

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT **Electrotechnique**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

**S U J E T**

Etude Comparative de modes de  
freinage d'une machine à courant  
continu

Proposé par :

Etudié par :

Dirigé par :

Mr.A.MAAZI

KATTAN Rafik

Mr.A.MAAZI

Mr.TAHMI

DOUARA Ahmed

Mr.TAHMI

PROMOTION : **Janvier 1986**

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT **Electrotechnique**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

**S U J E T**

**Etude Comparative de modes de  
freinage d'une machine à courant  
continu**

Proposé par :

Etudié par :

Dirigé par :

**Mr.A.MAAZI**

**KATTAN Rafik**

**Mr.A.MAAZI**

**Mr.TAHMI**

**DOUARA Ahmed**

**Mr.TAHMI**

PROMOTION : **Janvier 1986**



## الاهداء

الى أهلي الاحباء .

الى القبطان المرفوعة في وجه الاحتلال الاسرائيلي في لبنان و فلسطين

الى الزهرة التي سقطت في عتمة الليل الطويل .

مع حبي  
رفيق

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

A mes parents que je chérissse de tout mon cœur et à qui j'éprouve de l'affection et de la tendresse;

A tous ceux qui suivent le droit chemin et qui croient en un dieu seul et à Mohammed son envoyé et en le jugement dernier;

A tous ceux qui me sont chers, je dédie ce modeste travail

Ahmed Douara

## Remerciement

Nous exprimant ici notre sincère gratitude à Monsieur MAAZI pour nous avoir prodigué ses conseils et nous avoir suivi tout le long de ce travail.

Nous remercions aussi monsieur TAHMI pour l'aide qu'il nous a apporté.

Nos remerciements vont également au jury qui bien voulu juger notre travail.

Tous nos remerciements vont aux enseignants qui, de près ou de loin, ont participé à notre formation.

L. S. S. S.

## TABLE DES MATIERES

### Chapitre 1.

Introduction - théorie du freinage. (1)

### Chapitre 2. Identification de la machine de travail

- 2.1. Plaque signalétique 5
- 2.2. Mesures de résistances des enroulements de la machines ... 5
- 2.3. Mesures d'inductances ... 6
- 2.4. Calcul du moment d'inertie total 7
- 2.5. Calcul du gradient du courant de démarrage 9

### Chapitre 3 Freinage rhéostatique

#### A. Etude théorique

- 1. Caractéristiques de freinage: vitesse, couple, courant 10
- 2. Moteur dérivation 11
- 3. Moteur série 15
- 4. Moteur compound 15

#### B Etude pratique

- 1. Moteur à excitation séparée 17
- 2. Moteur shunt 19
- 3. Moteur série 21
- 4. Moteur compound à flux additifs 23
- 5. " " " " soustractifs 24
- 6. Comparaison des résultats 26

### Chapitre 4 Freinage à contre courant

#### A. Etude théorique

- 1. Moteur dérivation 27
- 2. " série 29

3. Moteur compound	30
B Etude pratique	
1. Moteur à excitation séparée	31
2. Moteur shunt	31
3 Moteur série	33
4 " à flux additifs	34
5 " " " soustractifs	34
- Comparaison des résultats	37
Chapitre 5 Freinage par récupération	
Première méthode.	
A. Etude théorique	38
B Etude pratique	39
Conclusion	46
Deuxième méthode	
A Etude théorique	47
B Etude pratique	49
Chapitre 6 Comparaison des résultats.	51
Chapitre 7 Proposition d'un freinage rhéostatique par tracheur	
Introduction	53
Principe	53
(X) Conclusion générale	56



# CHAPITRE 1

## Introduction

### Théorie du freinage

Dans les dispositifs de commande modernes, il est souvent nécessaire d'arrêter rapidement la machine actionnée ou de modifier son sens de rotation; la vitesse et la précision de ces opérations déterminent souvent le rendement de la machine et par fois la qualité du produit fabriqué (exemple du laminage).

Ainsi dans de nombreuses applications (traction, engins de levage) le problème de freinage est important. Certes, on peut toujours faire appel à des systèmes mécaniques, mais ceux-ci sont généralement complexes et les organes de freinage (patins...) s'usent rapidement. C'est pourquoi on préfère utiliser une solution électrique qui consiste à transformer en énergie électrique l'énergie cinétique du moteur et de la machine entraînés. Le moteur étant alors transformé en génératrice et le couple électromagnétique devient un couple résistant de freinage.

Suivant la façon dont on utilise l'énergie électrique de freinage, on distingue trois types de freinage électrique :

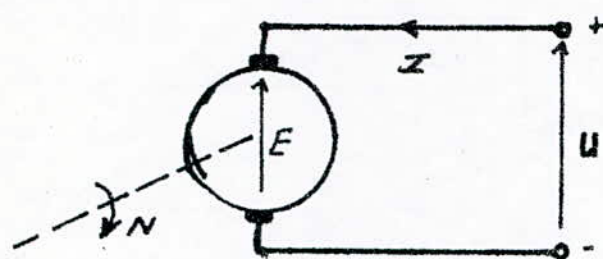
- freinage par récupération
- freinage dynamique (rhéostatique)
- freinage à contre courant

#### 1. FREINAGE PAR RECUPERATION

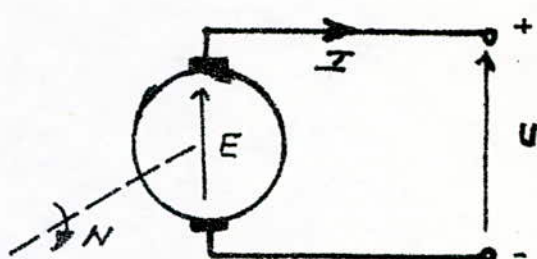
Le freinage par récupération de l'énergie est réalisé lorsque la vitesse du moteur est supérieure à la vitesse de marche à vide et sa f.e.m est supérieure à la tension  $U$  appliquée. Le moteur fonctionne alors en générateur en parallèle avec le réseau auquel il livre de l'énergie.

On applique ce type de freinage pour éviter la dissipation d'énergie.

Malheureusement ce procédé, qui est très séduisant, n'est pas simple à réaliser. En effet si l'on considère le circuit équivalent d'une machine à courant continu, on constate que le mode de fonctionnement: moteur ou génératrice est lié à l'inégalité entre  $U$  (tension appliquée à la machine) et la f.e.m.  $E$  (figure ci. après).



marche en moteur  $U > E$



marche en gén.  $E > U$

Lé courant d'induit s'inverse, ce qui a pour effet de changer le sens du couple électromagnétique. Et comme le sens de rotation reste le même, alors la machine freine. Ce résultat peut être obtenu par deux méthodes :

a/ fonctionnement à tension constante.

La condition  $E > U$  ne peut être réalisée que si la vitesse du groupe augmente légèrement. Ce procédé est appelé freinage en sur vitesse. On l'utilise en traction électrique où la sur vitesse est obtenue dans les pentes ou lorsqu'on veut freiner le convoi.

b/ fonctionnement à tension réglable.

Le fonctionnement à tension constante a des applications très limitées, car il n'est évidemment pas possible d'obtenir l'arrêt du groupe (moteur, machine entraînée) par ce procédé. Il en est tout autrement si l'on dispose d'une tension réglable. Car en réduisant cette tension au fur et à mesure que le groupe ralentit on pourra maintenir la condition  $E > U$  même aux plus basses vitesses.

Ce procédé qui présente une très grande souplesse, a malheureusement l'inconvénient de nécessiter un groupe convertisseur mécanique ou électronique.

## 2. FREINAGE DYNAMIQUE

Ce freinage a lieu lorsque l'induit du moteur est (connecté) déconnecté du réseau et débité dans une résistance. Le régime de freinage rhéostatique correspond également au fonctionnement de la machine en générateur. Mais ce régime diffère du freinage par récupération. Dans le premier cas l'énergie cinétique transformée en énergie électrique est dissipée sous forme de chaleur (pertes joules) dans le circuit d'induit.

## 3. FREINAGE A CONTRE COURANT

Il est réalisé lorsque les enroulements du moteur sont connectés pour un sens de rotation tandis que l'induit du moteur sous l'action d'un couple extérieur ou des forces d'inertie tourne dans le sens inverse. C'est ce qui se passe par exemple dans les systèmes de commande d'un monte charge lorsque le moteur est branché pour le levage et que le couple développé par la charge fait tourner l'ensemble dans le sens de la descente. Un tel régime s'obtient également lors de la commutation du moteur pour la rotation en sens inverse afin de réaliser un arrêt rapide.

Le freinage à contre courant a lieu le plus souvent lorsque on change la polarité de la tension appliquée à l'induit du moteur lors de la rotation. Dans ce cas la f.e.m. coïncide avec la tension du réseau et le couple moteur est opposé au sens de rotation de l'induit. Pour limiter le courant dans l'induit il faut insérer une résistance supplémentaire dans le circuit.

N.B. Le freinage électrique est actuellement très répandu surtout lors-

qu'il s'agit des machines à démarrage fréquent. Pour les systèmes de commande non réversibles on utilise le plus souvent le freinage rhéostatique car sa réalisation est plus simple. Pour les systèmes de commande réversibles, où le freinage et le démarrage du moteur dans le sens inverse présentent un processus unique, il est plus rationnel d'utiliser le freinage à contre courant qui assure un gain de temps du freinage.

## CHAPITRE 2

### Identification de la machine de travail

#### 1. Plaque signalétique

Elle donne les valeurs des différents paramètres pour un point de fonctionnement nominal

tension	$U = 120$ Volts	courant d'induit $I = 29$ Amp.
vitesse	$N = 1425$ tr/min	courant inducteur $J = 0,8$ Amp.
Puissance	$P = 3,8$ Ch.	

#### 2. Mesures de résistances

Le montage de principe est celui de la figure (2.1)

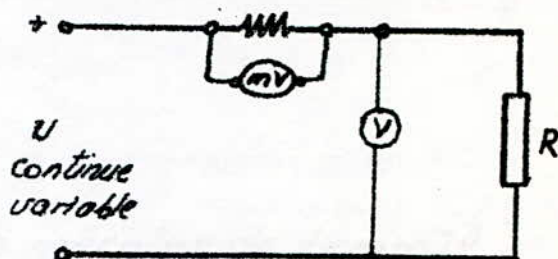
##### 2.1 Résistance d'induit

Pour un courant de 20 ampères on relève une tension de 9 volts. Ce qui donne une résistance d'induit de

$$R_{ind} = \frac{U}{I} = \frac{9}{20} = 0,45 \Omega$$

soit

$$R_{ind} = 0,45 \Omega$$



(figure 2.1)

##### 2.2. Résistance de l'inducteur série

Son calcul se fait pour un courant de 20 ampères, on relève une tension de 1,6 volts.

$$\text{Donc } R_s = \frac{U}{I} = \frac{1,6}{20} = 0,08 \Omega$$

$$R_s = 0,08 \Omega$$

##### 2.3 Résistance de l'inducteur shunt

Pour un courant égal au courant nominal (0,8 amp), la tension aux bornes est  $U = 108$  volts

$$\text{Donc } R_{sh} = \frac{U}{I} = \frac{108}{0,8} = 136 \Omega$$

$$R_{sh} = 136 \Omega$$

### 3. Mesures d'inductances

Utilisant la propriété des bobines d'emmagasiner l'énergie

$$w = \frac{1}{2} L i^2$$

on peut déterminer les self-inductances des enroulements de la machine; en procédant comme suit; (voir, figure 2.2

En premier lieu, on va limiter le courant dans la maille (1):  
L'interrupteur étant fermé on augmente la tension  $U$  jusqu'à avoir un courant dans (1) de 10 ampères.

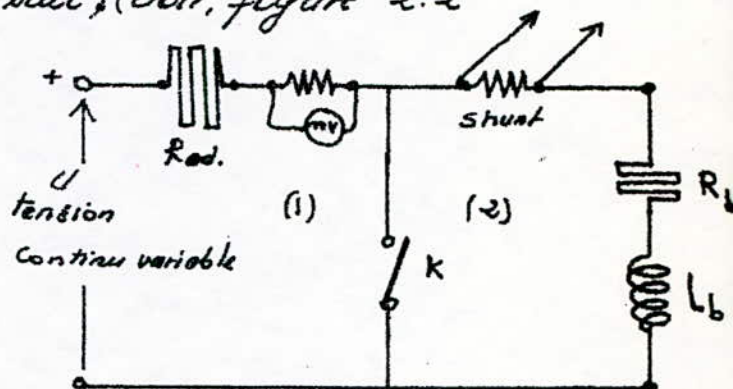


figure 2.2

Puis on ne touche plus au réglage de  $U$ .

Cette précaution étant prise, on ouvre l'interrupteur  $K$  et la source débite sur l'enroulement ayant pour résistance  $R_b$  et pour self  $L_b$ .

On referme alors l'interrupteur  $K$  et l'énergie emmagasinée du bobinage se dissipe dans la maille 2.

Le courant est donné par l'équation:

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

ou bien

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

soit  $i = A \cdot e^{-t/\tau}$  avec  $\tau = L_b / R_b$

Les conditions initiales donnent:

pour  $t=0$  on a  $I = I_0$

d'où  $i = I_0 \exp(-t/\tau)$

L'oscilloscope nous donne l'image de ce courant (figure 2.3)  
 Et au lieu de tracer la tangente, pour avoir la constante de temps  $\tau$ , il est plus commode de prendre  $i = 36,67\%$  de  $I_0$  et le temps correspondant sera  $\tau$ .

Or

$$\tau = L_s / R_s$$

d'où  $L_s = R_s \cdot \tau$

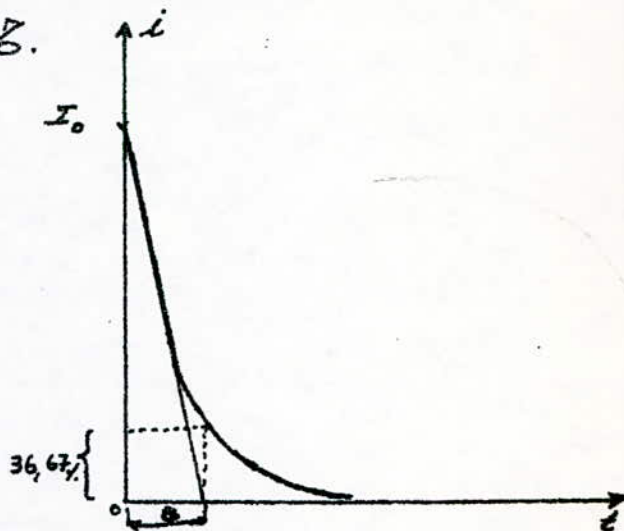
Application.

- Pour l'induit

$$\left. \begin{array}{l} \tau = 34,6 \text{ ms} \\ R_{\text{ind}} = 0,45 \Omega \end{array} \right\} L_{\text{ind}} = 15,57 \text{ mH}$$

- Pour l'inducteur série

$$\left. \begin{array}{l} \tau = 76 \text{ ms} \\ R_s = 0,08 \Omega \end{array} \right\} L_s = 6,08 \text{ mH}$$



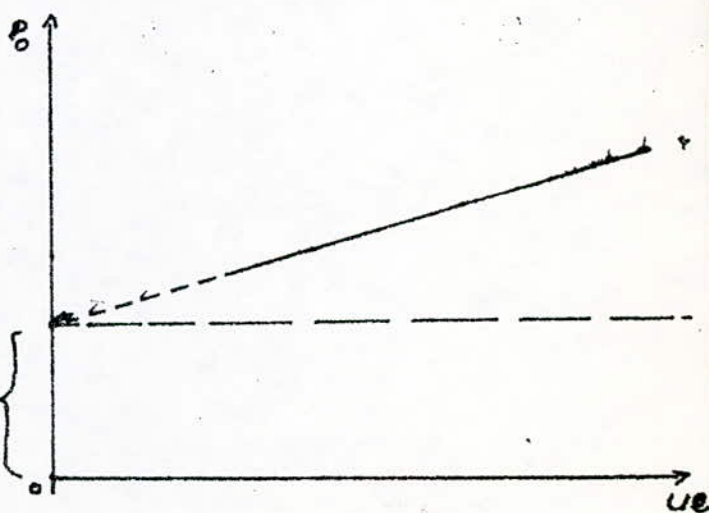
#### 4. Calcul du moment d'inertie total.

##### 4.1. Mesure des pertes mécaniques

Un essai à vide permet de tracer la courbe de variation des pertes ( $P_0$ ) en fonction de la tension  $U$  appliquée. Mais puisqu'on devait faire une extrapolation, on préfère donc tracer  $P_0(U_e)$  qui est une droite.

$U$ (V)	88	70	50
$I$ (A)	3	3,5	4,7
$P_0$ (W)	264	245	235
$U_e^2$ (V <sup>2</sup> )	7744	4900	2500

soit  $P_m = 277,5 \text{ W}$



#### 4.2. Calcul de la constante de temps mécanique

On fait tourner le groupe à une vitesse de 1000 (tr/min), puis on ouvre le circuit (figure ).

Le mouvement est régi par l'équation :

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

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

La solution est de la forme  $\Omega = A e^{-t/\tau_m}$

$$\text{d'où } \Omega = \Omega_0 \cdot e^{-t/\tau_m}$$

puisqu'au temps  $t=0$  on a  $\Omega = \Omega_0$ .

$f$ : étant le coefficient de frottement, qu'on peut prendre égal à

$$f = \frac{P_{me}}{\left(\frac{\Omega_N}{2}\right)^2}$$

soit pour

$$\Omega_N/2 = 74,6/2$$

$$\text{d'où } f = (217,5) / (74,6/2)^2 = 0,039 \text{ kg.m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Prenons ensuite deux points de la courbe  $\Omega(t)$ :

$$(\Omega_1, t_1) \text{ et } (\Omega_2, t_2)$$

$$\text{soit } (92,43, 3,4); (90,34, 4,1)$$

$$\text{on aurait } \frac{\Omega_1}{\Omega_2} = \frac{e^{-t_1/\tau_m}}{e^{-t_2/\tau_m}} = e^{(t_2-t_1)/\tau_m}$$

$$\text{soit } \tau_m = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{\Omega_1}{\Omega_2}} = \frac{4,1 - 3,4}{\ln \frac{92,43}{90,34}} = 30,6 \text{ sec}$$

$$\text{d'où } J = f \cdot \tau_m$$

$$= 0,039 \cdot 30,6 = 1,193 \text{ kg.m}^2$$

$$J = 1,2 \text{ kg.m}^2$$



#### 4. Calcul de grad I

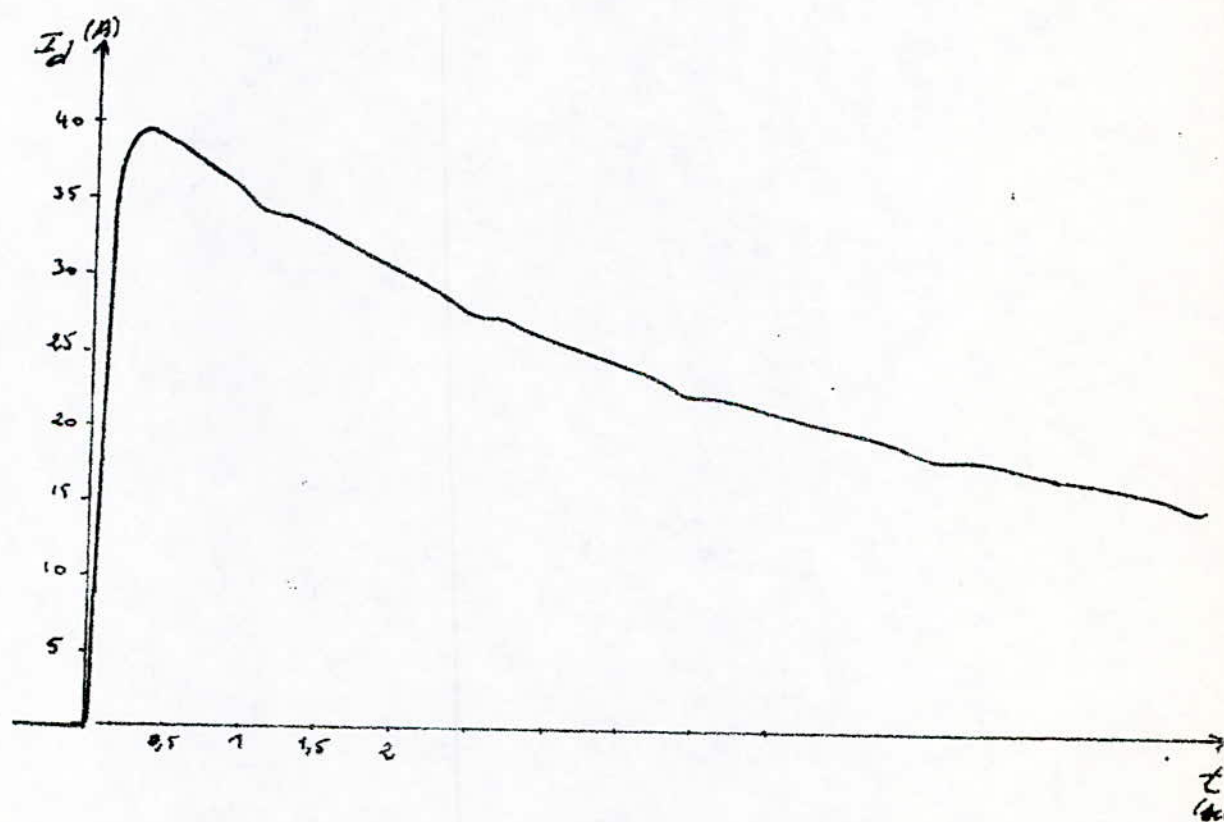
est défini par :

$$\text{grad } I = \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Les rhéostats de démarrage adoptés aux machines laissent passer un courant  $I_d$  de  $2,5 I_n$ . Donc avec un  $(\text{grad } I)_{\max}$  de  $((2,5 \cdot 29) / 0,4) = 181,25 \text{ A/s}$ ; dans notre cas:  $I_n = 29 \text{ A}$ .

Dans le laboratoire de T.P. on utilise des rhéostats non conformes au cas précédent et elles ne laissent passer qu'un courant inférieur à  $2,5 I_n$ . Comme le montre la figure ci-dessous. On a  $(\text{grad } I)_{\max} = \frac{40}{0,4} = 100 \text{ A/s}$ .

Ce qui permet la protection des machines d'essais.



## FREINAGE RHEOSTATIQUE

### A. Etude théorique

#### 3.1 CARACTERISTIQUES DE FREINAGE

Les paramètres définissant le freinage sont essentiellement la vitesse et le courant (couple), en fonction du temps.

L'équation des tensions d'un moteur compensé est

$$U = E + RI$$

ou  $E = \frac{p n \phi N}{a} = K \phi N \quad N \text{ (tr/axe)}$

soit  $U = K \phi N + RI$

(1)

D'autre par le mouvement est rég. par l'équation

$$J \frac{d\omega}{dt} = \sum \text{moments appliqués}$$

En fonctionnement moteur, le couple électromagnétique  $C_e$  est moteur, donc pour un couple résistant  $C_r$ , on a :

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_e - C_r \quad \omega \text{ (rd/sec)}$$

avec  $C_e = \frac{p n \phi I}{0.2\pi} = \frac{k}{2\pi} \phi I = K' \phi I$

soit  $J \frac{d\omega}{dt} = K' \phi I - C_r$

d'où  $I = \frac{J}{K' \phi} \frac{d\omega}{dt} + \frac{C_r}{K' \phi}$

(2)

#### 1.1 Expression de la vitesse

En divisant l'équation (1) par  $2\pi K \phi$  et en substituant  $I$  par son expression (2), il vient :

$$\frac{U}{2\pi K \phi} = \omega + \frac{RJ}{(K \phi)^2} \frac{d\omega}{dt} + \frac{RC_r}{(K \phi)^2} \quad (3)$$

soit  $\omega_0 = \omega + T_H \frac{d\omega}{dt} + \delta \omega_s \quad (4)$

ou  $T_H = \frac{JR}{(K \phi)^2}$  représente la constante de temps électromécanique

L'équation (4) se met sous la forme :

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{T_n} = \omega_0 - s\omega_s$$

La solution est de la forme :

$$\omega = (\omega_0 - s\omega_s) + A e^{-t/T_n} \quad (5)$$

## 1.2 Expression du courant (figure 3.2.2)

En introduisant le courant de charge statique défini par

$$I_s = \frac{C_T}{k'\phi}$$

L'expression (2) du courant devient

$$I = \frac{J}{k'\phi} \frac{d\omega}{dt} + I_s$$

en dérivant l'expression (5), il vient

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{A}{T_n} e^{-t/T_n}$$

$$\text{soit } I = -\frac{JA}{k'\phi T_n} e^{-t/T_n} + I_s$$

La constante  $A$  se détermine des conditions initiales :

au temps  $t=0$ ,  $I = I_{init}$

$$\text{d'où } A = \frac{k'\phi T_n}{J} (I_{init} - I_s)$$

en fin

$$I = I_s + (I_{init} - I_s) \cdot e^{-t/T_n} \quad (6)$$

## 2. FREINAGE D'UN MOTEUR DERIVATION

Pour effectuer le freinage dynamique d'un moteur dérivation, on débranche l'induit du moteur du réseau et on le ferme sur une résistance  $R_f$  (fig. 3.2.1). Deux cas sont possibles :

1<sup>er</sup> cas : L'inducteur reste branché sur l'induit, la machine s'amorce alors en génératrice dérivation.

2<sup>er</sup> cas : L'inducteur reste branché sur la source et la machine fonctionne en génératrice à excitation séparée.

Nous verrons dans la pratique l'intérêt de chaque type des deux montages.

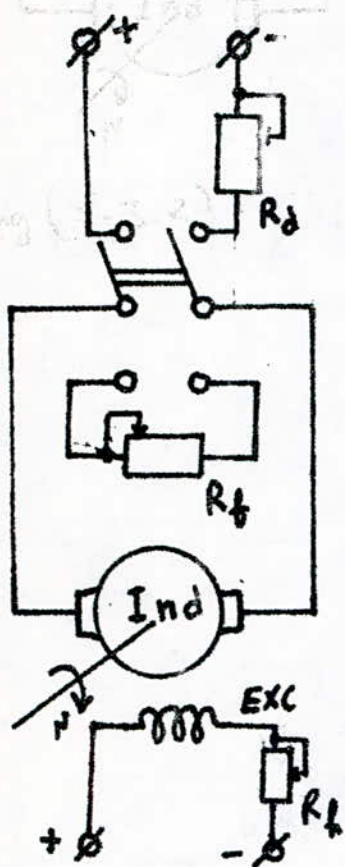
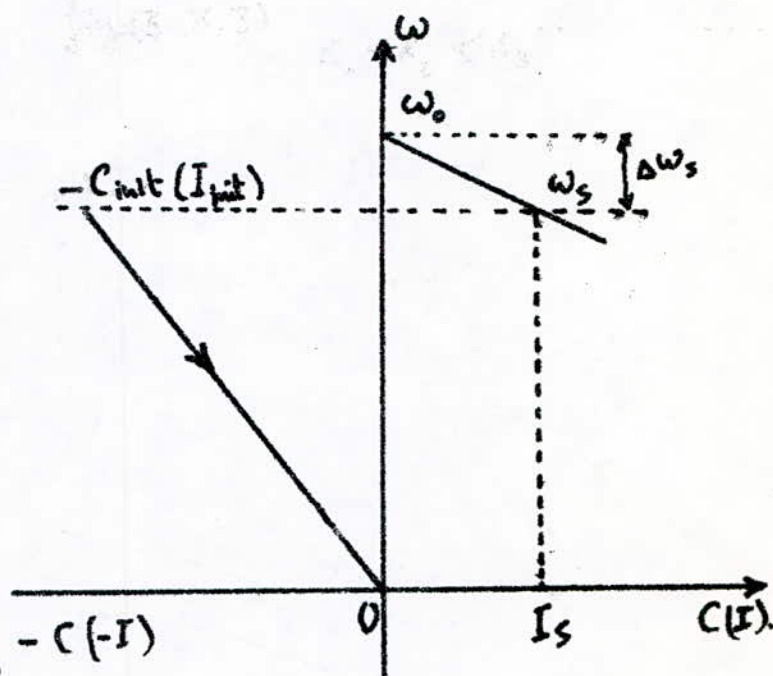


fig (3-2.1)



fig(3-2.2)

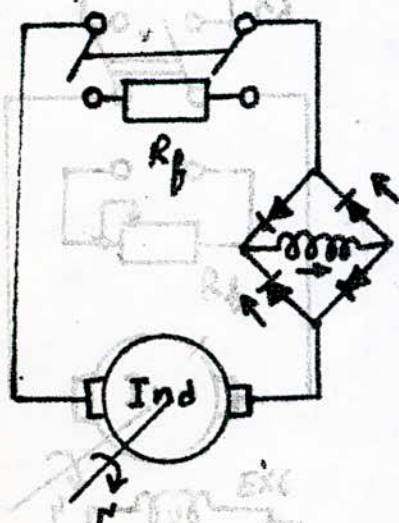
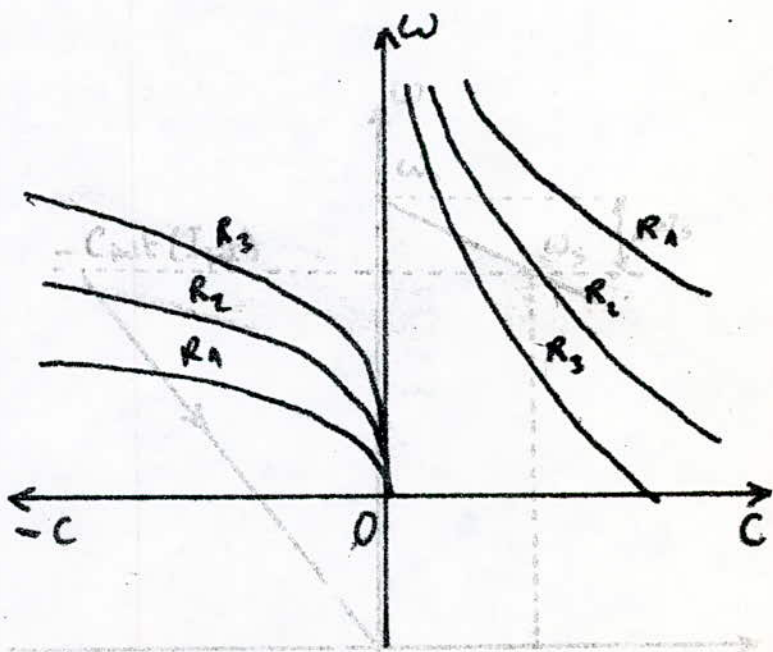


fig (3-3.2)



fig(3-3.3)

$R_1 < R_2 < R_3$

fig(3-2.2)

fig (3-2.1)

Le passage du fonctionnement moteur au freinage correspond à une tension d'alimentation nulle et les équations (i) et (ii) du paragraphe précédent deviennent

$$\begin{cases} K_1 \phi \omega + R I = 0 \\ K' \phi I = J \frac{d\omega}{dt} + C_r \end{cases} \quad \text{avec } K_1 = 2\pi k$$

La solution est comme on l'a déjà vu :

$$\omega = -\Delta\omega_s + A e^{-t/T_M}$$

Au temps  $t=0$ ,  $\omega = \omega_{init} = \omega_s$

$$\text{d'où } A = \omega_{init} + \Delta\omega_s$$

avec  $\omega_s$ : la vitesse constante à laquelle la machine passe du fonctionnement moteur, au fonctionnement génératrice (figure 3.2.2);

$$\text{et } \Delta\omega_s = C_r R / (k \phi)^2$$

La différence de vitesse déterminée d'après la caractéristique du freinage rhéostatique, pour un couple résistant  $C_r$ .

Comme on a  $C_r = 0$  pour un freinage rhéostatique à vide, alors

$$\Delta\omega_s = 0 \text{ et } \omega_{init} = \omega_0$$

et finalement, on a l'expression de la vitesse de freinage en fonction du temps:

$$\boxed{\omega = \omega_0 e^{-t/T_M}}$$

Courant de freinage

En introduisant la constante d'intégration  $A$  correspondant aux conditions initiales  $A = \frac{k \phi T_M}{J} (I_{init} + I_s)$

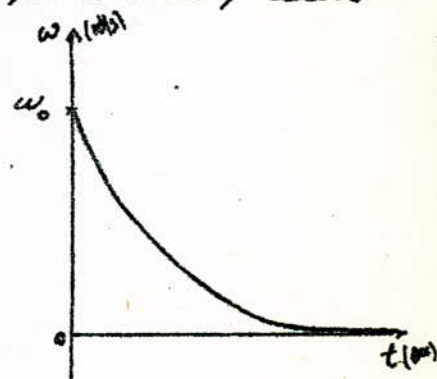
la formule (6) devient

$$I = I_s - (I_{init} + I_s) e^{-t/T_M}$$

pour  $C_r = 0$ , on a :

$$I = -I_{init} e^{-t/T_M}$$

La valeur absolue du courant au moment du changement de signe est



$$I_{init} = \frac{k\phi \omega_{init}}{R}$$

x) Temps de freinage

C'est le temps de passage de la vitesse initiale à une vitesse  $\omega_1$ .  
De l'équation de la vitesse on tire

$$t_1 = T_n \cdot \ln \frac{\omega_{init} + \Delta\omega_s}{\omega_1 + \Delta\omega_s}$$

Pour un freinage complet, on a  $\omega_1 = 0$

d'où 
$$t_f = T_n \cdot \ln \frac{\omega_{init} + \Delta\omega_s}{\Delta\omega_s}$$

Remarque. On avait défini  $T_n$  comme étant la constante de temps électromécanique. C'est-à-dire le temps pendant lequel le groupe de commande possédant un moment d'inertie  $J$  aurait passé, sans charge de l'état immobile à la vitesse à vide idéale  $\omega_0$ , sous l'action d'un couple constant égal au couple de court-circuit,  $C_{cc}$ .

$$T_n = \frac{JR}{(k\phi)^2} = \frac{J\omega_0}{C_{cc}}$$

Si  $R = (R_f + R_{ind})$  augmente alors  $C_{cc}$  diminue et  $T_n$  augmente.

Lorsque  $I_s = 0 \Rightarrow \Delta\omega_s = 0$  et  $t_f$  sera infini

On peut prendre  $t_f = 3 T_n$

d'où 
$$t_f = T_n \cdot \ln \frac{I_{init} + I_s}{I_s}$$

x) Caractéristique mécanique  $\omega(I_f)$  (fig. 3.2.2)

Le couple de freinage étant  $C_f = k'\phi I$ , alors, pour un courant de freinage égal à  $E / (R_f + R_{ind})$

on a 
$$C_f = \frac{(k\phi)^2}{R} \omega$$

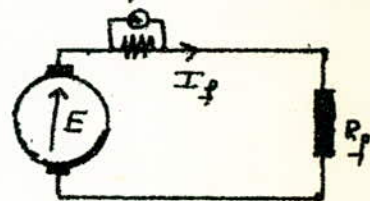
ou bien 
$$\omega = \frac{R}{(k\phi)^2} C_f$$

x) Caractéristique de vitesse  $\omega(I)$

Des équations précédentes on tire

$$\omega = \frac{R}{(k\phi)^2} \cdot I$$

C'est une droite de paramètre  $R$  (fig. 3.2.3), pour  $\phi$  constant.



### 3. FREINAGE DU MOTEUR SERIE

Ce mode <sup>de</sup> freinage est possible, mais il faut inverser la connecti-  
on entre induit et inducteur lors de la séparation de la machine de la  
source (fig. 3.3.1) ci-contre.

Sinon la machine ne s'arrêterait pas.

En effet la f.e.m. due au rémanent, ayant  
le même sens que la f.e.m. du moteur, cré-  
erait un courant qui déteinterait le réma-  
nent. On utilise un pont redresseur qui  
facilite la tâche (fig. 3.3.2)

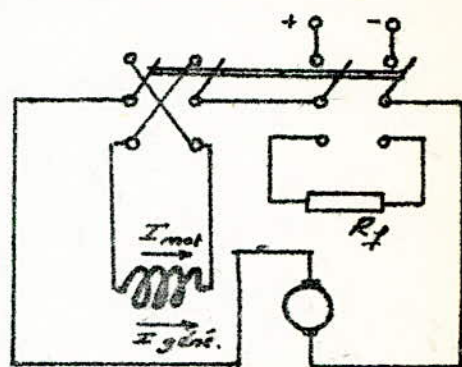


fig. 3.3.1

La machine étant auto excitée, le couple de freinage sera

$$C_f = k' \phi I = k' (a I) I = k'' I^2$$

$\alpha$  étant le rapport d'équivalence égal à  $J/I$ .

Les caractéristiques mécaniques prendraient l'allure des figures (3.3.3)

Il peut se produire une auto excitation qui provoque un saut considéra-  
ble du couple de freinage. Ce dernier, avec les masses d'inertie re-  
lativement grandes (machine entraînée + volant) peut provoquer de  
chocs mécaniques sur l'arbre et sur le manchon d'accouplement.

### 4. FREINAGE DU MOTEUR COMPOUND

Ce moteur a été conçu pour réunir les qualités du moteur  
série et du moteur shunt.

Bien que ce moteur est peu utilisé, vu la complexité de  
son fonctionnement, on a pu faire quelques essais dessus.

On distingue :

- le moteur à flux additifs
- le moteur à flux soustractifs.

$$\phi_t = \phi_0 \pm a I_{ind}$$

où  $\phi_0$  représente le flux produit par l'enroulement shunt;

$\alpha I_{ind}$ : le flux produit par l'inducteur série.

Le couple de freinage sera:

$$C_f = k' \phi_t \cdot I = k' (\phi_0 \pm \alpha I) I$$

soit  $C_f = C_{f_0} \pm \alpha I^2$

De même pour la vitesse, on a

$$N = \frac{R I}{k (\phi_0 \pm \alpha I)}$$

Ainsi, suivant que le fonctionnement est à flux additifs ou soustraitifs, le couple et la vitesse prennent des allures différentes.

Nous verrons ceci en pratique.



## 8. ETUDE PRATIQUE

Certains essais doivent être effectués en charge, exemple du moteur série. Pour cela une génératrice à excitation indépendante est accouplée au moteur de travail.

D'autre part, pour ne pas surchauffer la machine (en fonctionnement génératrice) on a été amené à se fixer une valeur limite du courant d'excitation  $I_p$ , la résistance de freinage. Ce qui revient à calculer la valeur minimale de cette dernière.

A partir de l'équation des tensions en fonctionnement moteur :

$$U = E + R_{ind} \cdot I_m \quad (9)$$

connaissant  $U$ ,  $I_m$  et  $R_{ind}$ , on la f.e.m.  $E$

Or, l'équation des tensions en freinage est liée à la f.e.m.  $E$  par

$$E_i = R I_p \quad \text{avec} \quad R = R_f + R_{ext}$$

$$\text{d'où} \quad R_f = \frac{E_i}{I_p} - R_{ext}$$

$I_p$  est le courant de pointe qui correspond à la f.e.m. de l'équation

### 1. Moteur séparé

#### 1.1 Montage (fig. 3B-1)

Le point de fonctionnement moteur est défini par

$$\left\{ \begin{array}{l} N = 1000 \text{ tr/min} \\ U = 90 \text{ volts} \\ U_G = 77 \text{ " } \\ I_m = 2,8 \text{ Amp} \\ J_m = 0,8 \text{ " } \\ J_G = 0,88 \text{ " } \end{array} \right.$$

#### 1.2 Calcul de $R_f$

De l'équation (9) on tire

$$E_i = U - (R_{ind} + R_A) I = 90 - 0,45 \cdot 2,8 = 88,74 \text{ V}$$

$$\text{d'où} \quad R_f = \left( \frac{E_i}{I_p} - R_{ind} \right) = \left( \frac{88,74}{I_p} - 0,45 \right) \Omega$$

→ 17 ←

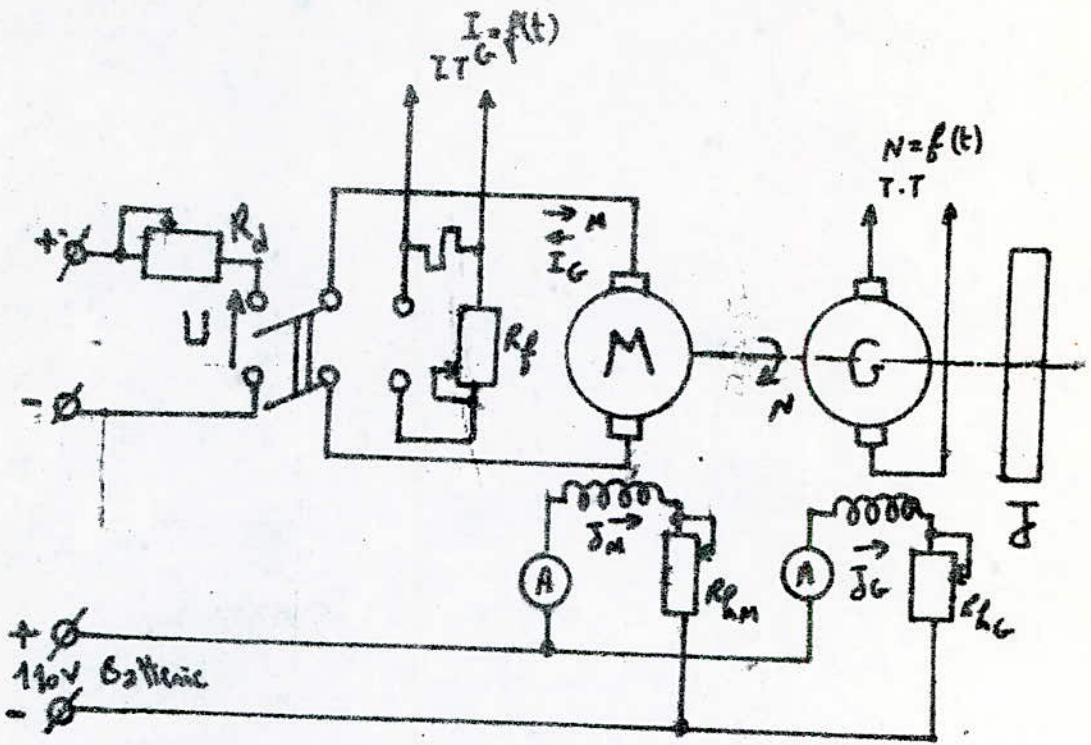


fig (3.B.1)

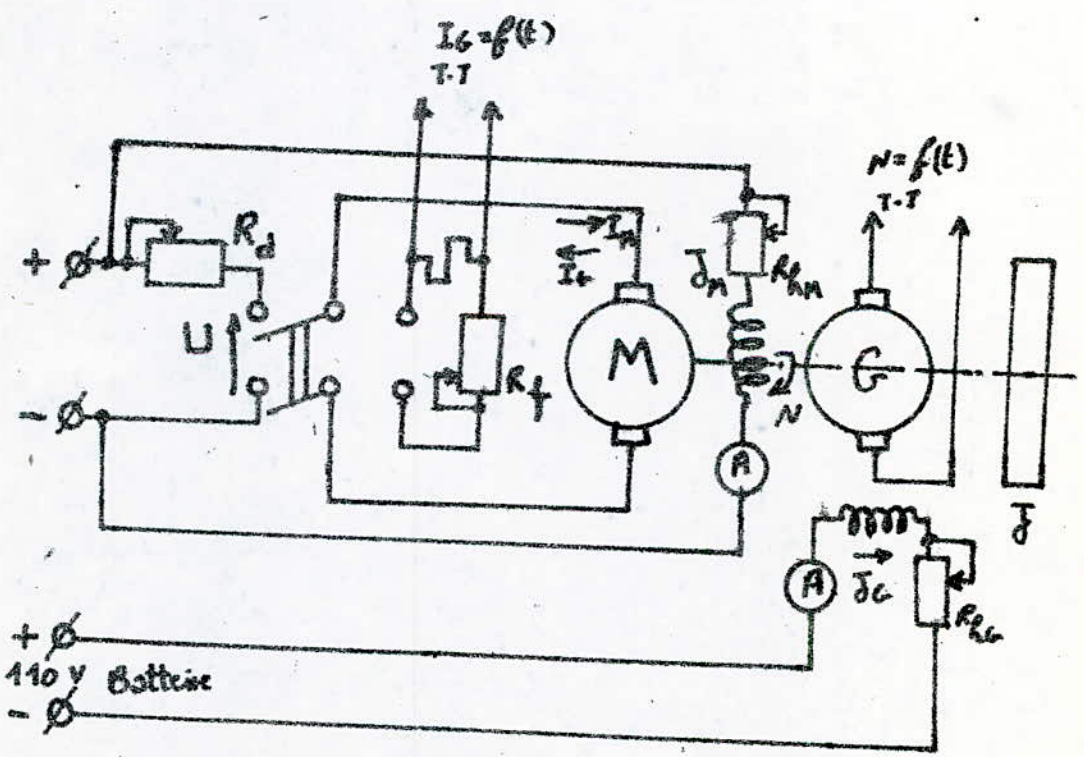


fig (3.B.1)

### 1.3. Couple de freinage $C_{fmax}$

Il est donné par  $C_{fmax} = \frac{E_i \cdot I_p}{\omega_i} = \frac{88,74 \cdot I_p}{2\pi \cdot 1000/60} = 0,847 \cdot I_p$

A partir des courbes de la figure 13-1 et des équations précédentes on a le tableau suivant:

$I_p$ (A)	0	27,5	43	65
$R_f$ ( $\Omega$ )	-	2,77	1,61	0,91
$C_{fmax}$ (N.m)	0	23,31	36,45	55,11
$t_f$ (sec)	38	9	6,5	4
$grad \varepsilon = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t}$ (A/s)	-	90	172	210

La réduction maximale est celle qui correspond au courant de 65 Amp, donc le temps est réduit jusqu'à 10,5 % du temps d'arrêt normal, c'est-à-dire à  $C_f = 0$ .

## 2. Moteur shunt

### 2.1. Montage (figure 3. B.2)

On porte le moteur au point de fonctionnement défini par :

$$\left\{ \begin{array}{l} N = 1000 \text{ tr/min} \\ U = 78 \text{ V} \\ I_H = 3 \text{ Amp} \\ I_G = 0 \\ J_H = 0,6 \text{ Amp} \\ J_G = 0,85 \text{ Amp} \end{array} \right.$$

### 2.2. Couple : $C_{fmax}$

$$C_{fmax} = \frac{E_i \cdot I_p}{\omega_i} \rightarrow$$

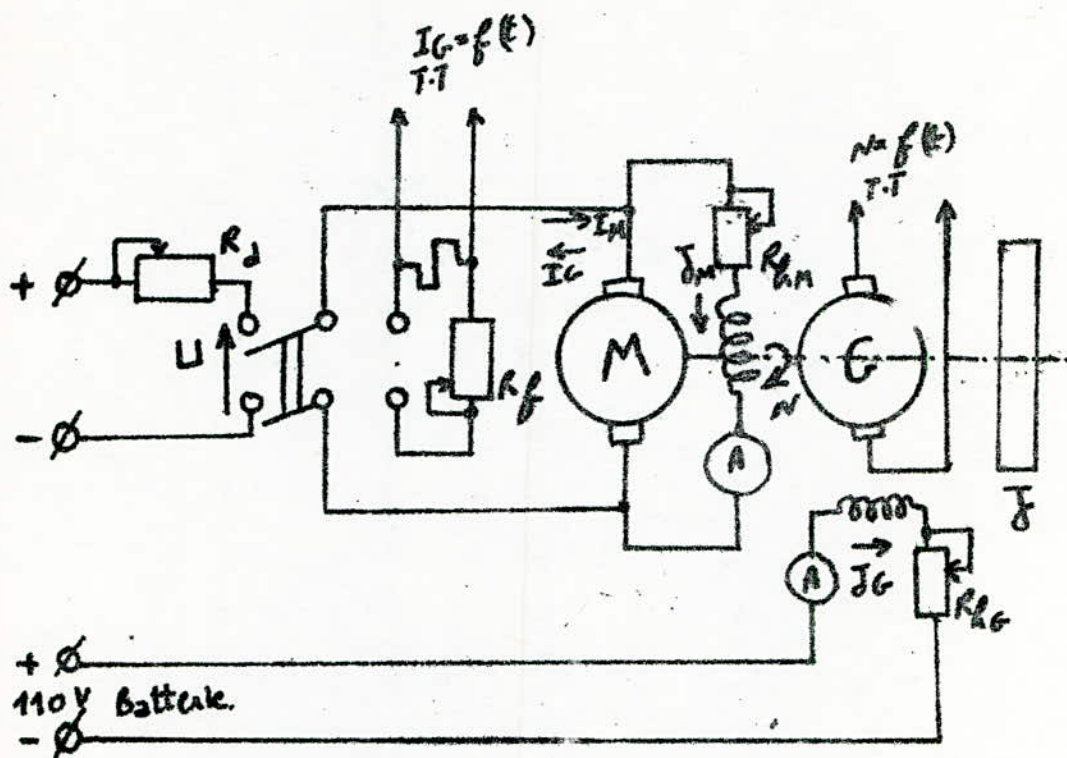
où  $E_i = U - R_{int} I_H = 78 - 0,45 \cdot 3 = 76,65 \text{ V}$

soit  $C_{fmax} = \frac{76,65}{2\pi \cdot 1000/60} I_p = 0,732 I_p$

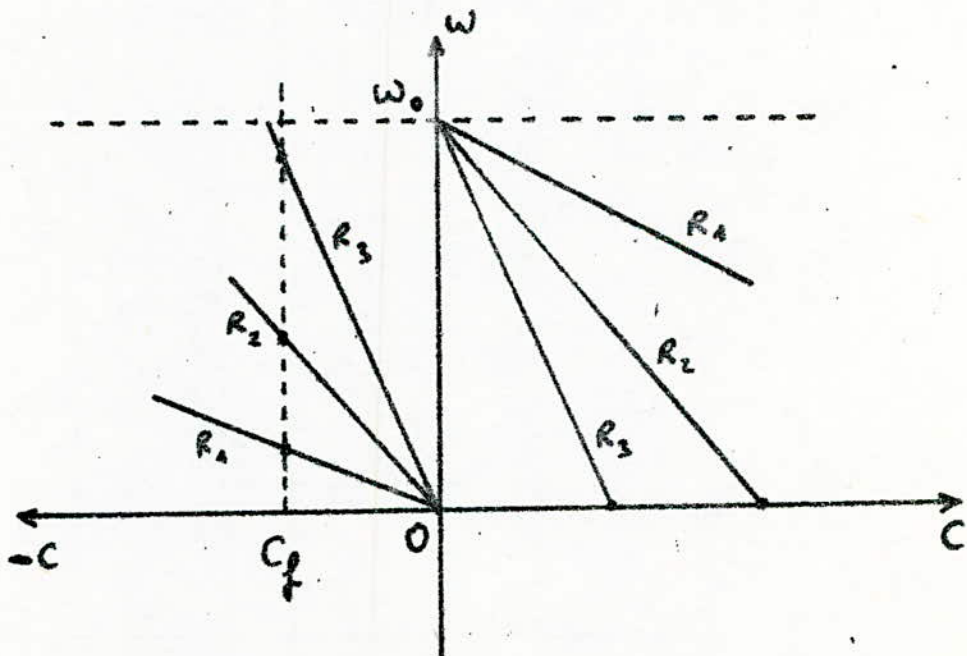
### 2.3. Calcul de $R_f$

connaissant  $E_i$  on a  $R_f = \left( \frac{76,65}{I_p} - 0,45 \right) \Omega$

A partir des courbes de la figure (3-2) et des équations précédentes,



fig(3B-2)



fig(3-2.3)

$R_1 < R_2 < R_3$

on tire le tableau suivant :

$I_p$ (A)	0	25	41,5	61
$R_f$ ( $\Omega$ )	-	2,61	1,42	0,8
$C_{p_{max}}$ (N.m)	0	18,3	30,38	44,65
$t_f$ (sec)	40	11	8	6
$grad I$ (A/s)	-	80	100	122

On s'est limité à un courant  $I_p$  de 61 (A) ce qui a donné un temps de freinage de 6 sec, soit une réduction à 15% du temps d'arrêt à vide. ( $q=0$ )

### 3. Moteur série

#### 3.1. Montage (fig. 3.8.2)

Dans le circuit de la génératrice de charge est inséré un interrupteur qu'on ouvre lors du passage au freinage, pour que celui-ci s'effectue à vide. On porte le moteur au point de fonctionnement défini par :

$$\left\{ \begin{array}{l} N = 1000 \text{ tr/min} \\ U = 75 \text{ V} \\ I_H = 23 \text{ A} \\ U_G = 70 \text{ V} \\ I_G = 22,5 \text{ A} \\ J_G = 0,87 \text{ A} \end{array} \right.$$

#### 3.2. Calcul de $R_f$

$$R_f = \frac{E_i}{I_p} - (R_s + R_{ind})$$

avec  $E_i = U - (R_s + R_{ind}) I_H = 75 - 0,53 \cdot 23 = 62,81 \text{ V}$

d'où  $R_f = \left( \frac{62,81}{I_p} - 0,53 \right) \Omega$

#### 3.3. Couple max $C_{f_{max}}$

$$C_{f_{max}} = \frac{E_i \cdot I_p}{\omega_i} = \frac{62,81 \cdot I_p}{2\pi \cdot 1000/60} = 0,6 I_p$$

A partir de ces équations et des courbes de la figure (3-3) on a le tableau suivant :

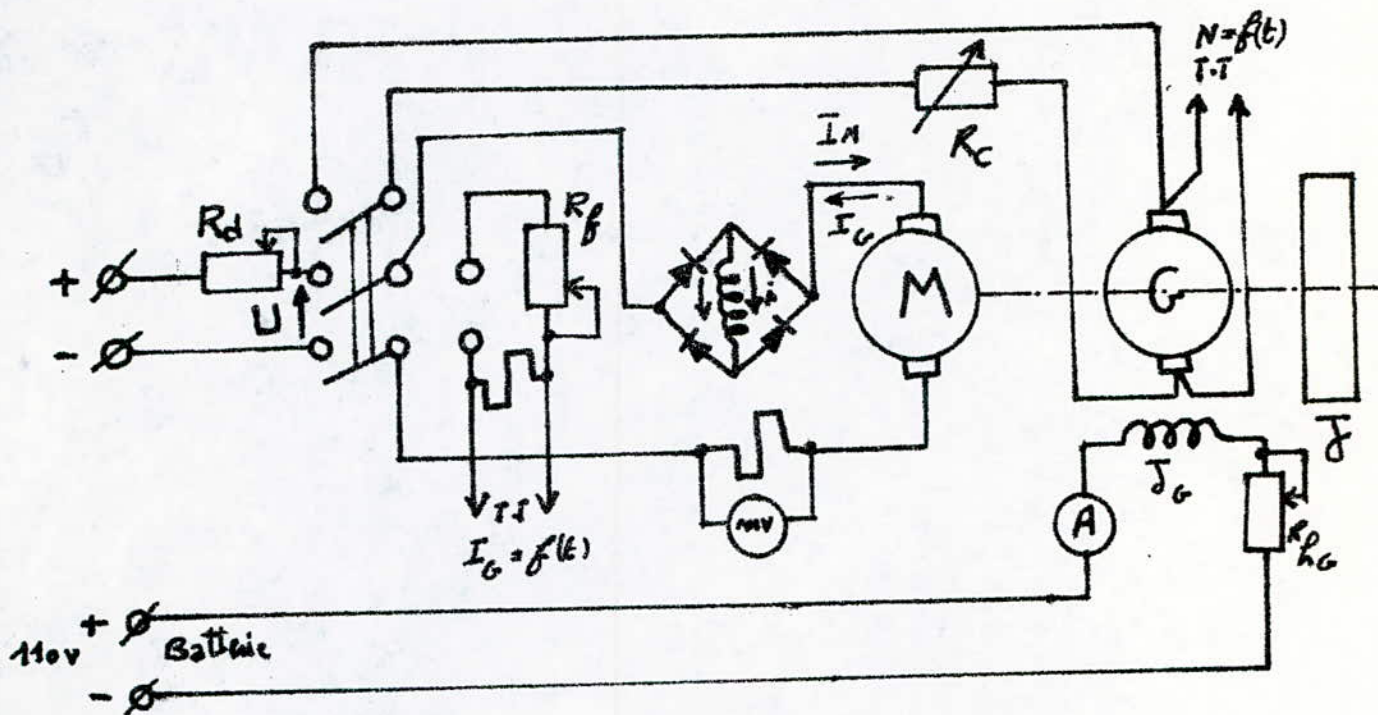


fig ( 3.B.2)

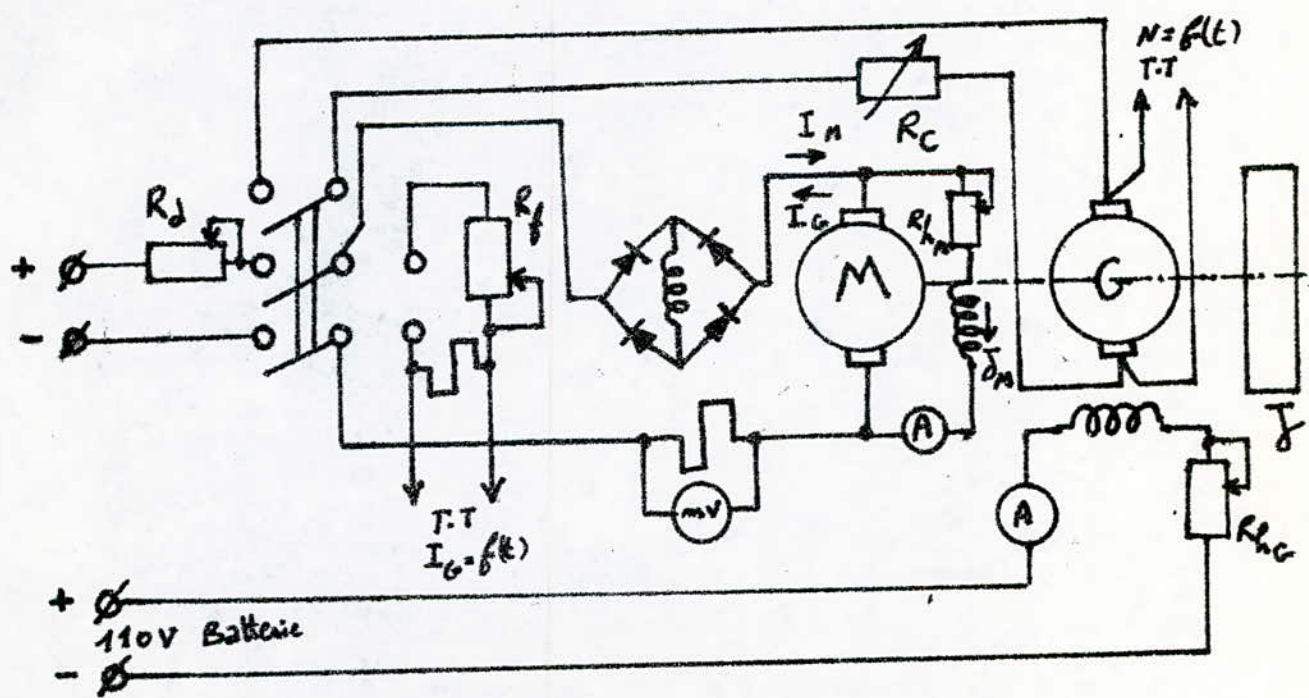


fig (3.B.3)

$I_p$ (A)	0	4,1	10,25	39	65
$R_f$ ( $\Omega$ )	-	14,79	5,6	1,1	0,43
$C_{fmax}$ (N.m)	0	2,46	6,15	23,4	39
$t_f$ (sec)	45	43	38	30	22,5
grad $\gamma$ (At)	-	17	26	78	130

Le temps de freinage est réduit jusqu'à la valeur 50% avec une pointe de courant de 65 A.

On remarque que la réduction est faible. Cela est dû au fait que la génératrice se désamorce à faibles vitesses. La résistance ( $R_f$ ) étant constante pendant chaque essai.

#### 4. MOTEUR COMPOUND A FLUX ADDITIFS

##### 4.1. Montage. (fig 3.8.3)

Le point de fonctionnement du moteur est défini par :

$$\left. \begin{array}{l} N = 1000 \text{ tr/min} \\ U = 100 \text{ V} \\ U_G = 72 \text{ V} \\ I_M = 9,5 \text{ A} \\ I_G = 14 \text{ A} \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} J_M = 0,76 \text{ A} \\ J_G = 0,85 \text{ A} \end{array} \right\}$$

##### 4.2. Calcul de $R_f$

Elle est calculée à partir de l'équation :

$$R_f = \frac{E_i}{I_p} - (R_s + R_{ind})$$

avec  $E_i = U - (R_s + R_{ind}) I_M = 100 - 0,53 \cdot 9,5 = 94,96 \text{ V}$

soit  $R_f = \left( \frac{94,96}{I_p} - 0,53 \right) \Omega$

##### 4.3. Couple max : $C_{fmax}$

$$C_{fmax} = \frac{E_i}{\omega_i} I_p = \frac{94,96}{2\pi \cdot 1000/60} I_p = 0,9 I_p$$

A partir des équations précédentes et des courbes (3-4) on tire :

$I_p$ (A)	0	23,6	39,15	58,35
$R_f$ ( $\Omega$ )	-	3,49	1,89	1,1
$C_{f_{max}}$ (N.m)	0	21,24	35,23	52,57
$t_f$ (sec)	41,25	26,25	21,25	17,5
grad $I$ (A/s)	-	60	78	190

Le temps de freinage correspondant à un gradient de  $I$  de 190 (A/s) est 17,5 sec, soit 42,42 %  $t_f$  à vide ( $C_f=0$ ). C'est le même problème qui se pose pour le moteur série : le désamorçage.

## 5. MOTEUR COMPOUND A FLUX SOUSTRACTIFS

### 5.1. Montage : (fig. 3.B.3)

Le point de fonctionnement moteur est défini par :

$$\left\{ \begin{array}{l} N = 1000 \text{ tr/min} \\ U = 45 \text{ V} \\ U_G = 73 \text{ V} \\ I_M = 29 \text{ A} \\ I_G = 14 \text{ A} \\ J_M = 0,37 \text{ A} \\ J_G = 0,88 \text{ A} \end{array} \right.$$

### 5.2. Calcul de $R_f$

$$R_f = \frac{E_i}{I_p} - (R_s + R_{ind})$$

$$E_i = U - (R_s + R_{ind}) I_M = 45 - (0,53) \cdot 29 = 29,63 \text{ V}$$

$$\text{soit } R_f = \left( \frac{29,63}{I_p} - 0,53 \right) \Omega$$

### 5.3. Couple max $C_{f_{max}}$

$$C_{f_{max}} = \frac{E_i}{\omega_i} I_p = \frac{29,63}{2\pi \cdot 1000/60} I_p = 0,283 I_p$$

A partir des équations précédentes et des courbes (3-5) on dresse le tableau suivant :



$I_p$ (A)	0	5	8,5	28,5	61
$R_f$ ( $\Omega$ )	-	5,4	2,96	0,51	-
$C_f$ (N.m)	0	1,41	2,40	8,06	17,26
$t_f$ (sec)	45,5	45,5	43,5	29	16
grad I (%)	-	17	17	19	81

Machin	U (V)	$I_m$ (A)	$I_p$ (A)	$R_f$ ( $\Omega$ )	$C_f$ (N.m)	$t_f$ (sec)	grad I (%)
Séparée	90	2,8	0	-	0	38	-
	"	"	27,5	2,77	23,31	9	90
	"	"	43	1,61	36,45	6,5	172
	"	"	65	0,91	55,11	4	210
shunt	78	3	0	-	0	40	-
	"	"	25	2,61	18,3	11	80
	"	"	41,5	1,42	30,38	8	100
	"	"	61	0,8	44,65	6	122
Série	75	23	0	-	0	45	-
	"	"	4,1	14,79	2,46	43	17
	"	"	10,25	5,6	6,15	38	26
	"	"	39	1,1	23,4	30	78
	"	"	65	0,43	39	22,5	130
Comp. addit.	100	9,5	0	-	0	41,25	-
	"	"	23,6	3,49	21,24	26,25	60
	"	"	39,15	1,89	35,23	21,25	78
	"	"	58,35	1,1	52,51	17,5	190
Comp. Abstrait	45	28	0	-	0	45,5	-
	"	"	5	5,40	1,41	45,5	17
	"	"	8,5	2,06	2,40	43,5	17
	"	"	28,5	0,51	8,06	29	19
	"	"	61	-	17,26	16	81
/	/	/	/	/	/	/	/

## 6. COMPARAISON DES RESULTATS

Les paramètres essentiels dans la comparaison sont le gradient du courant de freinage :  $dI/dt$  et le temps d'arrêt du groupe  $t_f$ . Prenons par exemple les essais ayant un courant  $I_p$  le plus grand.

machine	Séparé	shunt	Série	Comp. soud.	Comp. ad.
$I_p (A)$	65	61	65	61	58,35
$t_f (sec)$	4	6	22,5	16	17,5
grad $I (A/s)$	210	122	130	81	190

1. Pour le temps de freinage  $t_f$ , on a

$$t_f(\text{sep}) < t_f(\text{sh}) < t_f(\text{comp.s}) < t_f(\text{comp.ad}) < t_f(\text{serie}).$$

2. Pour les gradients de courant, on a:

$$\text{grad } I_{(\text{sep})} > \text{grad } I_{(\text{comp.ad})} > \text{grad } I_{(\text{serie})} > \text{grad } I_{(\text{sh})} > \text{grad } I_{(\text{soud})}$$

Pour ce mode de freinage, on peut dire que seul le moteur à excitation séparée convient. Car pour les autres machines série, shunt et compound, le problème d'amorçage ne permet pas d'avoir un temps de freinage réduit.

FREINAGE A CONTRE COURANT

A.1 Moteur derivation) A. ETUDE THEORIQUE

Le freinage à contre courant est réalisé par le changement de la polarité de la tension aux bornes de l'enroulement d'induit du moteur en marche. Le sens du courant dans l'enroulement d'excitation restant le même. Cette opération est exécutée à l'aide d'un commutateur  $K$ . En même temps une résistance additionnelle est insérée dans le circuit d'induit du moteur (fig. 4.1.1).

Le passage du régime moteur au régime de freinage est donné par la caractéristique mécanique de la figure (4.1.2). Si l'on ne débranche pas l'induit lors du passage par  $O_1$ , le moteur développant un couple (qui en valeur absolue) supérieur au couple résistant tournera dans le sens inverse (fig. 4.1.3).

L'équation donnant le courant de freinage est :

$$-U = E + RI \quad R = R_f + R_{ext}$$

$$= K\phi N + RI \quad N : \text{tr/sec}$$

soit  $|I| = \frac{U + K\phi N}{R}$

D'autre part l'équation des moments s'écrit :

$$C = K'\phi I = J \frac{d\omega}{dt} + C_r \quad (1)$$

soit  $\frac{-U}{2\pi K\phi} = \omega + \frac{JR}{(K\phi)^2} \frac{d\omega}{dt} + \frac{RC_r}{(K\phi)^2}$

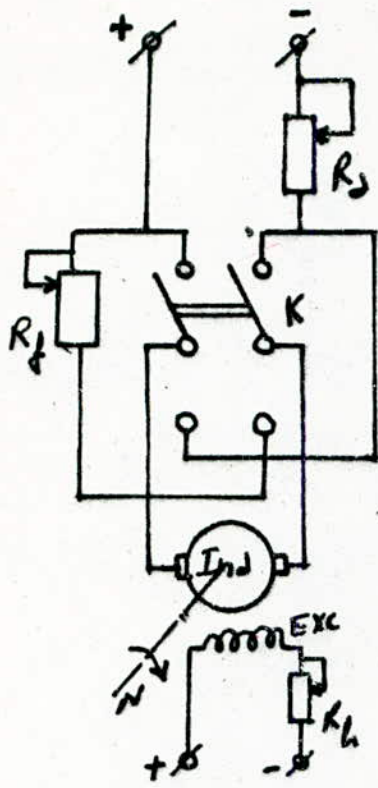
d'où  $-\omega_0 = \omega + T_H \frac{d\omega}{dt} + \delta\omega_s \quad (2)$

$$\delta\omega_s = \omega_0 - \omega_s = \frac{C_r R}{(K\phi)^2} \quad \text{la différence de vitesse en charge.}$$

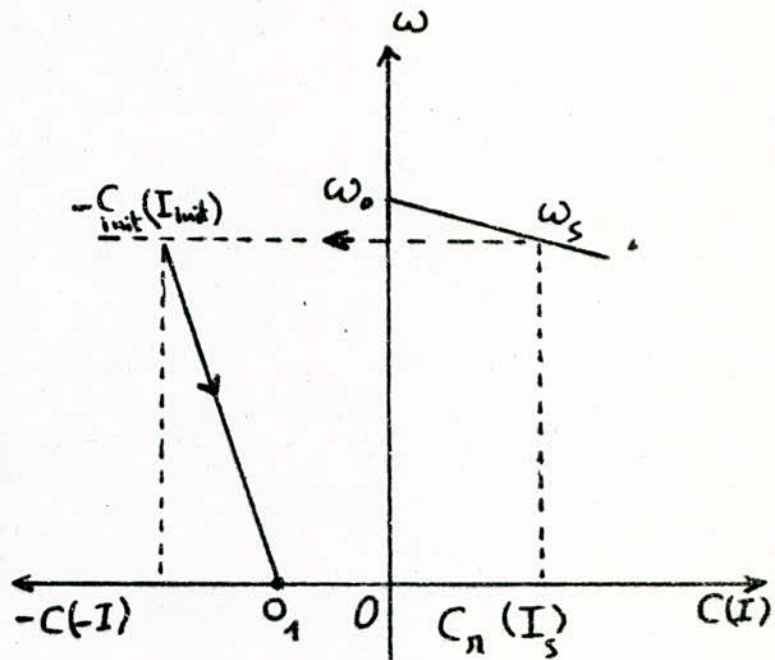
soit  $\frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{T_H} = - \frac{\omega_0 + \delta\omega_s}{T_H} \quad (3)$

qui admet pour solution :

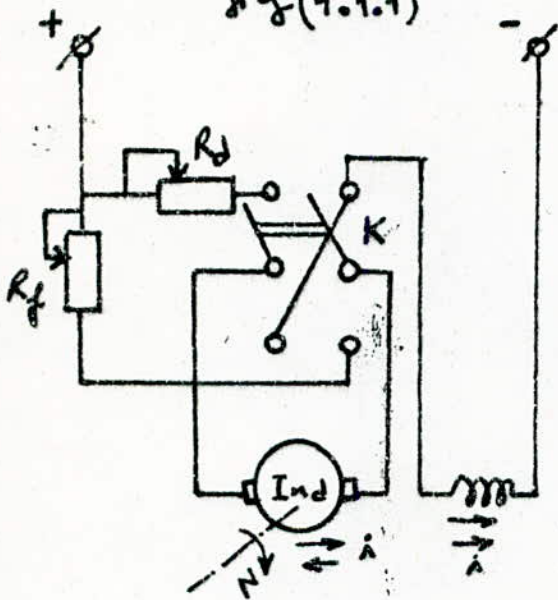
$$\omega = -\omega_0 - \delta\omega_s + A e^{-t/T_H}$$



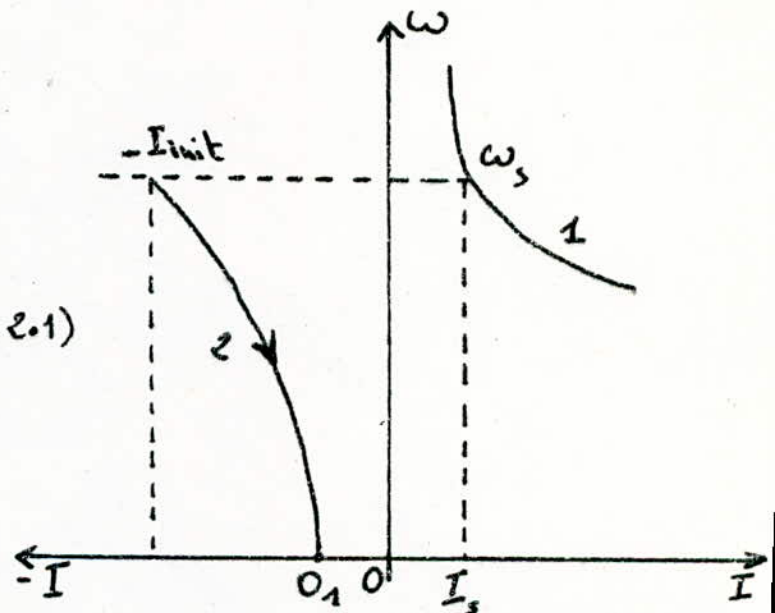
fig(4.1.1)



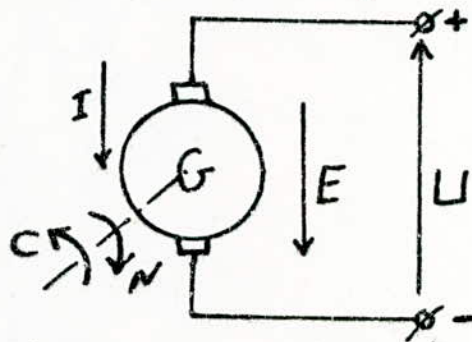
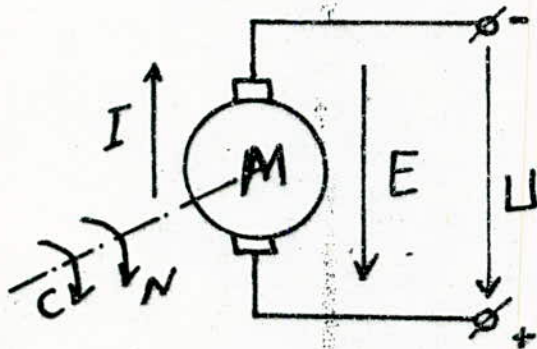
fig(4.1.2)



fig(4.2.1)



fig(4.2.2)



fig(4.1.3)

Au temps  $t=0$   $\omega = \omega_{init} = \omega_0$

$$\text{d'où } A = \omega_s + \omega_0 + 0\omega_s = 2\omega_0$$

Lors de l'inversion du sens de marche :

$$\omega = -(\omega_0 + 0\omega_s) + (\omega_0 + 0\omega_s + \omega_s) e^{-t/T_H} \quad (3)'$$

A vide ( $\omega_s = \omega_0$ ) et  $0\omega_s = 0$

$$\text{on a } \boxed{\omega = -\omega_0 + 2\omega_0 e^{-t/T_H}} \quad (4)$$

Le courant d'induit lors de l'inversion est déterminé à partir de (1):

$$\text{en posant } \frac{d\omega}{dt} = 0, I = I_s \Rightarrow C_T = k'\phi I_s$$

$$\text{d'où } I = \frac{J}{k'\phi} \frac{d\omega}{dt} + I_s \quad (5)$$

avec  $I_s$  : courant de charge (ou de marche).

$$UI = C_s \omega$$

d'après (3) et (3'), on tire :

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{A}{T_H} e^{-t/T_H}$$

et par substitution dans (5), on obtient

$$I = -\frac{J}{k'\phi} \frac{A}{T_H} e^{-t/T_H} + I_s$$

Au temps  $t=0$ , on a

$$I = I_{init} \Rightarrow A = \frac{k'\phi T_H}{J} (I_{init} + I_s)$$

$$\text{d'où } I = -(I_{init} + I_s) e^{-t/T_H} + I_s \quad (6)$$

$$\text{où } I_{init} = \frac{U + k_1 \phi \omega_s}{R} \quad k_1 = 2\pi k$$

est la valeur absolue du courant à l'instant du passage du régime moteur au régime de freinage à contre courant.

$$\text{et } R = R_f + R_{ind}$$

la résistance totale du circuit d'induit.

## 9.2. Moteur série

Le flux inducteur n'est plus constant mais varie linéairement en fonction du courant d'induit. (tant que l'on est en dessous de la saturation)

dors de la commutation de la polarité, on doit inverser la connexion entre l'induit et l'inducteur. Sinon le couple garderait le même sens qu'avant et le moteur continuerait à fonctionner normalement avec une augmentation du couple moteur (figure 4.2.1)

La figure (4.2.2) représente :

- dans le premier quadrant: caractéristique de vitesse du moteur série.
- dans le deuxième quadrant: " " " en freinage.

### A.3. Moteur compound (fig: 4.3.1)

Comme on l'a déjà vu, le flux inducteur peut être la somme ou la différence des flux provoqués par les enroulements. stator et de

$$\Phi_t = \Phi_{sh} \pm \Phi_s = \Phi_0 \pm gI$$

le couple est alors :

$$\begin{aligned} C_e &= K' \Phi_t I \\ &= K' (\Phi_0 \pm gI) I \end{aligned}$$

## B. ETUDE PRATIQUE

### 1. Moteur à excitation séparée

#### 1.1 Montage (fig. 4.B.1)

Une résistance  $R_f$  est nécessaire pour limiter le courant de pointe  $I_p$  ( $I_{init}$ ). Dans la pratique  $R_f$  est un résistat de démarrage.

Le point de fonctionnement moteur est défini par :

$$\left\{ \begin{array}{l} N = 1000 \text{ tr/min} \\ U = 85 \text{ V} \\ I_M = 3 \text{ A} \\ J_M = 0,73 \text{ A} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} U_G = 71 \text{ V} \\ J_G = 0,95 \text{ A} \end{array} \right.$$

Le freinage est réalisé en faisant passer l'inverseur de la position (1) à la position (2).

#### 1.2. Calcul de $R_f$

\* la f.e.m.  $E_c$  étant  $E_c = U - R_{ind} I_M = 85 - 0,45 \cdot 3 = 83,65 \text{ V}$

$$\text{or } R_f = \frac{U - U_G + E_c}{I_p} = R_{ind} = \frac{85 + 83,65}{I_p} - 0,45$$

A partir des courbes de la figure (4-1), on peut dresser le tableau suivant :

$I_p$ (A)	13	19,25	20,25	32
$R_f$ ( $\Omega$ )	12,5	8,3	7,87	4,8
$t_p$ (ms)	13	5,5	5,2	3,8
grad $\frac{d\theta}{dt}$	50	56	63	106

On remarque que  $t_p$  diminue avec  $R_f$  pour une pointe de courant relativement faible. Mais la diminution de  $R_f$  pourrait conduire à la destruction du collecteur par flash.

### 2. Moteur shunt

#### 2.1. Montage : (fig. 4.B.2)

On porte le moteur au point de fonctionnement défini par :

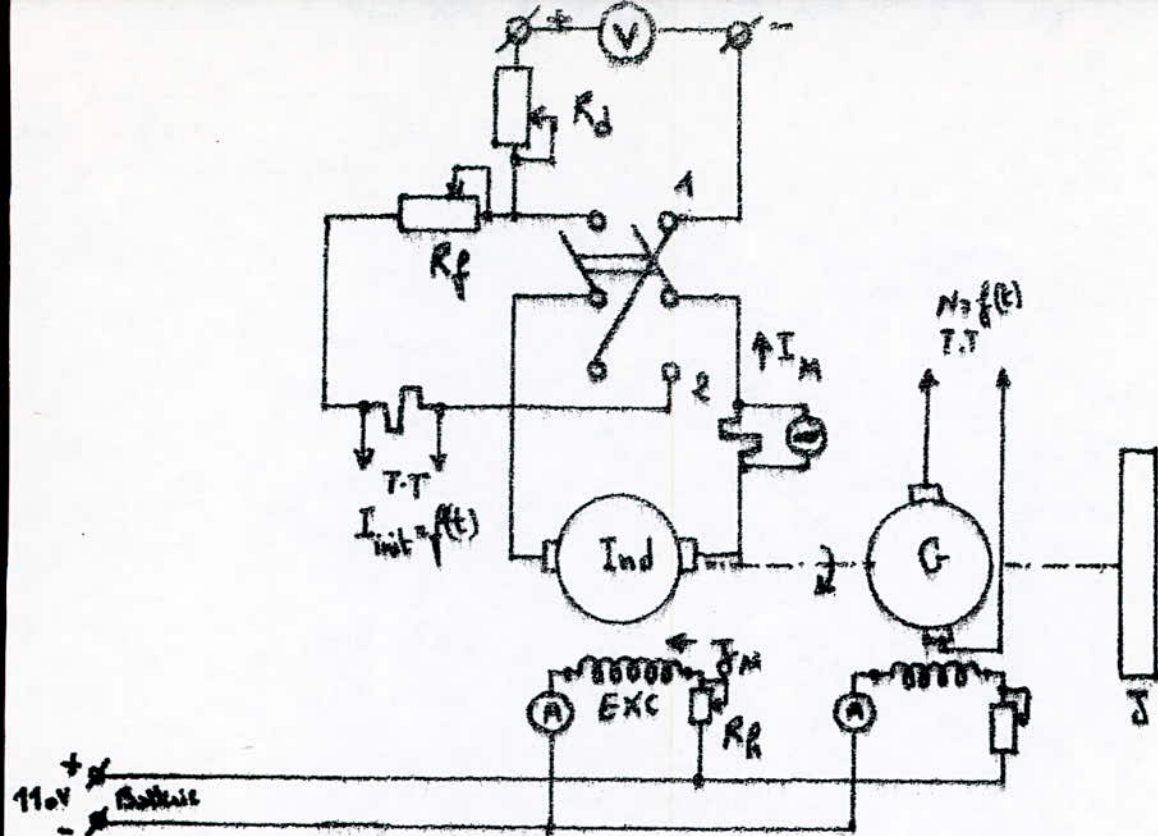


Fig (4.B.1)

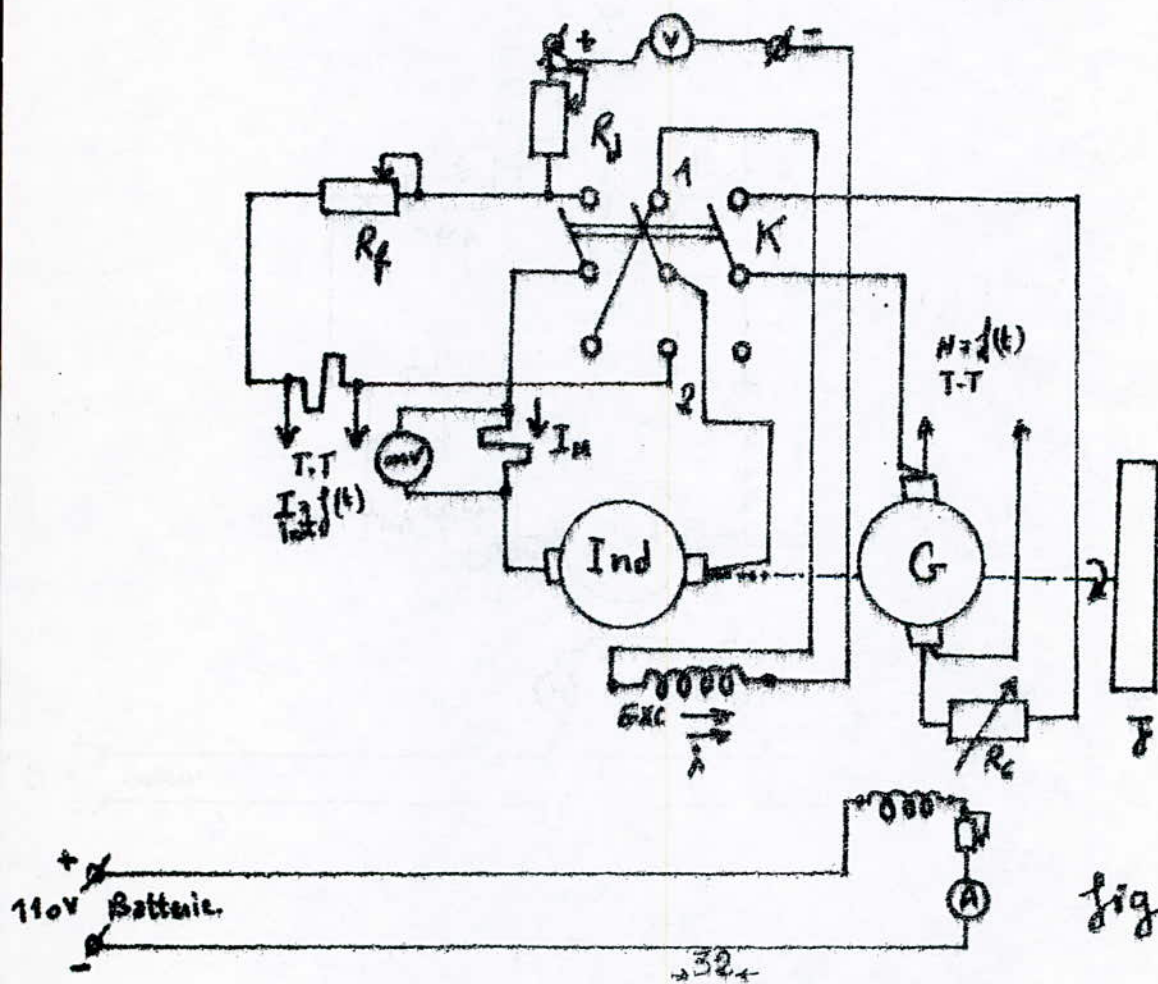


Fig 4.B.3



$$\left\{ \begin{array}{l} N = 1000 \text{ tr/min} \\ U = 77 \text{ V} \\ I_M = 3 \text{ A} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} J_M = 0,61 \text{ A} \\ U_G = 70 \text{ V} \\ J_G = 0,92 \text{ A} \end{array} \right.$$

Les calculs sont comme dans le cas précédent. Les courbes sont celles de la figure (4-2).

$I_p (A)$	0	19	33	37,5
$R_p (\Omega)$	-	7,58	4,17	3,62
$t_p (ms)$	39	60	47	4
grads (°)	-	63	126	125

### 3. Moteur Série

#### 3.1. Montage (figure 4. B. 3)

La génératrice est branchée sur une résistance de charge. Ce circuit comporte un interrupteur qui s'ouvre en même temps qu'on passe au freinage.

Initialement le moteur est défini par le point de fonctionnement :

$$\left\{ \begin{array}{l} N = 1000 \text{ tr/min} \\ U = 80 \text{ V} \\ I_M = 28 \text{ A} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} I_G = 21,5 \text{ A} \\ U_G = 72 \text{ V} \\ J_G = 0,92 \text{ A} \end{array} \right.$$

La résistance  $R_p$  est donnée par l'expression :

$$R_p = \frac{U + E_i}{I_p} - (R_s + R_{ind})$$

$$E_i = U - R I_M = 80 - 0,53 \cdot 28 = 65,16 \text{ V}$$

$$R_p = \left( \frac{80 + 65,16}{I_p} - 10,53 \right) \Omega = \left( \frac{145,16}{I_p} - 10,53 \right) \Omega$$

Utilisant ces résultats et les courbes de la figure (4-3), on a le tableau suivant :

$I_p (A)$	0	16	32	37,5	46,5
$R_p (\Omega)$	-	8,54	4	3,34	2,59
$t_p (ms)$	48	15	6	4,5	3,5
grads (°)	-	32	63	60	96

#### 4. Moteur à flux additifs

##### 4.1. Montage (figure 4.8.4)

Un montage redresseur permet de garder les flux enducteur additifs.

On a :

$$(a) \begin{cases} N = 1000 \text{ tr/min} \\ U = 85 \text{ V} \\ I_M = 10 \text{ A} \\ J_M = 0,73 \text{ A} \end{cases}$$

$$(b) \begin{cases} N = 1000 \text{ tr/min} \\ U = 108 \text{ V} \\ I_M = 31 \text{ A} \\ J_M = 0,8 \text{ A} \end{cases}$$

$$R_f = \left( \frac{85 +}{I_p} - 0,53 \right) \Omega$$

courbes (4-4)

$$R_f = \left( \frac{108 +}{I_p} - 0,53 \right) \Omega$$

$I_p$ (A)	0	7,5	18,5	27,5	35	37,9
$R_f$ ( $\Omega$ )	-	11,78	9,45	6,18	4,77	4,39
$t_f$ (ms)	39	6,4	5,4	3,6	3	2,9
grads (A)	-	29	120	275	196	320

$I_p$ (A)	0	16,5	20	31,5	38,5	42,5
$R_f$ ( $\Omega$ )	-	11,56	9,44	5,8	4,65	4,16
$t_f$ (ms)	38	5,5	4,8	3,2	2,6	2,4
grads (A)	-	82	100	157	150	217

#### 5. Comp. soustractif

5.1. Montage (figure 4.8.4) : le pont redresseur est éliminé pour avoir un freinage à flux additifs.

5.2. freinage: Le moteur éteint au point défini par :

$$\begin{cases} N = 1000 \text{ tr/min} \\ U = 118 \text{ V} \\ I_M = 12 \text{ A} \\ J_M = 0,88 \text{ A} \end{cases}$$

on a  $E_c = U - R I_M = 118 - 0,53 \cdot 12 = 111,64 \text{ V}$

$$R_f = \frac{118 + 111,64}{I_p} - 0,53$$

$$R_f = \left( \frac{229,64}{I_p} - 0,53 \right) \Omega$$

Les courbes de la figure (4-5) donnent :

$I_p$ (A)	0	19,3	28	33	36	42	48
$R_f$ ( $\Omega$ )	-	11,24	7,67	6,42	5,85	4,93	4,25
$t_f$ (ms)	39	5	4,9	5	5	5,5	6
grads (A)	-	122	280	330	225	210	300

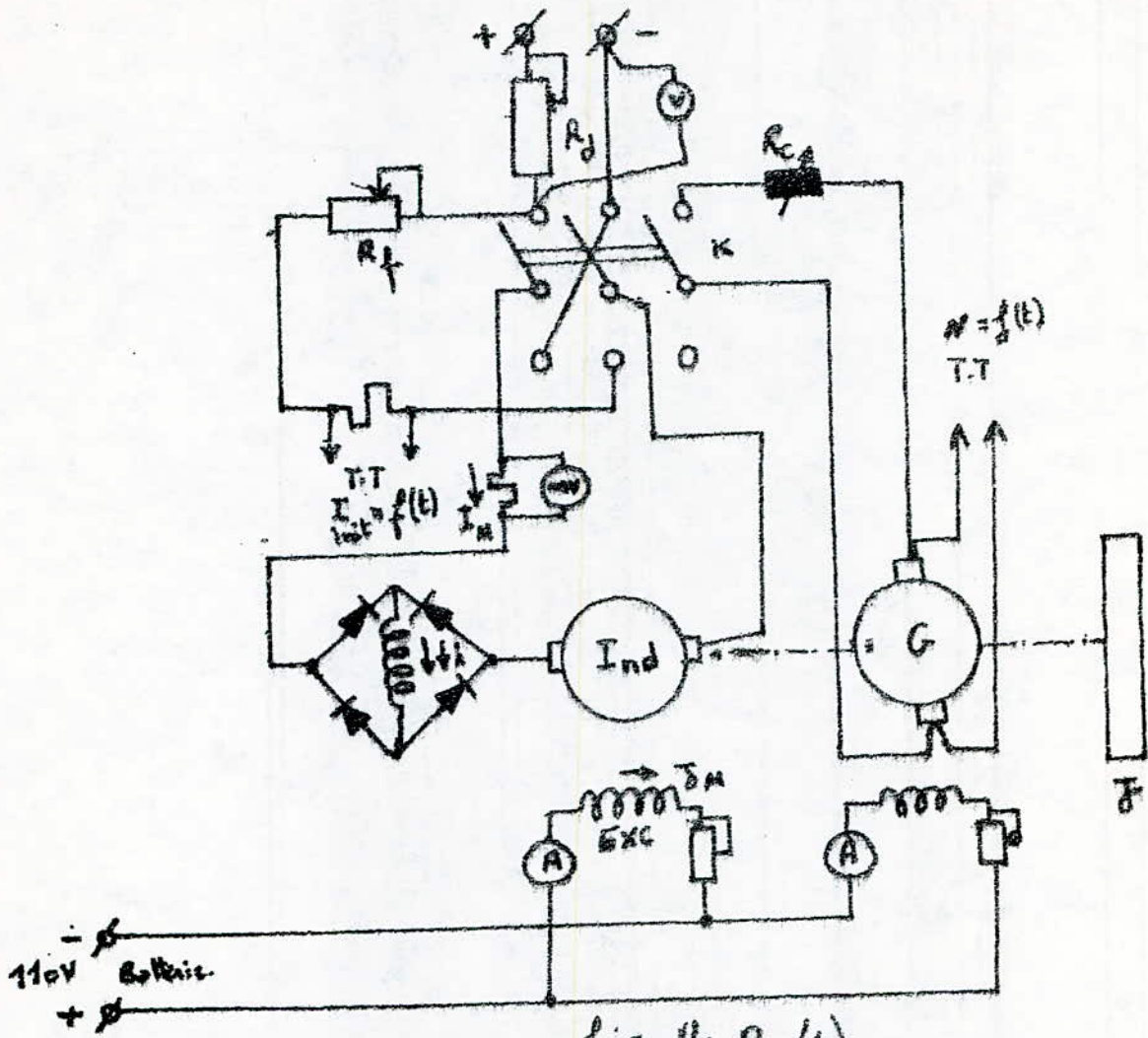


fig (4.8.4)

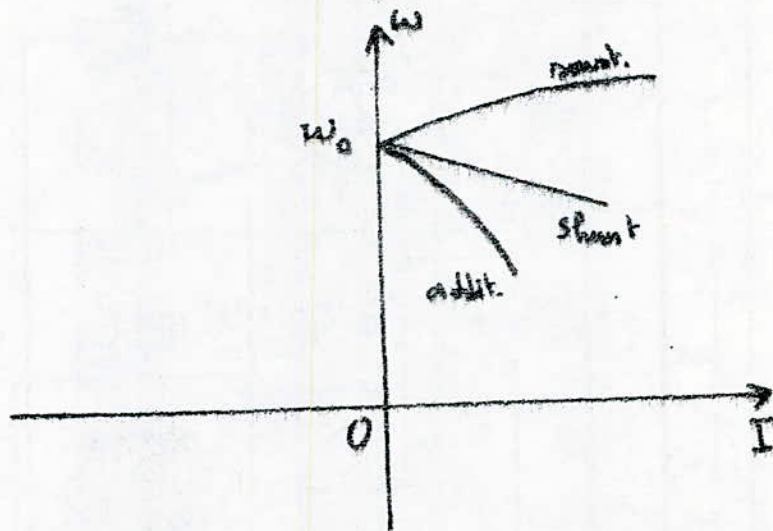


fig (4.3.1)

tableau récapitulatif

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

$R_{ind} = 0,45 \Omega$

$R_s = 0,08 \Omega$

machine	$I_{init} (A)$	$R_f (\Omega)$	$t_f (sec)$	$g_{max} (kg)$	$u (V)$	$I_m (A)$
Séparée	0	-	35	-	85	3
	13	12,5	13,7	50	"	"
	19,25	8,3	5,5	56	"	"
	20,25	7,87	5,2	63	"	"
	32	4,8	3,8	106	"	"
Shunt	0	-	39	-	77	3
	19	7,58	6	63	"	"
	33	4,17	4,1	126	"	"
	37,5	3,62	4	125	"	"
Série	0	-	48	-	80	28
	16	8,54	15	32	"	"
	32	4	6,0	53	"	"
	37,5	3,34	4,5	56	"	"
	46,5	2,59	3,5	93	"	"
Comp. additif.	0	-	39	-	95	10
	15	11,78	6,4	75	"	"
	18,5	9,45	5,4	123	"	"
	27,5	6,18	3,6	275	"	"
	35	4,75	3	275	"	"
	37,5	4,39	2,9	300	"	"
Comp. additif	0	-	38	-	108	31
	16,5	11,56	5,5	82	"	"
	20	9,44	4,8	100	"	"
	31,5	5,8	3,2	157	"	"
	38,5	4,65	2,6	150	"	"
	42,5	4,16	2,4	212	"	"
Comp. soustractif	0	-	39	-	118	12
	19,5	11,24	5	122	"	"
	28	7,67	4,9	280	"	"
	33	6,42	5	330	"	"
	36	6,42	5	225	"	"
	42	4,93	5,5	210	"	"
	48	4,25	6	300	"	"

## COMPARAISON DES RESULTATS

La vitesse initiale étant la même pour tous les essais, pour avoir une meilleure comparaison, on choisit les essais suivants:

machines	séparée	shunt	série	Comp. ad.	Comp. f.
$I_p$ (A)	32,	33	32	31,5	33
$t_f$ (sec)	3,8	4,1	6	3,2	5
grad I (A/s)	106	126	53	157	330

1. On voit bien que

$$t_f(\text{comp. ad.}) < t_f(\text{sep.}) < t_f(\text{sh.}) < t_f(\text{comp. s.}) < t_f(\text{sh. f.})$$

Ce résultat est vérifié pour les autres essais.

2. la comparaison des gradients du courant donne

$$\text{grad I (sh. f.)} < \text{grad I (sep.)} < \text{grad I (sh.)} < \text{grad I (ad.)} < \text{grad I (sh.)}$$

Donc, le freinage du moteur compound additif est meilleur par rapport aux autres moteurs, ceci du point de vue temps de freinage. Mais on remarque que le moteur à excitation séparée peut être préféré car le gradient de courant demandé n'est pas aussi important que pour le "compound." et que les temps de freinage ne diffèrent pas beaucoup (l'un de l'autre).

**FREINAGE PAR RECUPERATION**

PRINCIPE

Le groupe convertisseur utilisé étant mécanique, c'est le groupe (WARD-LEONARD). Il est formé d'un moteur asynchrone et d'une génératrice  $G_1$  à courant continu, les deux machines sont couplées sur le même arbre.

Le moteur de travail  $M$  relié électriquement à  $(G_1)$ , entraîne une génératrice  $(G_2)$  et un volant d'inertie  $(J)$ . Lorsqu'on ouvre l'interrupteur  $K$ , on sous excite  $G_1$ , alors sa f.e.m. devient inférieure à celle du moteur. Dès lors  $G_1$  devient moteur et  $M$  générateur, en même temps le moteur asynchrone tournant à l'hyper-synchronisme devient aussi génératrice asynchrone.

**première méthode**

A. Étude théorique

En Théorie une diminution de courant d'excitation de la génératrice (ici  $JG_1$ ) implique une diminution de sa f.e.m.  $E_G$ , donc de sa tension aux bornes  $U$ , alors la f.e.m.  $E_M$  aux bornes du moteur devient supérieur à  $U$ .

Ceci peut être aisément mis en évidence par les équations suivantes :

$$U = E_M + R_M I$$

$$U = E_G - R_G I$$

d'où  $E_G - E_M = (R_G + R_M) I$

soit  $I = \frac{U - E_M}{R_M}$

le couple est alors :

$$C_e = K' \Phi_M I$$

$$K' = \frac{P.n}{0.2\pi}$$

Si le courant  $I$  change de sens par conséquent le couple s'inverse et devient un couple de freinage.

On freine en récupération à couple fort pour annuler très rapidement la vitesse.

Comme 
$$\omega = \frac{E_G - (R_G + R_M) I}{K_f \Phi_M}$$

$$K_f = 2\pi \frac{p n}{a} = 2\pi K$$

$$-I = \frac{E_M}{R_G + R_M}$$

\* \*

### B : Etude pratique

#### 1. Moteur à excitation séparée

On réalise le montage de la figure (5-B-1), On fait tourner le moteur à la vitesse de 1000 tr/min correspondante au point de fonctionnement défini par

$$\begin{cases} U = 91 \text{ V} \\ I_M = 3 \text{ A} \end{cases} \quad \begin{cases} I_M = 0,8 \text{ A} \\ I_G = 9,8 \text{ A} \end{cases}$$

L'ouverture de  $K$  fait passer le groupe en freinage et on relève les courbes de la figure (5-1), qui donnent :

- un temps de récupération  $t_r = 4 \text{ sec}$  à quoi correspond une vitesse de 120 tr/min.

- Un courant de pointe  $|I_G| = 70 \text{ A}$

- Un couple :  $C_f = \frac{E I}{\omega} = \frac{E I}{2\pi N} \quad \text{N (tr/sec)}$

où  $E = U - I_M R_M = 91 - (3 \cdot 9,45) = 89 \text{ V}$

$$C_f = \frac{89 \cdot 70}{2\pi \cdot 1000/60} = 59,52 \text{ N.m}$$

le moteur prend ensuite un régime stable, avec :

$$\begin{cases} N = 100 \text{ tr/min} \\ I_M = 1,5 \text{ A} \end{cases}$$

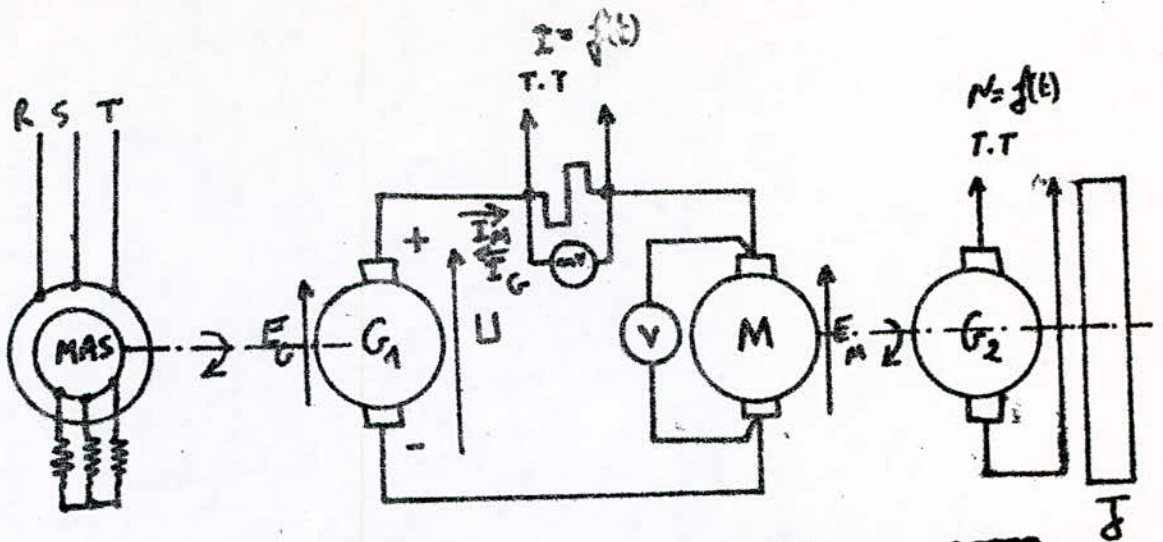


fig (5-B-1)

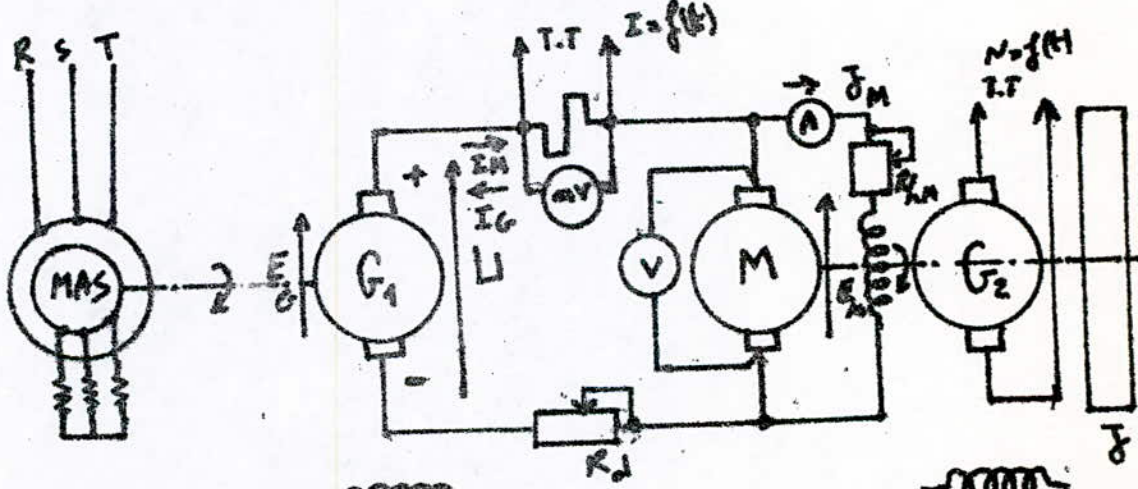
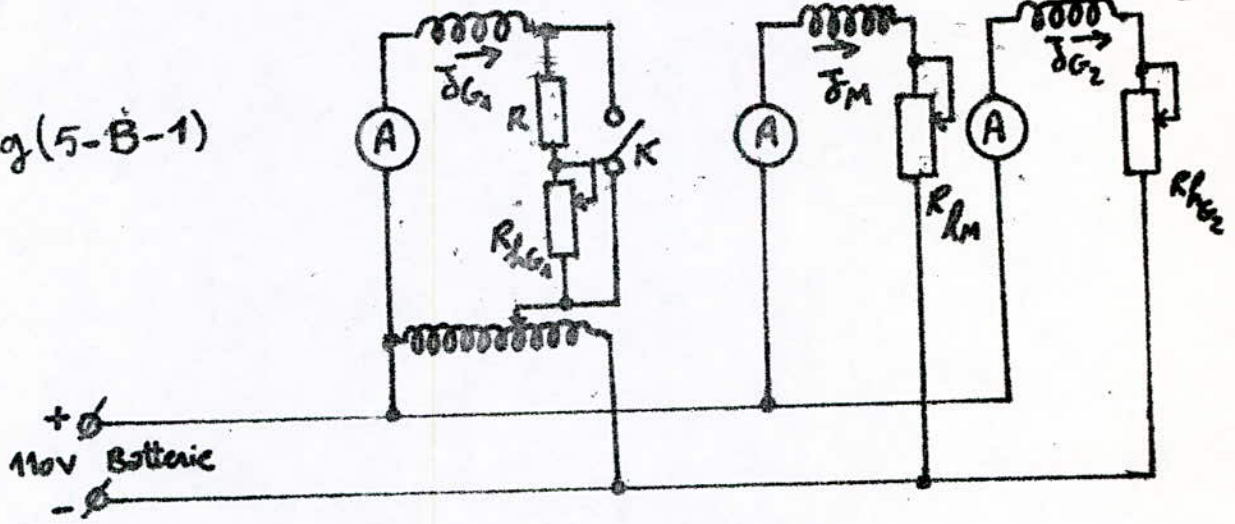
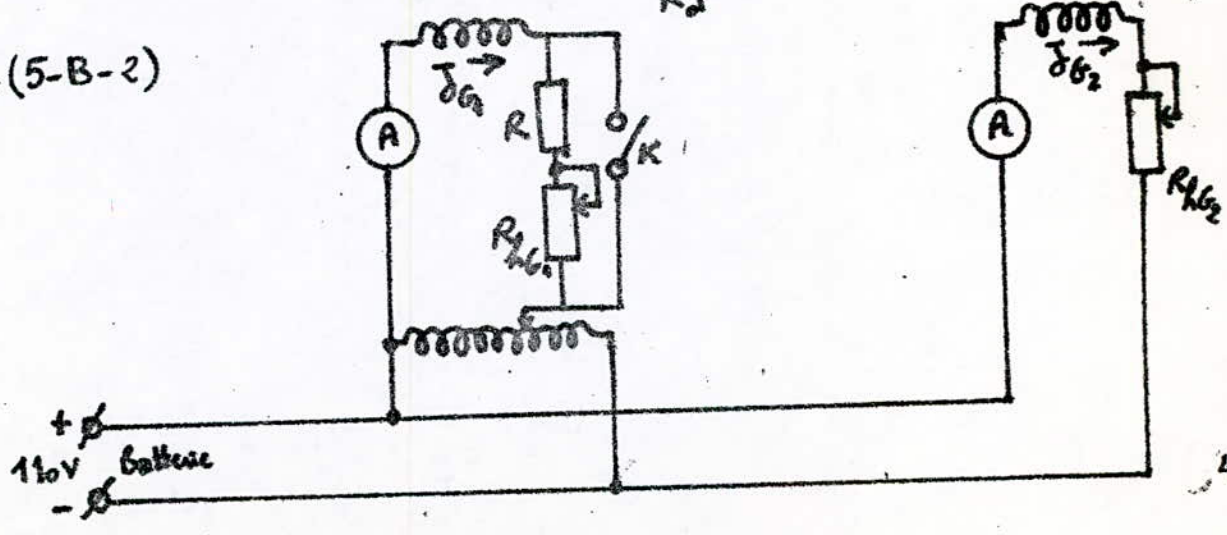


fig (5-B-2)





## 2. Moteur shunt

Vu la grande valeur de la résistance de l'inducteur shunt, relativement à celle de l'induit, il s'est avéré nécessaire d'introduire un rhéostat de démarrage en série avec l'induit, afin que celui-ci ne court-circuite pas l'inducteur.

Le montage est celui de la figure (5-8-2). On fait tourner le moteur à 1000 tr/min et on relève :

$$U = 83 \text{ V}$$

$$I_n = 9,65 \text{ A}$$

$$I_m = 3 \text{ A}$$

$$I_{G_1} = 0,65 \text{ A}$$

L'ouverture de  $K$  fait passer le groupe en fonctionnement freiné et on relève les courbes de la figure (5-2) à l'aide de la table tracée.

- le temps de récupération est  $t_2 = 10 \text{ sec}$
- le courant de pointe est  $I_p = 47 \text{ A}$
- la vitesse baisse jusqu'à 600 tr/min
- le couple de freinage maximum est

$$C_{f_{\max}} = \frac{E_c I}{\omega}$$

où  $E_c = U - R_n I_n = 83 - (9,45) \cdot 3 = 81,65 \text{ V}$

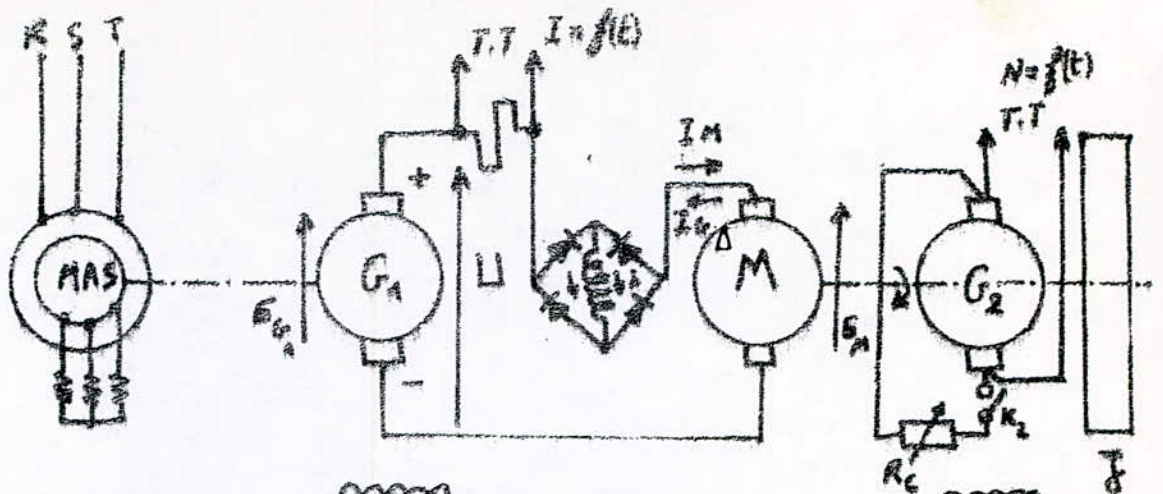
et  $C_{f_{\max}} = \frac{81,65 \cdot 47}{2\pi \cdot 1000/60} = 36,66 \text{ N.m.}$

le moteur atteignant la vitesse de 180 tr/min y reste avec  $I_n = 8$

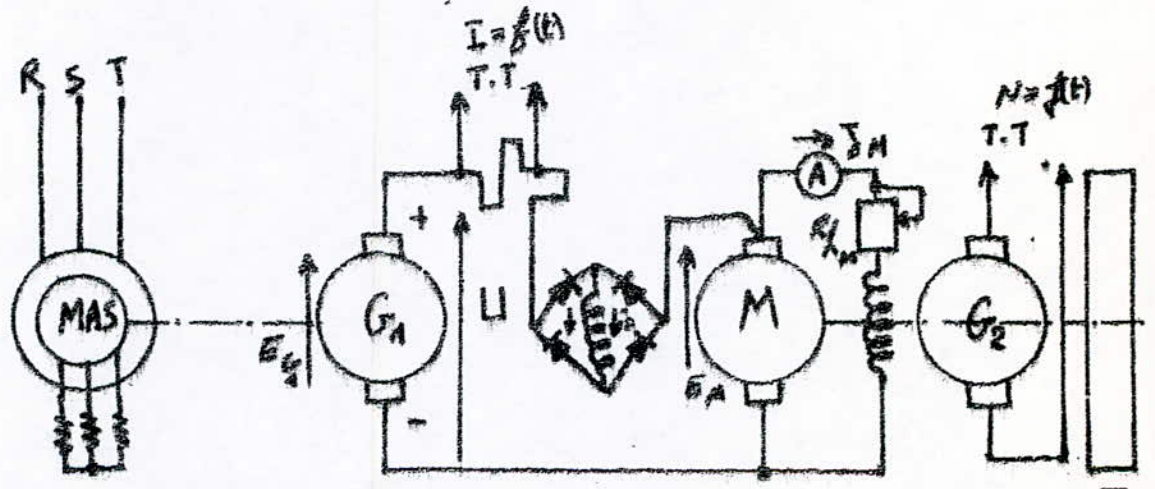
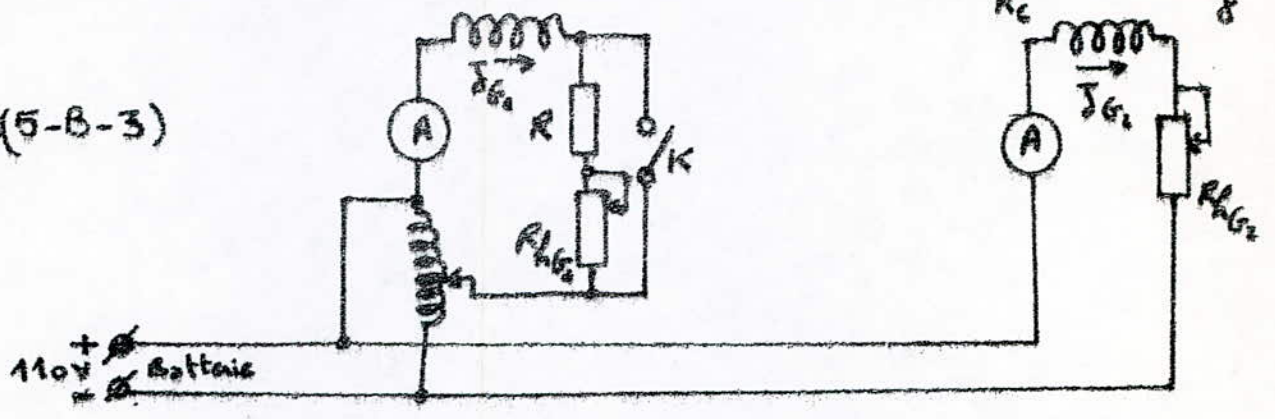
On remarque que dans ce dernier régime, une diminution de la vitesse entraînerait une chute de la f.e.m de la machine  $M$ , qui impliquerait une augmentation du courant  $I$ .

## 3. Moteur série

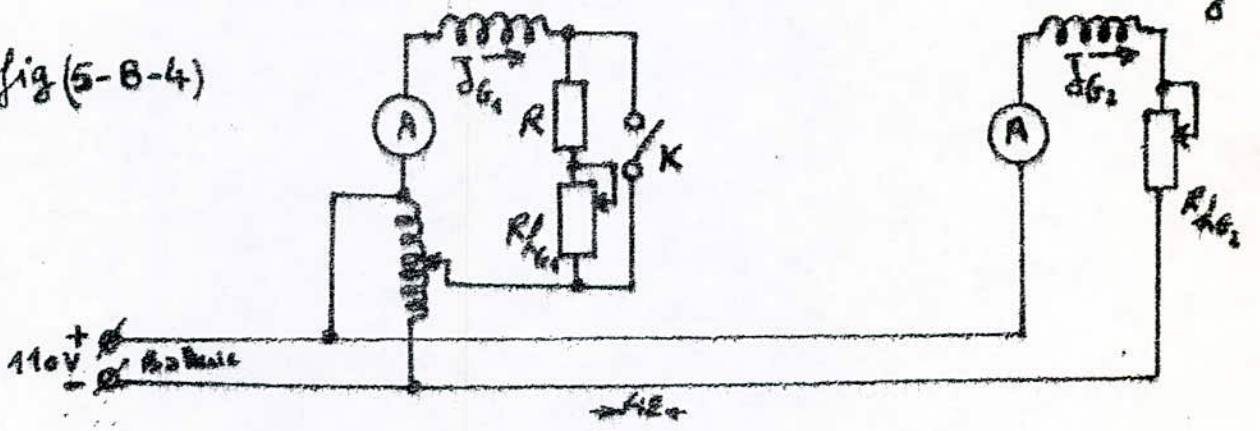
Le montage est celui de la figure (5-13-3). Un montage redresseur est nécessaire pour avoir l'amorçage en génératrice



fig(5-B-3)



fig(5-B-4)



de moteur tournant à 1000 tr/min, on a

$$U = 78 \text{ V}$$

$$I_G = 0,78 \text{ A}$$

$$I_M = 23 \text{ A}$$

On ouvre les interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$  simultanément. On remarque que le moteur ne s'amorce pas en génératrice série (fig. 5-3), bien que le courant de travail en moteur ( $I_M$ ) est proche du courant nominal (23 A)

Remarque. Lorsque le flux  $\Phi_M$  décroît, cela entraîne une chute de  $K \Phi_M$  et donc de la f.e.m.  $E_M$  (qui tend vers zéro si  $\Phi_M$  tend vers zéro), il en sera de même pour le couple de freinage  $C_f = K' \Phi_M (I_M)$ . Cela explique le fait que

$$I_G = I - I_M = \frac{E_M}{R_G + R_M} = 0 \quad (\text{graphes}).$$

#### 4. Moteur Compound additif

Le montage est celui de la figure (5-13-4). Le pont redresseur permet la conservation du sens du courant inducteur série, donc des flux additifs.

À la vitesse de 1000 tr/min on a

$$\begin{array}{l} U = 90 \text{ V} \\ I_M = 3,5 \text{ A} \end{array} ; \quad \begin{array}{l} I_M = 0,65 \text{ A} \\ I_G = 0,75 \text{ A} \end{array}$$

En ouvrant alors l'interrupteur  $K$ , on obtient les courbes de la figure ( )

$$\begin{array}{l} \text{avec} \\ I_{G0} = 67 \text{ A} \\ I_2 = 2,2 \text{ A} \\ I_G = 67 \text{ A} \\ N = 300 \text{ tr/min} \end{array}$$

Les calculs donnent :

$$E_i = U - R I_M = 90 - 0,45 \cdot 3,5 = 87,91 \text{ V}$$
$$C_f = \frac{E_i I}{\omega} = \frac{87,91 \cdot 67}{2\pi \cdot 1000/60} = 56,37 \text{ N.m}$$

La machine reprend son fonctionnement moteur avec

$$I_M = 4,5 \text{ A} \quad \text{et} \quad N = 130 \text{ tr/min}$$

Remarque. Ce courant (4,5 A) est supérieur à celui d'avant le freinage. Cette augmentation est due à la diminution de la vitesse, puisque la f.e.m diminue aussi et on a la relation

$$I = \frac{U - E}{R}$$

### 5. Moteur compound constructif.

Le montage est le même que celui de la figure (5-8.4); on a le point de travail moteur défini par :

$$\begin{cases} U = 58 \text{ V} \\ I_M = 31 \text{ A} \end{cases}$$

$$J_M = 0,37 \text{ A}$$

$$J_G = 96 \text{ A}$$

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

Le freinage est obtenu, en ouvrant l'interrupteur K. La courbe de la vitesse et celle du courant sont représentées sur les graphes.

Après le temps de récupération, la machine reprend son fonctionnement moteur avec une vitesse de 80 tr/min et un courant de 9 A. Avec les mêmes remarques que pour le compound

### Remarque.

Les essais de freinage par récupération sont effectués pour trois groupes ayant des puissances différentes. Les résultats sont donnés par le tableau de la page suivante.

Freinage par récupération       $N = 1000 \text{ tr/min}$

Puissances du groupe	moteur	$\frac{\Delta I}{\Delta t} (A/s)$	$I_n (A)$	$U (V)$	$J_n (s)$	$J_0 (A)$	$t_2 (s)$	$J_G$	$N (1/min)$	après freinage	
										$J_{fin} (s)$	$N (1/min)$
$P_{MAS} = 6 \text{ Ch}$  $P_{G_1} = 3,5 \text{ kW}$	Séparé	280	3	91	0,8	98	4	70	120	2,5	90
	Shunt	94	3	83	0,65	0,65	10	47	600	8	180
	Série	—	23	78	—	0,78	—	—	—	9	120
	Comp. additif	105	35	90	0,65	0,75	2,2	67	300	4,5	130
	Comp. soustractif	—	31	58	0,37	0,6	—	—	—	9	80
$P_{MAS} = 5 \text{ Ch}$  $P_{G_1} = 5 \text{ kW}$	Séparé	174	3	95	0,82	0,85	4,35	43,5	100	1,5	90
	Shunt	480	4	82	0,6	0,83	12	40	600	6,5	120
	Série	—	25,5	80	—	1	—	—	—	9,5	110
	Comp. additif	207	4	92	0,7	0,95	4,4	41,5	320	4	100
	Comp. soustractif	—	14	23	—	0,27	—	—	—	3	0
$P_{MAS} = 2 \text{ Ch}$  $P_{G_1} = 3 \text{ kW}$	Séparé	205	3	92	0,79	0,55	3,15	61,5	80	2	70
	Shunt	144	4	64	0,39	0,32	11	36	620	8	70
	Série	—	12,5	50	—	0,49	—	—	—	7	80
	Comp. additif	130	8,5	97	0,7	1,15	3	26	690	6	310
	Comp. soustractif	—	8,5	40	0,05	0,2	—	—	—	2,5	0

CONCLUSION

Après les différents essais, à partir des trois types de groupes (Ward-Leonard), il a été avéré que le moteur asynchrone adéquat devra avoir une puissance de 1,5 à 2 fois supérieure à celle du moteur à courant continu objet de nos essais.

En effet, fait de quoi, le glissement du moteur asynchrone augmenterait ce qui provoquerait des échauffements considérables de la machine asynchrone; fait vérifié avec le cas du moteur asynchrone de 2 chevaux.

Par ailleurs, on ne pourra pas comparer les essais faits à partir de groupes différents (moteurs asynchrones et génératrices).

Notre étude comparative entre les différents moteurs à courant continu se fera pour le groupe Ward-Leonard constitué d'une machine asynchrone de 6 CV et d'une génératrice de 3,5 kW. Les résultats précédents montrent que le moteur asynchrone adéquat

devis avoir  $t_{2 ad} < t_{2 sep} < t_{2 sh}$  fois supérieure à celle du moteur à courant continu objet de nos essais.  
 En effet, fait de quoi, le glissement du moteur asynchrone augmenterait ce qui provoquerait des échauffements considérables de la machine asynchrone; fait vérifié avec le cas du moteur asynchrone de 2 chevaux.

Par ailleurs, on ne pourra pas comparer les essais faits à partir de groupes différents (moteurs asynchrones et génératrices).

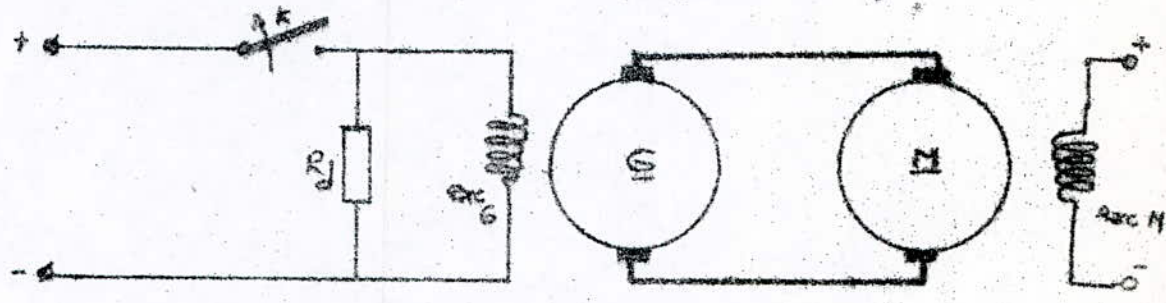
Notre étude comparative entre les différents moteurs à courant continu se fera pour le groupe Ward-Leonard constitué d'une machine asynchrone de 6 CV et d'une génératrice de 3,5 kW. Les résultats précédents montrent que le moteur asynchrone adéquat

## Deuxième méthode

On se limite dans cette deuxième méthode de freinage par récupération, au moteur à excitation indépendante.

### A. Etude théorique

Le freinage du moteur M se fait le plus fréquemment par décrochement de l'enroulement d'excitation de la génératrice du réseau et sa fermeture sur une résistance de décharge  $R_d$  (figure ci-dessous).



Le moteur fonctionne alors en génératrice grâce à l'énergie cinétique emmagasinée tandis que la génératrice passe en moteur et par suite laisse de l'énergie au moteur asynchrone. L'intensité de la diminution du courant dans l'enroulement d'excitation caractérise aussi le rythme de freinage du moteur. Cette diminution du courant d'excitation de la génératrice est établie par l'équation :

$$i_{exc} (R_{exc} + R_d) + L_{exc} \frac{di_{exc}}{dt} = 0$$

La solution de cette équation est

$$i_{exc} = I_{exc} \cdot e^{-t/T_{exc}} \quad T_{exc} = L_{exc} / (R_{exc} + R_d)$$

$T_{exc}$  étant la constante de temps électromagnétique du circuit considéré.

Sans le cas où la génératrice n'est pas saturée, l'expression de sa f.e.m. est :

$$e_g = E_n \cdot e^{-t/T_{exc}}$$

Il résulte de ces équations que la diminution de la constante de temps provoque un renforcement du système de freinage. On l'obtient en augmentant la valeur de la résistance de décharge ( $R_d$ ). Cependant

il faut tenir compte du fait que la tension aux bornes de la résistance ( $R_d$ ) et par conséquent aux bornes de l'enroulement d'excitation obéit à la loi suivante:

$$U_{exc} = U_{exc} \frac{R_d}{R_{exc}} e^{-t/T_{exc}}$$

Au temps  $t=0$ , on a:

$$U_{exc} = U_{exc} \frac{R_d}{R_{exc}}$$

Un grand accroissement de la valeur de  $R_d$  lié à la diminution de  $T_{exc}$  peut provoquer des surtensions inadmissibles aux bornes de l'enroulement d'excitation ou défaut de freinage ainsi que de forts appels de courant dans le circuit d'induit. Pour cette raison la valeur de la résistance  $R_d$  ne dépasse généralement pas trois fois la valeur de la résistance de l'enroulement d'excitation.

Pour avoir la relation analytique entre la vitesse du moteur et le temps lors du freinage, on résout le système d'équations:

$$\begin{cases} E_n e^{-t/T_{exc}} = k_f \phi \omega - R_{ind} i \\ -k_f \phi i = J \frac{d\omega}{dt} + C_f \end{cases}$$

La combinaison de ces deux équations après la transformation Laplace nous permet d'obtenir:

$$\omega = \frac{\omega_0}{T_{exc} - T_M} \left( T_{exc} e^{-t/T_{exc}} - T_M e^{-t/T_M} \right) - \Delta \omega_s$$

Le courant dans le circuit d'induit est déterminé d'après la formule:

$$i = \frac{J \omega_0}{k_f \phi (T_{exc} - T_M)} \left( e^{-t/T_{exc}} + e^{-t/T_M} \right) + I_s$$

ou bien 
$$i = I_{cc} \frac{T_M}{(T_{exc} - T_M)} \left( e^{-t/T_M} - e^{-t/T_{exc}} \right) + I_s$$

où 
$$I_{cc} = \frac{U_n}{R_{induit}}$$



### B. Etude pratique

La mesure de la résistance ( $R_{ex}$ ) de l'inducteur shunt de la génératrice a donné  $R_{ex} = 36 \Omega$ .

Le montage était celui de la figure (S-II-2).

Premier essai. On fixe  $R_d$  à  $200 \Omega$ , la vitesse du moteur étant  $1000 \text{ tr/min}$  on ouvre l'interrupteur  $K$  et le groupe freine. On obtient pour

$$U_G = 93 \text{ V}$$

$$I_N = 3 \text{ A}$$

un temps de freinage de  $4,5 \text{ sec}$  et un courant  $I_f = 85 \text{ A}$ .

Ainsi on aura  $E = U - RI = 93 - 3 \cdot 0,45 = 91,65 \text{ V}$

d'où un couple de freinage  $C_f = \frac{E I}{\omega} = \frac{91,65 \cdot 85}{2\pi \cdot 1000/60} = 74,43 \text{ N.m}$

La constante de temps sera  $T_{ex} = \frac{L_{ex}}{R_d + 36} = \frac{L_{ex}}{236}$

Deuxième essai.

On fixe  $R_d$  à  $100 \Omega$ . Avec les mêmes conditions initiales on obtient  $t_f = 5 \text{ s}$ ,  $I_f = 70 \text{ A}$ .

$$C_f = \frac{91,65 \cdot 70}{2\pi \cdot 1000/60} = 61,3 \text{ N.m}$$

$$T_{ex} = \frac{L_{ex}}{(100 + 36)} = \frac{L_{ex}}{136}$$

Ainsi on constate que :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{ex1} < T_{ex2} \\ t_{f1} < t_{f2} \\ C_{f1} > C_{f2} \\ I_{f1} > I_{f2} \end{array} \right.$$

Par conséquent pour freiner rapidement, il suffit de diminuer la constante de temps  $T_{ex}$  par action sur la résistance  $R_d$ .

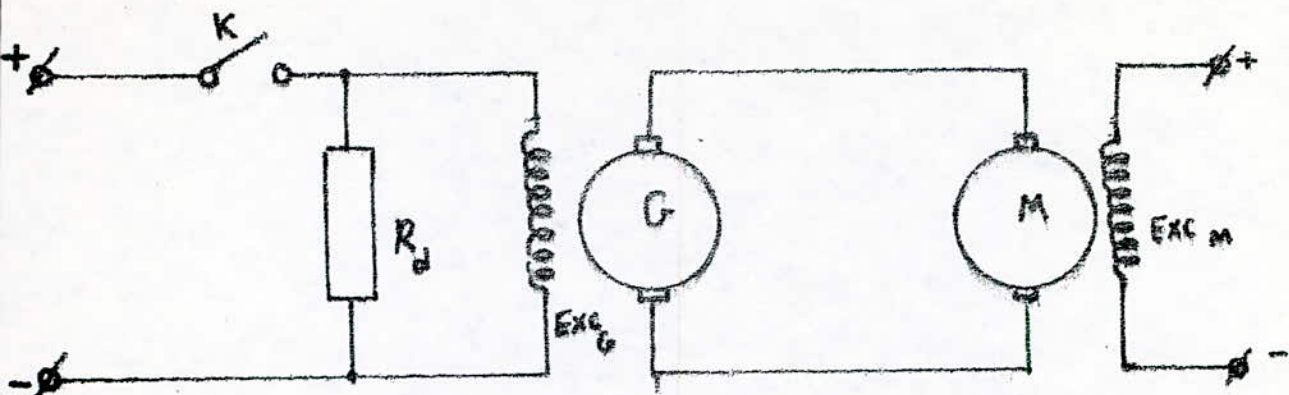


fig (5-II-1)

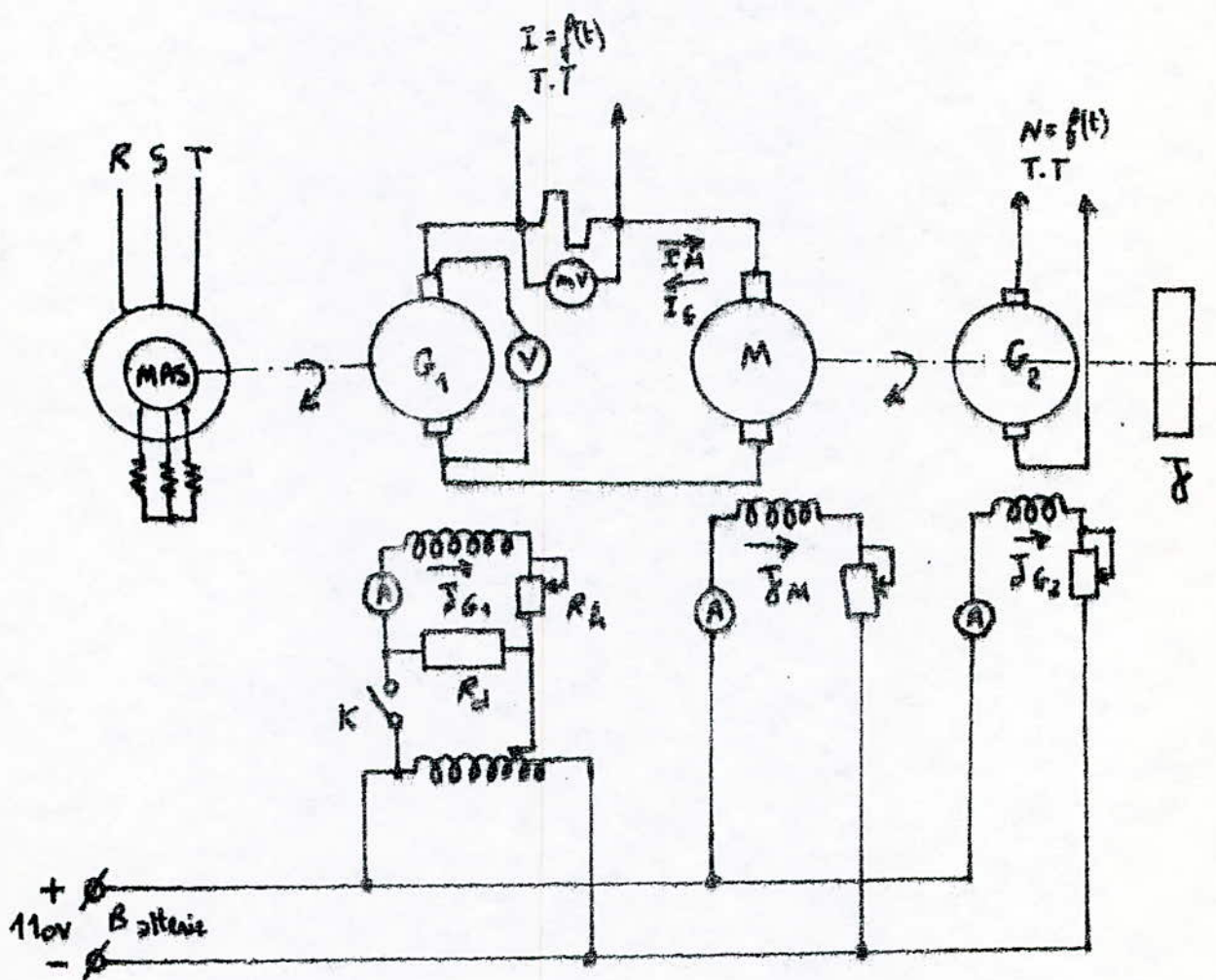


fig (5-II-2)

## CHAPITRE 6

### COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTS TYPES DE FREINAGE

A partir des essais effectués, des courbes tracées et des tableaux dressés, on peut tirer une comparaison globale entre les différents types de freinage. Cette comparaison est basée sur :

- Le temps de freinage :  $t_f$
- Le gradient du courant de pointe :  $DI/Dt$
- Le point de vue énergétique
- Le point de vue utilisation

#### 1. Temps de freinage.

Partant des mêmes conditions initiales de vitesse et de courant de pointe de freinage, on constate que le freinage à contre-courant donne le temps le plus court par rapport aux autres types de freinage. Dans le cas du freinage par récupération (première méthode), on avait remarqué l'impossibilité d'avoir un arrêt complet (total) du groupe. Par contre par la deuxième méthode on a pu obtenir l'arrêt complet du moteur.

#### 2. GRADIENT DU COURANT

On trouve que le freinage rhéostatique impose un faible gradient du courant, supportable par le collecteur du moteur. Par contre le freinage à contre-courant impose des gradients de courant élevés ce qui est dangereux pour le collecteur du moteur, surtout dans le cas du moteur compound. C'est le cas aussi pour le freinage par récupération : cas des moteurs compound et séparé.

#### 3. DU POINT DE VUE ENERGETIQUE

Pour le freinage rhéostatique, l'énergie cinétique du moteur

est transformée en énergie électrique dissipée par effet Joule dans la résistance de freinage  $R_f$ .

Par contre, dans le cas du freinage à contre-courant, c'est la source placée aux bornes de l'induit qui fournit l'énergie électrique de freinage. Ainsi l'énergie fournie par la source et l'énergie cinétique se dissipent toutes les deux sous forme électrique par effet Joule dans la résistance de freinage.

La meilleure façon de freiner, du point de vue énergétique est le freinage par récupération. Au fait que l'énergie cinétique du groupe est transformée en énergie électrique (Méthode largement utilisée dans les laminoirs réversibles) récupérée par la machine asynchrone qui débite dans le réseau. Ce mode de freinage demande l'utilisation d'un groupe convertisseur mécanique ou électronique.

#### 4.° DU POINT DE VUE UTILISATION

Le freinage par contre-courant permet de réaliser rapidement l'inversion du sens de rotation du moteur. Et comme on s'intéresse uniquement au freinage, on coupe l'alimentation au moment où la vitesse s'annule.

- Le freinage par récupération (première méthode) ne permet pas l'arrêt du groupe et ainsi ne sert qu'à la décélération du moteur. Cependant la deuxième méthode assure un arrêt total du groupe.

Le freinage rhéostatique demande un matériel très réduit, permet le réglage du courant par action sur le rhéostat, il ne pose aucun problème de manipulation et permet un arrêt total du groupe (dans le cadre de notre manipulation).

## PROPOSITION D'UN FREINAGE RHEOSTATIQUE PAR HACHEUR

### Introduction

Dans cette partie, nous proposons de manière succincte un mode de freinage rheostatique par l'intermédiaire d'un hacheur (fig 7-1)

L'avantage d'un tel système réside dans le fait qu'un hacheur série peut maintenir le courant constant dans l'induit, grâce à la boucle de réglage de  $I$ , tant que le groupe tourne, ce qui permet de diminuer le temps de freinage par rapport au freinage rheostatique classique, (fig. 7-2).

### Principe

Le hacheur disposé en série avec la machine fonctionnant en génératrice, on obtient :

- le hacheur fermé (durée  $T-\theta$ ) :  $U_{rf} = R_f \cdot I_f$

- le hacheur ouvert (durée  $\theta$ ) :  $U_{rf} = 0$

$$(U_{rf})_m = R_f I_6 \left(1 - \frac{\theta}{T}\right) = R_f I_6 (1 - \alpha)$$

$\alpha$  : rapport cyclique.

La résistance de freinage équivalente est donc

$$R_{ef} = R_f (1 - \alpha)$$

Il nous est donc possible de faire varier  $R_{ef}$  dans une plage comprise entre zéro et  $R_f$  ; ceci a fin de maintenir  $I_{6m}$  constant ; chose réalisable par une boucle de courant qui sera introduite dans le régulateur du hacheur.

Ainsi, l'équation de la vitesse, de la marche en génératrice de la machine est

$$J \frac{d\omega}{dt} + f\omega + C_f = 0 \quad (1)$$

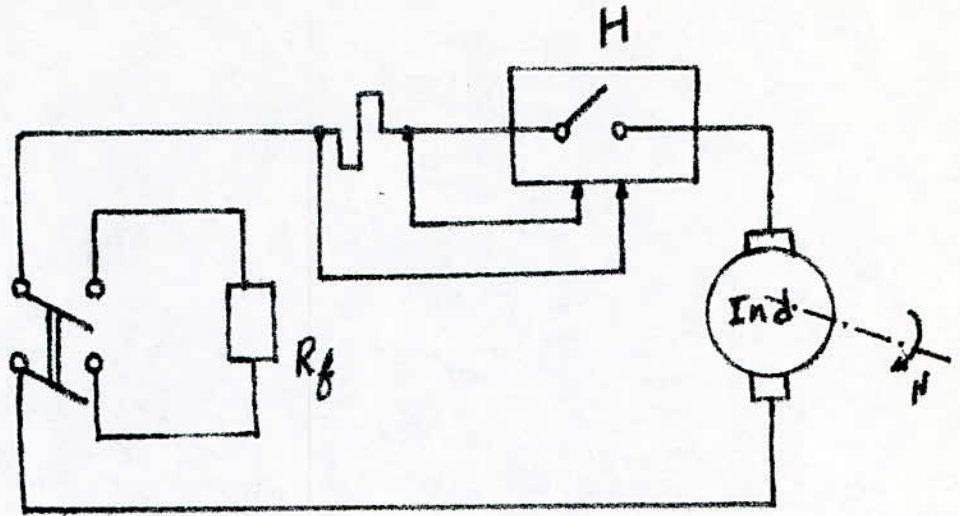


fig (7-1)

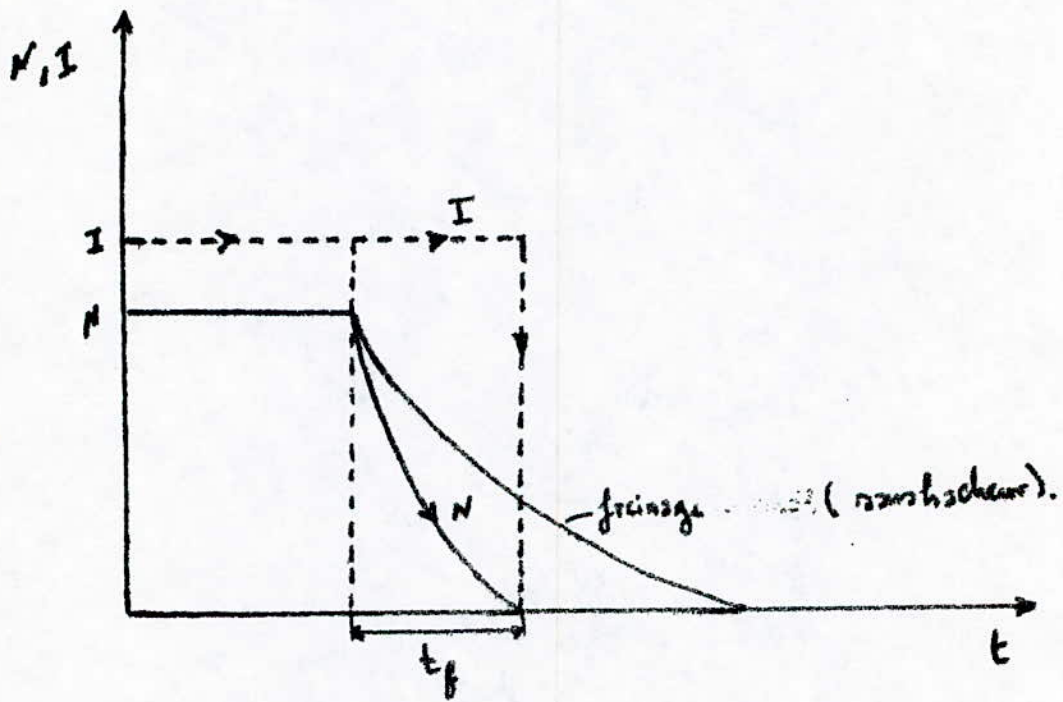


fig (7-2)

$$\text{ou } C_r = K' \phi I_{em}$$

d'équation caractéristique de l'équation différentielle homogène est:

$$Jp + f = 0 \Rightarrow p_0 = -\frac{f}{J} =$$

la solution générale est de la forme

$$\omega = A e^{-\frac{f}{J}t}$$

Après introduction de  $Ae^{-\frac{f}{J}t}$  dans l'équation (1)

$$J \frac{dA}{dt} e^{-\frac{f}{J}t} - J A \frac{f}{J} e^{-\frac{f}{J}t} + f A e^{-\frac{f}{J}t} = -K' \phi I_{em}$$

$$\text{donc } \frac{dA}{dt} = -\frac{K' \phi I_{em}}{J} e^{+\frac{f}{J}t} \Rightarrow A = -\frac{K' \phi I_{em}}{J} \cdot \frac{J}{f} e^{(\frac{f}{J})t} + B$$

$$\text{on obtient } \omega = \omega_0 e^{-\frac{f}{J}t} + \frac{K' \phi I_{em}}{f} (e^{-\frac{f}{J}t} - 1)$$

d'où l'expression du temps de freinage:

$$\left| t_f = \frac{J}{f} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\omega_0 f}{K' \phi I_{em}} \right) \right|$$

En fixant une valeur de  $I_{em}$ , on déduit une valeur de  $t_f$ .

L'idéal serait de maintenir  $I_{em}$  le plus grand possible (voisin de  $I_N$ )

afin de diminuer au maximum  $t_f$ .

Des essais pratiques effectués avec un hacheur série non pas donné les résultats escomptés vu que le hacheur utilisé n'avait pas de boucle de régulation du courant.

## CONCLUSION

Après comparaison des différents modes de freinage, il nous est apparu nécessaire de garder constante l'excitation de la machine  $M$  et ceci même dans le cas des moteurs série et shunt. Cela nous permet de maintenir  $K \phi_m$  à sa valeur maximale, d'où un couple de freinage plus important et un temps de freinage plus réduit.

Nous soulignons que cette étude pourrait être un débouché à un processus qui peut être utilisé industriellement surtout avec l'apport de l'électronique de puissance (contrôle du gradient du courant).

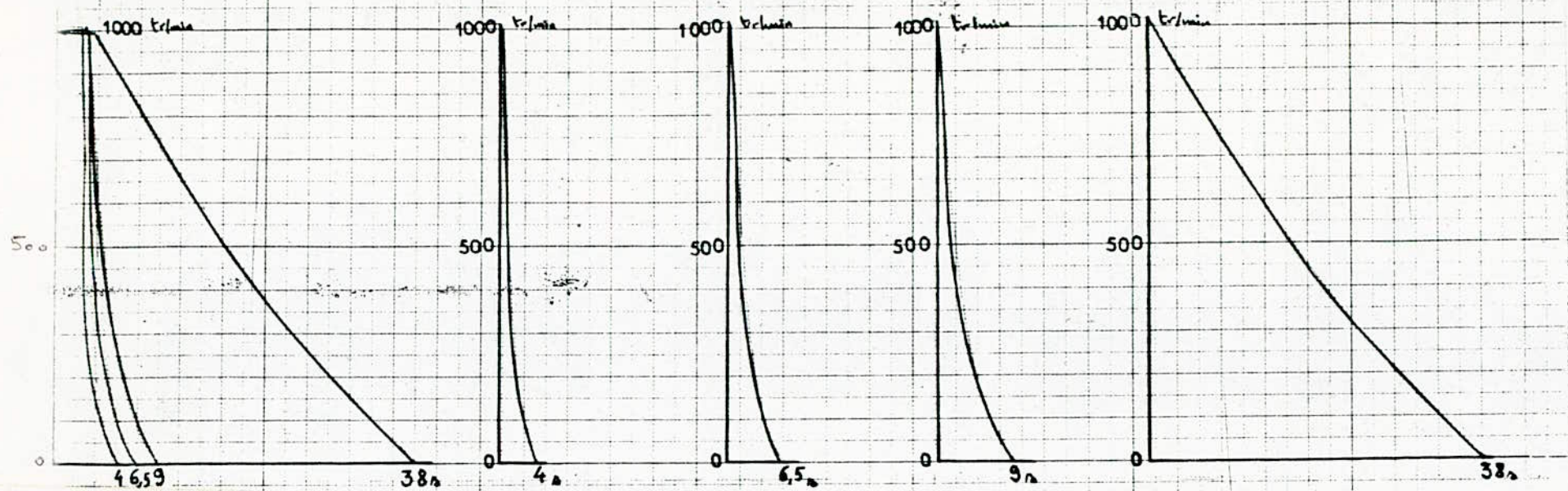
Les résultats de ce travail peuvent être utilisés pour le choix adéquat d'un mode de freinage. C'est dans ce sens que cette étude doit être approfondie. D'où la nécessité d'un matériel spécifique (utilisation des ressources de l'électronique de puissance).



## BIBLIOGRAPHIE

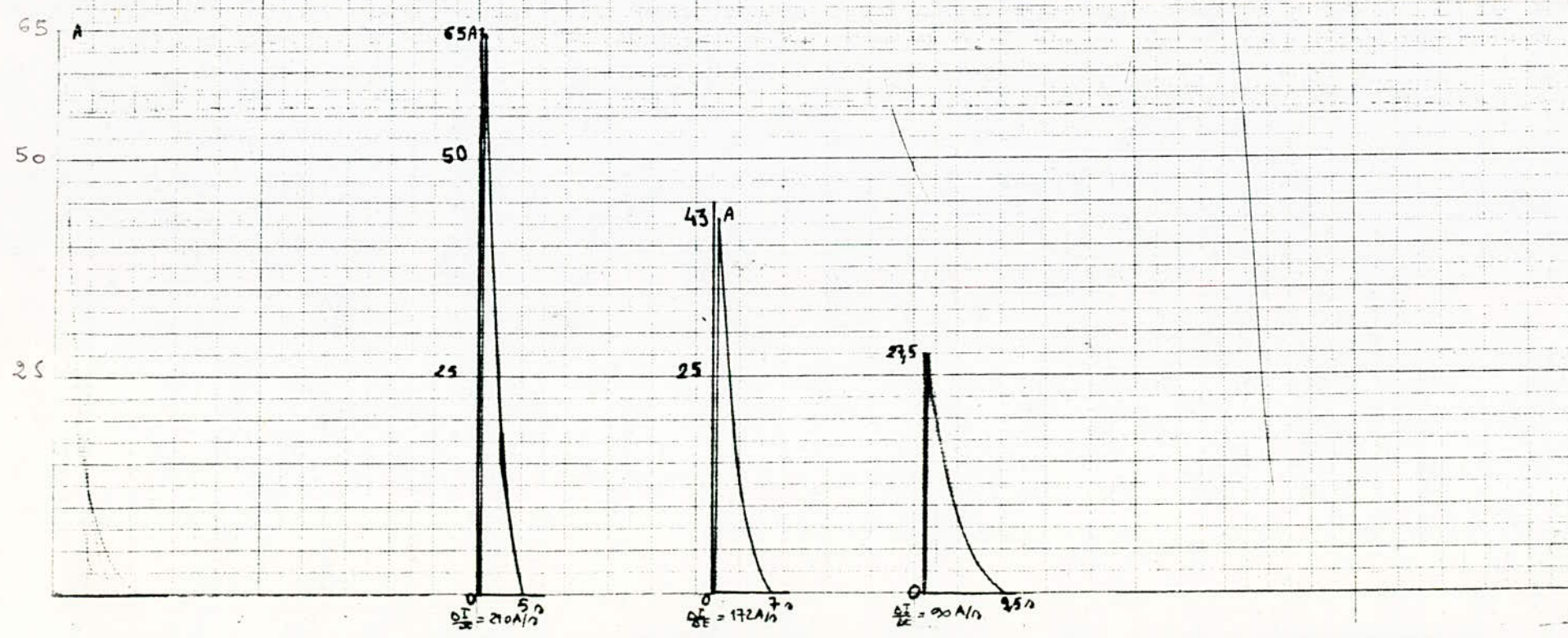
1. Cours d'électrotechnique Tome 2 { FRANCIS MILSANT  
édition Eyrolles
2. Machines électriques. Tome 1.  
par { L. PIOTROVSKI  
M. KOSTENKO      édition: MIR
3. Electrotechnique industrielle  
par { G. SEGUIER      édition:
4. Cours de commande électrique  
par: M. TCHILIKINE      édition: MIR
5. Etude des méthodes de réglage de la vitesse d'un moteur à  
courant continu. " thèse de fin d'étude d'ingénieur (ENP 78)  
par TSIMARİVO RAHALA
6. Commande électronique des moteurs à courant continu.  
par ROBERT CHAURADE      édition Eyrolles.

ANNEXE



Moteur à excitation  
séparée.

$U = 90V$   
 $\bar{I}_M = 2,8A.$   
 $N = 1000 \text{ tr/min.}$   
 $\delta_M = 0,8 A.$

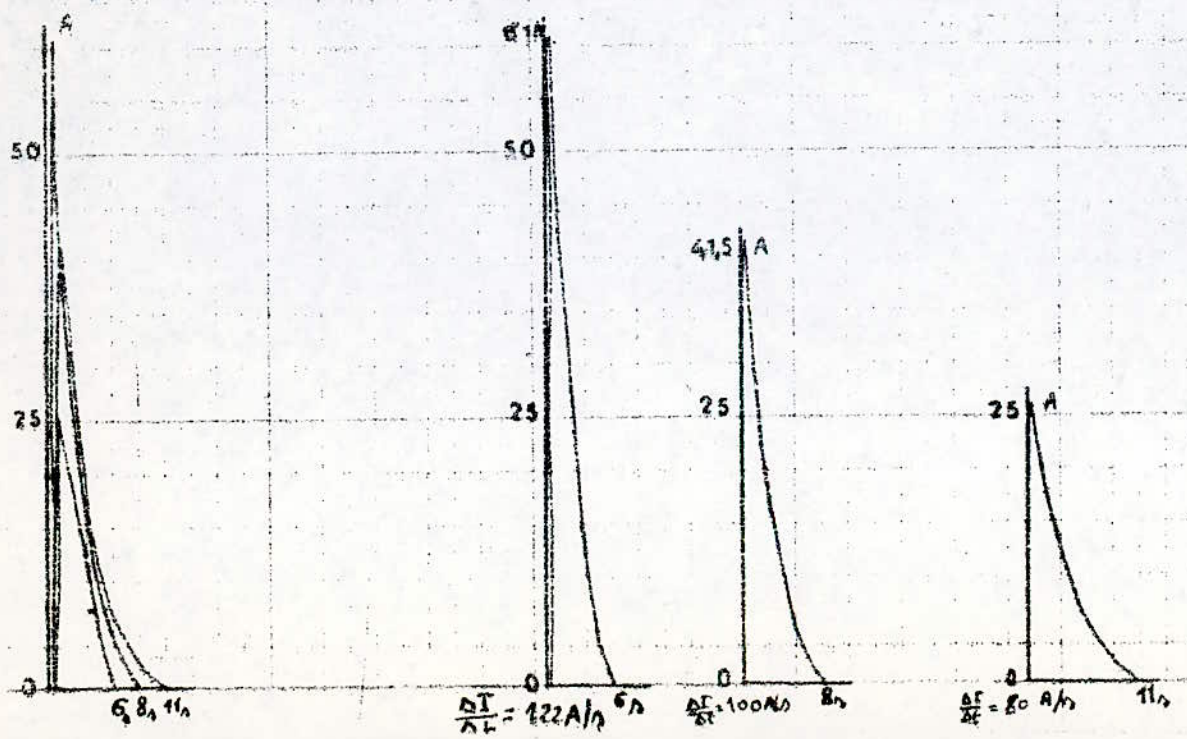
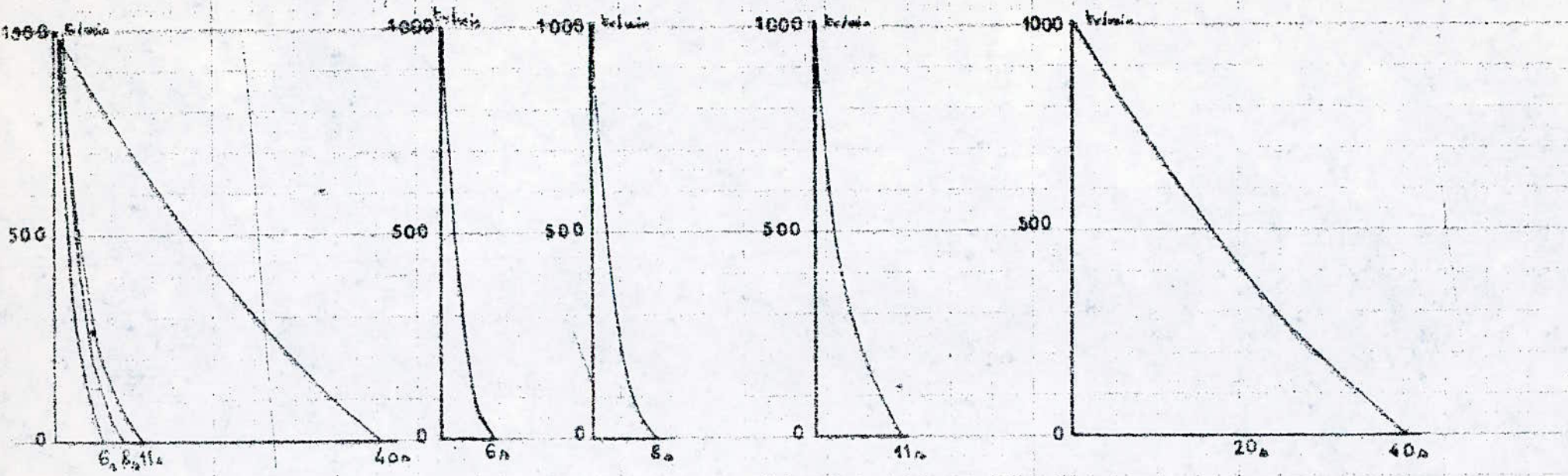


fig(3-1)

Moteur Shunt.  
freinage  
rheostatique.

$U = 78V$   
 $I_M = 3A$   
 $N = 1000 \text{ tours/min}$   
 $\delta_M = 0,6A$

fig(3-2)



Moteur sÉrie  
freinage Rhéostatique.

$U = 75V$   
 $N = 1000 \text{ tr/min.}$   
 $I_M = 23A.$   
 $I_{\text{charge}} = 22,5A.$   
 $I_{\text{d'charge}} = 0,87A.$

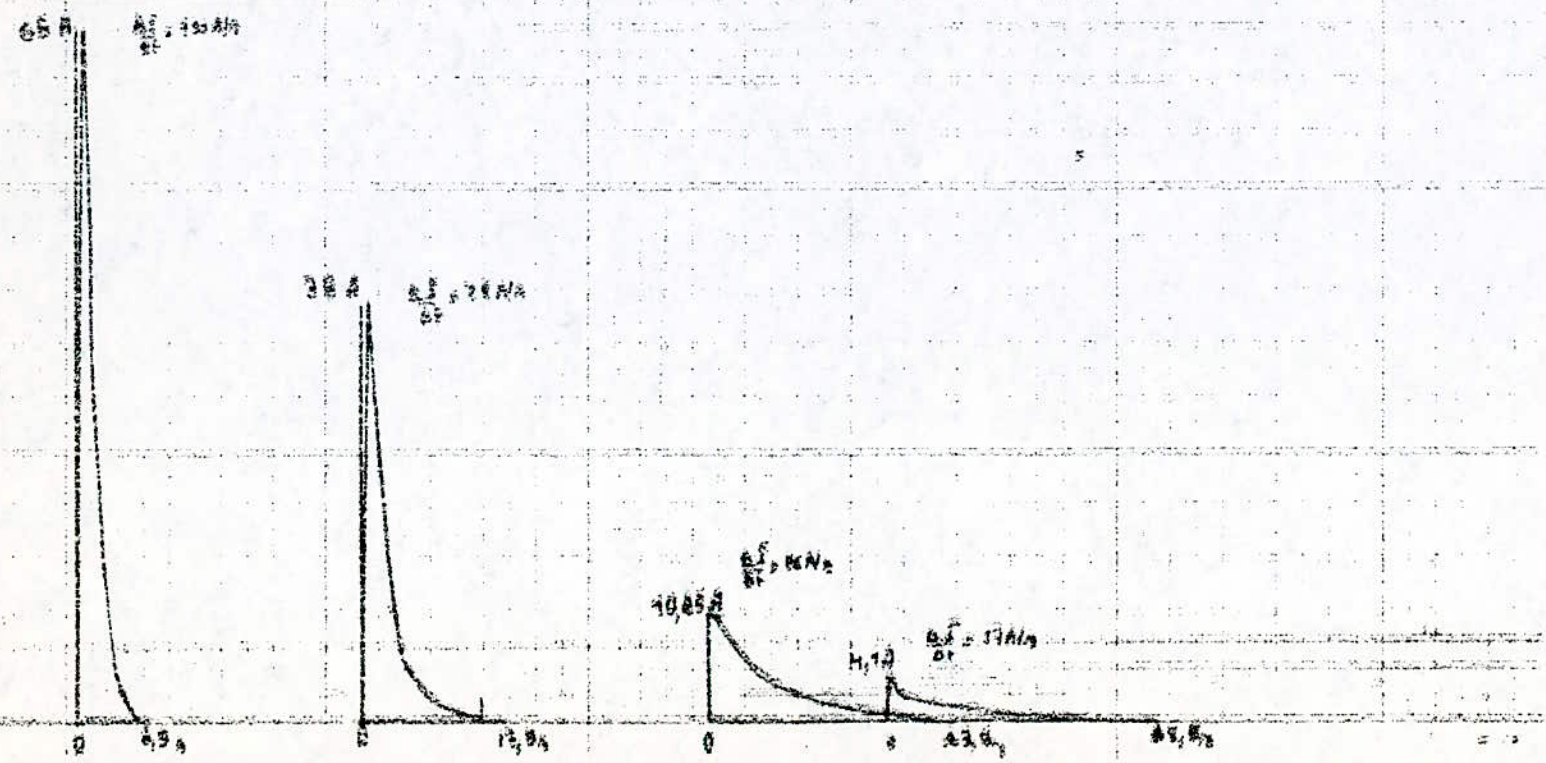
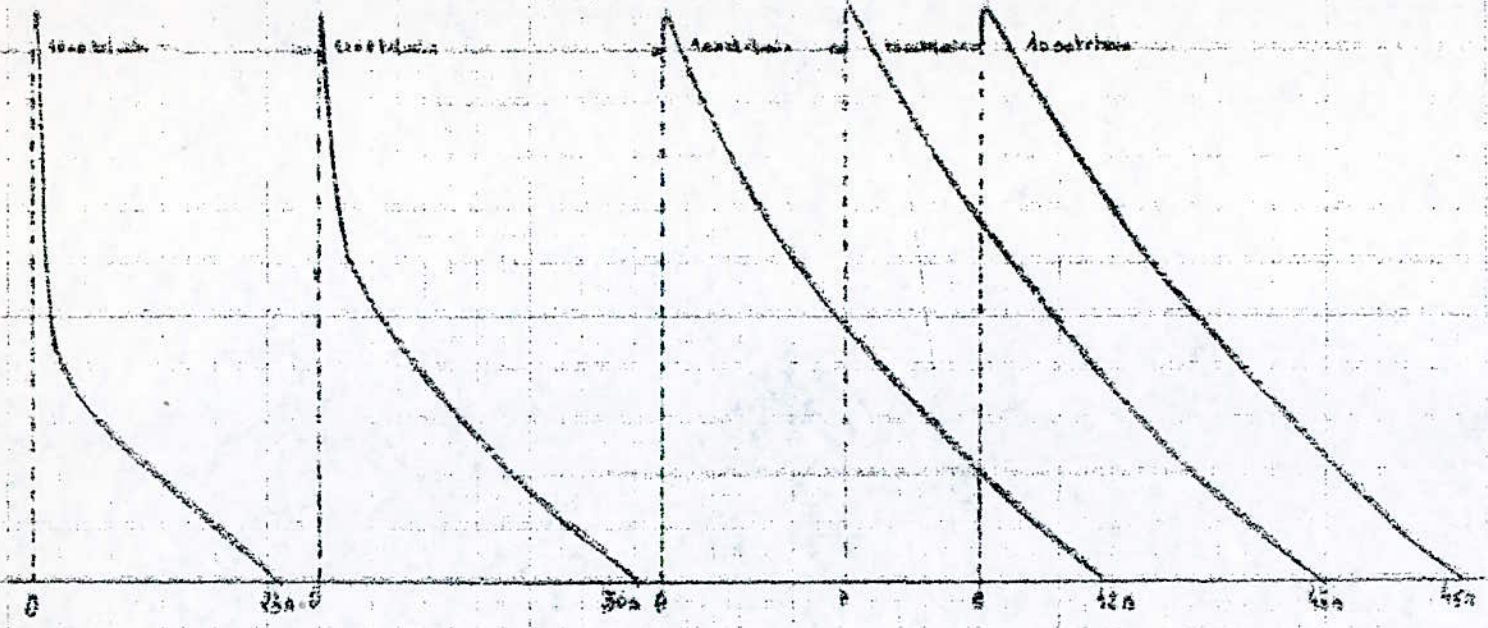
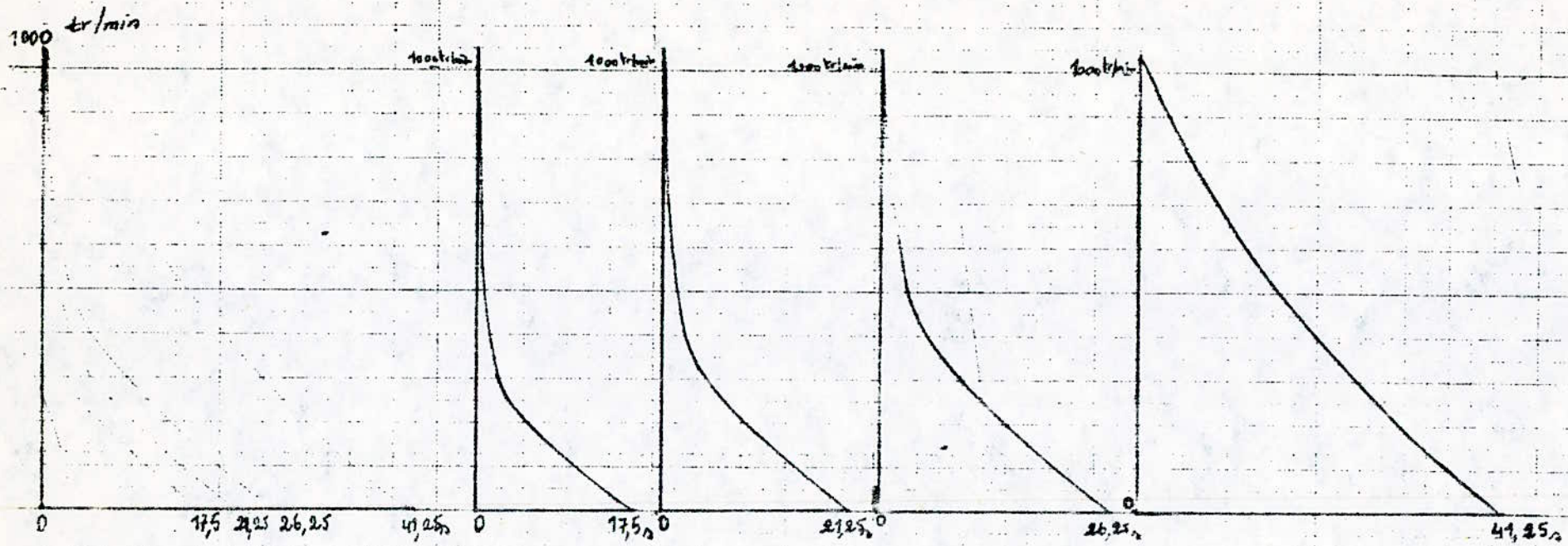


fig (3-3)



Moteur: Compound  
additif

freinage Rhéostatique

$$U = 100V$$

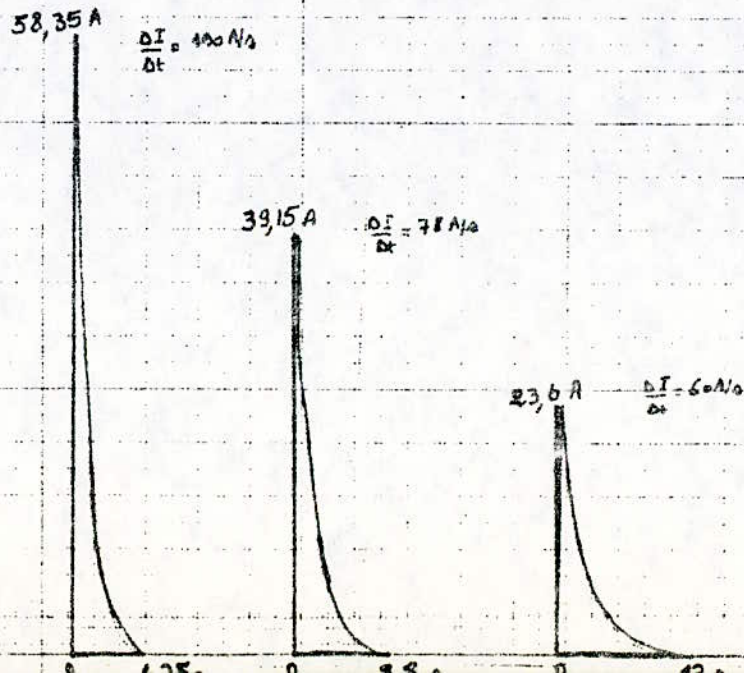
$$I_M = 9,5A$$

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

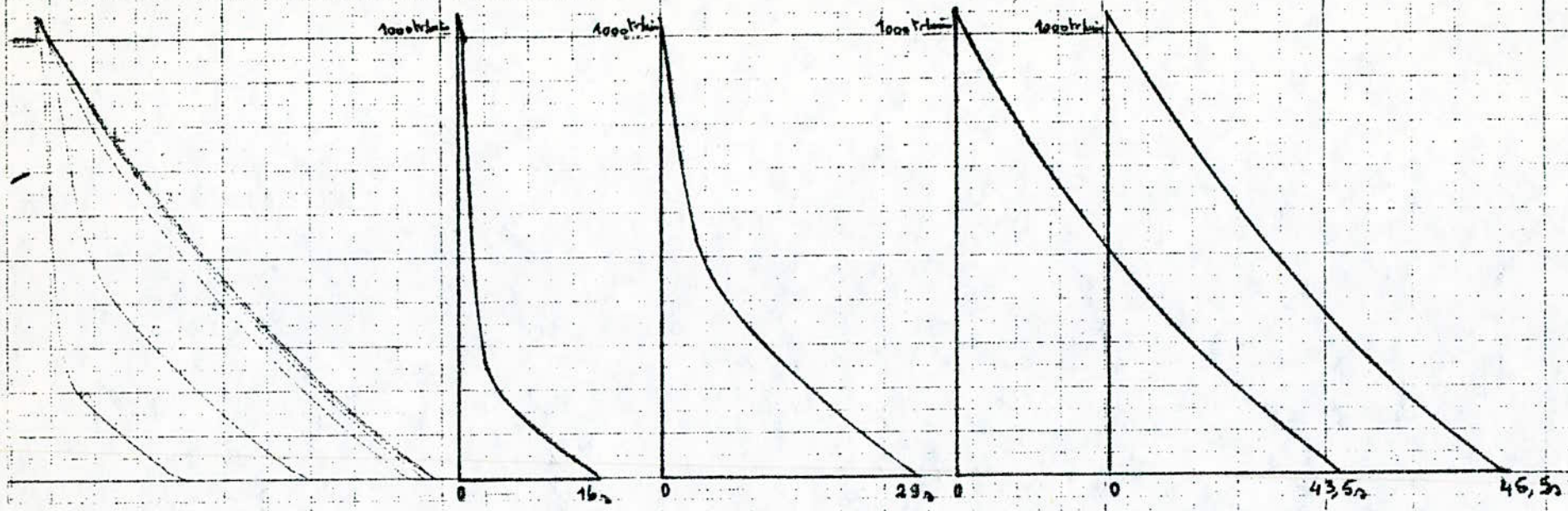
$$I_{\text{charge}} = 14A$$

$$T_{\text{charge}} = 0,85$$

$$T_M = 0,76A$$



fig(3-4)



Motor  
Compound Saut  
freizuge Rheostat

$U = 45V$   
 $N = 1000 \text{tr/min}$   
 $I_M = 29A$   
 $J_M = 0,37A$   
 $I_{\text{charge}} = 14A$   
 $J_{\text{charge}} = 0,88$

$67A$   
 $\frac{\Delta I}{\Delta t} = 80A/s$

$\frac{\Delta I}{\Delta t} = 19A/s$

$28,5A$

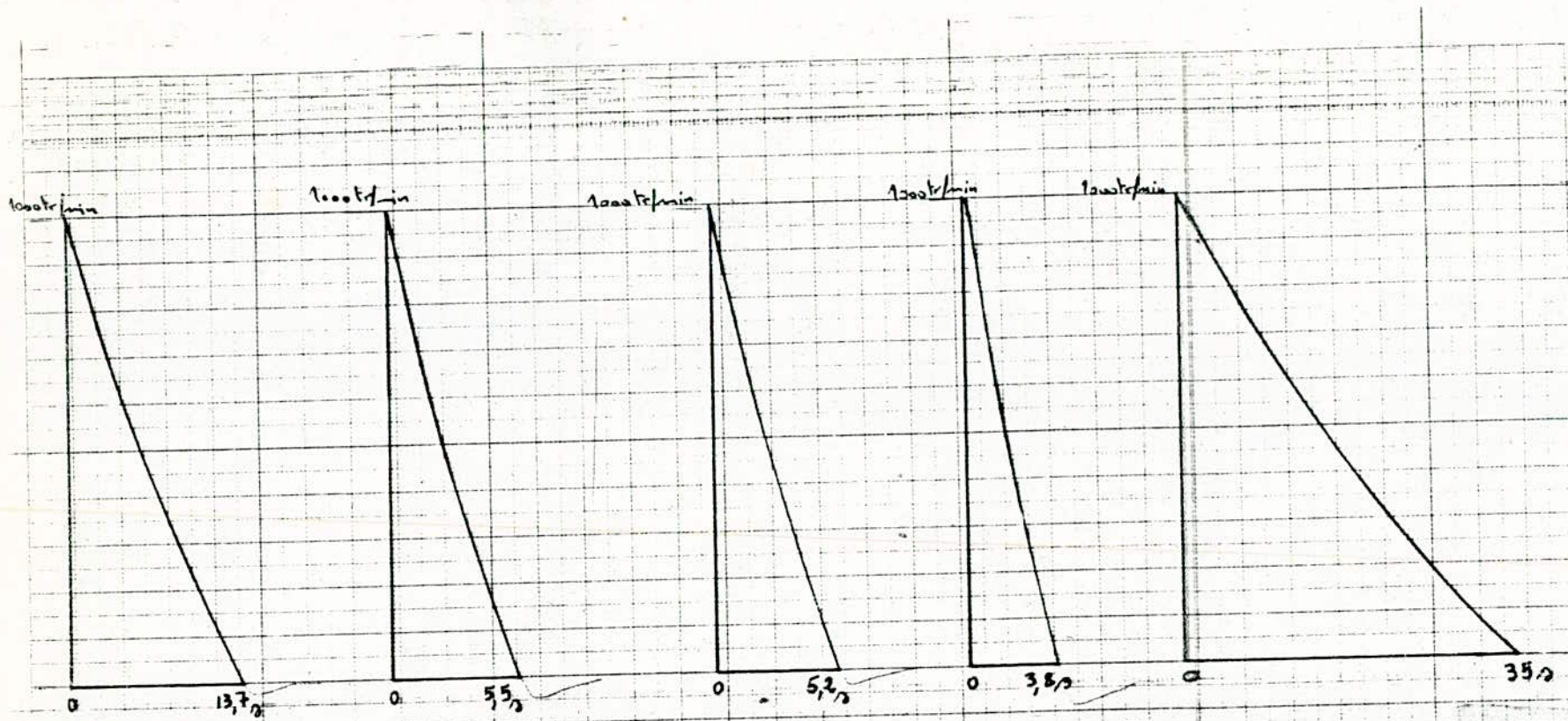
$\frac{\Delta I}{\Delta t} = 17A/s$

$\frac{\Delta I}{\Delta t} = 17A/s$

$8,5A$

$5A$

fig(3-5)



freinage à contre-courant.  
 Moteur à excitation séparée.

- $U = 85 \text{ V}$
- $N = 1000 \text{ tr/min}$
- $I_M = 3 \text{ A}$
- $\delta_M = 0,73 \text{ A}$

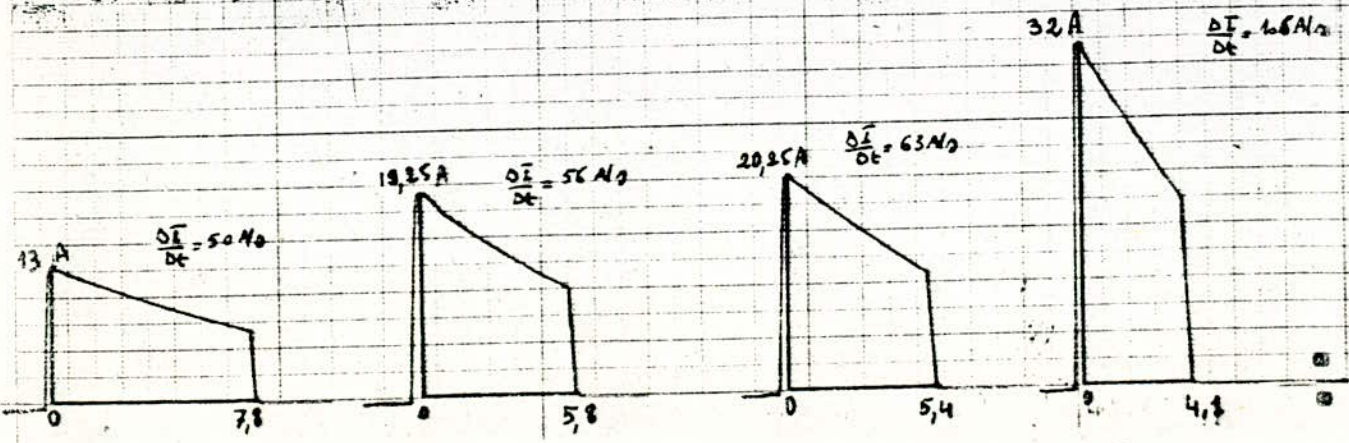
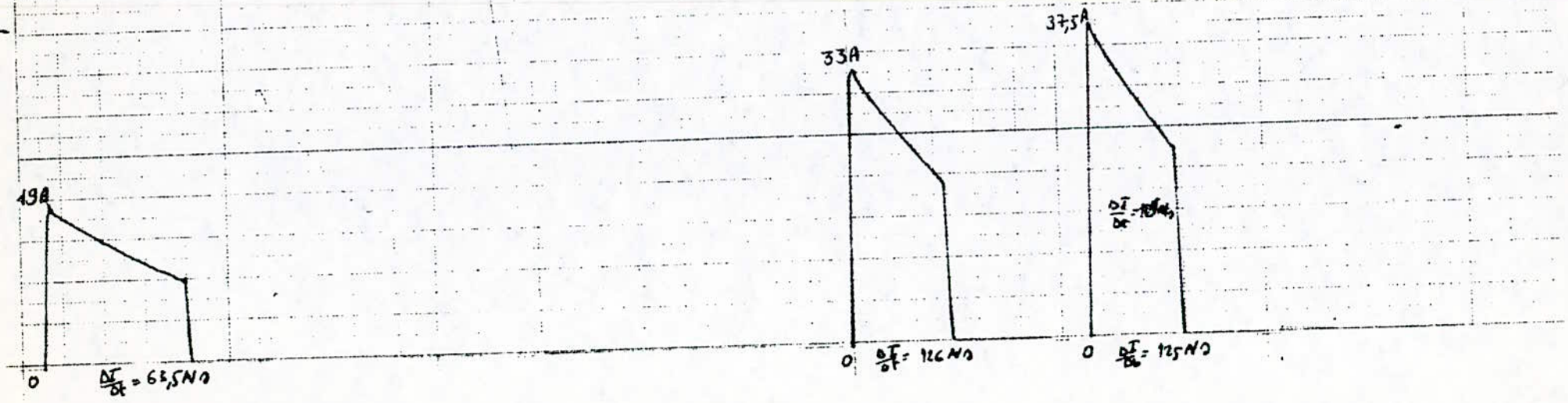
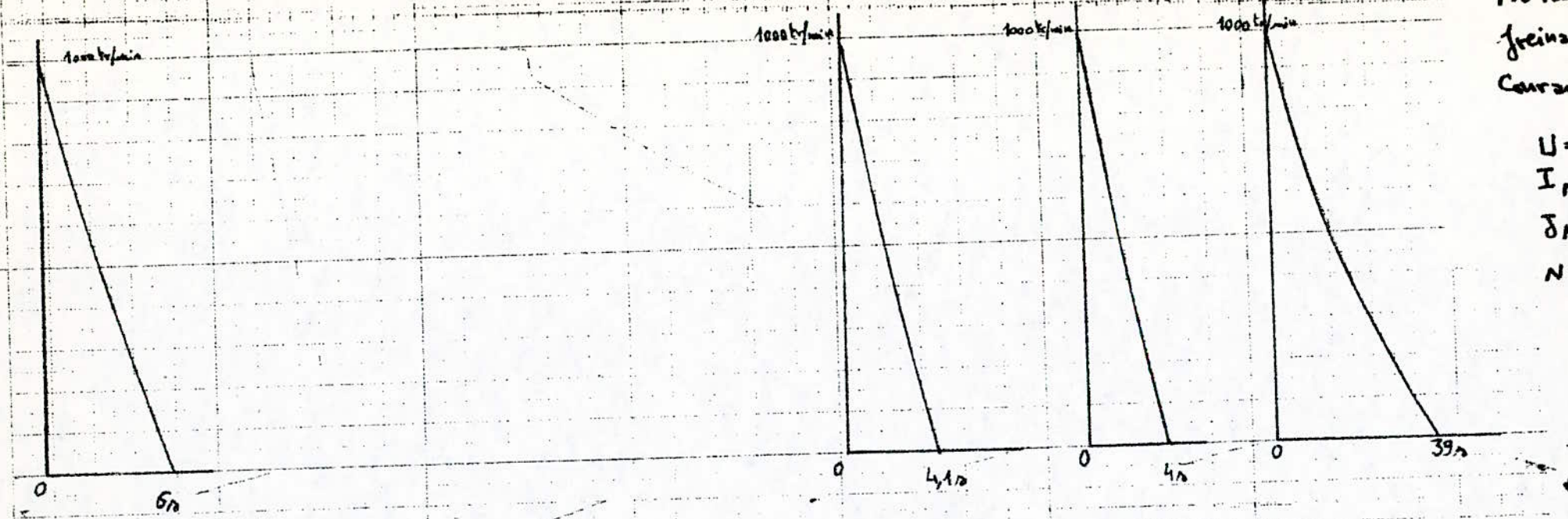


fig (4-1)



Motor Shunt.  
Freinsgei Sutte-  
Caurant.

$U = 77V$   
 $I_M = 3A$   
 $\delta_M = 9,61A$   
 $N = 1000 \text{tr/min.}$



fig(1-2)

Moteur série.

Freinage à saturation.

$U = 80V$

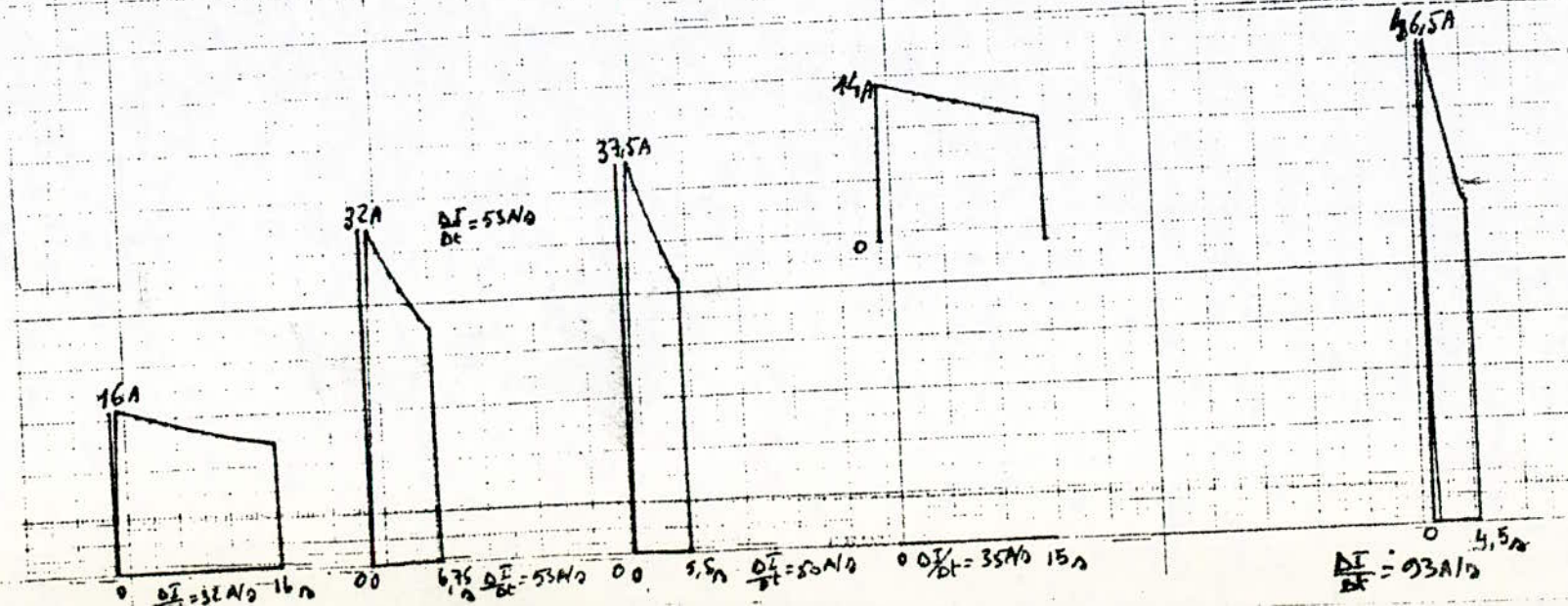
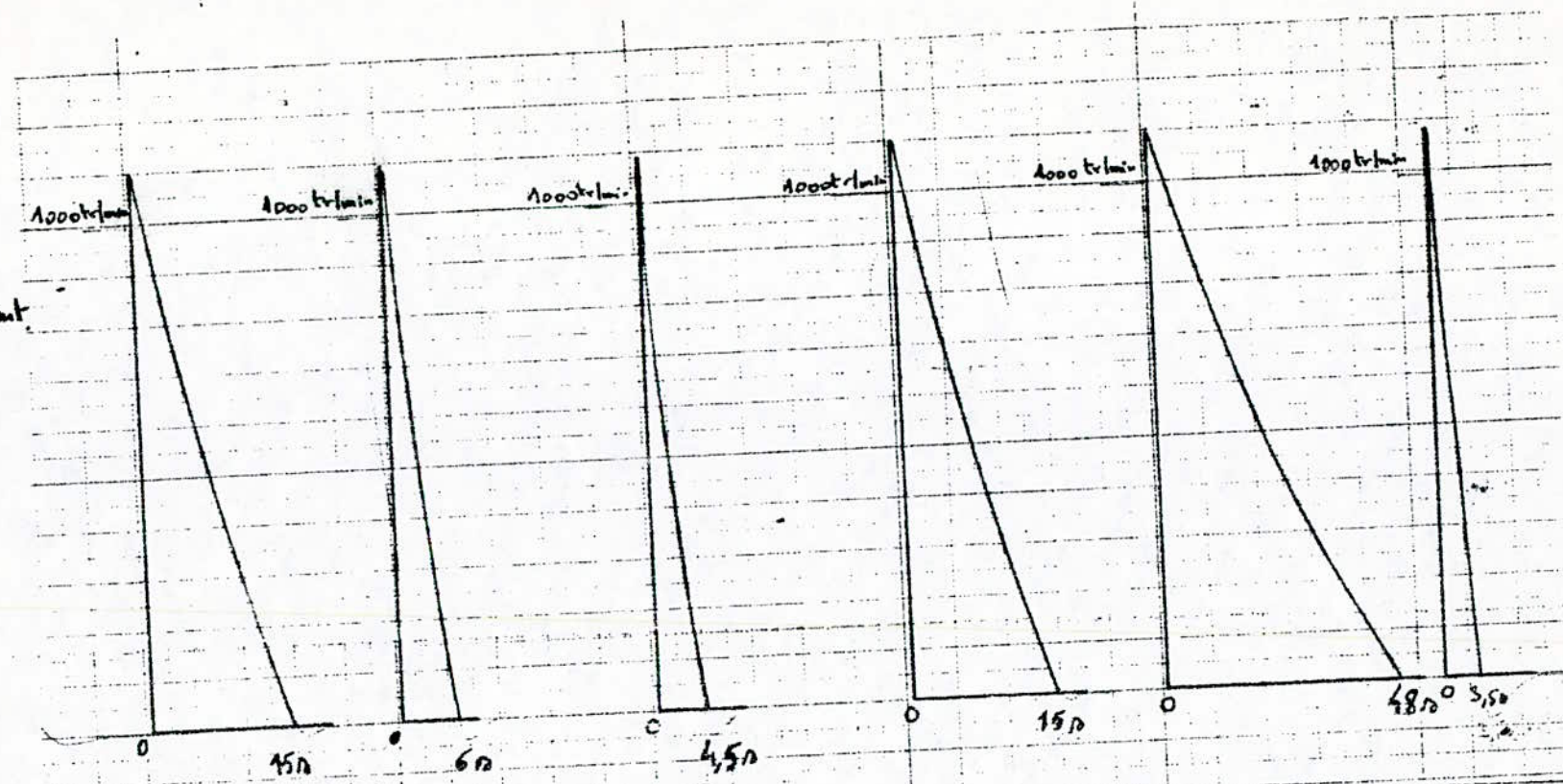
$N = 1000 \text{ tr/min}$

$I_M = 28A$

$I_{charge} = 21,5A$

$I_{charge} = 0,92A$

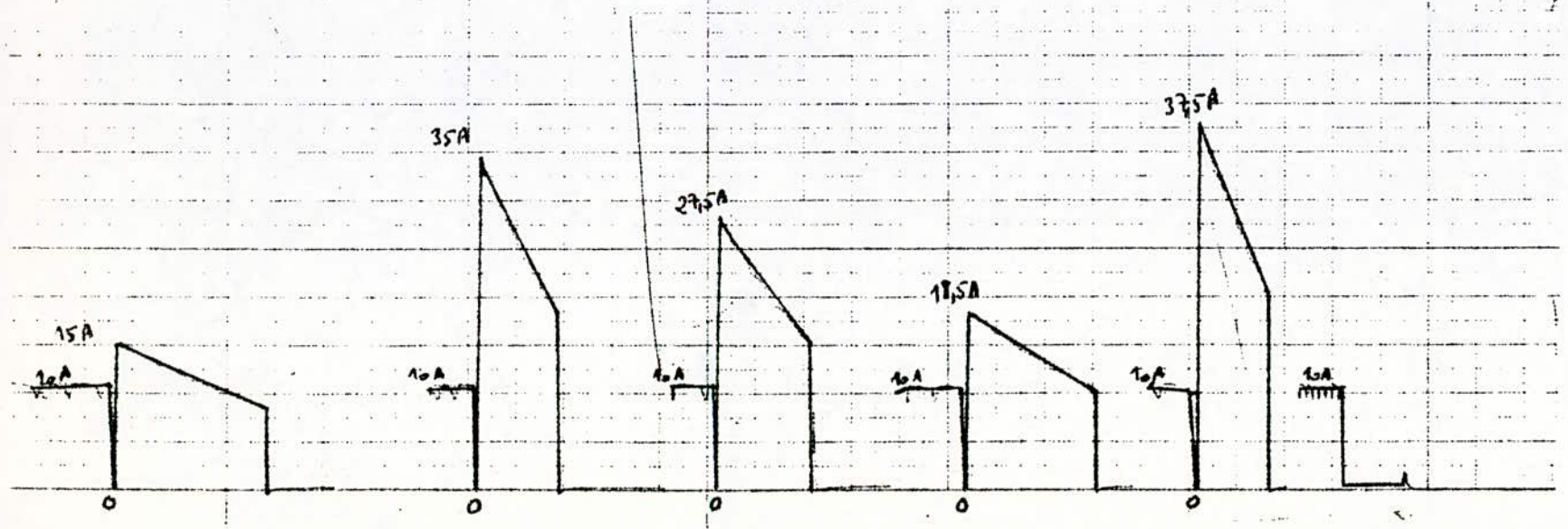
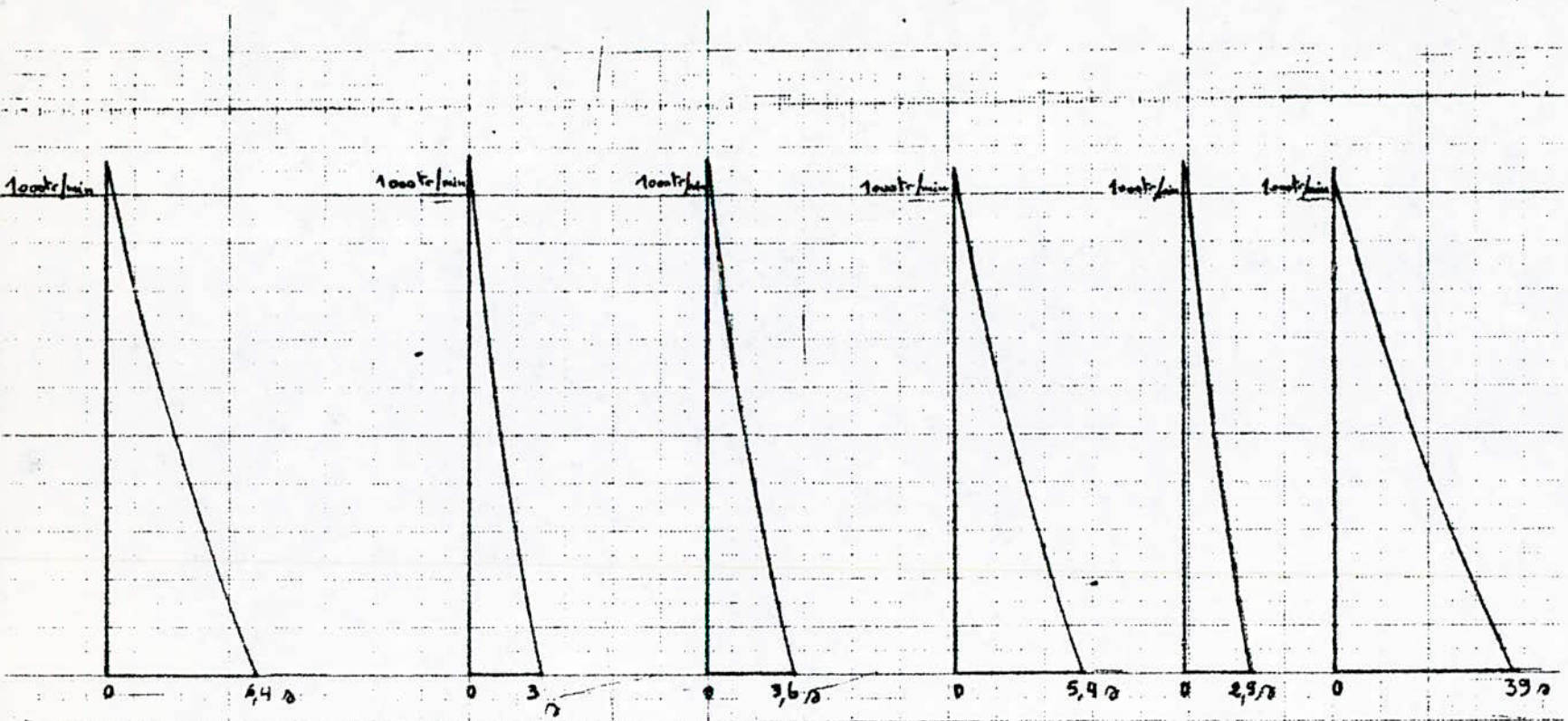
fig (4-3)



Moteur Compound additif.  
freinage à Centre-Courant.

$U = 115V$   
 $N = 1000 \text{ tr/min}$   
 $I_M = 10A$   
 $\delta_M = 0,73A.$   
 $I_{\text{charge}} = 12,5A.$   
 $\delta_{\text{charge}} = 0,82A.$

fig(4-4)



Motor  
Compound addit.

$U = 108V$

$N = 1000 \text{ r/min}$

$I_M = 20A$

$\delta_{\mu} = 0,8A$

$I_{\text{exchange}} = 31A$

$\delta_{\text{exchange}} = 0,8A$

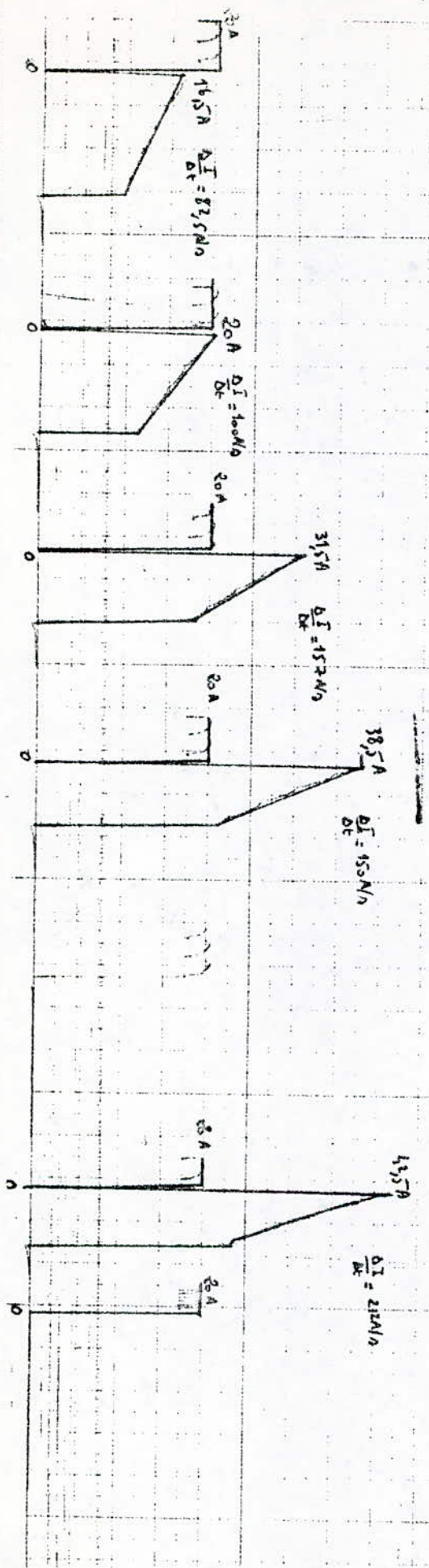
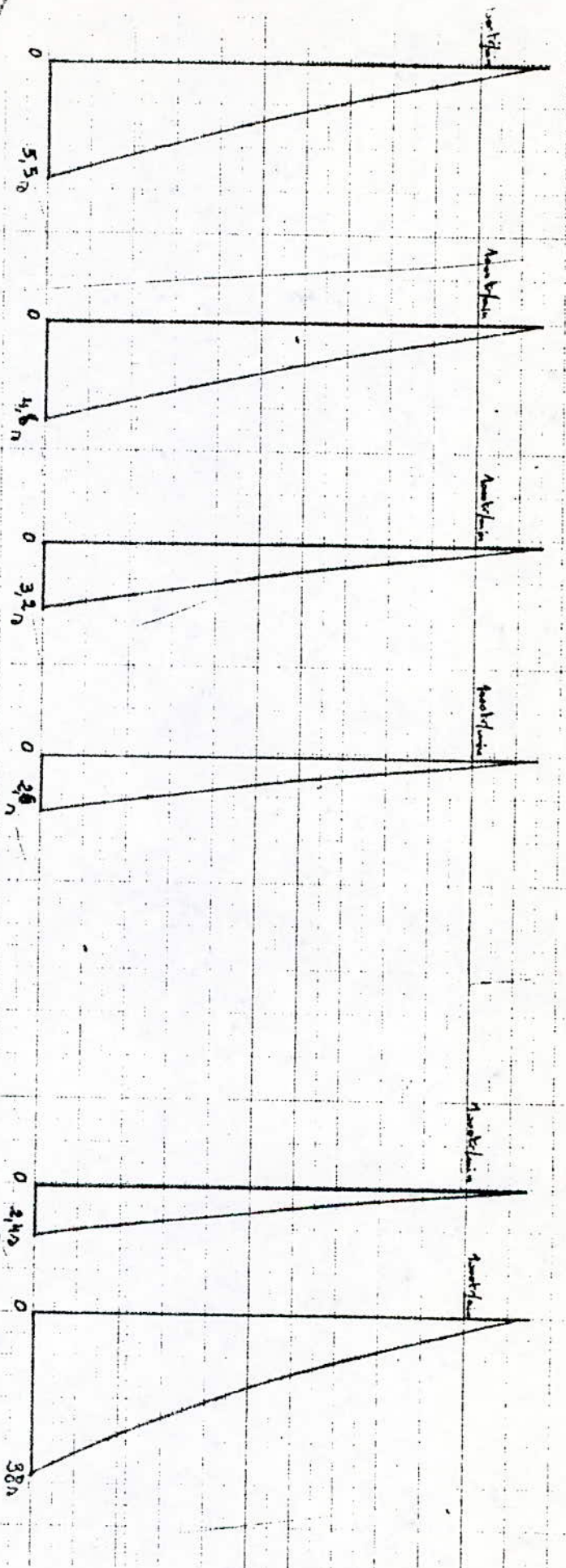


Fig (4-4)

Moteur  
Compound Scaust.

$U = 118 \text{ V}$   
 $N = 1000 \text{ tr/min}$   
 $I_M = 12 \text{ A}$   
 $\delta_M = 0,88 \text{ A}$   
 $I_{\text{charge}} = 12,5 \text{ A}$   
 $I_{\text{charge}} = 0,71 \text{ A}$

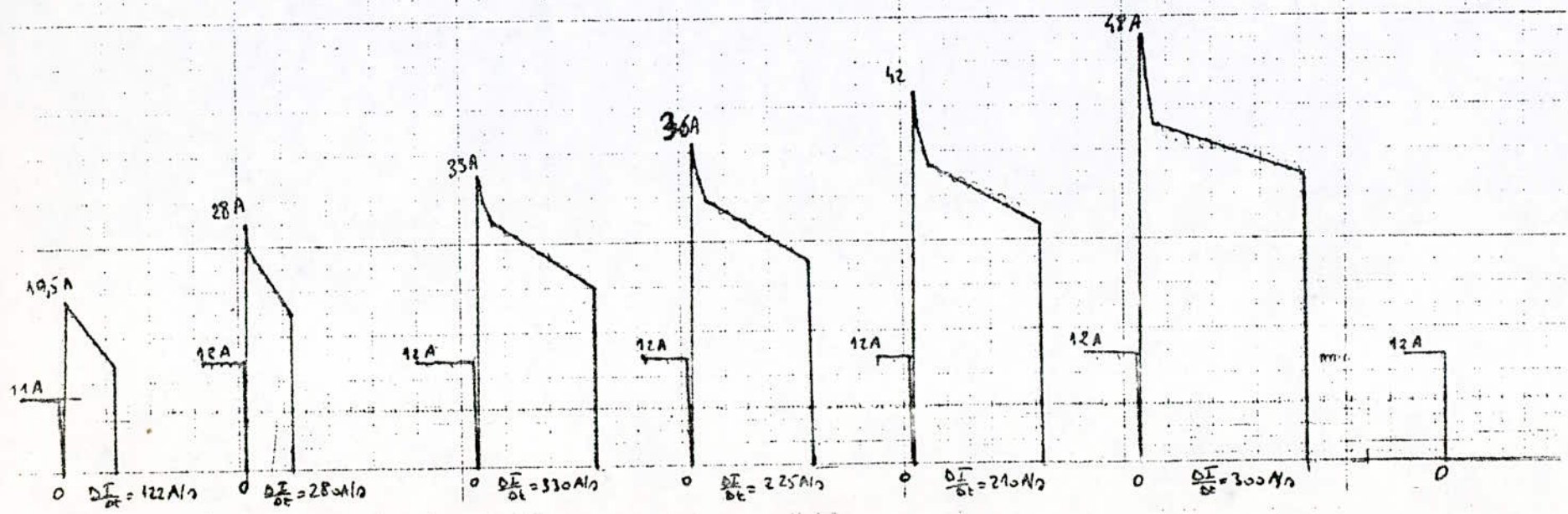
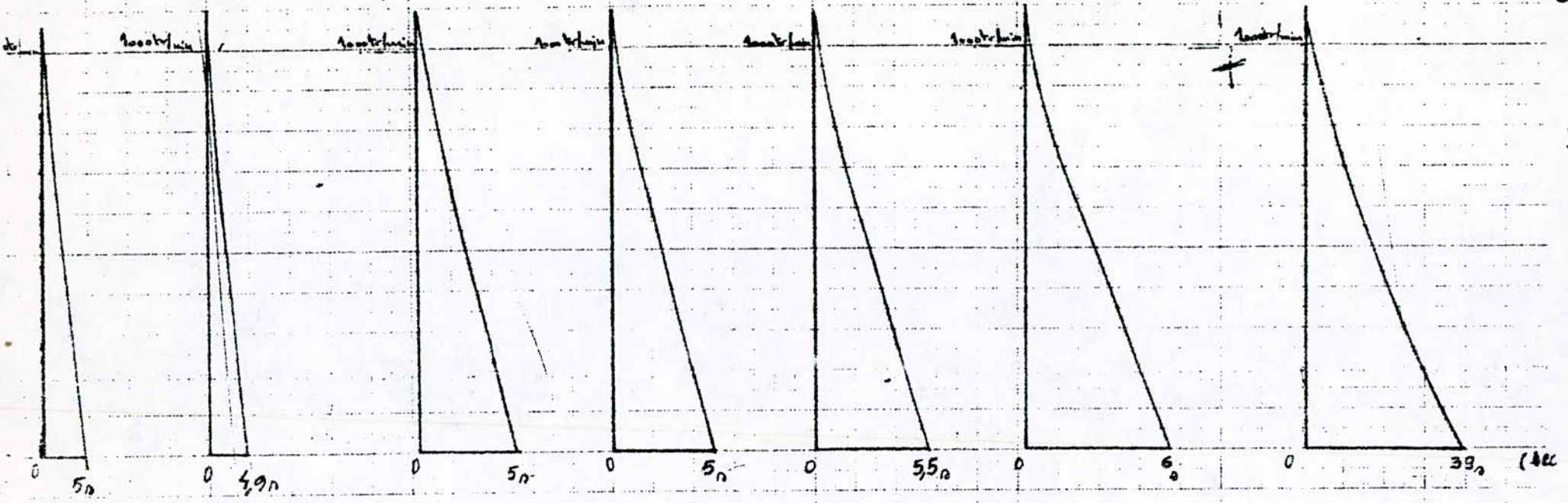


Fig (4-5)

1000 tr/min

120

0

3,4s

3A

0

3,4s

-70A

Récupération.

Moteur à excitation séparée

MAS: 6ch.

$$U_{G_1} = 0,1V$$

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

$$I_M = 0,8A$$

$$I_M = 3A$$

$$I_{G_1} = 0,8A.$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = 280A/s.$$

fig (5-1)

Recuperation.

Motor shunt.

MAS : Gch.

$$U_{G_1} = 83V$$

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

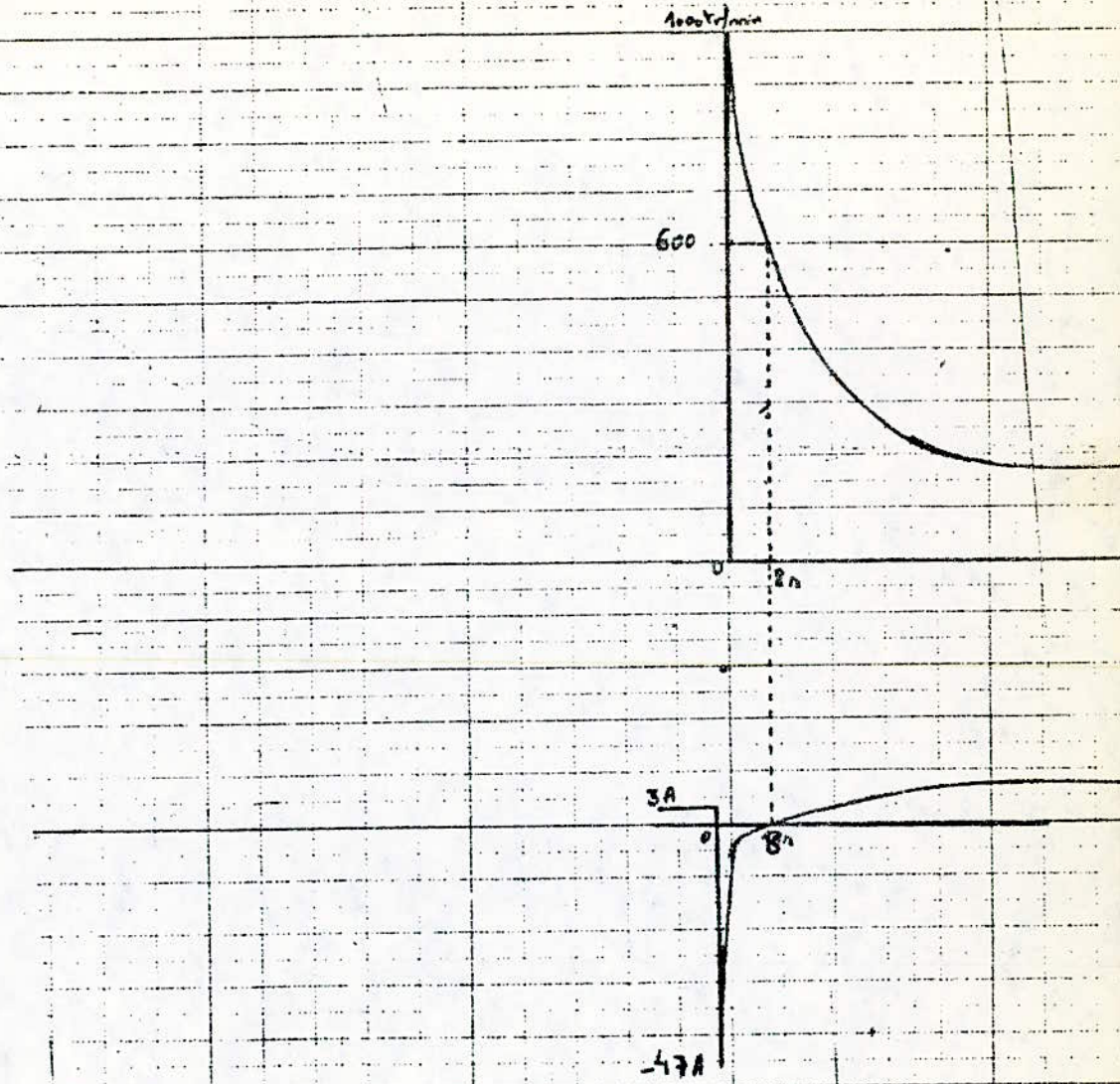
$$I_{G_1} = 0,65A$$

$$I_M = 3A$$

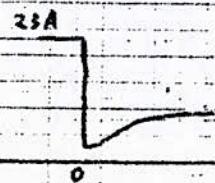
$$I_M = 0,65A$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = 94A/s$$

fig(5-2)



fig(5-3)



x

Récupération

Moteur série.

MAS: 6 ch.

$U_{G_1} = 78 \text{ V}$

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

$\gamma_{G_1} = 0,78 \text{ A}$

$I_M = 23 \text{ A}$

$I_{G_2} = 15 \text{ A}$

$\gamma_{G_2} = 0,15 \text{ A}$

in direct & slip



Réparation.  
Moteur Compound additif.

MAS: 6 ch.

$$U_G = 90V$$

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

$$I_{G_1} = 0,75A$$

$$I_M = 3,5A$$

$$I_M = 0,65A$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = 105A/s$$

fig (5-4)

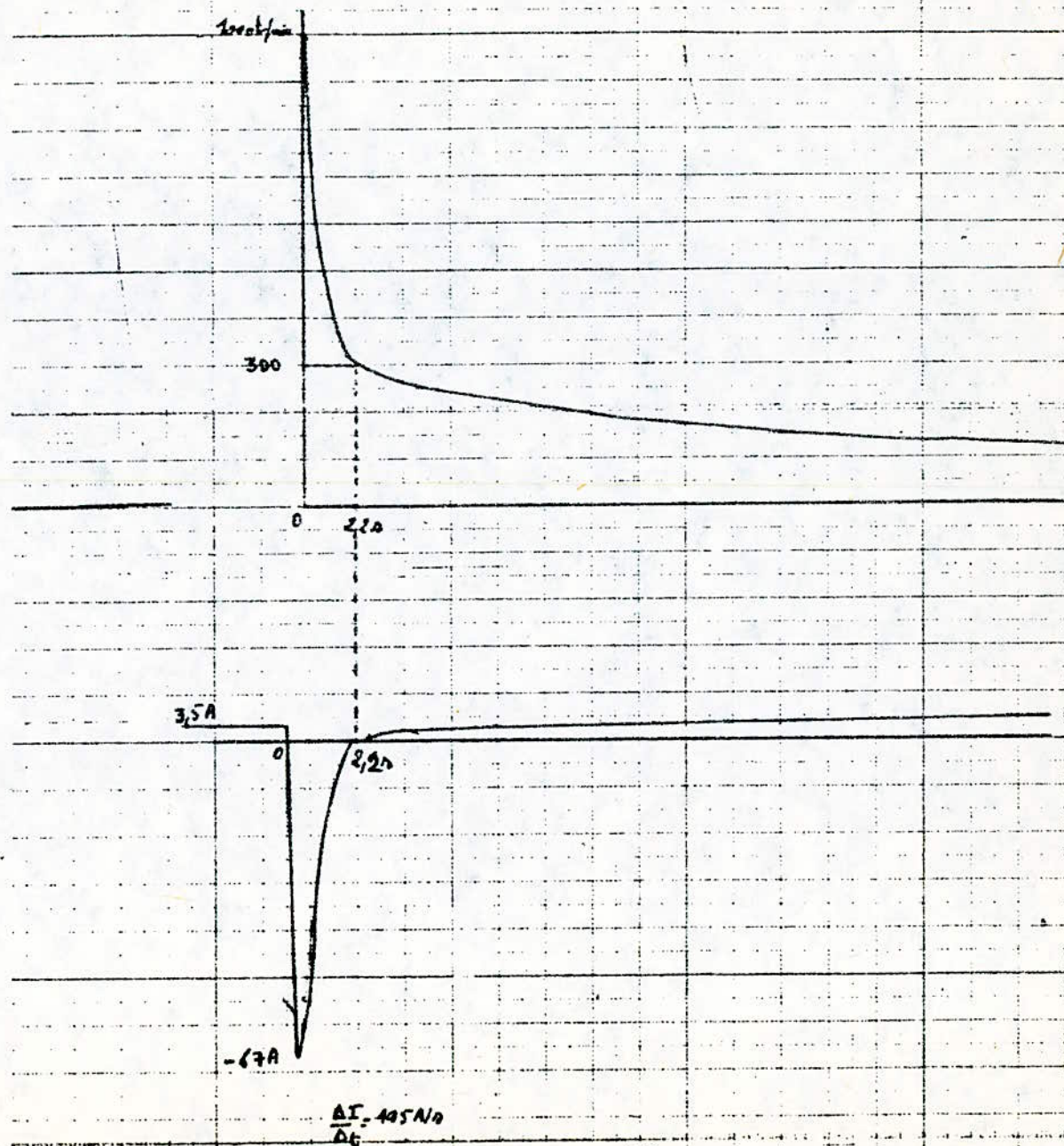
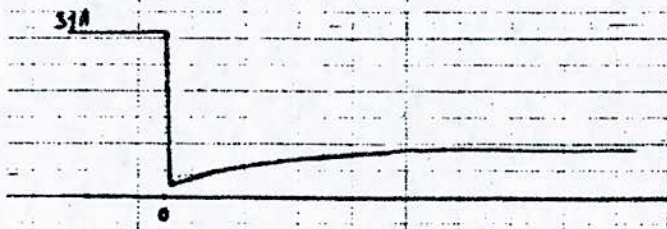
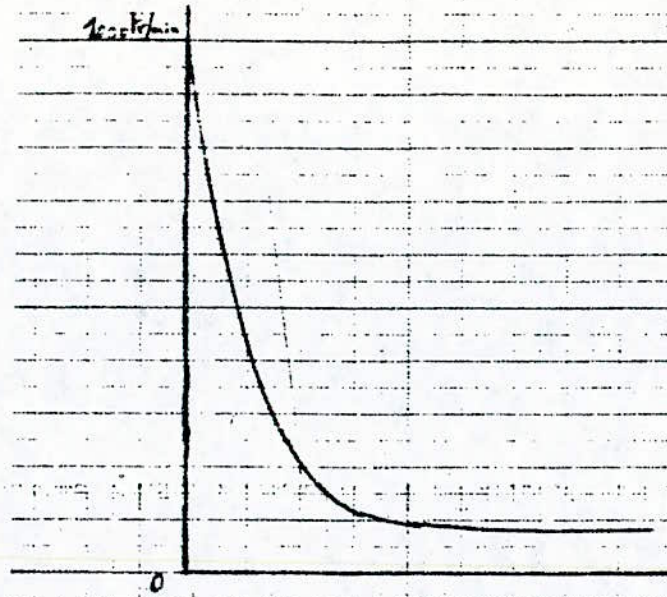


Fig (5-5)



Recuperation  
MAS: 6cl

Compu de control

$$U_c = 58V$$

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

$$I_n = 31A$$

$$s_n = 0,33A$$

$$U_b = 35V$$

$$I_{c1} = 11A$$

$$s_{c1} = 0,6A$$

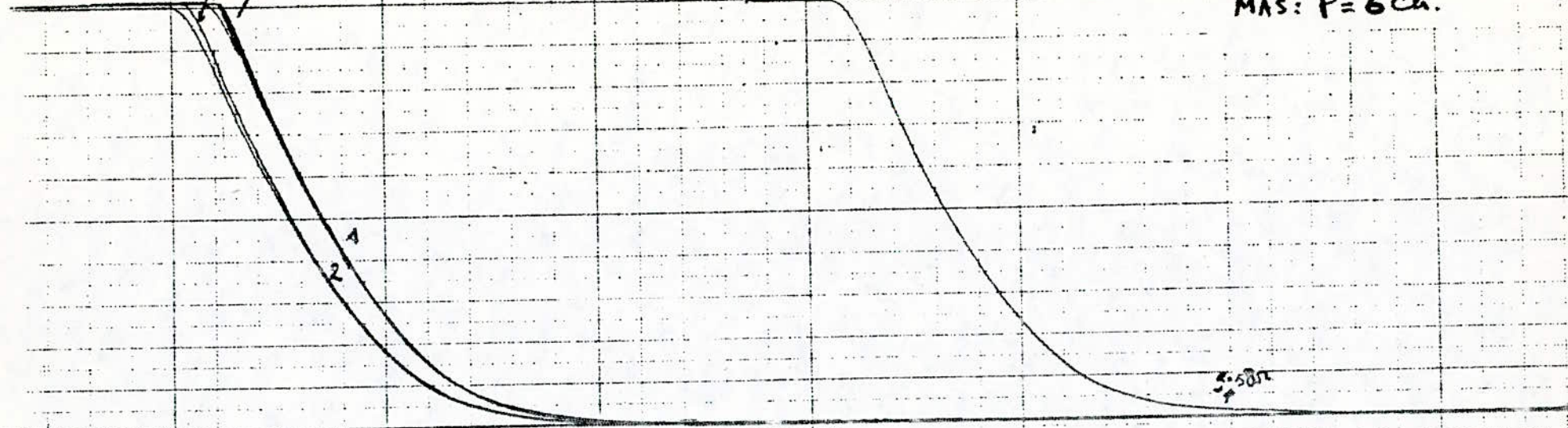
$$I_{c2} = 0,06A$$

gain méthode de  
 freinage par  
 récupération  
 MAS: P = 6ch.

0 tr/min

5.2002

1000 tr/min



CONDITION	
X	
IV cm	
POSITION 0	
DECALAGE	
MESURE	
SEC cm	
y f	

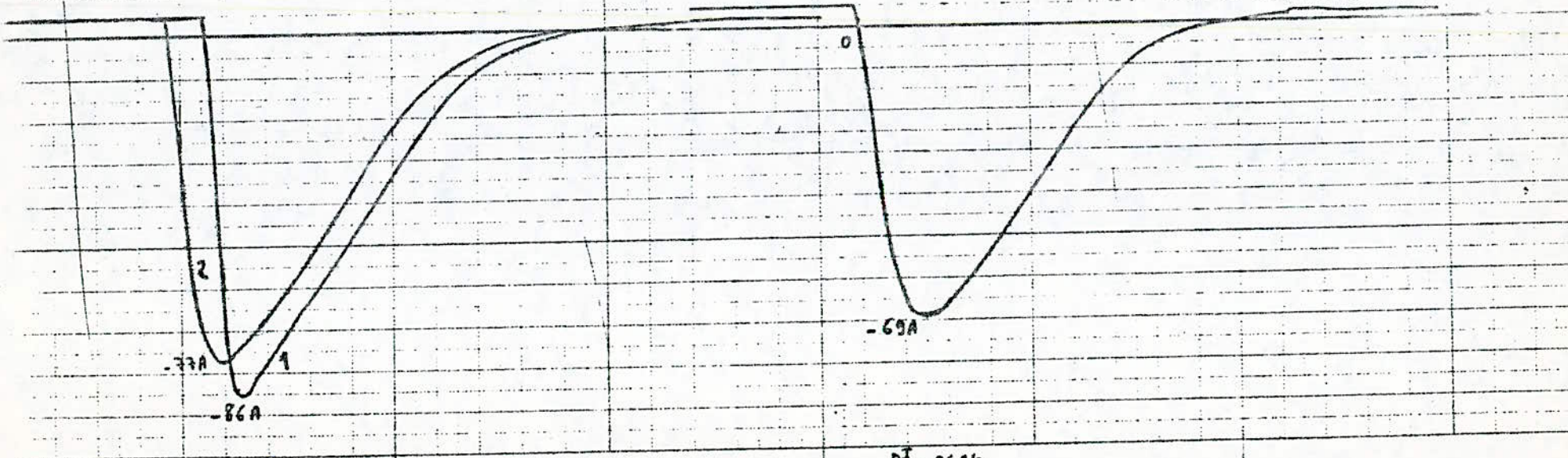
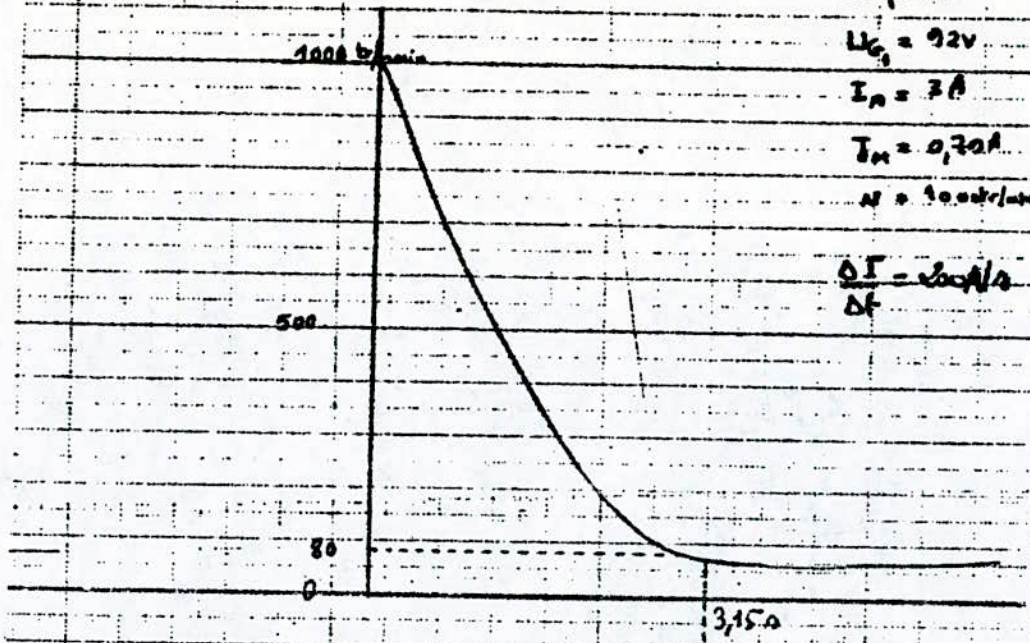


fig 5-1

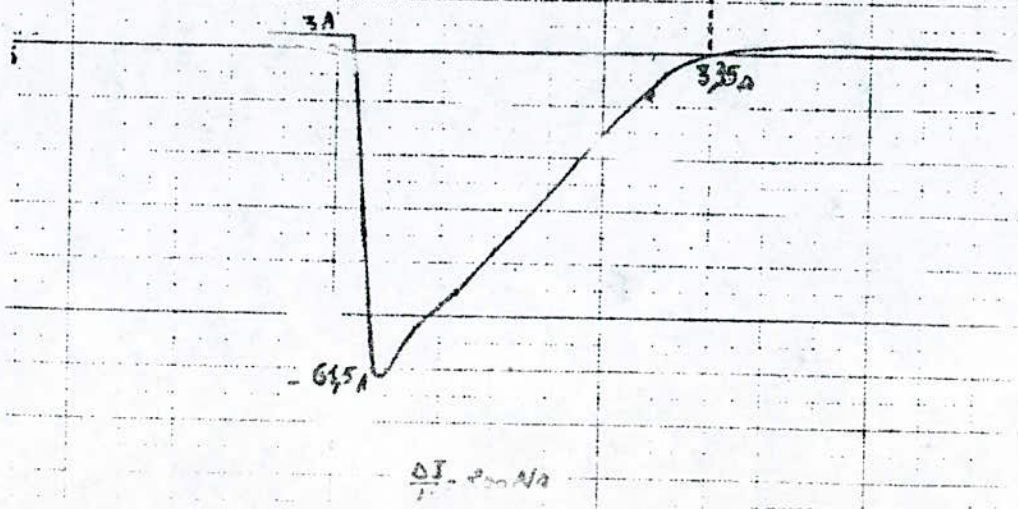
1 ->  $\frac{dI}{dt} = 215 A/s$  , 2 ->  $\frac{dI}{dt} = 128 A/s$

$\frac{dI}{dt} = 96 A/s$

MAS: 2ch  
 Recuperação  
 500 p.p.s  
 $U_G = 92V$   
 $I_A = 3A$   
 $I_M = 0,70A$   
 $N = 1000r/min$

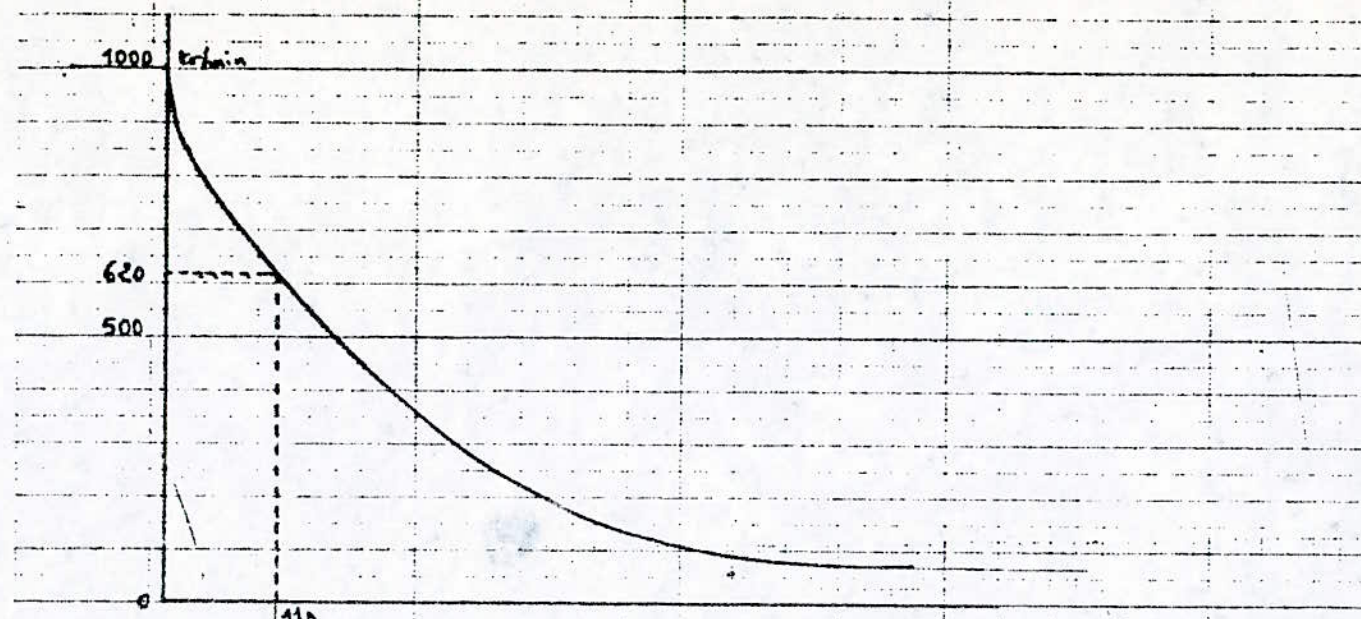


$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = 200 A/s$$



$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = 200 A/s$$

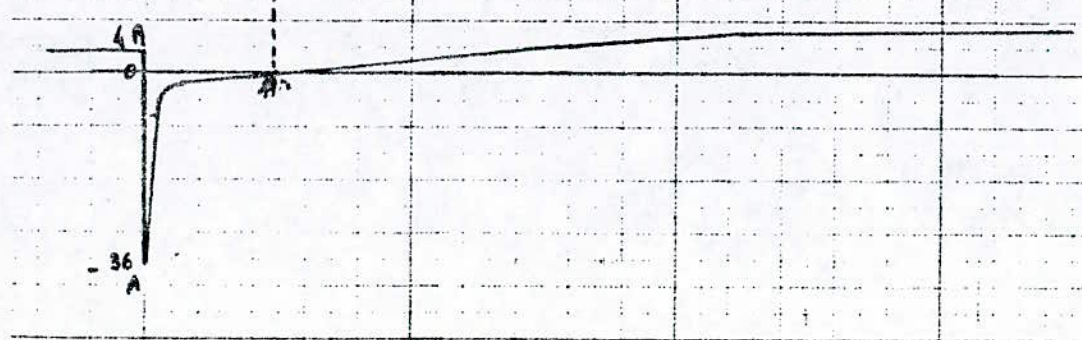
OPERATEUR: **Mateur**  
**shunt**  
**MAS: 2ch.**



CONDITIONS DE LA	
	V
RV (s)	
POSITION (s)	
DELAI (s)	
MESURE	A. E. - - - - -
SEC	<input checked="" type="checkbox"/>

$I_{00} = 10A/cm$

$U_G = 64V$   
 $N = 1000tr/min$   
 $J_M = 0,39A$   
 $J_{G_1} = 0,32A$   
 $I_M = 4A$



$\frac{\Delta I}{R} = 24V/0$

détermination  
Moteur série

MTs: 2ch

$U_G = 50V$

$n = 1000 \text{ tr/min}$

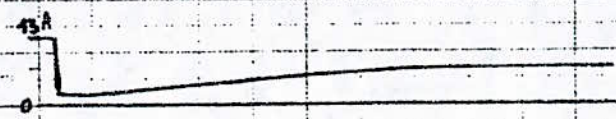
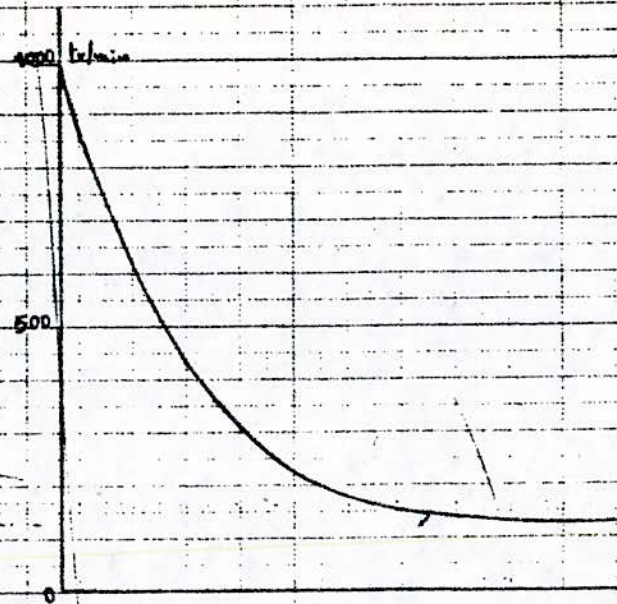
$J_M = 0$

$I_M = 13A$

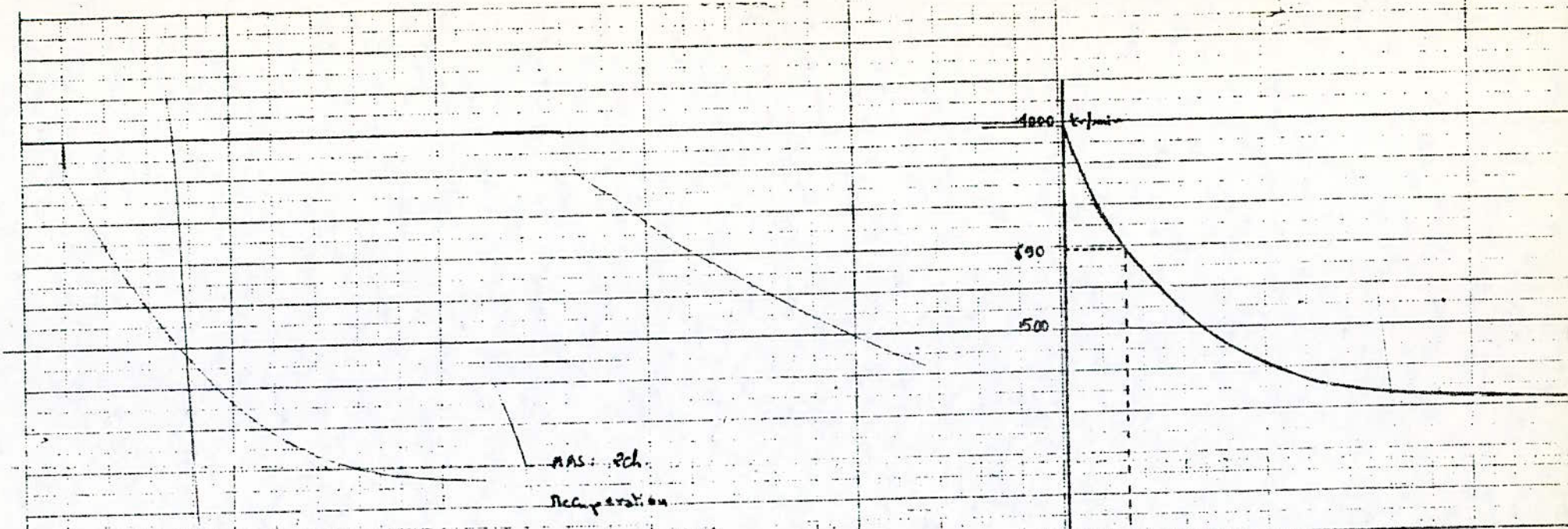
$I_G = 5A$

$J_G = 0,49A$

CONDITIONS DE TRAVAIL	
POSITION	X
POSITION C	
DECLAGE	
MESURE	A B C
SECURITE	<input checked="" type="checkbox"/>



$\frac{dI}{dt} = 0$



MAS: Pch.  
 Recuperation  
 Compound additf.  
 $U_G = 97V$   
 $N = 1000 \text{ r/min}$   
 $I_M = 8,5A$   
 $I_M = 8,2A$   
 $I_{G1} = 1,5A$   
 $I_{G2} = 8A$

400 k/min

600

500

0

3h



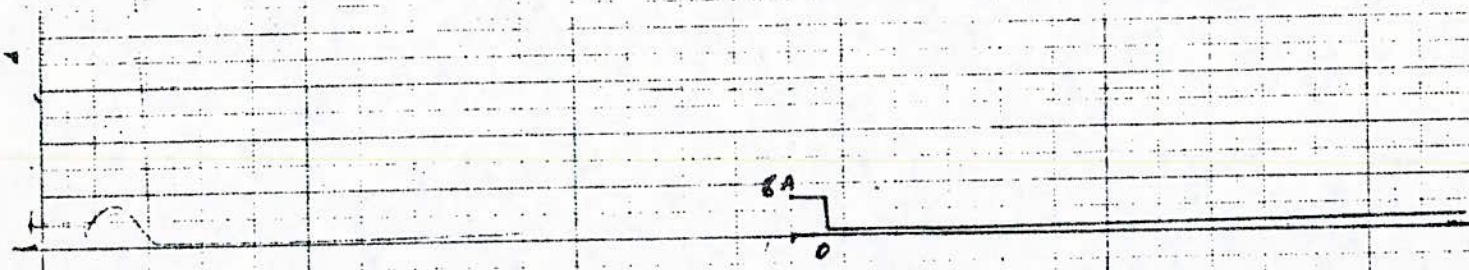
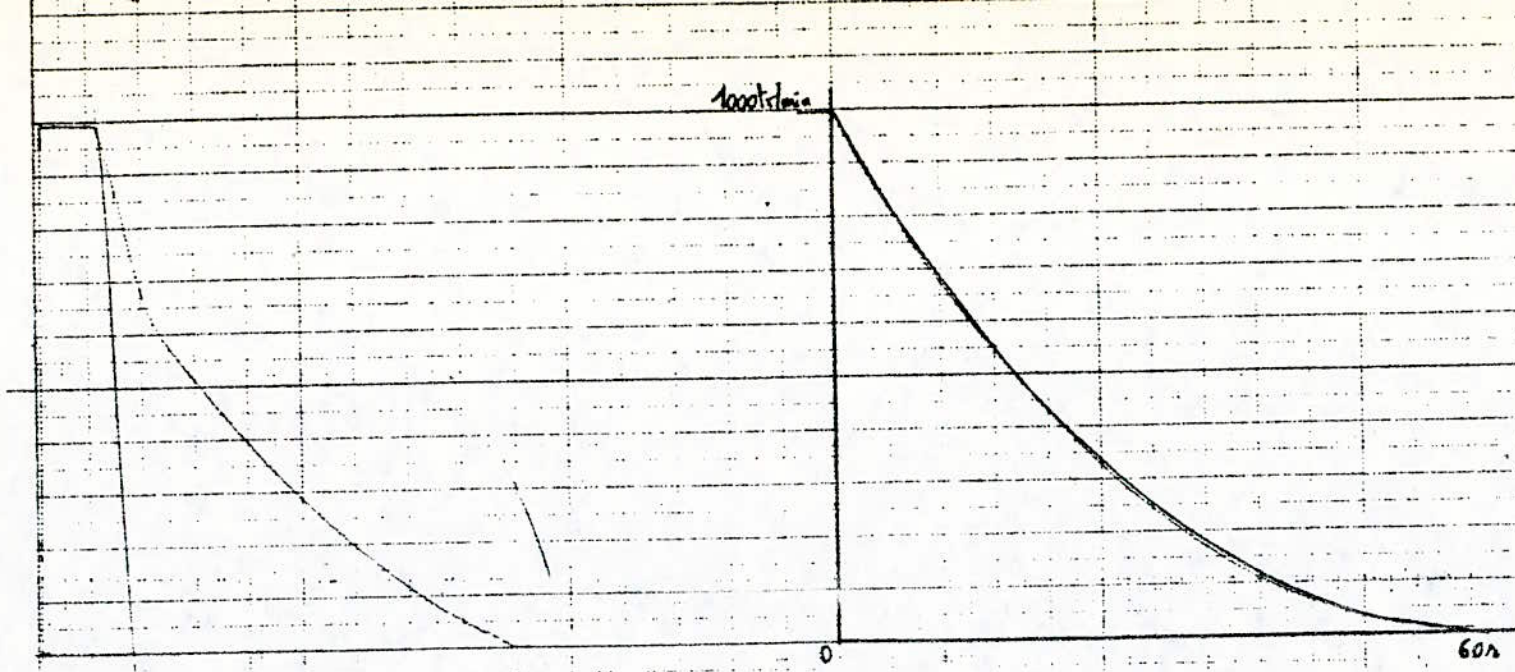
-26A

3/0

$\frac{\Delta I}{\Delta t} = 430 \text{ A/s}$

recuperation  
Moteur Compound  
sans tractif.

$U_G = 30V$   
 $N = 1000 \text{ tr/min}$   
 $I_M = 0,57 A$   
 $I_G = 0,16 A$   
 $I_M = 8 A$





Récupération  
Moteur à excitation séparée

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

$$U_G = 95 \text{ V}$$

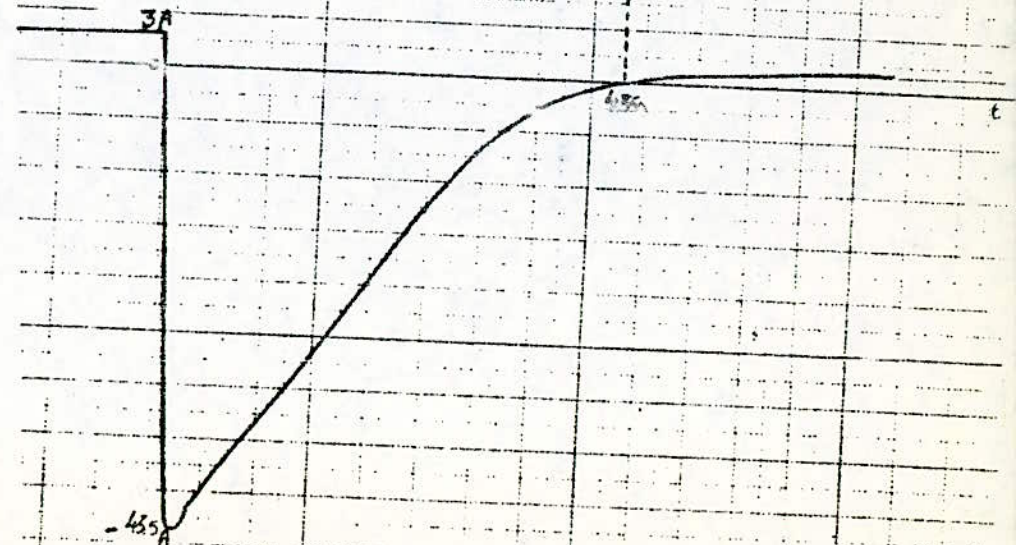
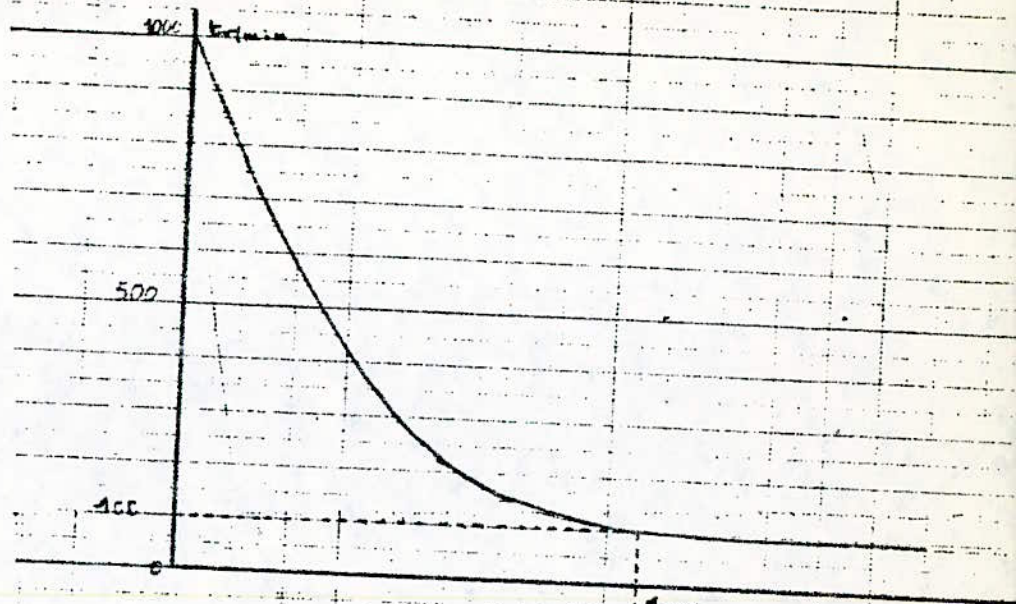
$$I_M = 0,82 \text{ A}$$

$$I_G = 2,95 \text{ A}$$

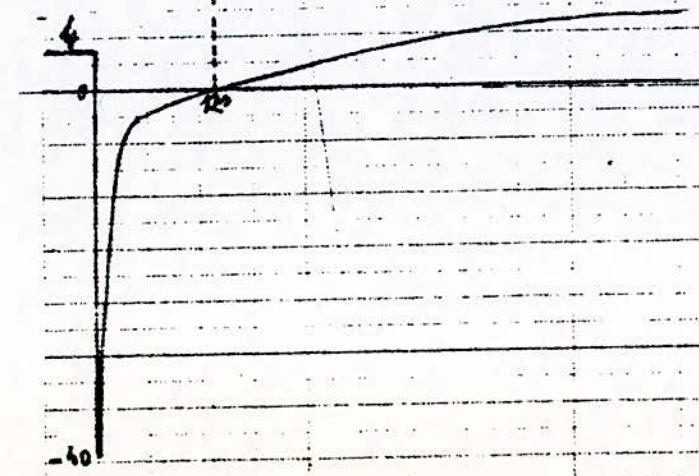
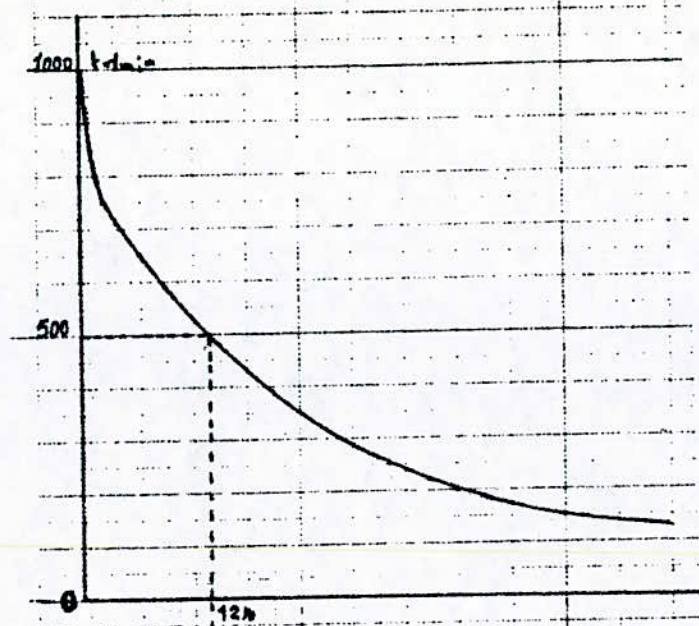
$$I_A = 3 \text{ A}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = 174 \text{ A/s}$$

MAS: 5ch.



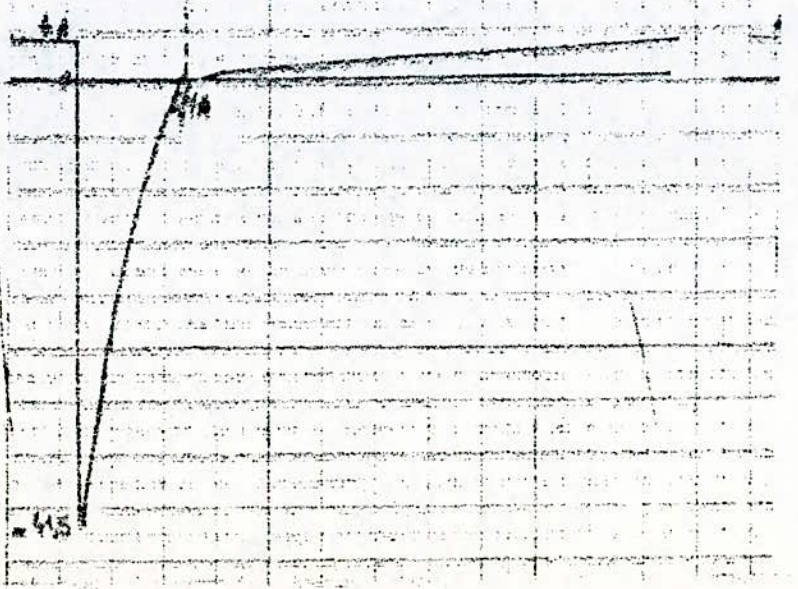
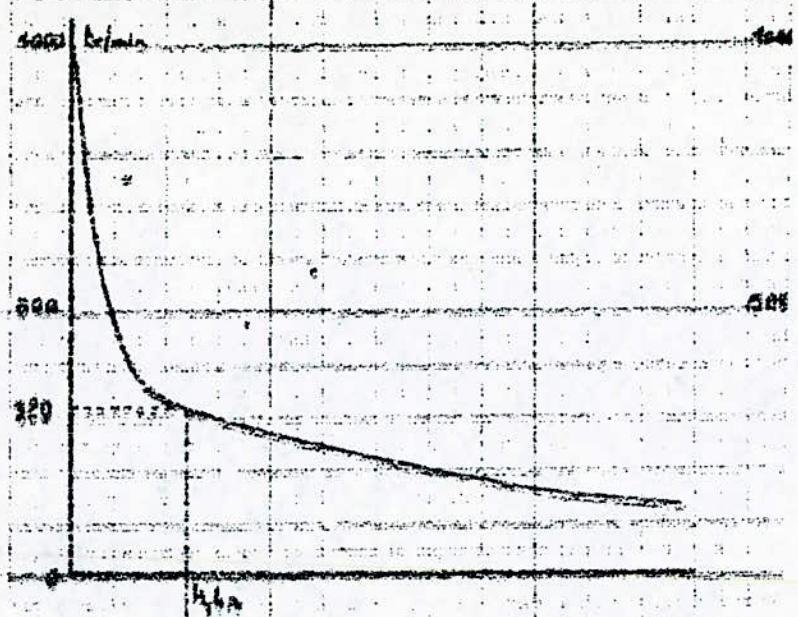
$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = 174 \text{ A/s}$$



$\Delta I = 400 \text{ A/s}$

réarmement  
Moteur shunt.  
MAS: 5ch.

$U_{G_1} = 82 \text{ V}$   
 $N = 1000 \text{ tr/min}$   
 $I_M = 4 \text{ A}$   
 $\delta_M = 0,6 \text{ A}$   
 $\delta_{G_1} = 0,83 \text{ A}$   
 $\frac{\Delta I}{\Delta t} = 400 \text{ A/s}$



Résumé:

Motors compound additif.

MAS: sch.

$U_E = 92V$

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

$I_A = 48$

$I_M = 0,7 A$

$\frac{dI}{dt} = 207 A/s$

Régulation

Moteur Compound soustractif.

MAS: 5 ch.

$U_c = 220V$

$J_M = 0,16A$

$I_M = 14A$

$N = 1500 \text{ tr/min}$

