	200	160	128	106	91	78	68
tf(s)	4,7	4,8	5,15	5,25	5,75	5,8	5,5

N=1400tr/mn

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	sans Hac
If(A)	3,4	2,6	2,4	2	1,8	1,5	1,2
Is(A)	12	7	5	3,5	2,7	2	1,3
Uch(V)	205	165	147	124	108	94	82
tf(s)	4,75	5,1	5,4	5,6	5,5	5,9	6,5

LE TEMPS DE FREINAGE EN FONCTION DU  
RAPPORT CYCLIQUE POUR DES VITESSES  
DONNEES  
(HACHEUR PARALLELE)



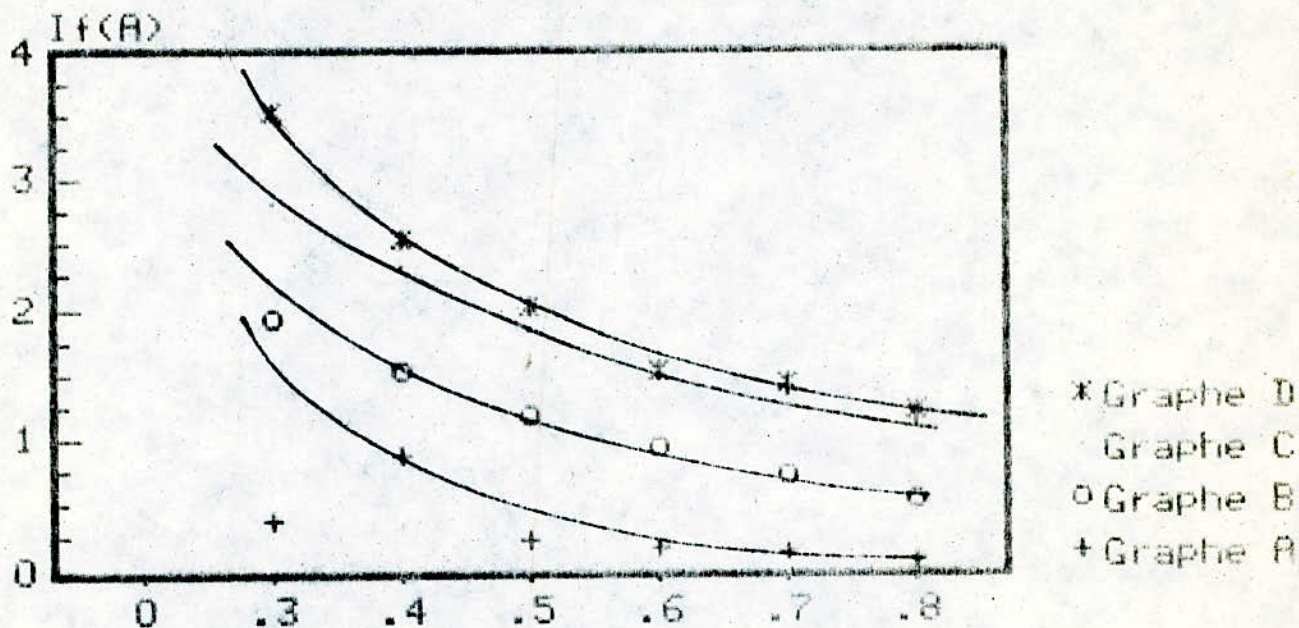
GRAPHE A : VITESSE 600 tr/min  
GRAPHE B : VITESSE 1000 tr/min  
GRAPHE C : VITESSE 1300 tr/min  
GRAPHE D : VITESSE 1500 tr/min

Cas du freinage rhéostatique du moteur à  
courant continu à excitation  
série

fig. II.10



LE COURANT DE FREINAGE EN FONCTION DU  
RAPPORT CYCLIQUE POUR DES VITESSES  
DONNEES  
(HACHEUR PARALLELE)

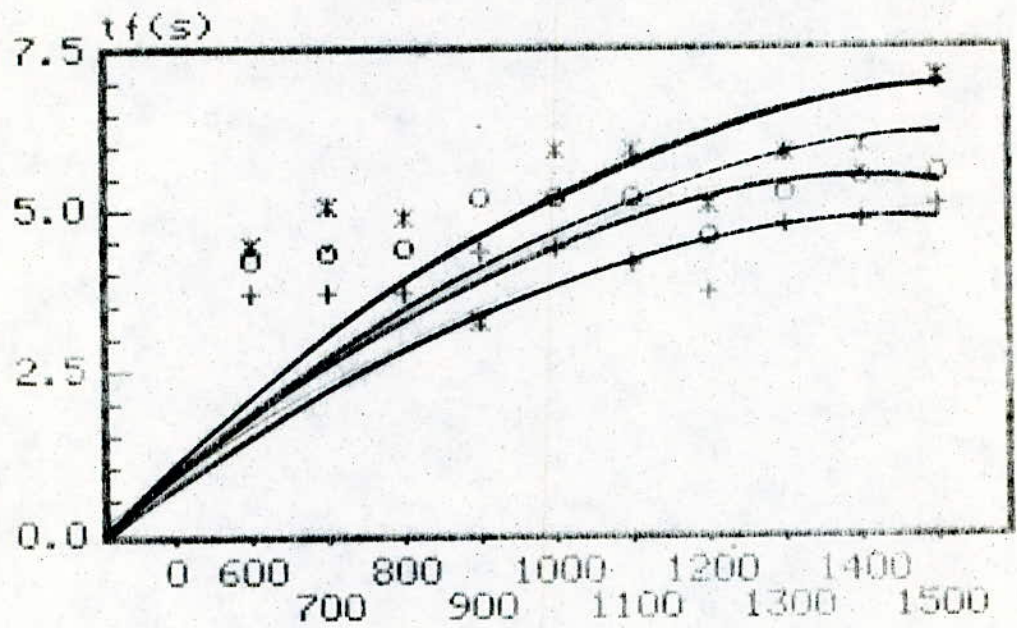


GRAPHE A : VITESSE 700 tr/min  
GRAPHE B : VITESSE 1000 tr/min  
GRAPHE C : VITESSE 1200 tr/min  
GRAPHE D : VITESSE 1500 tr/min

Cas du freinage rhéostatique du moteur à  
courant continu à excitation  
série

fig. II. 10

LE TEMPS DE FREINAGE EN FONCTION DE LA VITESSE A DES VALEURS DU RAPPORT CYCLIQUE DONNEES (HACHEUR PARALLELE)



- \* Graphe D
- Graphe C
- Graphe B
- + Graphe A

GRAPHE A : RAPPORT CYCLIQUE (  $\alpha$  ) 0.4  
 GRAPHE B : RAPPORT CYCLIQUE (  $\alpha$  ) 0.5  
 GRAPHE C : RAPPORT CYCLIQUE (  $\alpha$  ) 0.7  
 GRAPHE D : RAPPORT CYCLIQUE (  $\alpha$  ) 0.8

Cas du freinage rhéostatique du moteur à courant continu à excitation série

fig. II. 10



Pour ce type d'excitation, nous portons les même conditions que celles étudiées pour le moteur à excitation séparée.

$\alpha$	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
$t_f(s)$	5,85	5,50	5,25	4,90	4,75	4,30
$I_f(A)$	0,50	0,70	0,90	1,15	1,50	1,90
$I_s(A)$	0,70	1,10	1,60	2,50	4,00	6,60
$E(V)$	83,94	83,84	83,73	83,60	83,41	83,20
$R_f(\Omega)$	305	203,3	152,5	122	101,6	87,14
$C_f(Nm)$	0,56	0,88	1,28	1,99	3,18	5,25
$U_{ch}(V)$	33	48	56	72	92	118

Nous constatons que la réduction du temps de freinage est faible; elle est de l'ordre de 69,35% pour un courant

$I_s = 6,6$  A par rapport au temps d'arrêt du moteur sans le hacheur ( $t_f = 6,25$  s).

Tout cela est dû, au désamorçage de la génératrice qui se fait à faible vitesse.

### II.3 COMPARAISON DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

- Pour le moteur à excitation séparée, le hacheur parallèle travaille dans un intervalle de vitesse plus important que celui du moteur série.

- Le moteur à excitation séparée freine plus rapidement que le moteur série. Donc le temps de freinage du moteur séparée est inférieur au temps de freinage du moteur série.

- Pour ce mode de freinage (rhéostatique), nous pouvons conclure que le moteur à excitation séparée est adéquat par rapport au freinage du moteur série (problème d'amorçage qui ne nous permet pas d'avoir un temps de freinage réduit).



**CHAPITRE**  
**III**



### III. FREINAGE PAR RECUPERATION:

Le problème est très différent de celui du freinage rhéostatique. La différence c'est qu'ici le moteur fonctionnant en génératrice débite sur un réseau dont la tension  $U$  est imposée. Il n'y aura de récupération possible que si la f.e.m totale fournie par la génératrice est supérieure à  $U$ .

La récupération peut être un freinage de maintien ou de ralentissement, mais non un freinage jusqu'à l'arrêt.

Si nous nous contentons de conserver aux moteurs leur excitation série (en inversant les inducteurs pour permettre l'amorçage en génératrice), le système serait instable; une augmentation de vitesse entrainerait une diminution de l'effort de retenue, et inversement.

Le freinage par récupération à excitation série n'est pas viable. Il faut une excitation séparée.

#### III.1 ETUDE THEORIQUE

##### III.1.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

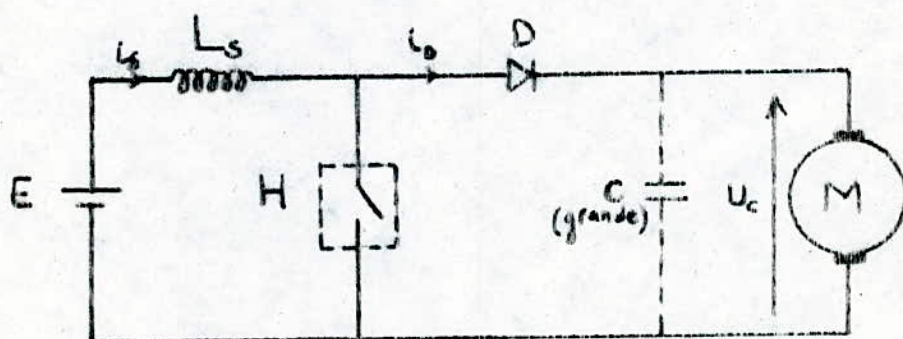


fig. III.1 Schema de principe



0 < t < 0: Hacheur conduit.

$$E = L_s ( di_s / dt )$$

$$\Rightarrow i_s = \frac{E}{L_s} \int_0^{\theta} dt \quad (i_s \text{ varie linéairement})$$

d'où 
$$i_s = \frac{E}{L_s} \int_{t_0}^t dt = \frac{E}{L_s} (t - t_0) = \frac{E}{L_s} t + I_0$$

La valeur du courant est maximale quand le temps  $t = \theta$

$$I_{\max} = \frac{E}{L_s} \theta + I_{\min}$$

0 < t < T : Hacheur ne conduit pas (ouvert).

Nous constatons que l'énergie emmagasinée dans l'inductance se divise dans le condensateur et dans la charge. Comme le courant passe d'une valeur zéro à la valeur  $i_s$ , il faut une capacité pour absorber cette brusque variation sans provoquer les surtensions dangereuses pour l'équipement. La tension  $U_c$  étant supposée constante:

$$U_c = E - L_s \frac{di_s}{dt} \Rightarrow U_c - E = -L_s \frac{di_s}{dt}$$

$$\Rightarrow \int_0^T (U_c - E) dt = -L_s \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} di_s$$

$$\Rightarrow (U_c - E) (T - \theta) = -L_s (I_{\min} - I_{\max})$$

Et on sait que: 
$$I_{\min} - I_{\max} = -\frac{E \theta}{L_s}$$

d'où 
$$(U_c - E) (T - \theta) = -L_s \left(-\frac{E \theta}{L_s}\right) = E \theta = E \alpha T$$

$$U_c = \frac{E}{(1 - \alpha)}$$

### III.1.2 CRITERE DE STABILITE

Par analogie au freinage rhéostatique, le courant instantané de freinage par récupération est:

$0 < t < \theta$ : Hacheur conduit.

$$L (di_m/dt) + R i_m = E \quad \text{avec } E = N.a + N.b.i_m$$

$$L (di_m/dt) + R i_m = N.a + N.b.i_m$$

$$L (di_m/dt) + (R - N.b)i_m = N.a$$

$$\text{d'où } I_m = \frac{N.a}{R - N.b} + \left( I_{\min} - \frac{N.a}{R - N.b} \right) e^{-t/\tau_2}$$

$$\text{avec } \tau_2 = \frac{L}{R - N.b}$$

$\theta < t < T$ : Hacheur ne conduit pas (ouvert).

$$E = N.a + N.b.i_m = E + L (di_m/dt) + R.i_m$$

$$\Rightarrow N.a - E = L (di_m/dt) + (R - N.b) i_m$$

d'où

$$i_{\text{moteur}} = \frac{N.a - E}{R - N.b} + \left( (I_m)_{\max} - \frac{N.a - E}{R - N.b} \right) e^{-t/\tau_2}$$

Pour que le fonctionnement soit stable:

$$* i_{\text{moteur}} \text{ croisse pendant } 0 < t < \theta : -\tau_1 > 0$$

$$* i_{\text{moteur}} \text{ décroisse pendant } \theta < t < T: \left( (I_m)_{\max} - \frac{N.a - E}{R - N.b} \right) < 0$$



### III.2 RESULTATS EXPERIMENTAUX:

Dans cet essai nous utilisons la machine asynchrone couplée mécaniquement à la génératrice à courant continu  $G_2$ . Le moteur de travail  $M$  est relié électriquement à la génératrice à courant continu  $G_2$ , entraînant la génératrice  $G_1$ . La machine asynchrone est couplée au réseau. Nous enclenchons le hacheur parallèle, alors, la génératrice  $G_2$  devient moteur et le moteur opérant à l'hypersynchronisme devient génératrice asynchrone.

tableau des relevés et des calculs:

$\alpha$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$U(V)$	76	78	78,5	79	79	79	79
$I(A)$	18	16,4	15,8	16,4	16,5	14,8	12,5
$P(W)$	240	60	30	30	60	90	120
$N(t/mn)$	1450	1460	1485	1496	1520	1530	1550
$UI$	1368	1279	1240	1295	1303	1169	987,5
$t_f(s)$	2,9	4,2	4,9	5,5	6,1	6,5	6,75

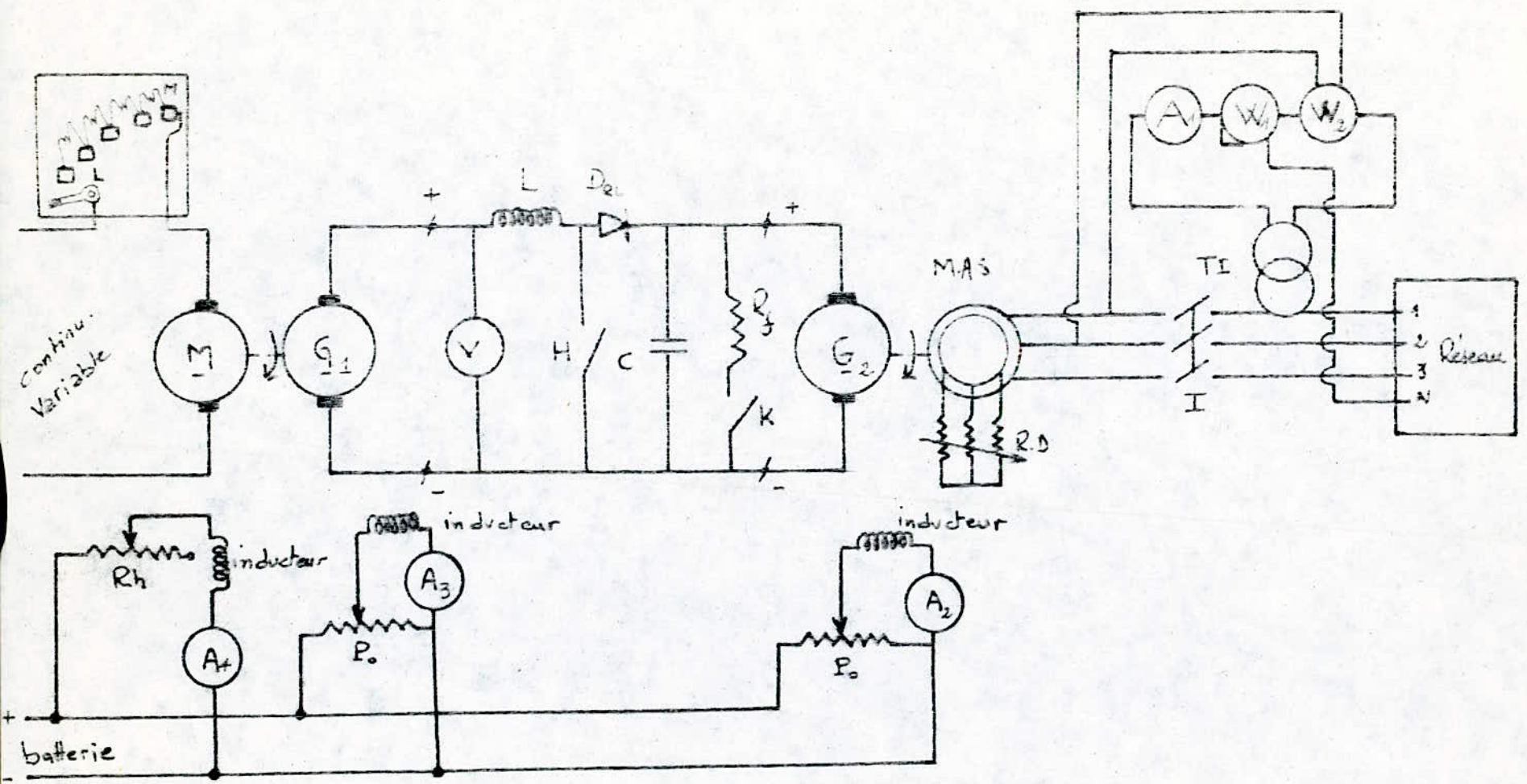


fig. III. 2. Schéma de montage.



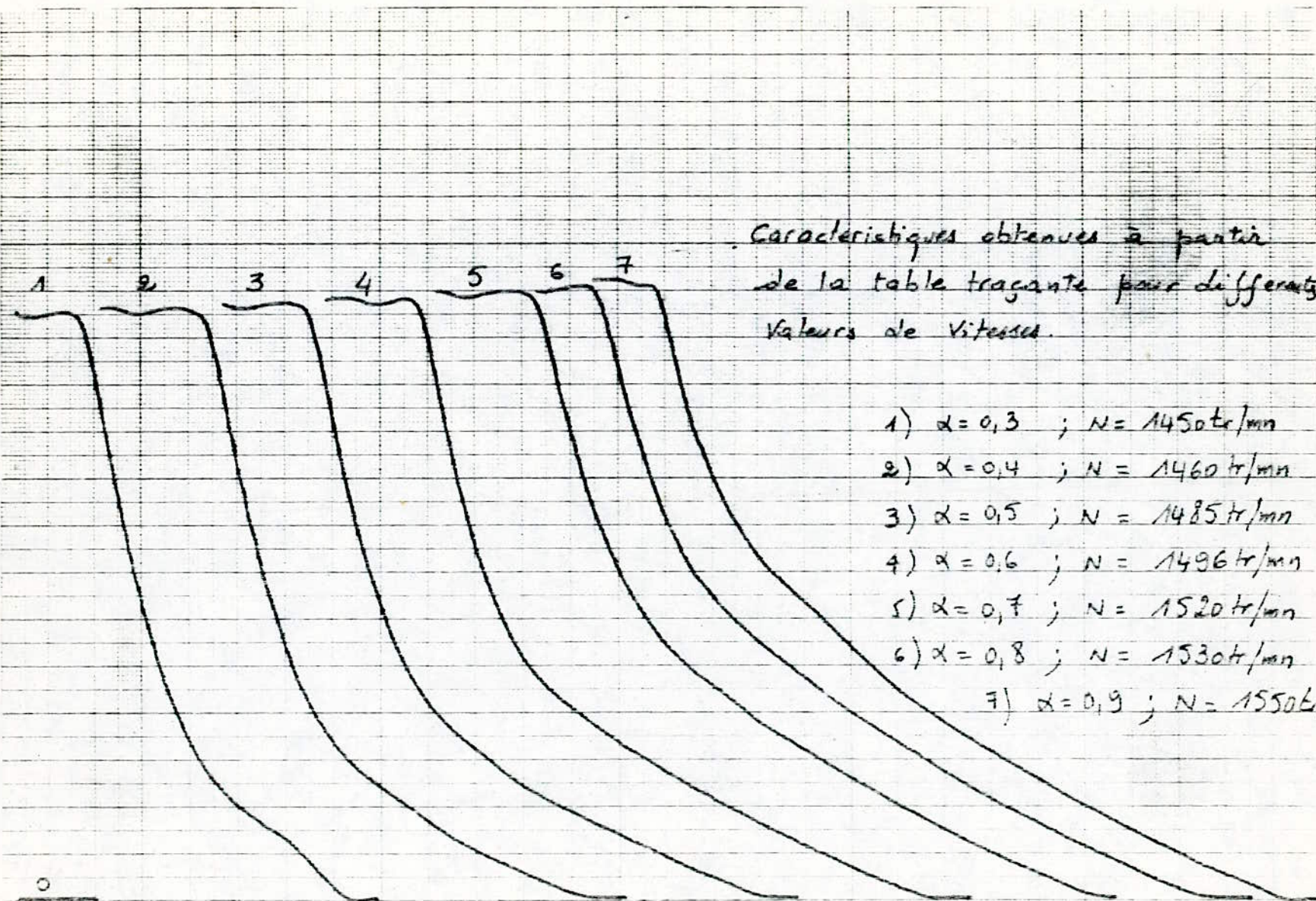


Fig. III.3

### III.3 COMPARAISON DES RESULTATS EXPERIMENTAUX:

Le temps de freinage est plus réduit dans le cas rhéostatique à excitation séparée que dans le cas de la récupération; lesquels sont plus petits que le temps de freinage rhéostatique à excitation série.

Pour une vitesse  $N = 1500$  tr/mn, nous avons relevé les temps de freinage pour chaque type:

$$(t_{f.sép})_{rhé} = 5,15s$$

$$(t_{f.sép})_{récup} = 6,5s$$

$$(t_{f.série})_{rhé} = 7s$$

Le courant de freinage dans la récupération est plus élevé.

La meilleure façon de freiner, du point de vue énergétique **est** le freinage par récupération, du fait que l'énergie cinétique du groupe est transformée en énergie électrique, est récupérée par le moteur asynchrone qui débite dans le réseau.

Par contre le freinage rhéostatique transforme l'énergie cinétique en énergie électrique qui se dissipe dans la résistance de freinage.



# **CONCLUSION**

# Conclusion

L'étude de ce mémoire est basée essentiellement sur le freinage électrique du moteur à courant continu alimenté par un hacheur parallèle.

A partir, des tableaux dressés, des essais effectués et des courbes tracées, une comparaison entre les résultats expérimentaux obtenus et les résultats théoriques sont concordants.

Nous soulignons que cette étude pourrait faire l'objet d'une utilisation en milieu industriel.

En ce qui nous concerne, ce travail nous a été bénéfique dans la mesure où il nous a permis de mettre en pratique certains concepts théoriques acquis durant notre formation et d'acquérir une idée quant à leur concrétisation.



**ANNEXE.**



```

10 SCREEN 2
20 CLS:KEY OFF
30 LOCATE 6,12 :PRINT "BONJOUR"
40 LOCATE 8,12:PRINT "QUELLE COURBE VOULEZ VOUS TRACER"
50 LOCATE 10,12:PRINT "FAITES VOTRE CHOIX:"
60 LOCATE 12,12:PRINT "1.temps de freinage en fonction de la vitesse:"
70 LOCATE 14,12:PRINT "2.le couple moteur en fonction du courant:"
80 LOCATE 16,12:PRINT "3.la resistance de freinage en fonction de i:"
90 LOCATE 18,12:PRINT "4.la F.E .M fonction de la vitesse:"
100 LOCATE 20,12:PRINT "5.Arreter le programme:"
110 INPUT R
120 ON R GOTO 130,620,1000,1440,1900
130 CLS:KEY OFF
140 PRINT "***** temps de freinage en fonction de la vitesse ****"
150 PRINT "***** le couple moteur en fonction du courant *****"
160 PRINT "***** la resistance de freinage en fonction de i *****"
170 PRINT:PRINT :INPUT "appuyer sur return pour avoir la courbe";R
180 PRINT :INPUT "quelle est la valeur maximale de la vitesse:";VX
190 PRINT :INPUT "quelle est la valeur minimale de l'axe y :";VY
200 CLS
210 SCREEN 2
220 FOR I=10 TO 600 STEP 600/5
230 LINE (10,170)-(600,170):LINE(1,170+.6)-(1,170-.6)
240 NEXT I
250 FOR I=10 TO 170 STEP 170/3
260 LINE (10,10)-(10,170):LINE(10+.6,1)-(10-.6,1)
270 NEXT I
280 VIEW(10,10)-(600,170)
290 WINDOW(0,0)-(VX,VY)
300 FOR J=1 TO 6 STEP 1
310 FOR X=.0001 TO VX STEP 1
320 A=(.01*.6.28*X)/(60*9.000001E-02)
330 Y=(.01/.063)*LOG(1+(A*X/J))
340 PSET(X,Y)
350 NEXT X
360 NEXT J
370 LOCATE 1,1:PRINT "I(f)"
380 K=VY/3
390 FOR M=16 TO 2 STEP -7
400 LOCATE M,4:PRINT K:K=K+VY/3
410 NEXT M
420 J=0
430 FOR I=2 TO 74 STEP 14
440 LOCATE 23,I:PRINT J
450 J=J+VX/5
460 NEXT I
470 LOCATE 23,79:PRINT "N"
480 LOCATE 12,22:PRINT "Le temps de freinage"
490 LOCATE 13,22:PRINT "en fonction de la vitesse (tr/s)"
500 LOCATE 14,22:PRINT "a des courants donnés"
510 LOCATE 1,55:PRINT "I=1A"
520 LOCATE 1,76:PRINT "I=2A"
530 LOCATE 2,76:PRINT "I=3A"
540 LOCATE 3,76:PRINT "I=4A"
550 LOCATE 4,76:PRINT "I=5A"
560 LOCATE 5,76:PRINT "I=6A"
570 LOCATE 24,3:INPUT G
580 CLS:SCREEN 1
590 LOCATE 12,12:PRINT "1.voulez vous avoir le menu"
600 LOCATE 14,12:PRINT "2.voulez vous arreter"
610 INPUT R:ON R GOTO 10,1900
620 CLS:KEY OFF
630 PRINT "***** le couple moteur en fonction du courant *****"
640 PRINT "***** la resistance de freinage en fonction de i *****"
650 PRINT "***** temps de freinage en fonction de la vitesse *****"
660 PRINT:PRINT :INPUT "appuyer sur return pour avoir la courbe";R
670 CLS:KEY OFF
680 SCREEN 2
690 FOR I=10 TO 600 STEP 600/5
700 LINE (10,180)-(600,180):LINE(1,180+.6)-(1,180-.6)
710 NEXT I
720 FOR I=10 TO 180 STEP 180/3
730 LINE (10,10)-(10,180):LINE(10+.6,1)-(10-.6,1)

```



```

740 NEXT I
750 VIEW(10,10)-(600,180)
760 WINDOW(0,0)-(30,30)
770 FOR X=.01 TO 30 STEP .05
780 Y=(.036*X+.0286*X^2)
790 PSET(X,Y)
800 NEXT X
810 LOCATE 1,1:PRINT "Cm"
820 LOCATE 1,4:PRINT "30"
830 LOCATE 9,3:PRINT "20"
840 LOCATE 17,3:PRINT "10"
850 LOCATE 22,3:PRINT "0"
860 LOCATE 22,17:PRINT "6"
870 LOCATE 22,32:PRINT "12"
880 LOCATE 22,47:PRINT "18"
890 LOCATE 22,62:PRINT "24"
900 LOCATE 22,75:PRINT "30"
910 LOCATE 16,45:PRINT "Le Couple moteur en fonction de I "
920 LOCATE 17,45:PRINT "pour le moteur a excitation serie"
930 LOCATE 24,3:INPUT G
940 CLS:SCREEN 1:LOCATE 12,12:PRINT "1.voulez vous avoir le menu"
950 LOCATE 14,12:PRINT "2.voulez vous arreter"
960 INPUT R:ON R GOTO 10,1900
970 CLS:SCREEN 1:LOCATE 12,12:PRINT "1.voulez vous avoir le menu"
980 LOCATE 14,12:PRINT "2.voulez vous arreter"
990 INPUT R:ON R GOTO 10,1900
1000 CLS:KEY OFF
1010 PRINT "*****"
1020 PRINT "**** la resistance de freinage en fonction de ****"
1030 PRINT "*****"
1040 PRINT:PRINT:INPUT "appuyer sur return pour avoir la courbe":K
1050 CLS:KEY OFF
1060 SCREEN 2
1070 FOR I=10 TO 600 STEP 600/5
1080 LINE (10,180)-(600,180):LINE(I,180+.6)-(I,180-.6)
1090 NEXT I
1100 FOR I=10 TO 180 STEP 180/3
1110 LINE (10,10)-(10,180):LINE(10+.6,I)-(10-.6,I)
1120 NEXT I
1130 VIEW(10,10)-(600,180)
1140 WINDOW(0,0)-(5,120)
1150 FOR X=1 TO 5 STEP .005
1160 FOR J=1 TO 6 STEP 1
1170 A=(1425*.036)/J:B=(1425*.0286)
1180 PSET(X,(A*X+B))
1190 NEXT J
1200 NEXT X
1210 LOCATE 1,1:PRINT "Rf"
1220 LOCATE 1,4:PRINT "120"
1230 LOCATE 9,3:PRINT "80"
1240 LOCATE 17,3:PRINT "40"
1250 LOCATE 22,3:PRINT "0"
1260 LOCATE 22,17:PRINT "1"
1270 LOCATE 22,32:PRINT "2"
1280 LOCATE 22,47:PRINT "3"
1290 LOCATE 22,62:PRINT "4"
1300 LOCATE 22,75:PRINT "5"
1310 LOCATE 5,20:PRINT "I=1A"
1320 LOCATE 5,35:PRINT "I=2A"
1330 LOCATE 5,48:PRINT "I=3A"
1340 LOCATE 5,65:PRINT "I=4A"
1350 LOCATE 6,75:PRINT "I=5A"
1360 LOCATE 9,75:PRINT "I=6A"
1370 LOCATE 15,45:PRINT "La rsistance de freinage"
1380 LOCATE 16,45:PRINT "en fonction de I à des"
1390 LOCATE 17,45:PRINT "courants donnés"
1400 LOCATE 24,3:INPUT G
1410 CLS:SCREEN 1:LOCATE 12,12:PRINT "1.voulez vous avoir le menu"
1420 LOCATE 14,12:PRINT "2.voulez vous arreter"
1430 INPUT R:ON R GOTO 10,1900
1440 CLS:KEY OFF
1450 PRINT "**** la F.E.M en fonction de la vitesse ****"

```



```

1470 PRINT "*****"
1480 PRINT:PRINT :INPUT "appuyer sur return pour avoir la courbe",R
1490 CLS:KEY OFF
1500 SCREEN 2
1510 FOR I=10 TO 600 STEP 600/5
1520 LINE (10,180)-(600,180):LINE(I,180+.6)-(I,180-.6)
1530 NEXT I
1540 FOR I=10 TO 180 STEP 180/3
1550 LINE (10,10)-(10,180):LINE(10+.6,I)-(10-.6,I)
1560 NEXT I
1570 VIEW(10,10)-(600,180)
1580 WINDOW(0,0)-(1500,300)
1590 FOR X=.0001 TO 1500 STEP 1
1600 FOR J=1 TO 6 STEP 1
1610 Y=(.036+(.0286*J))*X
1620 PSET(X,Y)
1630 NEXT J
1640 NEXT X
1650 LOCATE 1,1:PRINT "E(V)"
1660 LOCATE 1,5:PRINT "300"
1670 LOCATE 9,3:PRINT "200"
1680 LOCATE 17,4:PRINT "100"
1690 LOCATE 22,3:PRINT "0"
1700 LOCATE 22,17:PRINT "300"
1710 LOCATE 22,32:PRINT "600"
1720 LOCATE 22,47:PRINT "900"
1730 LOCATE 22,62:PRINT "1200"
1740 LOCATE 22,75:PRINT "1500"
1750 LOCATE 23,78:PRINT "N"
1760 LOCATE 8,10:PRINT "La F.E.M du moteur en fonction "
1770 LOCATE 9,10:PRINT "de la vitesse (tr/mn) "
1780 LOCATE 10,10:PRINT "a des courants pour "
1790 LOCATE 11,10:PRINT "le moteur serie"
1800 LOCATE 7,65:PRINT "I=5A"
1810 LOCATE 4,65:PRINT "I=6A"
1820 LOCATE 10,65:PRINT "I=4A"
1830 LOCATE 13,65:PRINT "I=3A"
1840 LOCATE 16,65:PRINT "I=2A"
1850 LOCATE 19,65:PRINT "I=1A"
1860 LOCATE 24,3:INPUT G
1870 CLS :SCREEN 1:LOCATE 12,12:PRINT "1.voulez vous avoir le menu"
1880 LOCATE 14,12:PRINT "2.voulez vous arreter"
1890 INPUT R:ON R GOTO 10,1900
1900 CLS:KEY OFF
1910 PRINT "*****"
1920 PRINT "****          la fin de la programmation          ****"
1930 PRINT "*****"
1940 PRINT:PRINT :INPUT "appuyer sur return pour sortir du programme",R

```



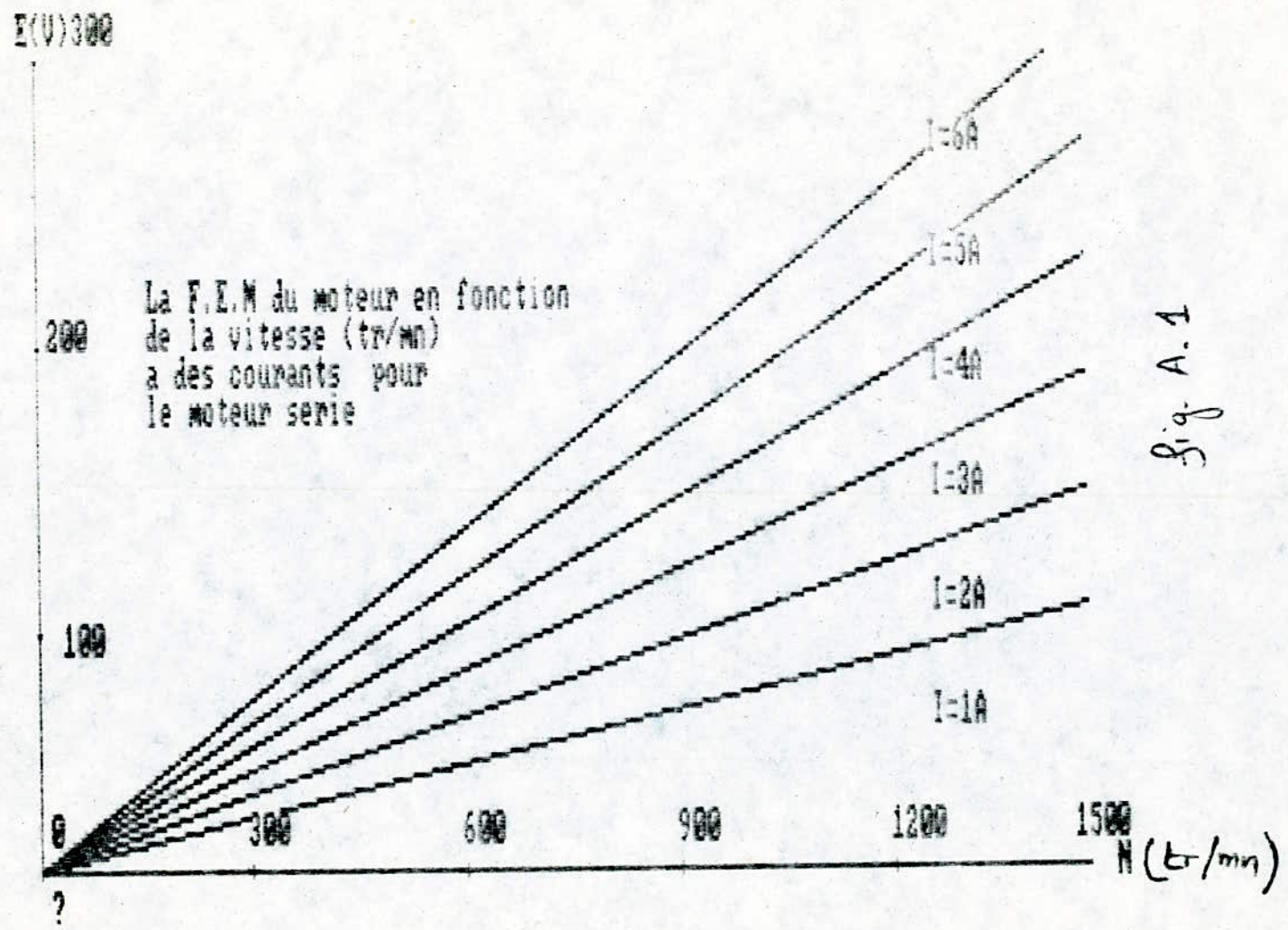


Fig. A.1

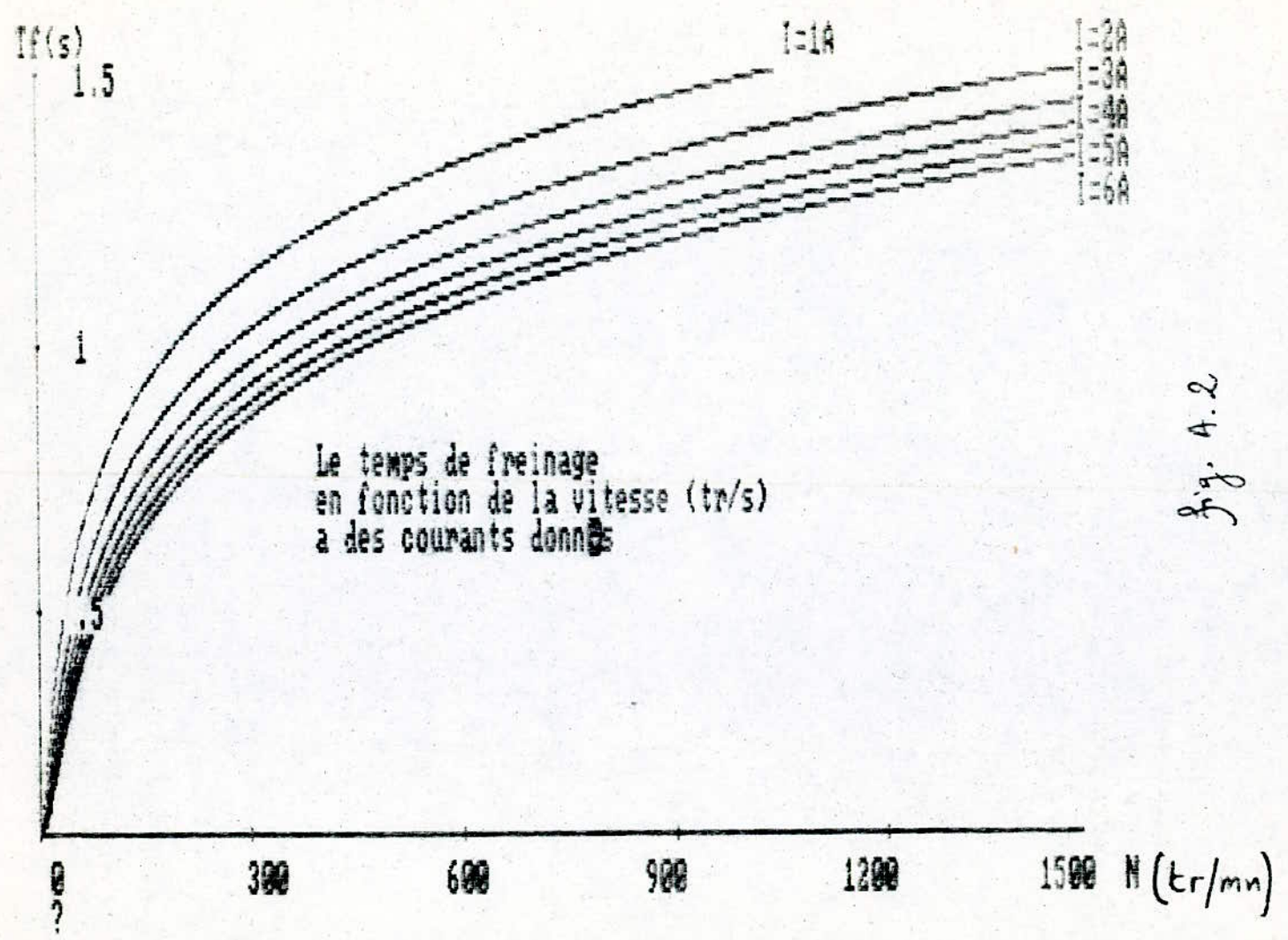
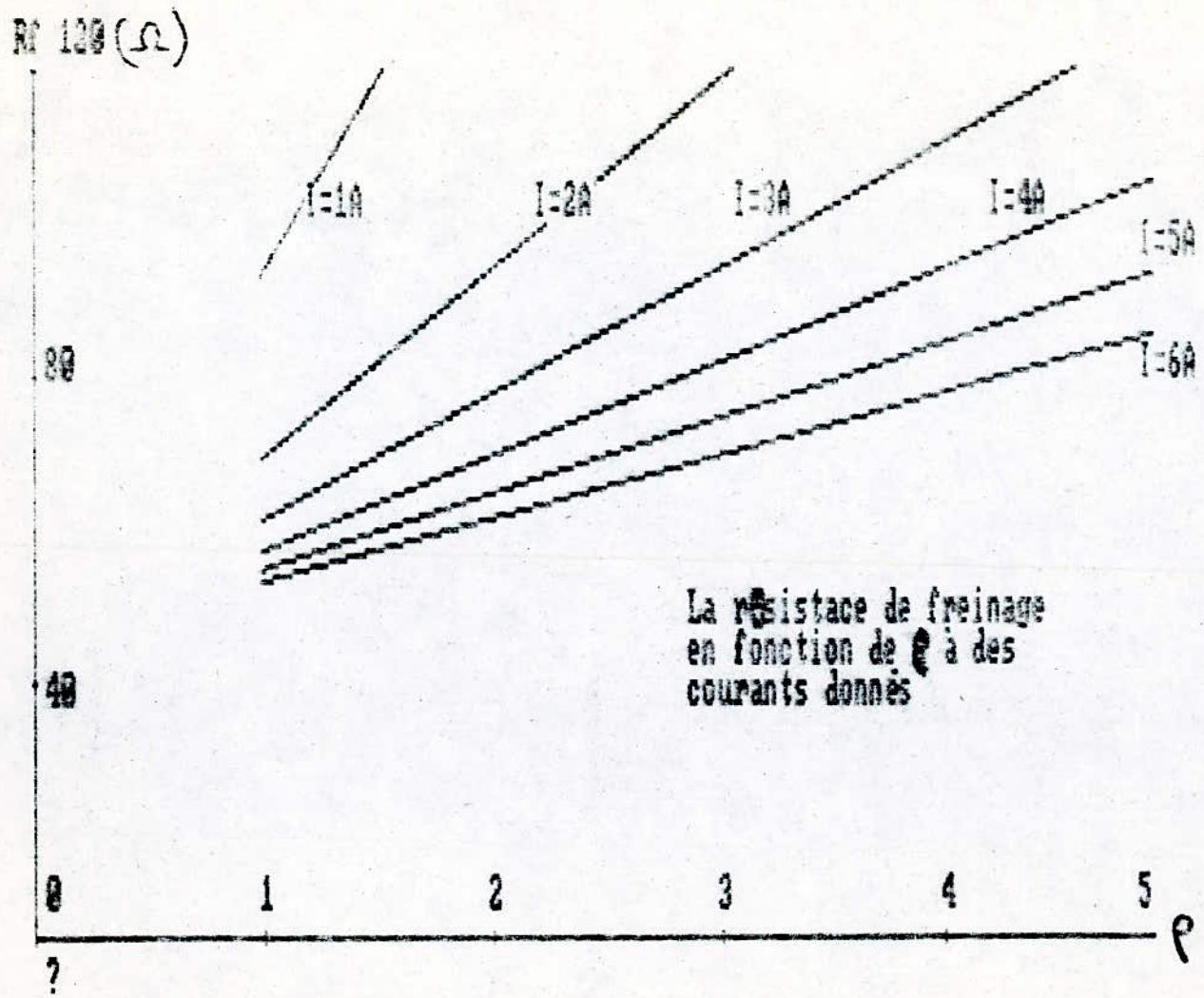


Fig. 4.2





La résistance de freinage en fonction de  $\rho$  à des courants donnés

Fig. A.3

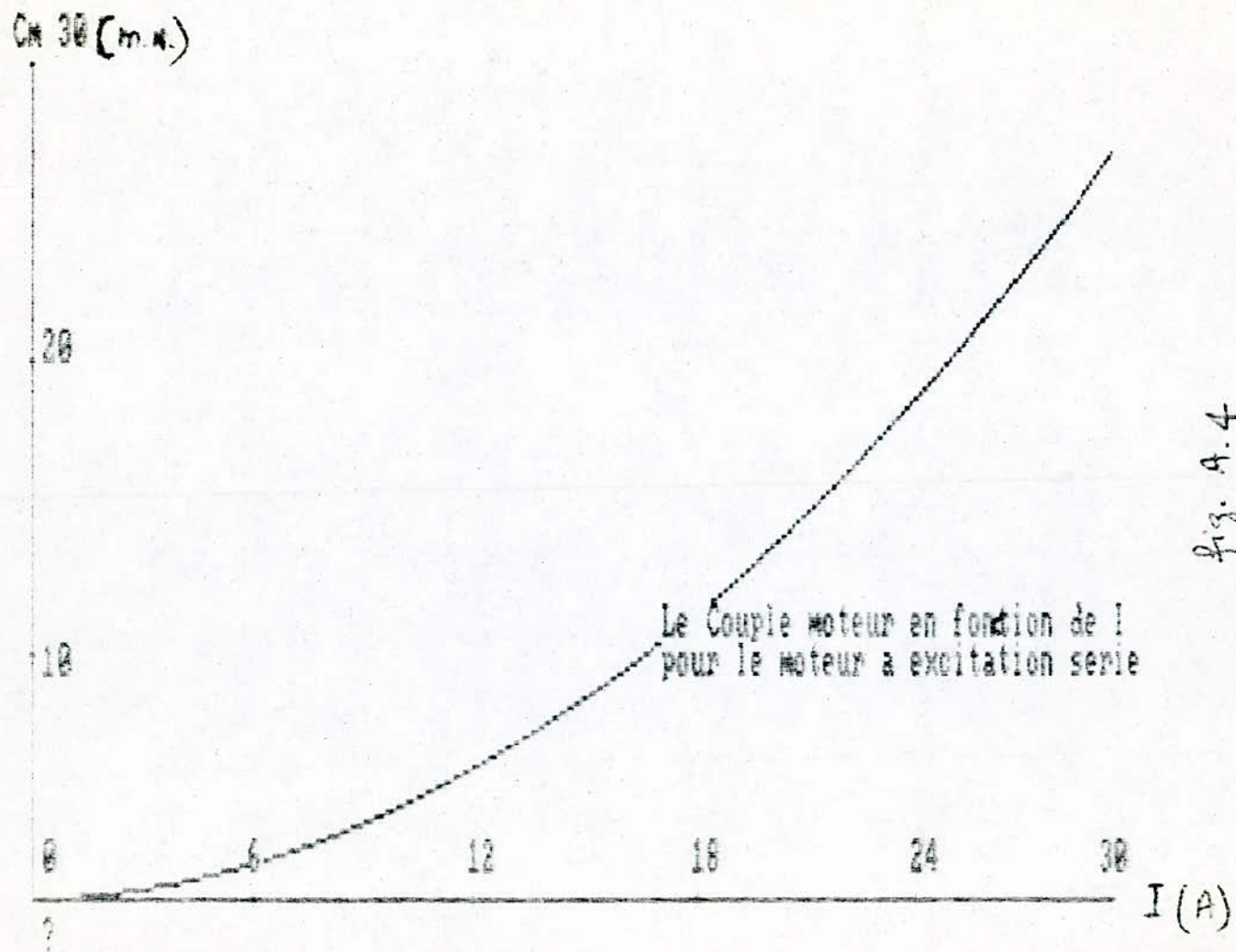


fig. A.4



# BIBLIOGRAPHIE

1. R. CHAUPRADE " Electronique de puissance " tome 1  
édition Eyrolles 1984
2. FRANCIS MILSANT " Diodes thyristors. Commande " tome 5  
des moteurs édition Eyrolles 1985
3. G. SEQUIER " L'électronique de puissance " édition Dunod 1985
4. A. FOUILLE " Machines continues, électronique " tome 3  
de puissance édition Dunod 1980
5. GARREAU " La traction électrique " édition Eyrolles 1965
6. PATIN " La traction électrique " et  
diesel électrique édition Eyrolles 1954
7. DALMASSO " Cours d'électrotechnique " tome 2  
édition Belin 1984
8. A.C.E.C " Les hacheurs en traction électrique " charleroi (Belgique) Juin 1983

