

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : ELECTROTECHNIQUE

BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE DE L'ALIMENTATION
D'UN MO TEUR A COURANT CONTINU
PAR L'INTERMEDIAIRE D'UN HACHEUR

Proposé Par :
M. K. MOUMEN

Etudié par :
SAYAT BELKACEM
REZZAG DINE

Dirigé par :
M M M. MAHMOUDI
K. MOUMEN

PROMOTION : JANVIER 87



DEDICACES

Je dédie cette mémoire à :

- la mémoire de mon père
- ma mère
- mes frères et ma soeur
- toute la famille
- tous mes amis .

Belkacem . S

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie cette mémoire à

- ma famille
- tous mes amis .

REZZAG Dine

REMERCIEMENTS

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Nous exprimons nos vifs remerciements et notre sincère reconnaissance à nos promoteurs Monsieur MOUMEN et Monsieur MAHMOUDI pour l'aide et pour les conseils précieux qu'ils nous ont apportés durant tout le semestre.

Nous remercions aussi tout ceux qui nous ont aidés de près ou de loin dans notre projet , ainsi que tous les enseignants qui ont contribues à notre formation.

TABLE DE MATIERES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 المكتبة — BIBLIOTHEQUE
 Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION		1.
CHAPITRE 1	REDRESSEMENT ET FILTRAGE	
1 -	Introduction	2.
1-2	Description du montage	3
1-3	Filtrage	4
CHAPITRE 2	ETUDE THEORIQUE DU HACHEUR <i>Série</i>	
2-1	Utilisation	7
2-2	Principe de fonctionnement cas d'une charge R	7
2-3	Calcul des phénomènes d'enclenchement et de déclenchement du hacheur	8
2-4	Variation de la tension continue	12
2-5	Alimentation d'une charge R, L	15
2-6	Cas d'une charge R, L, E'	18
CHAPITRE 3	ASSOCIATION HACHEUR -MOTEUR	
3-1	introduction	21
3-2	Modèle de l'association hacheur-moteur	22
3-3	Les hypothèses de travail	22
3-4	Les spécification du moteur	23
3-5	Méthode d'établissement du courant et de la vitesse du moteur.....	24
3-6	Régime de démarrage	28
3-7	Régime permanent	33

CHAPITRE 4 VERIFICATION EXPERIMENTALE

4-1 Essais sur charge R,L	45
4-2 Essais sur moteur	49
CONCLUSION.....	64
ANNEXES	66

INTRODUCTION

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Dans divers domaines de l'industrie et du transport, il est besoin d'utiliser des systèmes (dynamiques) à vitesse continuellement variable et doués de souplesse (de commande) et de précision.

A l'heure actuelle les moteurs les plus utilisés et qui remplissent largement les conditions citées sont les moteurs à courant continu.

Les principes de la commande électronique de ces moteurs sont connus depuis longtemps . Les domaines d'utilisation se sont encore plus élargis grâce à la mise au point de " semi-conducteurs " (transistors; thyristors) présentant des caractéristiques de fonctionnement et de commande de plus en plus intéressantes (rapidité; rendement;.....).

L'alimentation en tension d'induit variable, peut se faire par l'intermédiaire de plusieurs dispositifs d'électronique de puissance.

Le choix de tel ou tel dispositif se fait sur la base

- de données de fonctionnement de système " alimentation-moteur - charge "
- du prix de revient
- de la rapidité de la commande
- de la simplicité de cette dernière ; etc

Un des dispositifs permettant l'alimentation en tension

variable est le hacheur.

Celui-ci se distingue par rapport à d'autres convertisseurs (ponts redresseurs commandables) par

- son faible coût
- la simplicité de sa commande
- la mise à jour de la valeur de la tension moyenne délivrée, mise à jour qui peut être très rapide (fréquence de hachage donc constante de temps " électronique " faible).

C'est ce dispositif qui est retenu par l'objet de notre étude.

L'aspect haché de la tension d'alimentation introduit des phénomènes (ondulations courants) dont il faut étudier les méthodes de leur limitation et les effets sur le système.

Ce mémoire se décompose en quatre chapitres se présentant de la manière suivante:

-premier chapitre : il étudie brièvement le redressement de la tension et le filtrage, (la tension obtenue servant de source pour le hacheur).

- deuxième chapitre: il est consacré à l'étude théorique du hacheur (série) pour les trois cas suivants :

- 1^{er} cas alimentant une charge R (résistive)
- 2^e cas alimentant une charge R,L (inductive)
- 3^e cas : alimentant une charge R,L,E' (moteur).

- troisième chapitre : il est consacré à l'étude théorique de l'association "hacheur - moteur"
- quatrième chapitre : il complète l'étude théorique par une vérification expérimentale dans le cas d'une charge R,L et dans le cas d'une charge représentée par un groupe "moteur - génératrice".

En annexe nous donnons: - un schéma de circuit d'alimentation stabilisée et

- un schéma du circuit de commande du hacheur avec les signaux délivrés par ses différents étages

CHAPITRE I

I REDRESSEMENT ET FILTRAGE

1.1 INTRODUCTION

Le redressement de la tension alternative en continu est appliquée là où une source continue variable ou fixe est exigée

A partir d'un réseau alternatif nous redressons le système de tensions à l'aide d'un pont à diodes.

Pour faire varier (en moyenne) la tension continue, nous utilisons un hacheur (équivalent à un contacteur électrique statique).

Malgré la variation discontinue de la tension obtenue, les ondulations du courant de charge doivent être de faible amplitude . Pour cela deux paramètres sont à notre disposition :

- 1- une éventuelle self de lissage que nous devons dimensionner
- 2- la fréquence de hachage que nous devons fixer.

Le montage global peut être complété par certains dispositifs

- en amont un transformateur (d'isolation), afin de réduire les effets harmoniques sur le système de tensions du réseau .

- et, en aval, un condensateur, en parallèle avec la charge, pour diminuer les ondulations de la tension à laquelle elle est soumise .

Le montage à utiliser est décrit dans le paragraphe suivant :

1.2 DESCRIPTION DU MONTAGE :

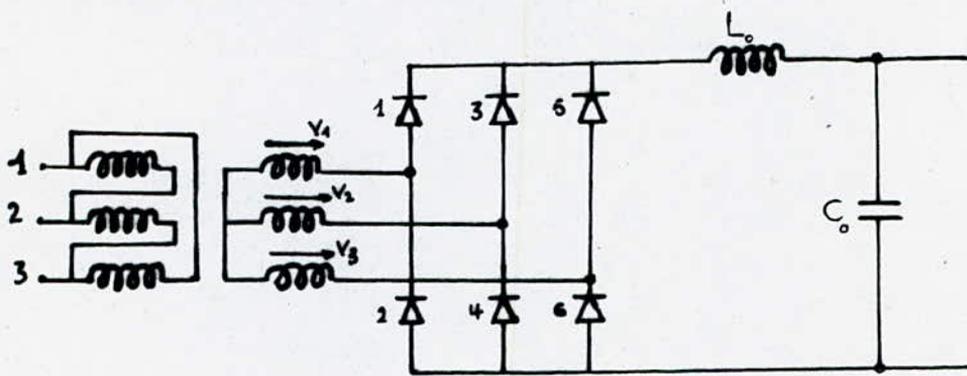
un transformateur triphasé

-Un pont redresseur à diodes, double voie

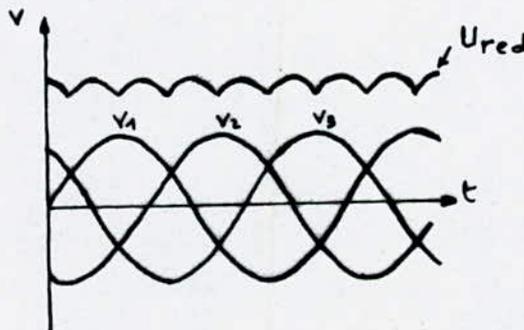
(Le pont double voie permet d'avoir des ondulations de tension plus faibles que celles obtenues avec un pont simple voie) ;

-Et enfin un filtre qui comporte une inductance en série et éventuellement un condensateur en parallèle avec la charge.

Le schéma de principe du dispositif d'alimentation du hacheur est le suivant :



Sans le filtre la tension redressée U_{red} présente les ondulations suivantes.



$$\begin{cases} v_1 = V_m \sin \omega_r t \\ v_2 = V_m \sin(\omega_r t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_3 = V_m \sin(\omega_r t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$

$$(U_{red})_{moy} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m = 1,65 V_m$$

La tension inverse maximale pour chaque diode est:

$$V_{im} = V_m \cdot \sqrt{3}$$

1.3 FILTRAGE

L'introduction du filtre permet de diminuer les ondulations considérées (côté continu).

Le choix de L_0 (ou de L_0 et C_0) se détermine en fonction de la qualité souhaitée de la tension et du courant, et aussi en considérant les temps de commutation du hacheur, temps qui se trouvent allongés par l'introduction de la self (L_0).

Un compromis est donc nécessaire.

CHAPITRE II

II ETUDE THEORIQUE DU HACHEUR SÉRIE

Le hacheur est un interrupteur électronique, placé entre la source de tension continue et la charge, qui permet de délivrer une tension réglable en valeur moyenne. Aux bornes du récepteur la tension de sortie varie selon les trois procédés fondamentaux suivants.

- durée de conduction t_c variable, fréquence fixe
- durée de conduction fixe, fréquence variable
- durée de conduction et fréquence variables

2-1 UTILISATION

Le hacheur est très utilisé dans le domaine de la traction électrique à courant continu. Comme exemples on peut citer les engins de traction pour chemin de fer, les trams, les trolleybus et les véhicules à batterie.

2-2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Pour l'étude du principe de fonctionnement nous faisons appel au schéma de montage de la figure (II.1)

A la mise sous tension du hacheur, le condensateur se charge à la polarité indiquée sur la figure (II.1). Une impulsion d'allumage arrive à la gâchette du thyristor principal et le rend conducteur; le hacheur se trouve alors enclenché. Pour le déclencher on amorce le thyristor auxiliaire. Le condensateur se recharge alors à la polarité inverse. Quand la diode conduit

le condensateur se décharge partiellement à travers le thyristor Th1 et provoque le blocage de ce dernier. La recharge de ce condensateur se fait ensuite à travers la charge jusqu'à atteindre la polarité initiale. Le hacheur se trouve ainsi déclenché.

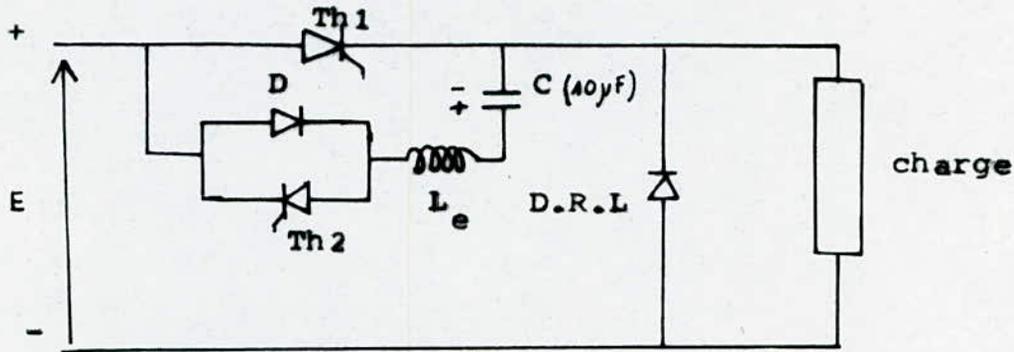


Figure (X.1)

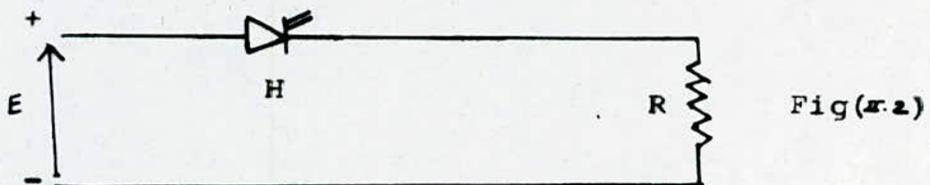
Sk100

Th1 est le thyristor principal $\left\{ \begin{array}{l} I_d = 100 \text{ (A)} , V_{iTh} = 1200 \text{ V} , \\ I_{mn} = 100 \text{ mA} , I_G = 170 \text{ mA} , \\ V_G = 3 \text{ V} . \end{array} \right.$
 Th2 " " " auxillaire
 D et D.R.L sont des diodes ($V_i = 1200 \text{ V} ; I_d = 45 \text{ A}$)

2-3 CALCUL DES PHENOMENES D'ENCLENCHEMENT ET DE DECLENCHEMENT DU HACHEUR .

Cas d'une charge résistive.

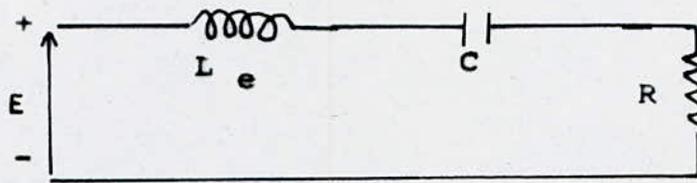
Le schéma symbolique pour u_s tel montage est donné à u_a figure(X.2)



Fig(X.2)

3.1 Charge initiale du condensateur d'extinction

le schéma équivalent est donné par la figure(X.3)



Fig(II.3)

A la mise sous tension du hacheur, le condensateur se charge à travers R. La tension $U_c(t)$ aux bornes de ce condensateur est déterminée à partir des équations différentielles suivantes

$$E = R i_c + L_e \frac{d i_c}{dt} + U_c \quad (1)$$

$$i_c = C \frac{d U_c}{dt}$$

avec les conditions initiales:

$$U_c(0) = 0 \quad ; \quad i_c(0) = 0$$

$$\text{posons } \omega_0^2 = \frac{1}{L_e C} \quad \text{et} \quad 2a = \frac{R}{L}$$

L'équation (1) peut se mettre alors sous la forme:

$$\frac{d^2 U_c}{dt^2} + 2a \frac{d U_c}{dt} + \omega_0^2 U_c = \omega_0^2 E$$

La variation de $U_c(t)$ est alors donnée par:

$$U_c(t) = E \left[1 - \frac{e^{-at}}{\cos \varphi} \cos(\omega t + \varphi) \right] \quad (*)$$

$$\text{avec } \varphi = -\arctg \frac{a}{\omega} \quad \text{et} \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - a^2}$$

La solution (*) est valable tant que: $\frac{d U_c}{dt} > 0$

Quand cette dérivée s'annule, $U_c(t)$ devient constante

(: le condensateur ne pouvant se décharger à cause de la diode).

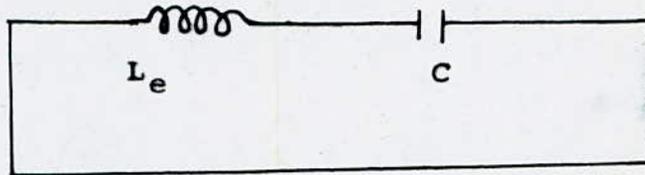
2.3.2 Enclenchement du contacteur statique:

Une impulsion envoyée sur la gâchette du thyristor principal amorce ce dernier. Le hacheur est alors enclenché. La tension aux bornes de la charge est E.

2-3-3 Déclenchement du contacteur statique

Au temps $t'=0$ (changement de variable), une impulsion ^{est} envoyée à la gâchette du thyristor auxiliaire Th2. Le thyristor Th1 se désamorce.

Le thyristor Th2 étant conducteur, le circuit équivalent est donné par la figure (2.4)



Fig(2.4)

La tension $U_c(t)$ se détermine à partir de l'équation différentielle suivante.

$$U_c = -L_e \frac{di_c}{dt} = C \int_0^{t'} i_c d\tau'$$

$$d'où : U_c + L_e C \frac{d^2 U_c}{dt'^2} = 0$$

$$U_c(0) = U_{c0} \quad i_c(0) = 0$$

La solution d'une telle équation est donnée par:

$$U_c(t') = U_{c0} \cos \omega_0 t' \quad \text{avec} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_e C}}$$

La tension U_c étant inversée, la diode sera polarisée en direct, elle conduit et le condensateur se décharge partiellement à travers le thyristor Th1 et provoque le blocage de ce dernier. La tension aux bornes de la charge est de: $U = E + U_{c0}$.

au moment du blocage du thyristor Th1

Après l'intervalle du temps de commutation, la tension aux bornes de la charge est égale à zéro comme l'indique la figure (2.5)

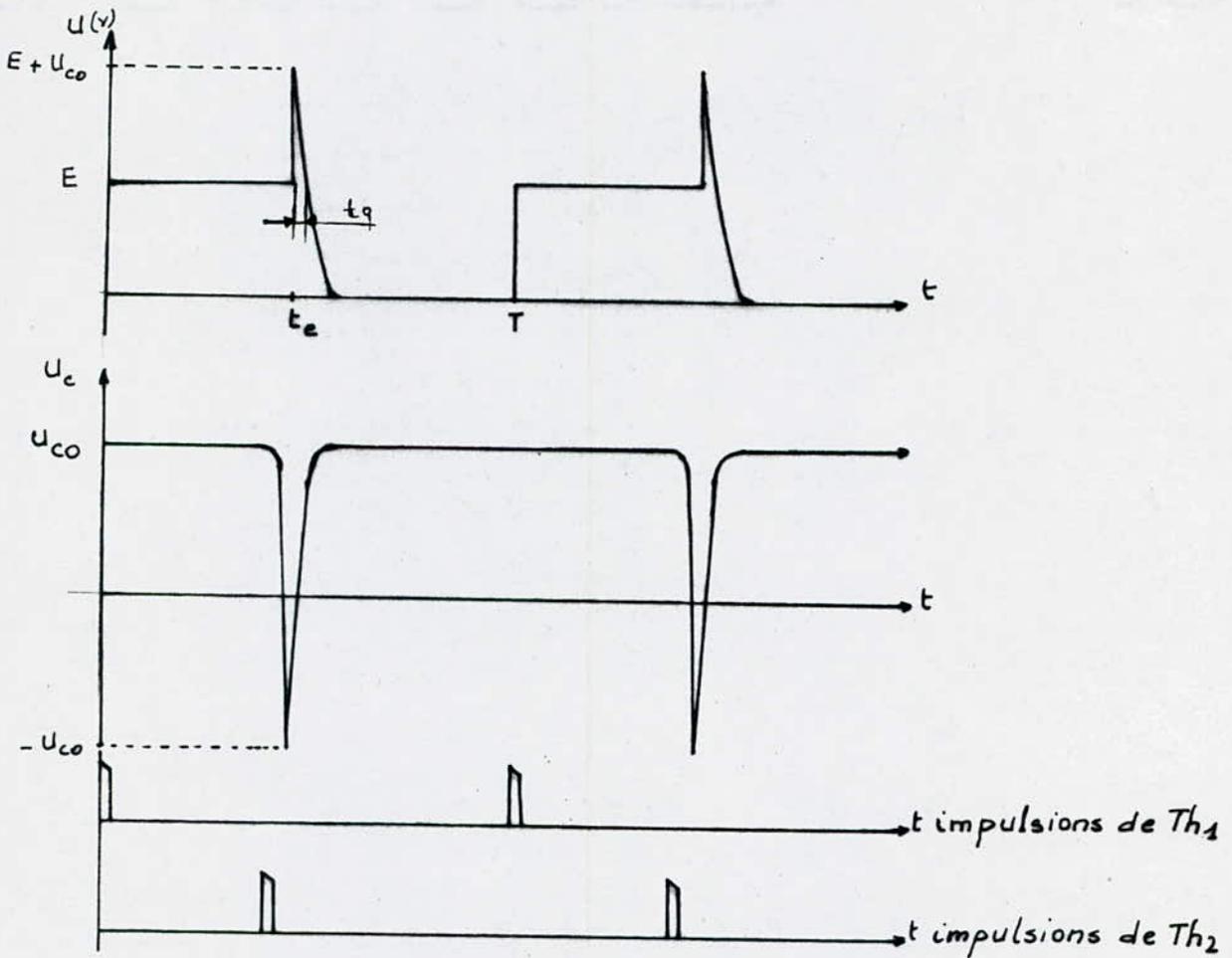
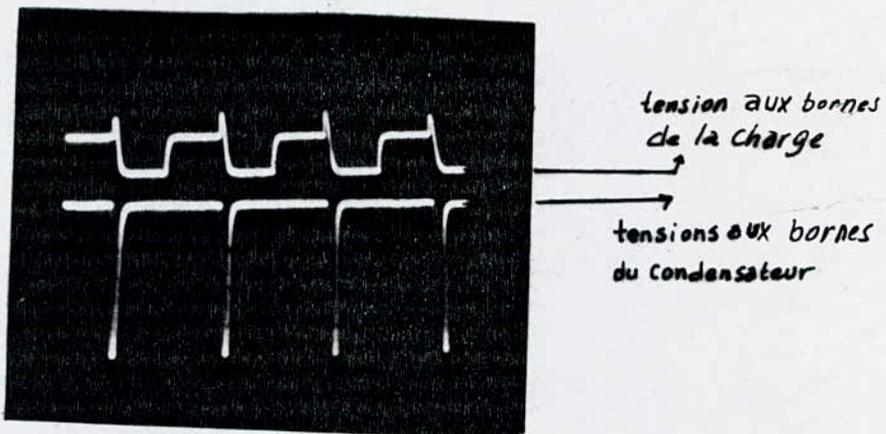


Figure (II.5)



Allures des tensions U et U_c obtenues expérimentalement. (Les échelles sont différentes)

D'après la loi d'Ohm :

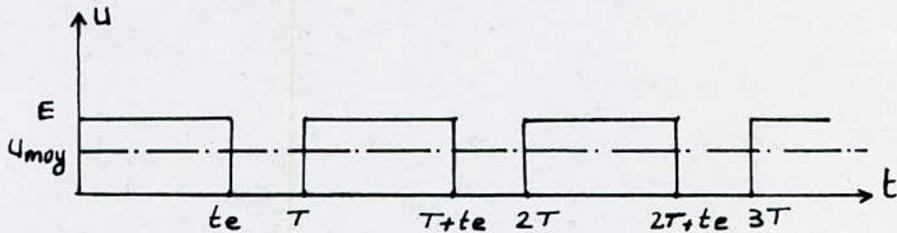
$$U = Ri$$

quand on néglige le pic de tension, c'est à dire quand on fait abstraction des intervalles de commutation,

$U = E$, pendant la durée de fermeture du contacteur statique $0 \leq t \leq t_e$

$U = 0$ " " " d'ouverture " " " " $t_e \leq t \leq T$

La tension aux bornes de la charge peut être assimilée à des créneaux



La valeur moyenne de la tension est :

$$U_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T U dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_e} E dt = E \frac{t_e}{T}$$

$$U_{moy} = E \cdot \frac{t_e}{T}$$

$\frac{t_e}{T} = \alpha$ est appelé rapport cyclique du hacheur ;

donc $U = \alpha \cdot E$

2.4 VARIATION DE LA TENSION CONTINUE

A tension d'alimentation E du contacteur statique constante, la valeur moyenne de la tension continue (U_{moy}) dépend du temps de fermeture t_e du contacteur statique et de la période T de hachage .

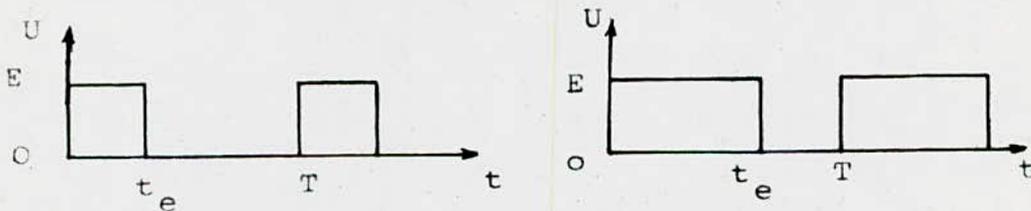
$$U_{moy} = \frac{t_e}{T} \cdot E \quad (\text{dans le cas idéal ; sans durée de commutation})$$

Pour faire varier la tension moyenne, il faut modifier les valeurs de t_e ou/et T . Nous avons trois procédés.

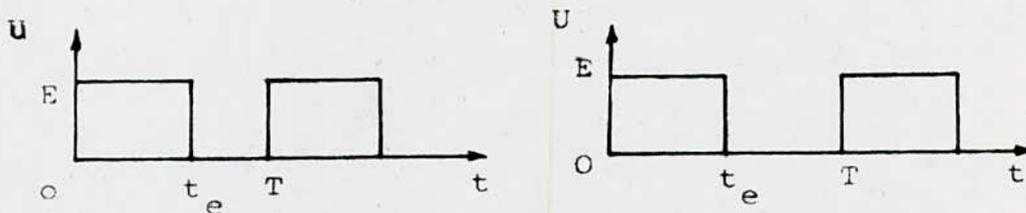
- 1-En agissant sur le temps de fermeture t_e avec une fréquence fixe égale à $\frac{1}{T}$, c'est à dire en faisant varier le rapport cyclique $\frac{t_e}{T} = \alpha$ qui est compris théoriquement entre 0 et 1 figure (a)
- 2-En agissant sur la fréquence ($\frac{1}{T}$) tout en maintenant constant le temps de fermeture t_e (ce qui revient à faire varier le temps d'ouverture t_d), figure (b)
- 3-En agissant sur la fréquence et sur le temps de fermeture figure (c)

Remarque

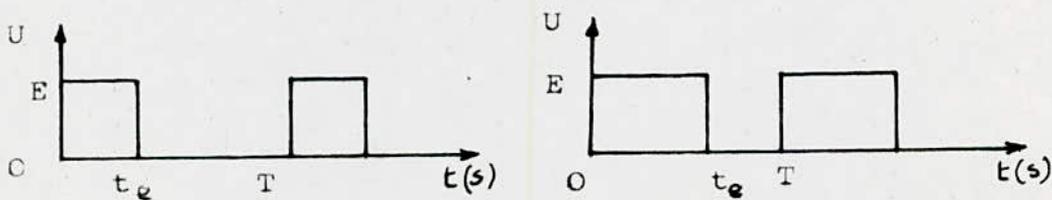
Le rapport $\frac{t_e}{T}$ peut varier entre 0 et 1 théoriquement, mais en réalité il faut tenir compte de la recharge négative puis positive du condensateur du circuit d'extinction, (en d'autres termes des temps de commutations et leurs préparations).



Fig(a). Modulation de largeur d'impulsion.



Fig(b). Modulation de fréquence d'impulsion



Fig(c). Modulation de largeur et fréquence d'impulsion

Tous ces modes de modulation d'impulsion ont une influence sur l'ondulation du courant i . Comme nous le verrons plus loin il est avantageux de travailler à des fréquences éloignées de la fréquence propre du filtre et pas trop élevées pour éviter des pertes dans les semi-conducteurs.

2.4-1 - Influence de la commutation forcée sur la tension moyenne.

La tension instantanée aux bornes de la charge présente une surtension comme l'indique la figure (d). Cette surtension est due au phénomène de la commutation forcée lors de l'ouverture du contacteur statique. Celle-ci provoque une augmentation de la valeur moyenne de la tension U_{moy} car pour un fonctionnement à pulsation qui se reproduit de façon monotone on peut décomposer l'allure de la tension en une composante idéale U_{id} et une composante U_{com} due à la commutation forcée. Cette décomposition est comme suit (figure (d)) :

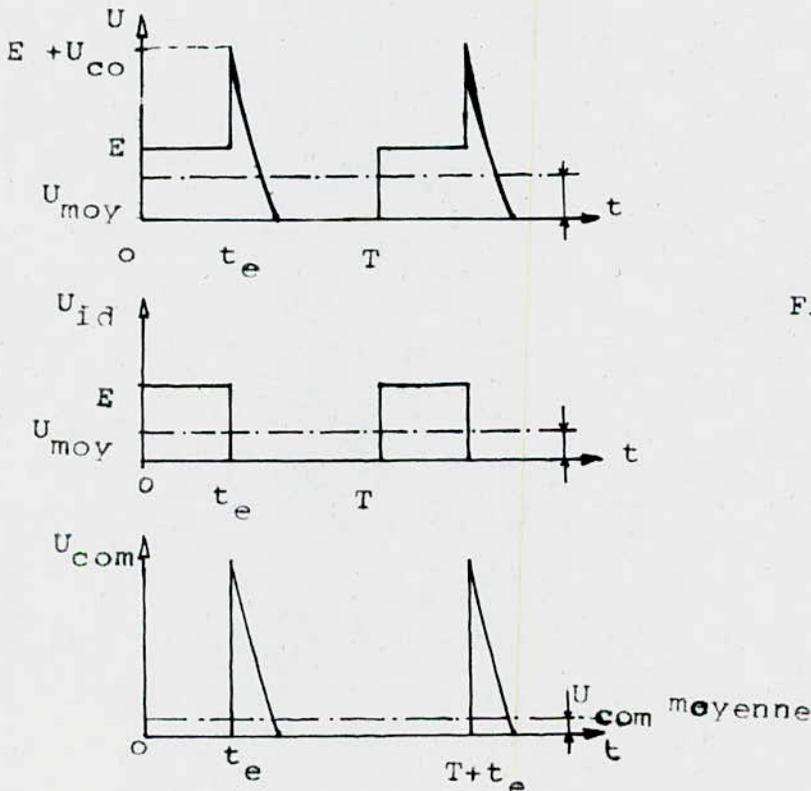


Figure (d)

2-5 ALIMENTATION D'UNE CHARGE INDUCTIVE

(passive R,L ou active R,L,E')

De par son inductance L, une charge inductive parcourue par un courant i , accumule une énergie $W = \frac{1}{2} Li^2$. La coupure brusque de ce courant (ouverture du contacteur statique) induit une surtension (due à la loi $U_L = -L \frac{di}{dt}$) pouvant entraîner de graves dommages à la charge.

Pour éviter cet inconvénient on utilise une diode dite "de roue libre". Cette dernière se place en parallèle avec la charge. Elle entre en action au moment de l'ouverture du contacteur statique et permet la continuité de la variation du courant, circulant grâce à l'énergie accumulée ($\frac{1}{2} Li^2$).

On obtient ainsi un courant continu évoluant entre deux valeurs limites.

Schéma du montage.

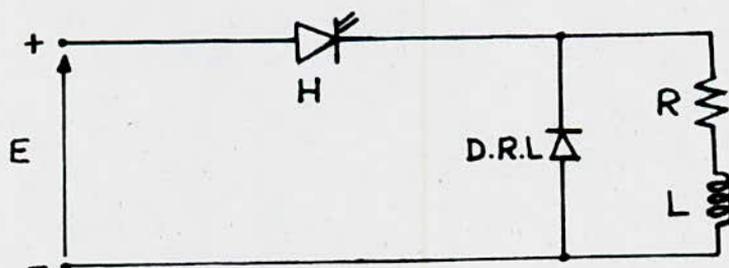


Figure (II-c)

Le principe de fonctionnement est le même que pour une charge purement résistive (avec une légère modification des durées de commutation)

2-5-1 Evolution du courant dans la charge (R, L)

Pour simplification, nous faisons abstraction des intervalles

de commutation . Nous avons alors une tension, aux bornes de la charge , sous forme de créneaux.

a) Équation correspondant à la phase de fermeture du contacteur statique:

nous avons, pour $0 \leq t \leq t_e$

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

La solution de cette équation est donnée par:

$$i(t) = \left(I_m - \frac{E}{R} \right) e^{-t/\tau} + \frac{E}{R}$$

avec $\tau = \frac{L}{R}$ et I_m : valeur initiale (qui correspond à la valeur minimale de i en régime permanent)

b) Équation correspondant à la phase d'ouverture du contacteur statique :

La charge se trouve en court-circuit à travers la diode de roue libre , l'équation régissant la variation du courant est:

$$0 = Ri + L \frac{di}{dt} \quad \left(\text{pour } t_e \leq t \leq T \right)$$

La solution de cette équation est:

$$i = I_M e^{-(t-t_e)/\tau}$$

avec

I_M : valeur maximale de i atteinte lors de la phase de fermeture du contacteur statique.

Remarque:

Les autres périodes identiques à celle précédente, s'obtiennent en faisant $t'' = t, + kT$
avec $k \in \mathbb{N}$ et T la période de hachage.

c) Détermination de I_m et I_M en fonction de E, R, α, T et τ :
Reprenons les expressions du courant dans la charge lors de la fermeture et de l'ouverture du contacteur statique.

$$\text{Fermeture : } i = e^{-t/\tau} \left(i_m - \frac{E}{R} \right) + \frac{E}{R} \quad (5.1)$$

$$\text{Ouverture : } i = I_M e^{-(t-\alpha T)/\tau} \quad (5.2)$$

nous avons pour $t = t_e = \alpha T$; $i = I_M$

d'où d'après (5.1) :

$$I_M = e^{-\alpha T/\tau} \left(I_M - \frac{E}{R} \right) + \frac{E}{R} \quad (5.3)$$

pour $t = T$; $i = I_m$, d'où d'après (5.2) :

$$I_m = I_M e^{-(1-\alpha)T/\tau} \quad (5.4)$$

En considérant (5.3) et (5.4) et en éliminant I_m il vient :

$$I_M = e^{-\alpha T/\tau} \left(I_M e^{-(1-\alpha)T/\tau} \frac{E}{R} \right) + \frac{E}{R}$$

d'où :

$$I_M (1 - e^{-T/\tau}) = \frac{E}{R} (1 - e^{-\alpha T/\tau})$$

$$I_M = \frac{E}{R} \frac{1 - e^{-\alpha T/\tau}}{1 - e^{-T/\tau}}$$

En remplaçant dans (5.4) I_m par l'expression ci-dessus il

$$\text{vient : } I_m = \frac{E}{R} \frac{1 - e^{-\alpha T/\tau}}{1 - e^{-T/\tau}} e^{-(1-\alpha)T/\tau}$$

$$\text{soit encore : } I_m = \frac{E}{R} \cdot \frac{e^{-(1-\alpha)T/\tau} - e^{-T/\tau}}{1 - e^{-T/\tau}}$$

Calculons la valeur moyenne du courant.

Nous avons :

$$U = Ri + L \frac{di}{dt}$$

d'où :

$$\frac{1}{T} \int_0^T U dt = \frac{1}{T} \int_0^T Ri dt + \underbrace{\frac{1}{T} \int_0^T L \left(\frac{di}{dt} \right) dt}_{\frac{1}{T} \int_{I_m}^{I_m''} L di = 0}$$

$$\frac{1}{T} \left[\int_0^{\alpha T} E dt + \int_{\alpha T}^T 0 dt \right] = R I_{\text{moy}} + 0$$

$$\frac{1}{T} (E \cdot \alpha T) = R I_{\text{moy}}$$

$$\text{d'où : } I_{\text{moy}} = \alpha \cdot \frac{E}{R} = \frac{U_{\text{moy}}}{R}$$

d) Ondulation du courant:

Nous considérons que la constante $\tau = \frac{L}{R} \gg 1$, ce qui revient à écrire: $\frac{T}{\tau} \ll 1$

et comme $e^\varepsilon = 1 + \varepsilon$ (pour $\varepsilon \ll 1$), il vient:

$$\begin{aligned} \Delta I = I_M - I_m &= \frac{E}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\alpha T/\tau}}{1 - e^{-T/\tau}} \cdot [1 - e^{-(1-\alpha)T/\tau}] \\ &= \frac{E}{R} \cdot \frac{1 - (1 - \alpha T/\tau)}{1 - (1 - T/\tau)} \cdot \left\{ 1 - [1 - (1 - \alpha)T/\tau] \right\} \end{aligned}$$

$$\Delta I = \frac{E}{R} \alpha (1 - \alpha) \frac{T}{\tau}$$

Pour une tension d'alimentation constante, une fréquence de hachage constante et une self de lissage donnée on constate que ΔI est une fonction du deuxième degré de α .

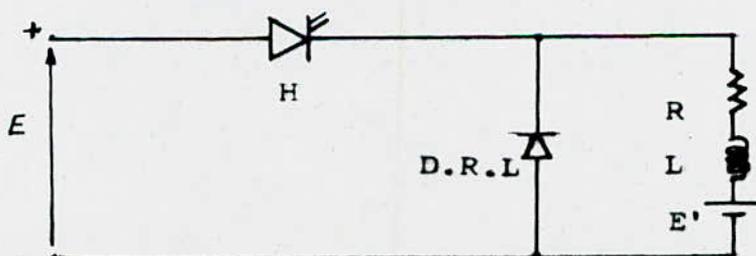
$$\frac{d(\Delta I)}{d\alpha} = \frac{E \cdot T}{L} (1 - 2\alpha) = 0 \quad \text{pour } \alpha = 0,5$$

La dérivée s'annule pour $\alpha = 0,5$, ΔI présente un maxi-

$$\text{mum pour } \alpha = 0,5 ; \Delta I_{\text{MAX}} = \frac{E \cdot T}{4R\tau} = \frac{E \cdot T}{4L}$$

2-6 CAS D'UNE CHARGE R, L, E'

Le schéma du montage est le suivant:



La tension moyenne aux borne de la charge:

Elle se calcule à partir de l'équation différentielle suivante:

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

$$\text{qui peut s'ecrire: } \frac{1}{T} \int_0^T U dt = \frac{R}{T} \int_0^T i dt + \frac{L}{T} \int_0^T di + \frac{1}{T} \int_0^T E' dt$$

ce qui donne

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

Le courant moyen est :

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

2.6-1 Evolution du courant.

a) contacteur statique fermé $0 \leq t \leq t_e$

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

$$i(0) = I_m$$

$$\text{La solution est } i(t) = \left(I_m - \frac{E-E'}{R} \right) e^{-t/\tau} + \frac{E-E'}{R} \quad (6.1)$$

b) contacteur statique ouvert $t_e \leq t \leq T$

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

$$i(t_e) = I_M$$

$$\text{La solution est: } i(t) = \left(I_M - \frac{E'}{R} \right) e^{-(t-\alpha T)/\tau} - \frac{E'}{R} \quad (6.2)$$

Pour déterminer I_m et I_M nous utilisons les expressions (6.1) et (6.2)

Nous avons:

$$I_m = \frac{E}{R} \cdot \frac{e^{-(1-\alpha)T/\tau} - e^{-T/\tau}}{1 - e^{-T/\tau}} - \frac{E'}{R}$$

$$I_M = \frac{E}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\alpha T/\tau}}{1 - e^{-T/\tau}} - \frac{E'}{R}$$

2.6-2 Ondulation du courant

De même que pour le cas de la charge R,L, nous considérons que la constante de temps $\tau = \frac{L}{R} \gg T$

Ce qui revient à écrire : $\frac{T}{\tau} \ll 1$

$$\Delta I = I_M - I_m = \frac{E}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\alpha T/\tau}}{1 - e^{-T/\tau}} - \frac{E'}{R} - \frac{E}{R} \cdot \frac{e^{-(1-\alpha)T/\tau} - e^{-T/\tau}}{1 - e^{-T/\tau}} + \frac{E'}{R}$$

$$\Delta I = \frac{E}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\alpha T/\tau}}{1 - e^{-T/\tau}} - \frac{E}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\alpha T/\tau}}{1 - e^{-T/\tau}} \cdot e^{-(1-\alpha)T/\tau}$$

$$\Delta I = \frac{E}{R} \cdot \left\{ \frac{1 - (1 - \alpha T/\tau)}{1 - (1 - T/\tau)} \cdot \left[1 - (1 - \alpha) \frac{T}{\tau} \right] \right\}$$

$$\Delta I = \frac{E}{R} \alpha (1 - \alpha) \frac{T}{\tau}$$

L'ondulation est la même que pour une charge R,L .

Le maximum correspond à $\alpha = 0,5$

$$\Delta I_{MAX} = \frac{E.T}{4L}$$

EXTRA STR

EXTRA STR

CHAPITRE III

EXTRA STR

3.1 INTRODUCTION

Vu sa commande simple à implanter, le moteur à courant continu est le plus utilisé dans les domaines des entraînements à vitesse réglable ou asserviable; (les moteurs à courant alternatif, nécessitant souvent des systèmes convertisseurs complexes et des traitements de mesure plus denses, n'interviennent que dans les domaines où il y'a limite du moteur à courant continu de par sa structure).

Le réglage électrique (ou électronique) du fonctionnement se fait par l'intermédiaire du réglage de la tension continue d'induit. Cette tension est le plus souvent réglée en valeur moyenne.

Pour cela plusieurs dispositifs d'électronique de puissance sont possibles. Les plus courants sont:

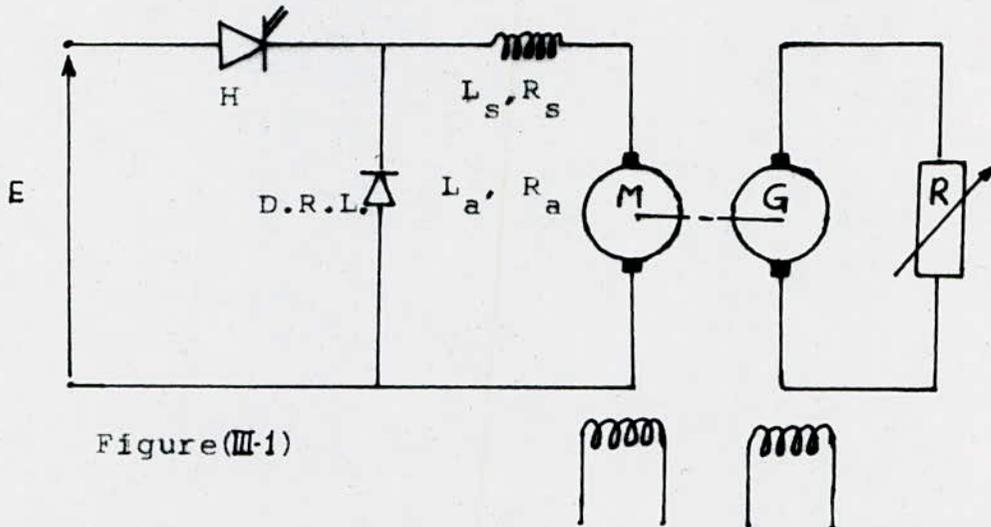
- le pont de Gretz hexaphasé, simple à réaliser et à commander,
- l'association pont redresseur à diodes en cascade avec un hacheur.

Pour cette deuxième possibilité on peut remarquer deux points importants.

- 1°) un seul thyristor (principal) (ou transistor de puissance est à commander
- 2°) la mise à jour de la tension ne dépend pas de la fréquence du secteur (le plus souvent = 50 Hz)

Cette association pour la commande d'un moteur à courant continu fait l'objet de notre étude .

3.2 MODELE DE L'ASSOCIATION HACHEUR -MOTEUR-CHARGE.



Figure(III-1)

Le montage comporte:

- un hacheur,
- une diode de roue libre(D.R.L),
- une self de lissage,
- un moteur à courant continu,
- et une charge constituée d'une génératrice(à courant continu) alimentant un *rhéostat*

3.3 LES HYPOTHESES DE TRAVAIL

Remarque:

Nous disposons dans le laboratoire d'une source de tension continue. C'est cette alimentation que nous avons utilisée (dans le système convertisseur nous n'avons pas introduit le pont de Graëtz à diodes).

- La tension d' alimentation du hacheur est fixe.
- Les chutes de tension internes en direct dans les éléments semi- conducteurs, sont négligables.
- Les temps de commutation sont négligables.
- La réaction magnétique d'induit n'est pas prise en considération

3.4 LES SPECIFICATIONS DU MOTEUR.

Le moteur est chargé par une génératrice figure(III-1), en excitation indépendante maintenue constante. La génératrice débite sur un groupe de résistances.

A vide le moteur présente un coefficient de frottement $K_f = 0,0064 \text{ mN/rds}^{-1}$.

Le moteur porte sur sa plaque signalétique les indications suivantes:

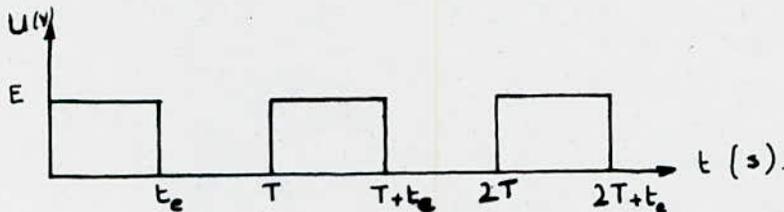
Puissance : 2,2kW	vitesse : 1800 tr/min
Induit: tension 110V	courant: 24 A
Inducteur: tension 110V	courant : 0,95 A

Les mesures de la résistance R_a , de l'inductance L_a de l'induit du moteur et du moment d'inertie J du groupe moteur - génératrice sont:

$R_a = 0,43 \Omega$; $L_a = 15 \text{ mH}$; $J = 0,055 \text{ kg.m}^2$

3.5 METHODE D'ETABLISSEMENT DU COURANT ET DE LA VITESSE DU MOTEUR.

Soit $U(t)$ la tension créneaux aux bornes du circuit série
" self de lissage - induit du moteur "



Les équations électrique et mécanique du système sont:

$$U(t) = L \frac{di}{dt} + Ri + E' \quad (3-1)$$

avec $E' = K_e i$, $L = L_a + L_s$ et $R = R_a + R_s$

$$\Gamma_e = J \frac{d\Omega}{dt} + k_f \Omega + \Gamma_u \quad (3-2)$$

avec: $\Gamma_e = k_t i$

L'écriture matricielle des équations.

$$\begin{bmatrix} \frac{di}{dt} \\ \frac{d\Omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_e}{L} \\ \frac{K_t}{J} & -\frac{k_f}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U(t) \\ \Gamma_u \end{bmatrix}$$

qui, condensée, prend la forme :

$$\dot{x} = Ax + Dy \quad (3-3)$$

$$\text{avec: } x(t) = \begin{bmatrix} i(t) \\ \Omega(t) \end{bmatrix}; \quad y(t) = \begin{bmatrix} U(t) \\ \Gamma_u \end{bmatrix}$$

En appliquant la transformée de Laplace au système (3-3)

nous obtenons :

$$X(p) = [pI - A]^{-1} Y(p) + [pI - A]^{-1} x(0) \quad (3-4)$$

I est la matrice unitaire.

Nous considérons le cas où les conditions initiales sont nulles

$$x(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

La transformée de Laplace de $y(t)$ est :

$$Y(p) = \begin{bmatrix} \frac{E}{p} \frac{1 - e^{-p\alpha T}}{1 - e^{-pT}} \\ \frac{\Gamma_u}{p} \end{bmatrix}$$

En effet, en effectuant les calculs, l'expression (3-4) devient :

$$X(p) = \begin{bmatrix} I(p) \\ \Omega(p) \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \frac{E}{p} \left(p + \frac{k_f}{J} \right) \left(\frac{1 - e^{-p\alpha T}}{1 - e^{-pT}} \right) + \frac{k \Gamma_u}{pL} \\ \frac{E \cdot k}{pJL} \left(\frac{1 - e^{-p\alpha T}}{1 - e^{-pT}} \right) - \frac{\Gamma_u}{pJ} \left(p - \frac{R}{L} \right) \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

où Δ est le déterminant de la matrice $[pI - A]$.

$$\text{Nous avons :} \quad \Delta = p^2 + \left(\frac{R}{L} + \frac{k_f}{J} \right) p + \frac{k^2 + R k_f}{JL} \quad (3-6)$$

Nous pouvons mettre cette expression sous la forme :

$$\Delta = (p + \alpha_1)(p + \alpha_2)$$

3.5.1 Détermination du courant et de la vitesse du moteur.

Pour déterminer le courant $i(t)$ et la vitesse $\Omega(t)$ on applique la transformée inverse de Laplace à l'expression (3-5)

$$X(t) = \begin{bmatrix} i(t) \\ \Omega(t) \end{bmatrix} = \mathcal{L}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{1}{(p+\alpha_1)(p+\alpha_2)} \left[\frac{E}{pL} \left(p + \frac{k_f}{J} \right) \left(\frac{1-e^{-p\alpha T}}{1-e^{-pT}} \right) + \frac{k\Gamma u}{pJL} \right] \\ \frac{1}{(p+\alpha_1)(p+\alpha_2)} \left[\frac{kE}{pJL} \left(\frac{1-e^{-p\alpha T}}{1-e^{-pT}} \right) - \frac{\Gamma u}{pJ} \left(p - \frac{R}{L} \right) \right] \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$i(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{k\Gamma u}{JpL(p+\alpha_1)(p+\alpha_2)} + \frac{E(p + \frac{1}{Z_m})}{pL(p+\alpha_1)(p+\alpha_2)} \left(\frac{1-e^{-p\alpha T}}{1-e^{-pT}} \right) \right]$$

avec: $Z_m = \frac{J}{k_f}$ et $Z_e = \frac{L}{R}$

$$i(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{k\Gamma u}{JL} \left(\frac{A_1}{p} + \frac{A_2}{p+\alpha_1} + \frac{A_3}{p+\alpha_2} \right) + \frac{E}{L} \left(\frac{B_1}{p} + \frac{B_2}{p+\alpha_1} + \frac{B_3}{p+\alpha_2} \right) \left(\frac{1-e^{-p\alpha T}}{1-e^{-pT}} \right) \right] \quad (3.9)$$

$$A_1 = \frac{1}{\alpha_1\alpha_2}; \quad A_2 = \frac{1}{\alpha_1(\alpha_2-\alpha_1)}; \quad A_3 = \frac{1}{\alpha_2(\alpha_2-\alpha_1)}$$

$$B_1 = \frac{1}{Z_m\alpha_1\alpha_2} \quad B_2 = \frac{Z_m\alpha_1 - 1}{Z_m(\alpha_2-\alpha_1)\alpha_1} \quad \text{et} \quad B_3 = \frac{1 - \alpha_2 Z_m}{\alpha_2 Z_m(\alpha_2-\alpha_1)}$$

$$\Omega(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{(-\Gamma u) \left(p + \frac{1}{Z_e} \right)}{(pJ)(p+\alpha_1)(p+\alpha_2)} + \frac{KE}{pJL(p+\alpha_1)(p+\alpha_2)} \left(\frac{1-e^{-p\alpha T}}{1-e^{-pT}} \right) \right]$$

$$\Omega(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{-\Gamma u}{J} \left(\frac{A_4}{p} + \frac{A_5}{p+\alpha_1} + \frac{A_6}{p+\alpha_2} \right) + \frac{KE}{JL} \left(\frac{B_4}{p} + \frac{B_5}{p+\alpha_1} + \frac{B_6}{p+\alpha_2} \right) \left(\frac{1-e^{-p\alpha T}}{1-e^{-pT}} \right) \right] \quad (3.10)$$

$$\text{avec : } A_4 = \frac{1}{\tau e^{\alpha_1 \alpha_2}} \quad ; \quad A_5 = \frac{\tau e^{\alpha_1} - 1}{\tau e^{\alpha_1} (\alpha_2 - \alpha_1)} \quad ; \quad A_6 = \frac{1 - \tau e^{\alpha_2}}{\tau e^{\alpha_2} (\alpha_2 - \alpha_1)}$$

$$B_4 = A_1 \quad ; \quad B_5 = A_2 \quad \text{et} \quad B_6 = A_3$$

Pour déterminer $i(t)$ et $\Omega(t)$, nous considérons les deux cas: état fermé, état ouvert du contacteur statique.

Contacteur statique fermé: (la D.R.L. ne conduit pas)

Contacteur statique ouvert: (la D.R.L. conduit)

3.5.2 Expressions du courant:

- Contacteur statique fermé: $(n-1)T \leq t \leq (n-1)T + \alpha T$

$$\begin{aligned} i(t) = i_H(t) = & \frac{K \Gamma_U}{JL} \left(A_1 + A_2 e^{-\alpha_1 t} + A_3 e^{-\alpha_2 t} \right) \\ & + \frac{E}{R \tau e} \left\{ B_1 + B_2 e^{-\alpha_1 t} \left(\frac{e^{\alpha_1 n T} - 1}{e^{\alpha_1 T} - 1} \right) \right. \\ & + B_3 e^{-\alpha_2 t} \left(\frac{e^{\alpha_2 n T} - 1}{e^{\alpha_2 T} - 1} \right) - B_2 e^{-\alpha_1 (t - \alpha T)} \left(\frac{e^{(n-1)T \alpha_1} - 1}{e^{\alpha_1 T} - 1} \right) \\ & \left. - B_3 e^{-\alpha_2 (t - \alpha T)} \left(\frac{e^{\alpha_2 (n-1)T} - 1}{e^{\alpha_2 T} - 1} \right) \right\} \quad (3-11) \end{aligned}$$

- Contacteur statique ouvert. $(n-1)T + \alpha T \leq t \leq nT$

$$\begin{aligned} i(t) = i_D(t) = & \frac{K \Gamma_U}{JL} \left(A_1 + A_2 e^{-\alpha_1 t} + A_3 e^{-\alpha_2 t} \right) \\ & + \frac{E}{R \tau e} \left\{ B_2 e^{-\alpha_1 t} (1 - e^{\alpha_1 \alpha T}) \left(\frac{e^{\alpha_1 n T} - 1}{e^{\alpha_1 T} - 1} \right) \right. \\ & \left. + B_3 e^{-\alpha_2 t} (1 - e^{\alpha_2 \alpha T}) \left(\frac{e^{\alpha_2 n T} - 1}{e^{\alpha_2 T} - 1} \right) \right\} \quad (3-12) \end{aligned}$$

3.53 Expression de la vitesse.

- Contacteur statique fermé.

$$\Omega(t) = \Omega_H(t) = -\frac{\Gamma_u}{J} (A_4 + A_5 e^{-\alpha_1 t} + A_6 e^{-\alpha_2 t}) + \frac{EK}{JL} \left\{ B_4 + B_5 e^{-\alpha_1 t} \left(\frac{e^{nT\alpha_1} - 1}{e^{\alpha_1 T} - 1} \right) + B_6 e^{-\alpha_2 t} \left(\frac{e^{nT\alpha_2} - 1}{e^{T\alpha_2} - 1} \right) - B_5 e^{-(t-\alpha T)\alpha_1} \left(\frac{e^{(n-1)T\alpha_1} - 1}{e^{T\alpha_1} - 1} \right) - B_6 e^{-\alpha(t-\alpha T)} \left(\frac{e^{(n-1)T\alpha_2} - 1}{e^{T\alpha_2} - 1} \right) \right\} \quad (3.13)$$

- Contacteur statique ouvert.

$$\Omega(t) = \Omega_D(t) = -\frac{\Gamma_u}{J} (A_4 + A_5 e^{-\alpha_1 t} + A_6 e^{-\alpha_2 t}) + \frac{EK}{JL} \left\{ B_5 e^{-\alpha_1 t} \left(\frac{e^{nT\alpha_1} - 1}{e^{T\alpha_1} - 1} \right) (1 - e^{-\alpha\alpha_1 T}) + B_6 e^{-\alpha_2 t} \left(\frac{e^{nT\alpha_2} - 1}{e^{T\alpha_2} - 1} \right) (1 - e^{-\alpha\alpha_2 T}) \right\} \quad (3.14)$$

3.6 REGIME DE DEMARRAGE.

On spécifie la condition dans laquelle le démarrage est effectué .

$\Gamma_u = 0$ (i.e la génératrice ne débite pas)

3.6.1 Expressions du courant de démarrage.

- Contacteur statique fermé . $(n-1)T < t < (n-1)T + \alpha T$

$$i_{dem}(t) = i_{Hdem}(t) = \frac{E}{RZ_e} \left\{ B_1 + B_2 e^{-\alpha_1 t} \left(\frac{e^{nT\alpha_1} - 1}{e^{T\alpha_1} - 1} \right) + B_3 e^{-\alpha_2 t} \left(\frac{e^{nT\alpha_2} - 1}{e^{T\alpha_2} - 1} \right) - B_2 e^{-(t-\alpha T)\alpha_1} \left(\frac{e^{(n-1)T\alpha_1} - 1}{e^{T\alpha_1} - 1} \right) - B_3 e^{-(t-\alpha T)\alpha_2} \left(\frac{e^{(n-1)T\alpha_2} - 1}{e^{T\alpha_2} - 1} \right) \right\}$$

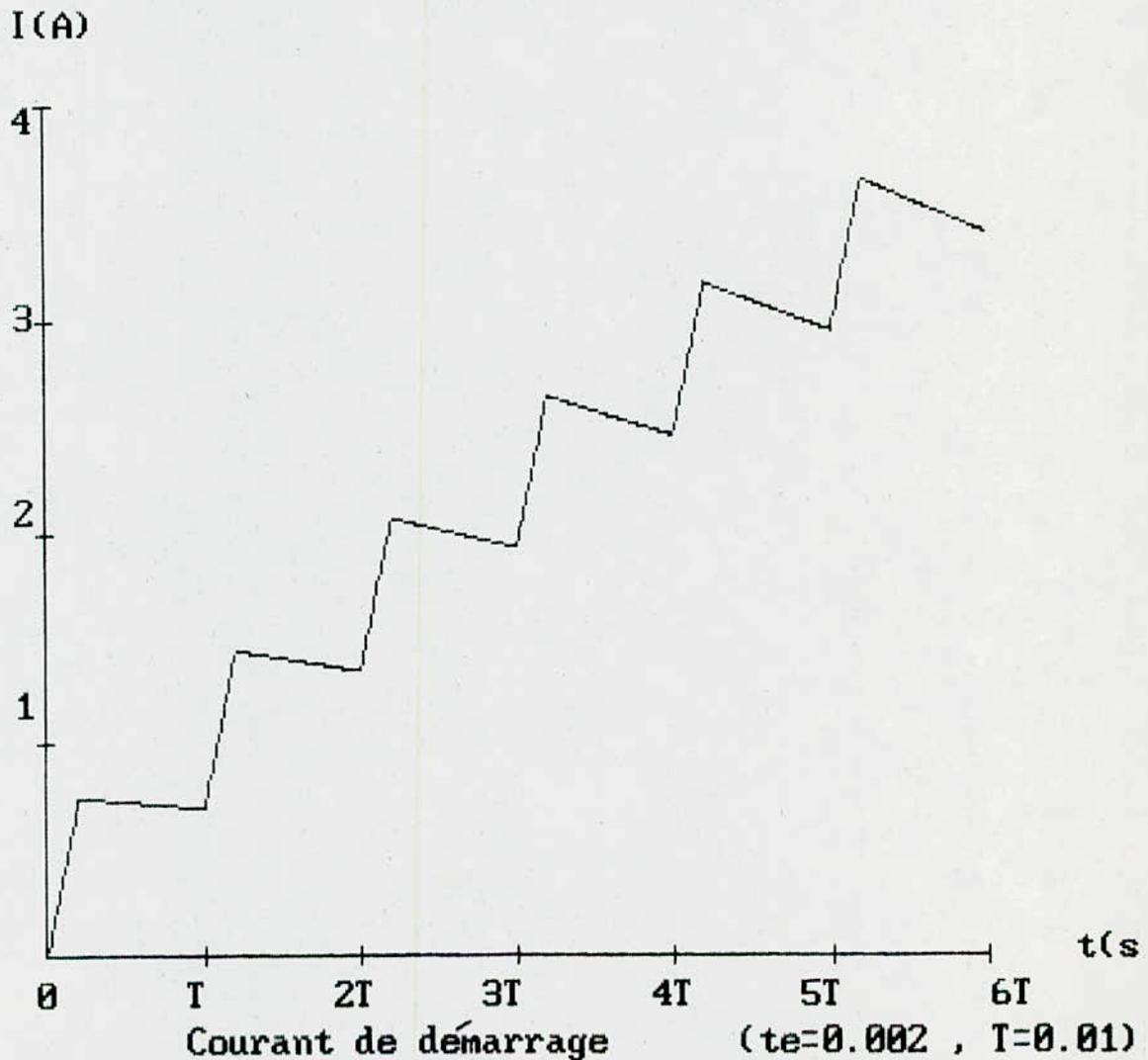
..... (3.15)

-Contateur statique ouvert.

$$i_{dem}(t) = i_{Ddem}(t) = \frac{E}{RZ_c} \left\{ B_2 e^{-\alpha_1 t} (1 - e^{\alpha_1 T}) \left(\frac{e^{nT\alpha_1} - 1}{e^{T\alpha_1} - 1} \right) + B_3 e^{-\alpha_2 t} (1 - e^{\alpha_2 T}) \left(\frac{e^{nT\alpha_2} - 1}{e^{nT\alpha_2} - 1} \right) \right\} \quad (3.16)$$

La figure (III-2) représente la montée du courant de démarrage

La figure (III-3) représente l'allure complète du courant de démarrage.



Figure(III - 2)

30
Courant de démarrage

($T=0.01s$, $t_e=0.002s$)

($L_s=0.28 H$, $R_s=2.14 \Omega$)

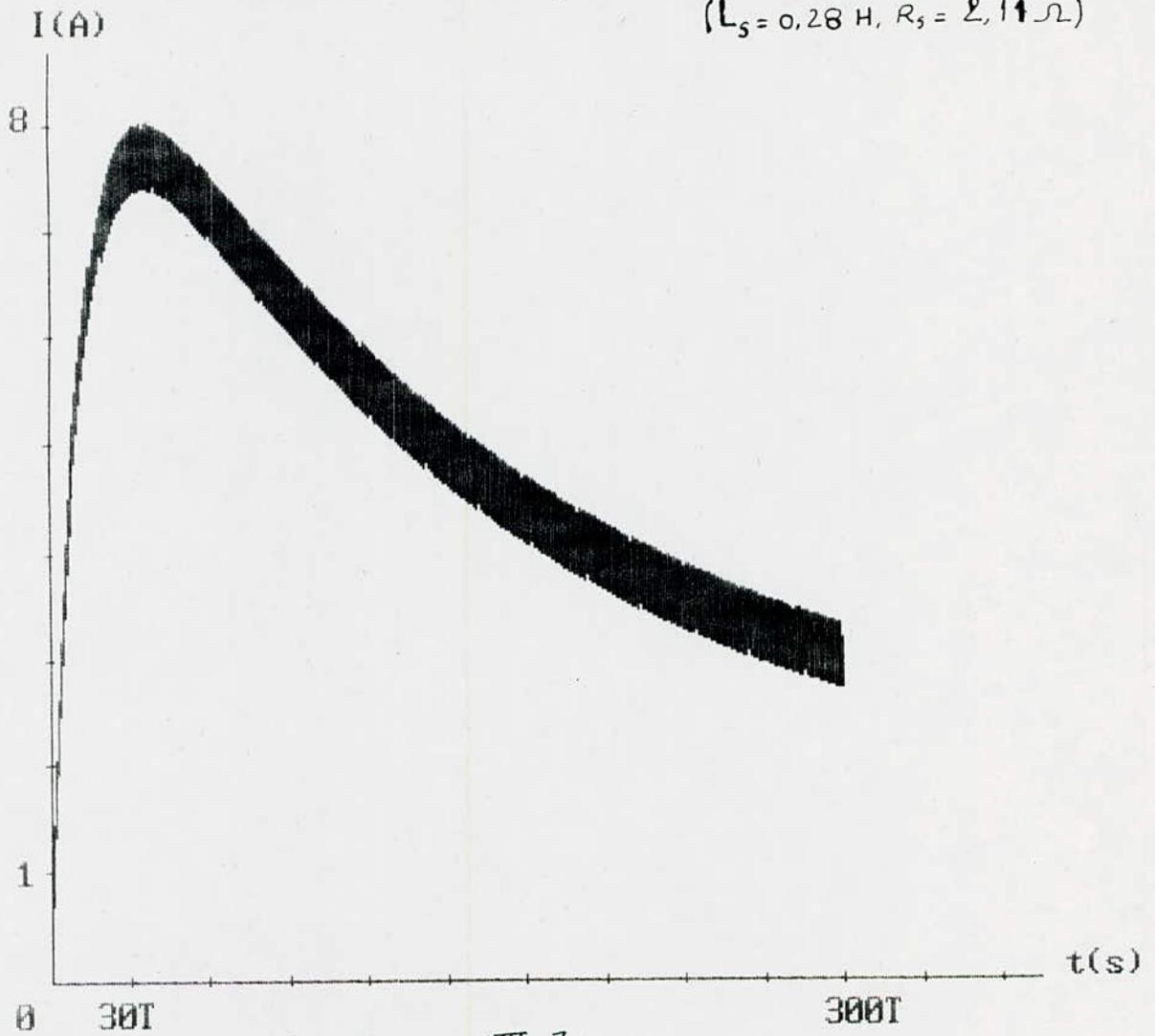
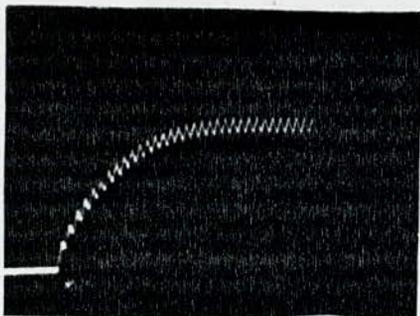


Figure (III-3)



Allure de la montée



Allure complète

Courant de démarrage obtenu en pratique.

Interprétation:

Lors de la mise sous tensions du moteur à courant continu, le courant absorbé par celui-ci n'est limité que par sa résistance d'induit et de la self de lissage, du fait qu'il n'existe pas encore de force contre électromotrice. A mesure que la vitesse augmente, elle entraîne un accroissement de E' et donc une diminution de I_{dem} . A la fin du démarrage nous trouvons
$$I_{moy} = \frac{U_{moy} - E'}{R}$$
 Nous constatons cependant aussi des ondulations de courant dans ce démarrage. Ces dernières sont dues au fonctionnement du hacheur.

Remarque:

Pour limiter le courant de démarrage nous réglons la tension d'alimentation du moteur en agissant sur le rapport cyclique et la fréquence de hachage.

3.6.2 Expressions de la vitesse au démarrage.

- Contacteur statique fermé.

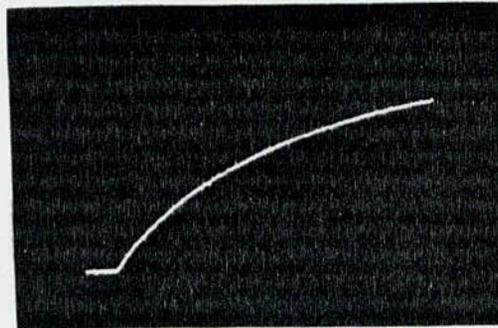
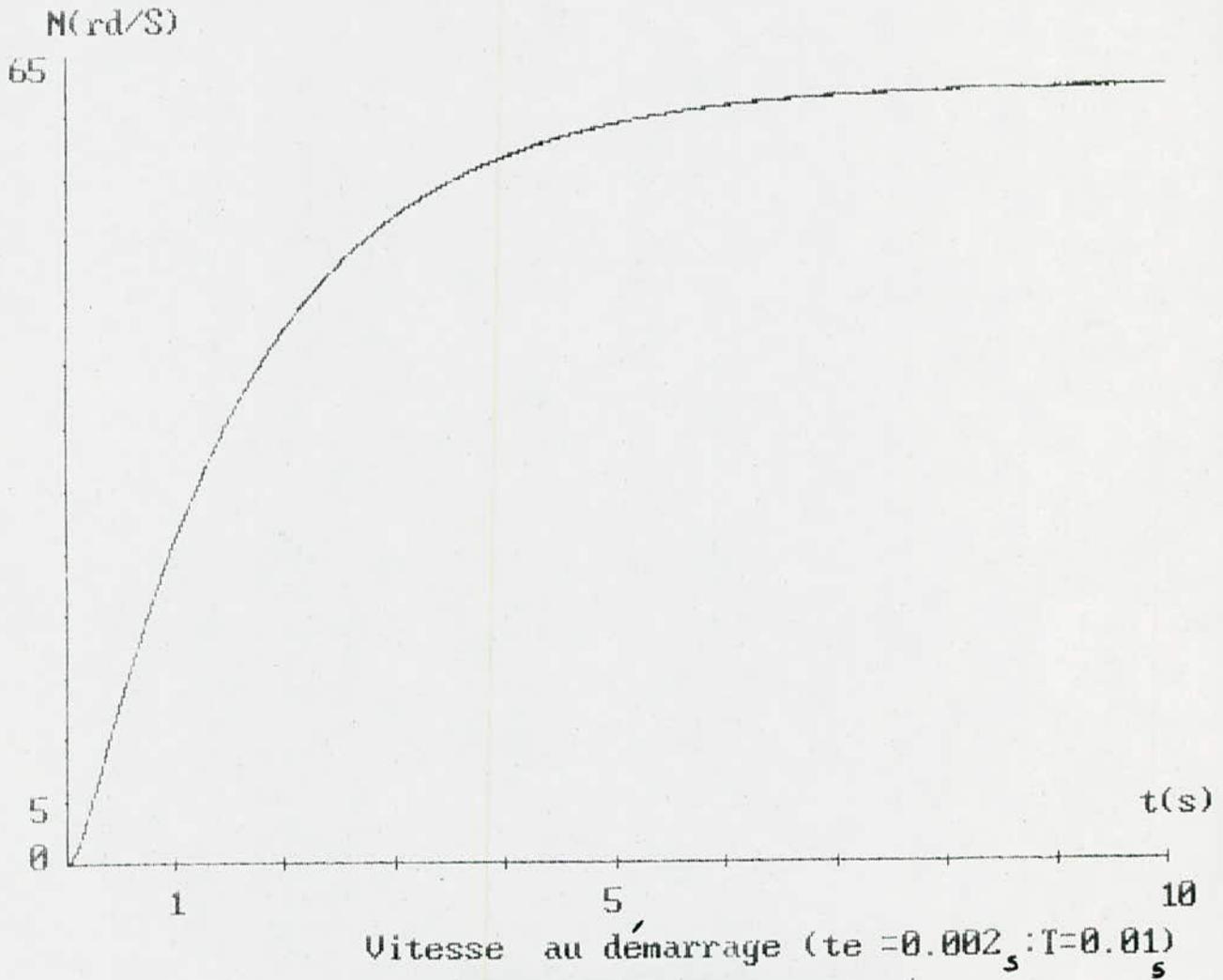
$$\Omega_{dem}(t) = \Omega_{Hdem}(t) = \frac{EK}{JL} \left\{ B_4 + B_5 e^{-\alpha_1 t} \left(\frac{e^{nT\alpha_1} - 1}{e^{T\alpha_1} - 1} \right) + B_6 e^{-\alpha_2 t} \left(\frac{e^{-nT\alpha_2} - 1}{e^{T\alpha_2} - 1} \right) - B_5 e^{-(t-\alpha T)\alpha_1} \left(\frac{e^{(n-1)T\alpha_1} - 1}{e^{T\alpha_1} - 1} \right) - B_6 e^{-(t-\alpha T)\alpha_2} \left(\frac{e^{(n-1)T\alpha_2} - 1}{e^{T\alpha_2} - 1} \right) \right\}$$

- Contacteur statique ouvert.

.... (3.17)

$$\Omega_{dem}(t) = \Omega_{Ddem}(t) = \frac{EK}{JL} \left\{ B_5 e^{-\alpha_1 t} \left(\frac{e^{nT\alpha_1} - 1}{e^{T\alpha_1} - 1} \right) (1 - e^{\alpha_1 \alpha T}) + B_6 e^{-\alpha_2 t} \left(\frac{e^{nT\alpha_2} - 1}{e^{T\alpha_2} - 1} \right) (1 - e^{\alpha_2 \alpha T}) \right\} \quad (3.18)$$

La figure ci-dessous représente l'allure de la vitesse au démarrage.



Allure de la vitesse au démarrage obtenue expérimentalement .

3.7 REGIME PERMANENT.

3.7.1 Expressions du courant:

Les termes constants plus les termes qui contiennent $(t-nT)$ dans les équations (3.11) et (3.12) constituent le courant permanent $i_p(t)$ est indépendant de n . En effet pour t assez grand n est grand et la différence $(t-nT)$ est finie. Elle est indépendante de n . Cette différence $(t-nT)$ varie.

- de $-T$ à $\alpha T - T$ quand le hacheur conduit et
- de αT à 0 quand " " est bloqué

- Quand le hacheur conduit.

$$i_p(t) = i_{Hp}(t) = \frac{K \Gamma_u}{JL} A_1 + \frac{E}{RL} \left\{ B_1 + B_2 e^{-\alpha_1(t-nT)} \left(\frac{1 - e^{-\alpha_1(T-\alpha T)}}{e^{\alpha_1 T} - 1} \right) + B_3 e^{-\alpha_2(t-nT)} \left(\frac{1 - e^{-\alpha_2(T-\alpha T)}}{e^{\alpha_2 T} - 1} \right) \right\}$$

- quand le hacheur est bloqué.

$$i_p(t) = i_{Dp}(t) = \frac{K \Gamma_u}{JL} A_1 + \frac{E}{RZ_e} \left\{ B_2 e^{-\alpha_1(t-nT)} \left(\frac{1 - e^{\alpha \alpha_1 T}}{e^{\alpha_1 T} - 1} \right) + B_3 e^{-\alpha_2(t-nT)} \left(\frac{1 - e^{\alpha \alpha_2 T}}{e^{\alpha_2 T} - 1} \right) \right\}$$

Valeur moyenne du courant permanent .

$$I_{moy} = \frac{1}{T} \int_{(n-1)T}^{\alpha T + (n-1)T} i_{Hp}(t) dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T + (n-1)T}^{nT} i_{Dp}(t) dt$$

après intégration nous trouvons

$$I_{moy} = \frac{A_1 K \Gamma_u}{J L} + \frac{E}{R Z_e} B_1 \alpha$$

La figure (III-4) représente l'allure du courant permanent $i_p(t)$

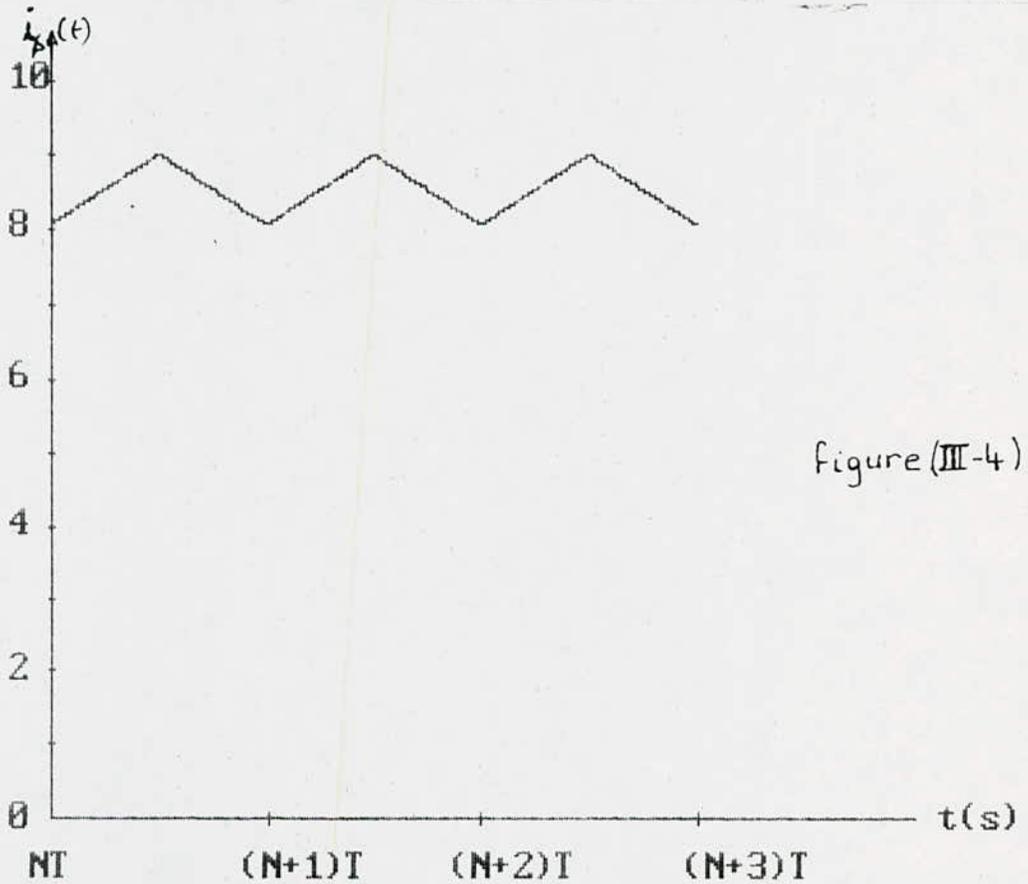
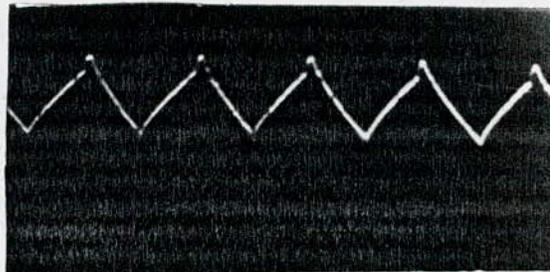


Figure (III-4)

($T = .01s$, $t_e = .005s$)
($\Gamma_u = 1,47 N.m$)



Allure du courant permanent, obtenu e expérimentalement

3.72 Expression de la vitesse permanente.

L'explication (des termes qui constituent les expressions de la vitesse permanente) est la même que celle donnée au paragraphe (5.1)

- quand le hacheur conduit.

$$\Omega_p(t) = \Omega_{Hp}(t) = -\frac{\Gamma_0}{J} A_4 + \frac{E \cdot k}{J \cdot L} \left\{ B_4 + B_5 e^{-\alpha_1(t-nT)} \left(\frac{1 - e^{-\alpha_1(T-\alpha T)}}{e^{\alpha_1 T} - 1} \right) + B_6 e^{-\alpha_2(t-nT)} \left(\frac{1 - e^{-\alpha_2(T-\alpha T)}}{e^{\alpha_2 T} - 1} \right) \right\}$$

- quand le hacheur est bloqué

$$\Omega_p(t) = \Omega_{Dp}(t) = -\frac{\Gamma_0}{J} A_4 + \frac{E \cdot k}{J \cdot k} \left\{ B_5 e^{-\alpha_1(t-nT)} \left(\frac{1 - e^{\alpha_1 \alpha T}}{e^{\alpha_1 T} - 1} \right) + B_6 e^{-\alpha_2(t-nT)} \left(\frac{1 - e^{\alpha_2 \alpha T}}{e^{\alpha_2 T} - 1} \right) \right\}$$

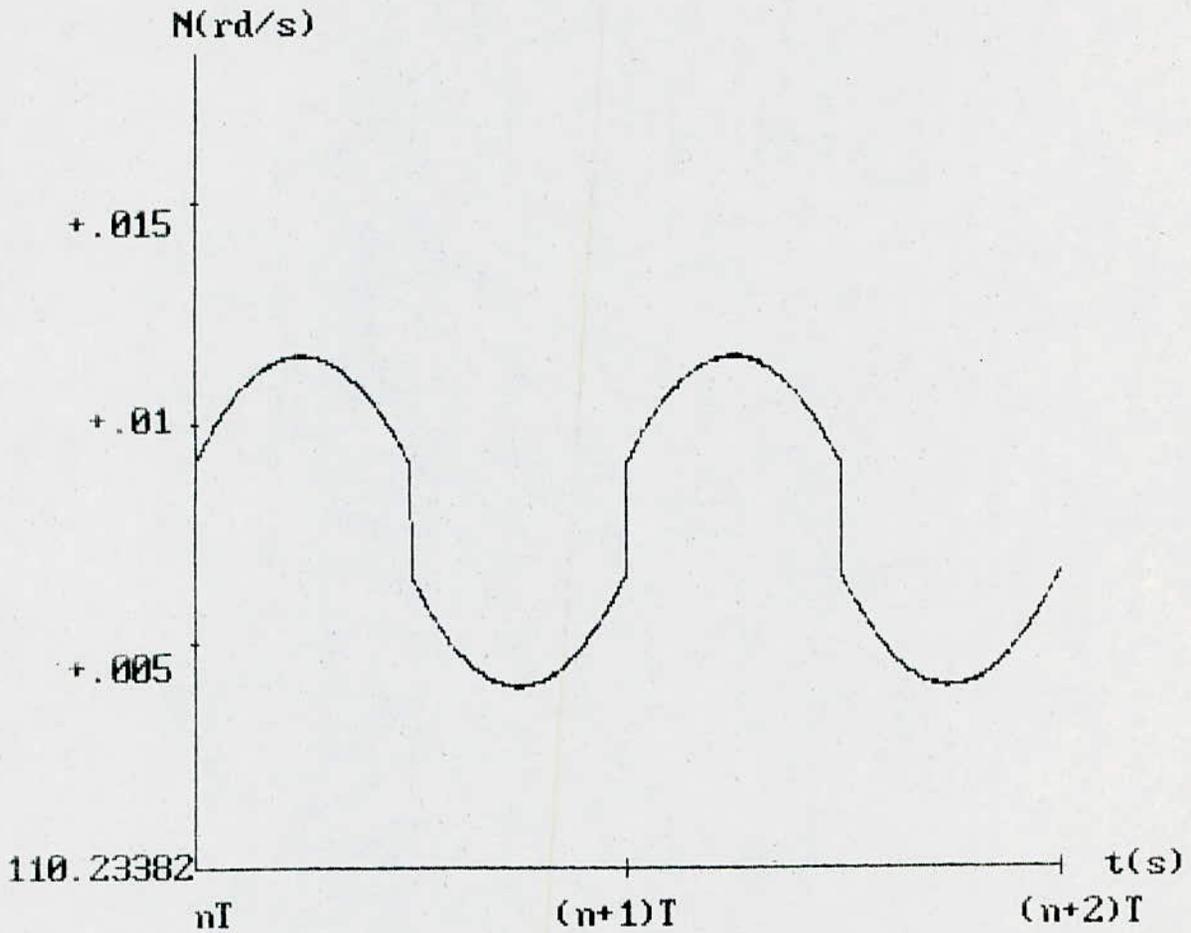
Valeur moyenne de la vitesse

$$\Omega_{moy} = \frac{1}{T} \int_{(n-1)T}^{(n-1)T + \alpha T} \Omega_{Hp}(t) dt + \frac{1}{T} \int_{(n-1)T + \alpha T}^{nT} \Omega_{Dp}(t) dt$$

après intégration nous trouvons

$$\Omega_{moy} = \frac{1}{T} \left(\frac{\Gamma_0}{J} A_4 T + \frac{E}{JL} \cdot B_4 \cdot \alpha T \right) = \frac{\Gamma_0}{J} A_4 + \frac{\alpha E}{JL} B_4$$

La figure (III-5) représente l'allure de la vitesse permanente $\Omega_p(t)$



La vitesse au régime permanent ($T = .01s, te = .005s$)

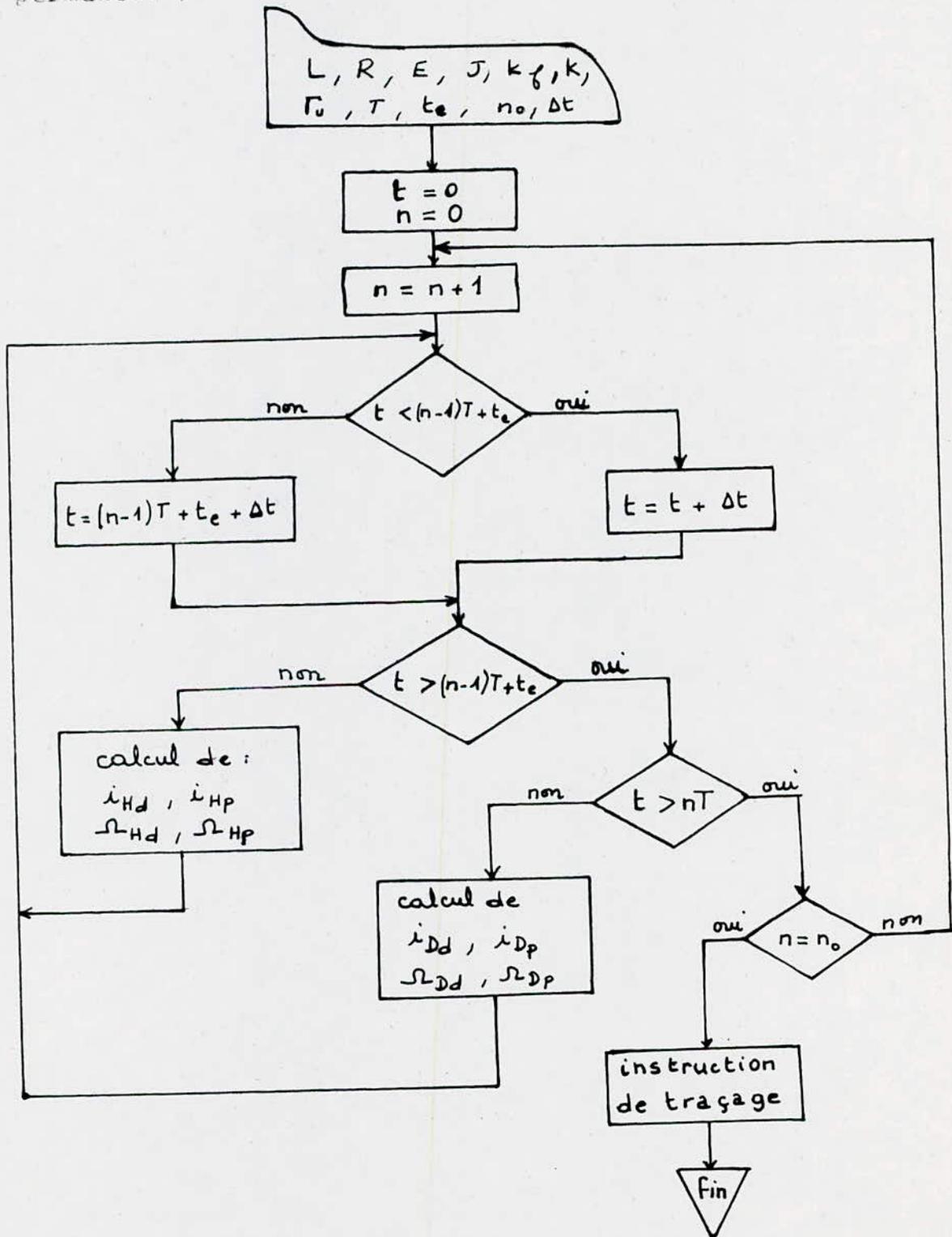
Figure (III.5)

Cette courbe met en évidence la présence d'ondulation dans la vitesse de rotation du moteur .

Ces ondulations sont dues aux ondulations du courant. Elles sont faibles (de l'ordre de millièmes, crête à crête .

Ces valeurs relatives s'expliquent par le fait que les brèves variations de la vitesse sont amorties par l'inertie du groupe moteur - génératrice.

Le programme , dont l'organigramme est donné par la suite, a permis de tracer ces courants et vitesses (démarrage et permanent)



3.73 Influence du rapport cyclique sur l'ondulation du courant.

La figure (III-6) représente l'allure de la variation de l'ondulation du courant en fonction du rapport cyclique, pour plusieurs valeurs de la fréquence de hachage (:67;100 et 200 Hz).

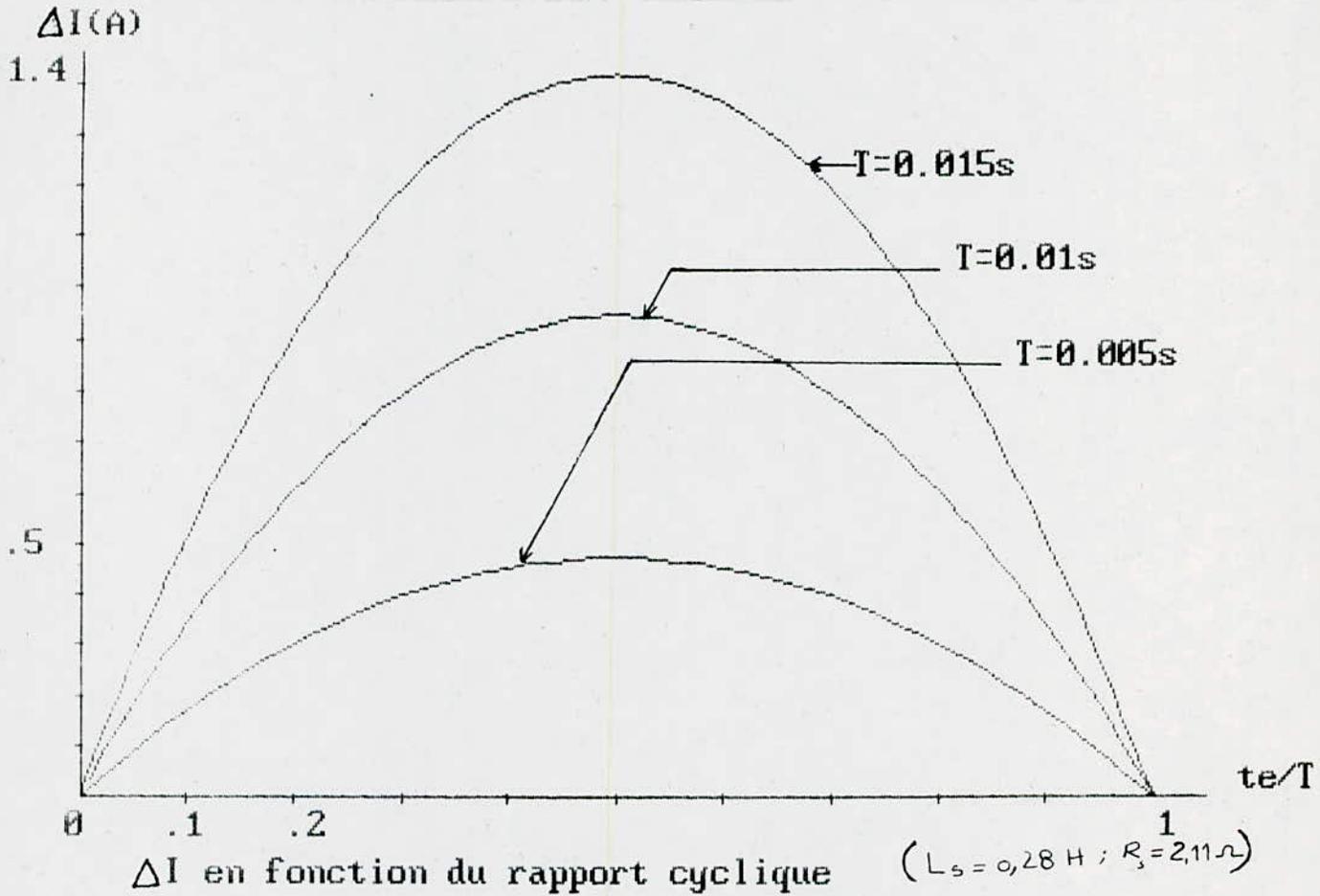


Figure (III-6)

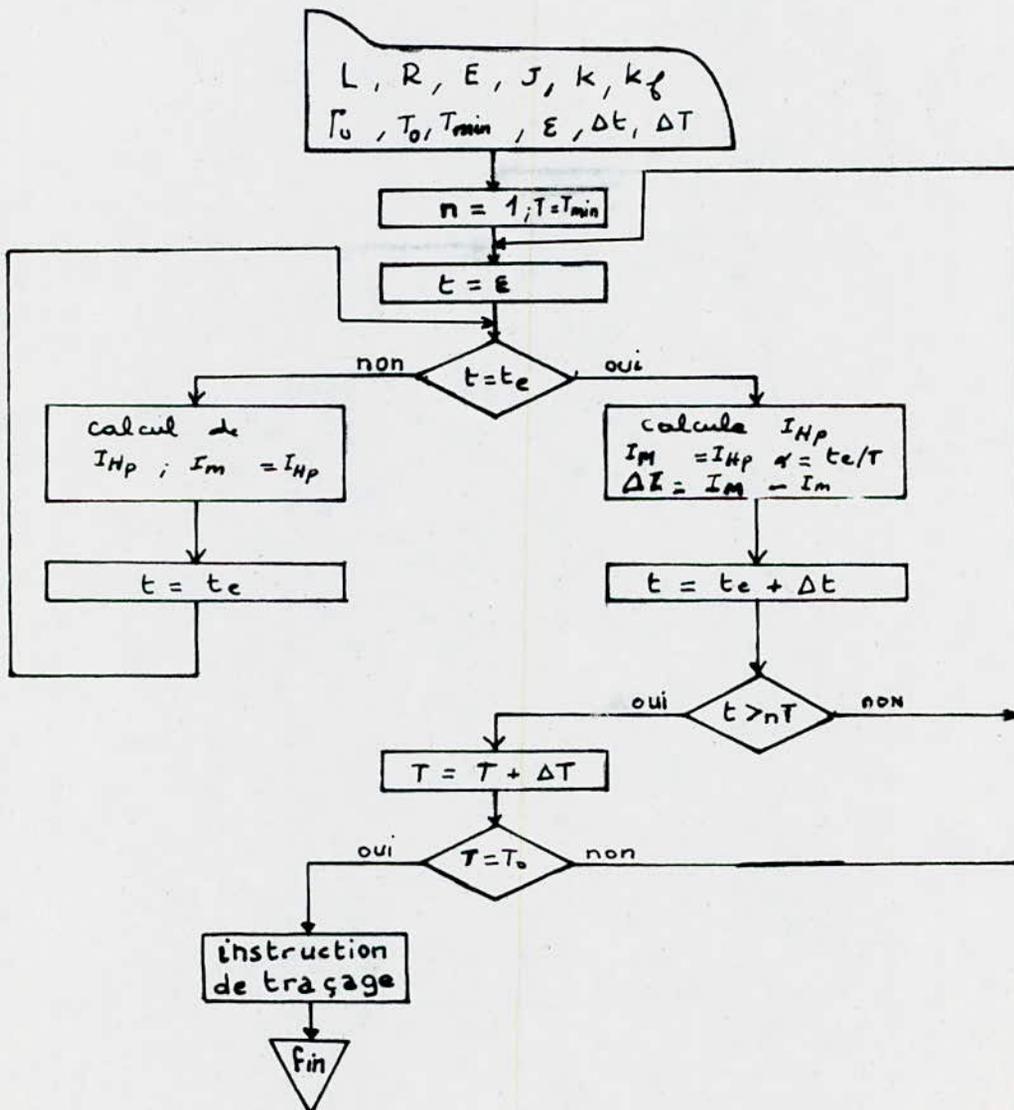
Cette courbe permet de constater que.

- l'ondulation du courant est faible pour α tendant vers 0 et tendant vers 1
- elle présente un maximum pour $\alpha = 0,5$, (ces courbes sont même symétriques par rapport à la droite d'équation $\alpha = 0,5$).

- l'ondulation diminue avec l'augmentation de la fréquence de hachage (*)

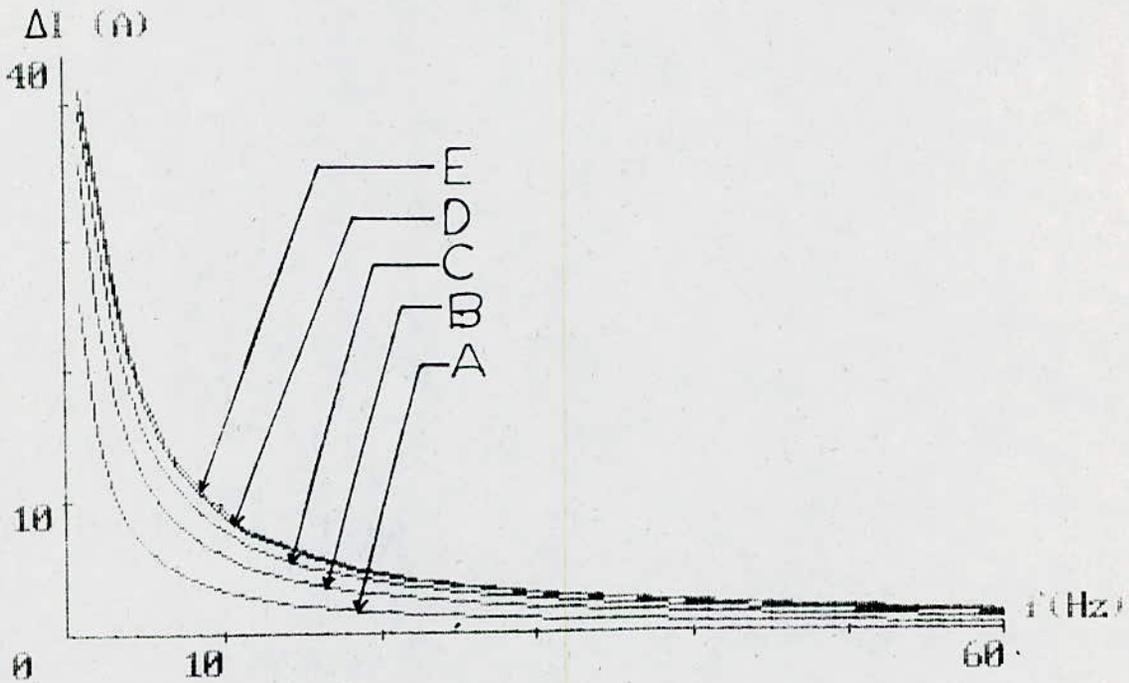
(*) remarque : nous donnons dans le paragraphe suivant la variation , point par point, de l'ondulation en fonction de la fréquence de hachage .

Le programme , dont l'organigramme est donné par la suite, a permis de tracer la variation de ΔI en fonction du rapport cyclique.



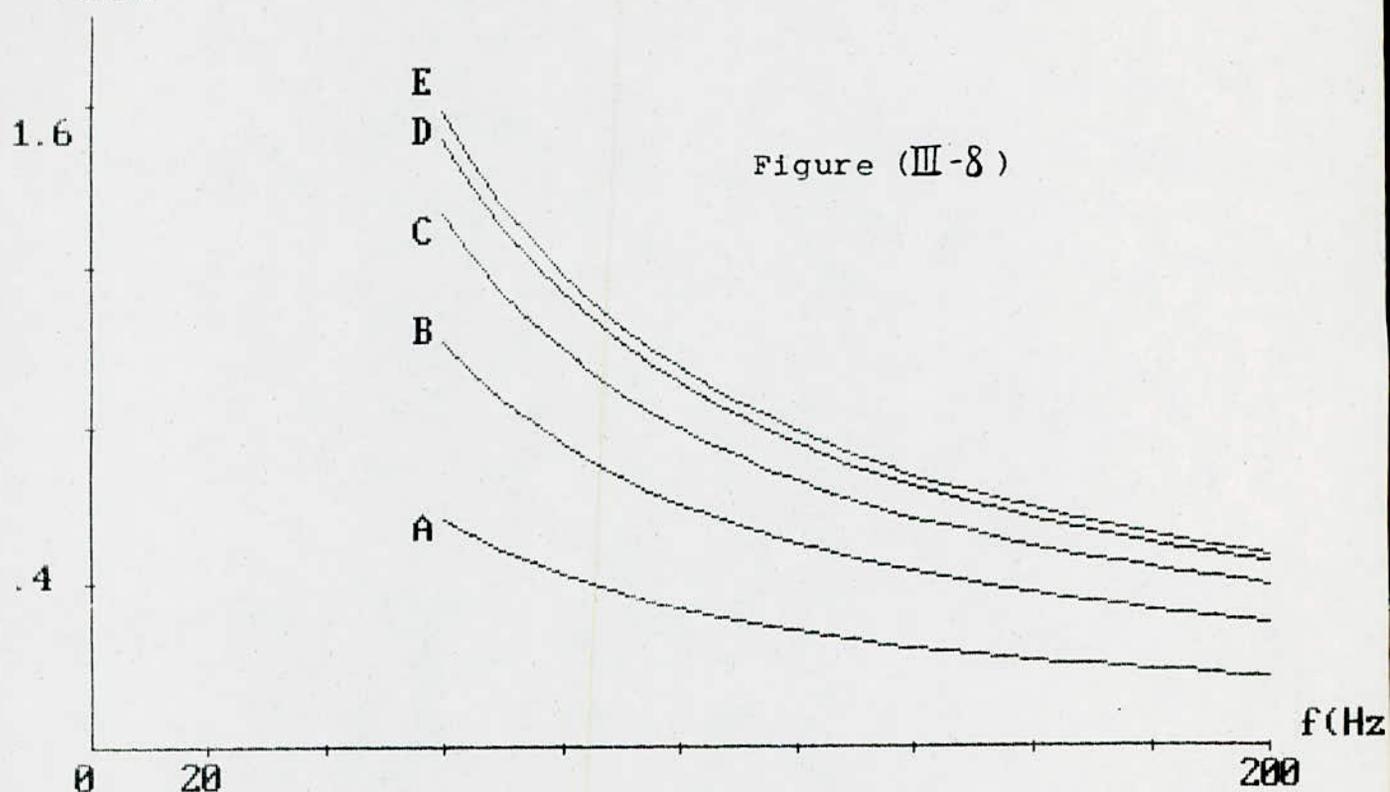
3.7.4 Influence de la fréquence de hachage sur l'ondulation du courant .

Les figures (III-7) et (III-8) représentent l'allure de la variation de ΔI en fonction de f pour plusieurs valeurs de rapport cyclique.



Influence de la fréquence sur ΔI

figure (III - 7)

$\Delta I(A)$ 

Influence de la fréquence sur l'ondulation du courant

La courbe A correspond à : $\alpha = 0.1$ et $\alpha = 0.9$

B " " : $\alpha = 0.2$ et $\alpha = 0.8$

C " " : $\alpha = 0.3$ et $\alpha = 0.7$

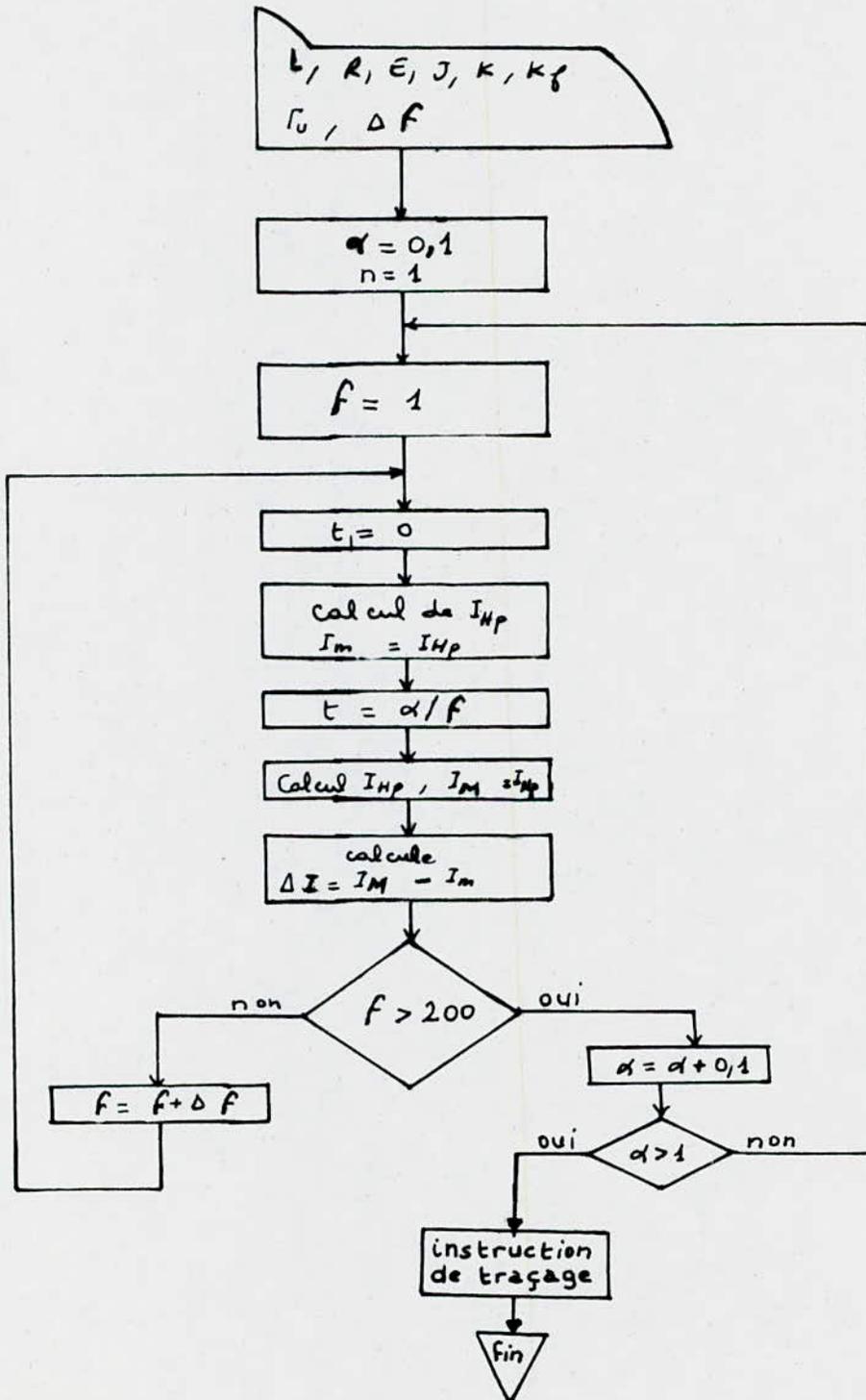
D " " : $\alpha = 0.4$ et $\alpha = 0.6$

E " " : $\alpha = 0.5$

Ces courbes permettent de remarquer que:

- quand la fréquence de hachage augmente l'ondulation du courant diminue.
- cette augmentation connaît un maximum pour $\alpha = 0,5$ et est de moins en moins importante pour α tendant vers 0 ou vers 1.

L'organigramme du programme qui a permis de tracer les courbes des figures (III-7) et (III-8) est tracé ci-dessous

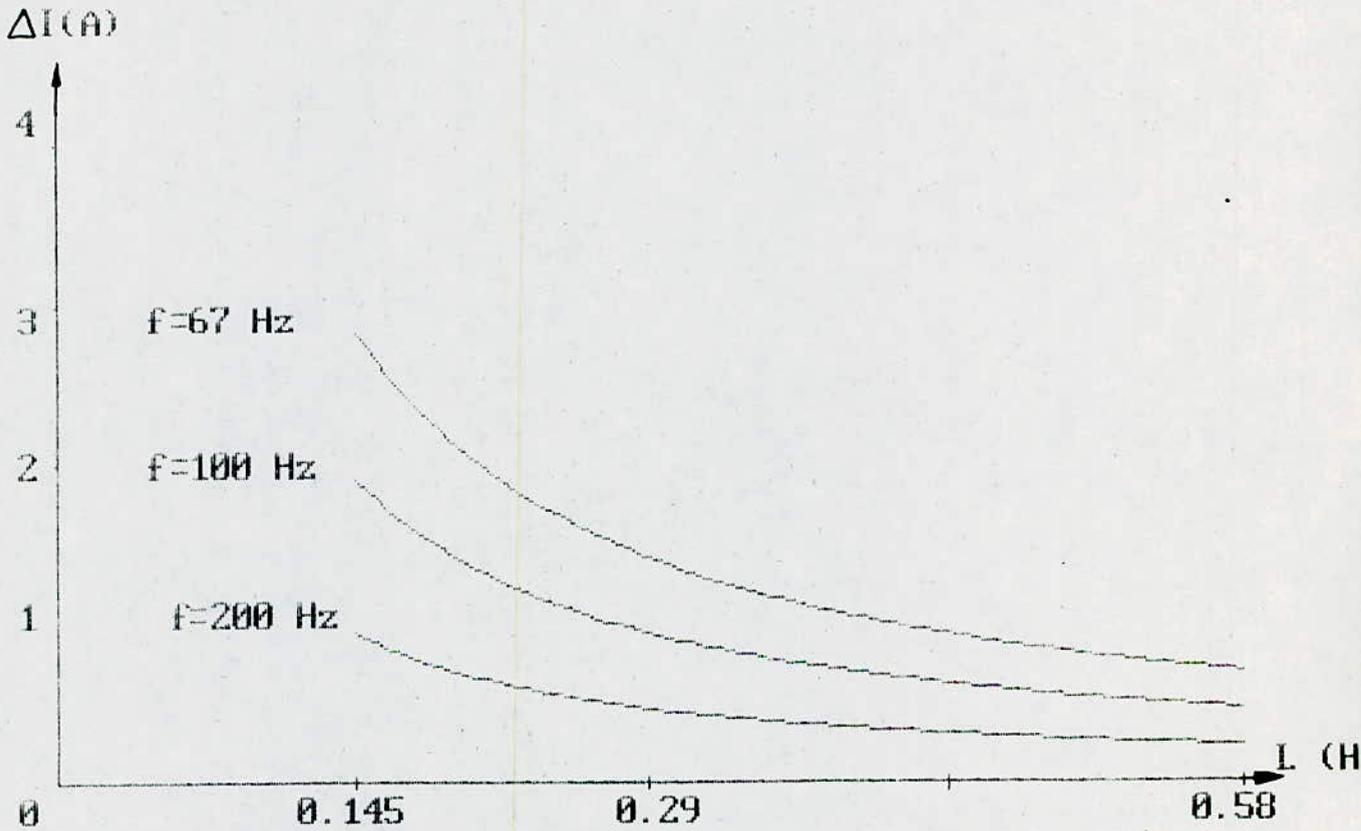


3.75 Influence de la self sur l'ondulation du courant.

Les courbes représentatives de ces variations sont données par la figure (III - 9)

De ces courbes nous constatons que:

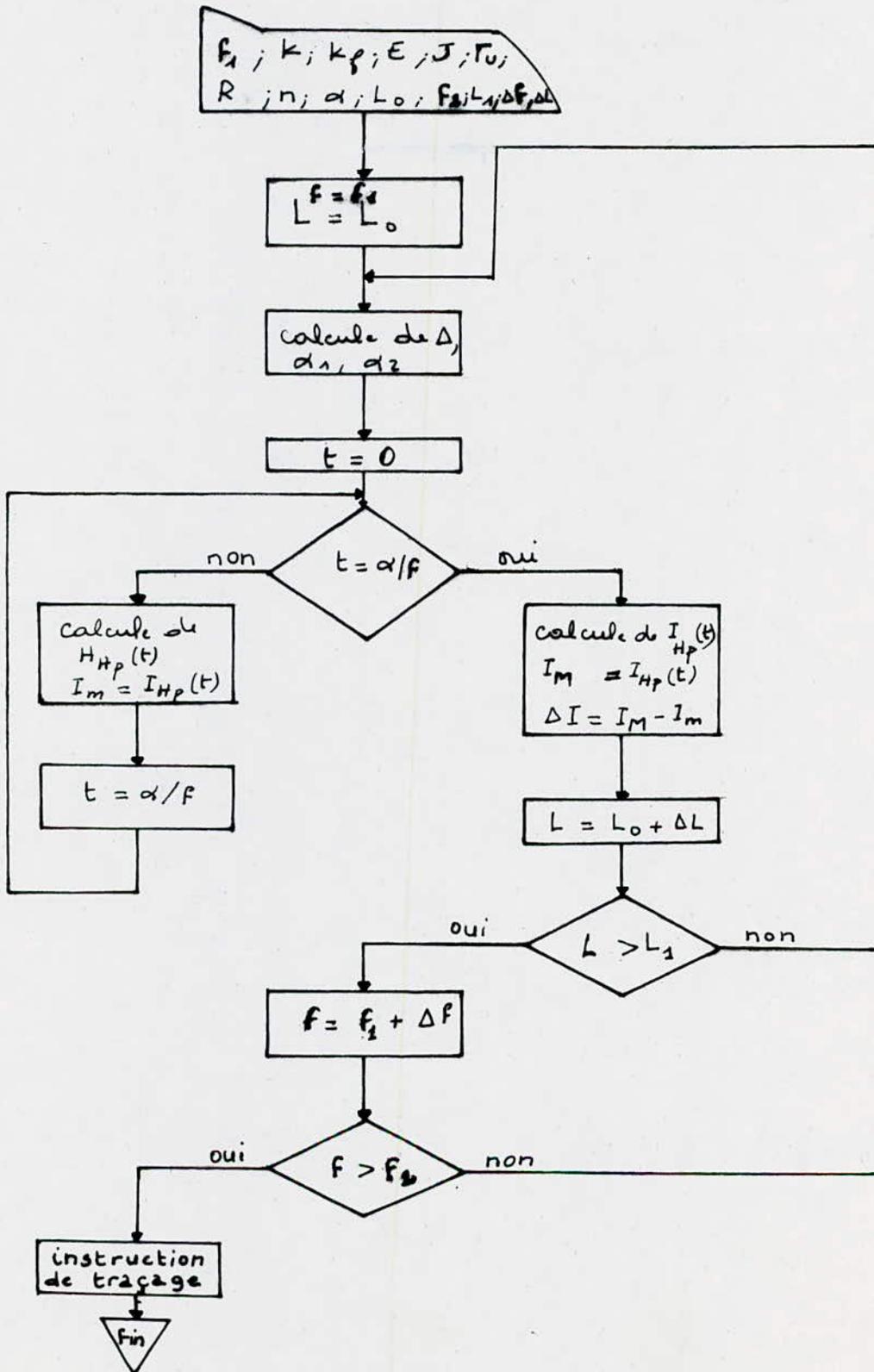
Quand l'inductance de la self augmente l'ondulation diminue



Influence de l'inductance de lissage sur l'ondulation du courant ($\alpha = 0,5$)

Figure (III - 9)

L'organigramme du programme qui a permis de tracer les courbes de la figure (III-9) est celui donné ci-dessous.



CHAPITRE IV

IV VERIFICATION EXPERIMENTAL

4.1 ESSAIS SUR CHARGE R, L

4-1.1 Influence du rapport cyclique sur l'ondulation du courant

Les essais effectués ont permis de relever les résultats:

α	0,22	0,30	0,37	0,48	0,60	0,81
ΔI (A)	1,20	1,40	1,60	1,85	1,80	1,30
I_M (A)	4	4,20	5,80	7,20	8,20	9,80

pour la fréquence de hachage $f = 74$ Hz et $L = 550$ mH

La courbe représentative des résultats obtenus est donnée par la figure (IV-1)

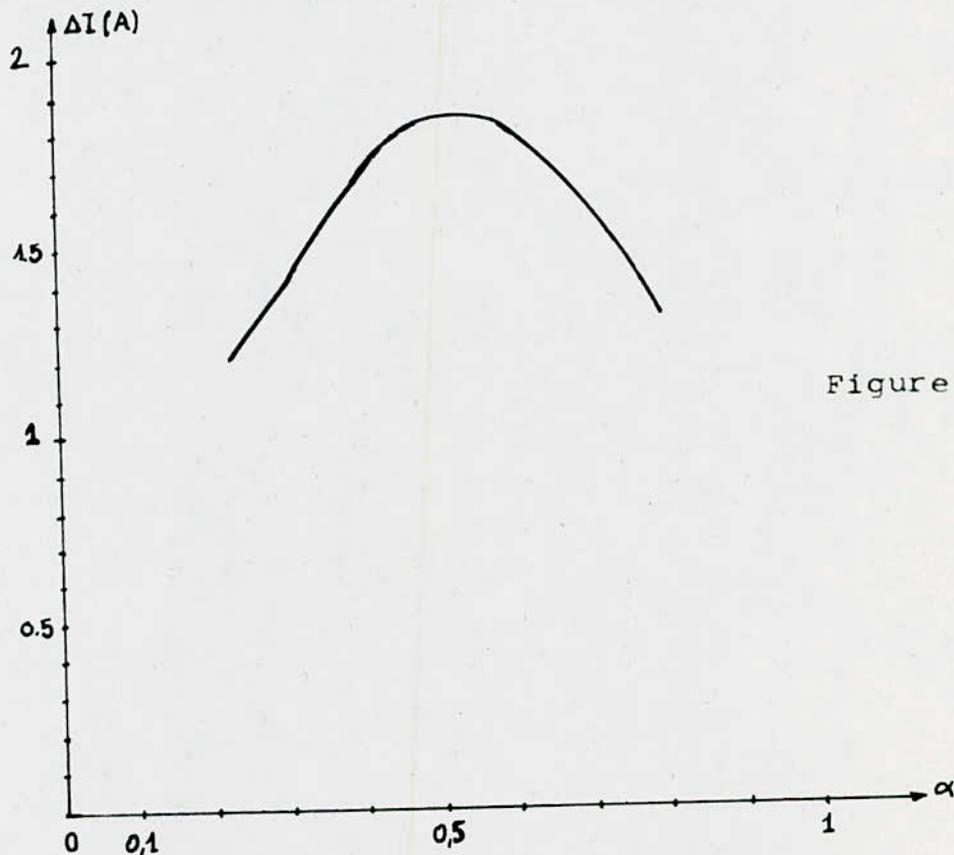


Figure (IV-1)

Influence du rapport cyclique sur l'ondulation du courant

Cette courbe (figure (IV.1)) permet de constater :

Quand le rapport cyclique α augmente l'ondulation du courant augmente d'abord jusqu'à atteindre un maximum qui se situe au voisinage de $\alpha = 0,5$, puis diminue pour les valeurs de α situées au delà de $\alpha = 0,5$ ($0,5 < \alpha \leq 1$)

La forme de cette courbe est de type parabolique .

4-1.2 Influence de la fréquence de hachage sur l'ondulation

du courant :

Les essais sont effectués à rapport cyclique constant,

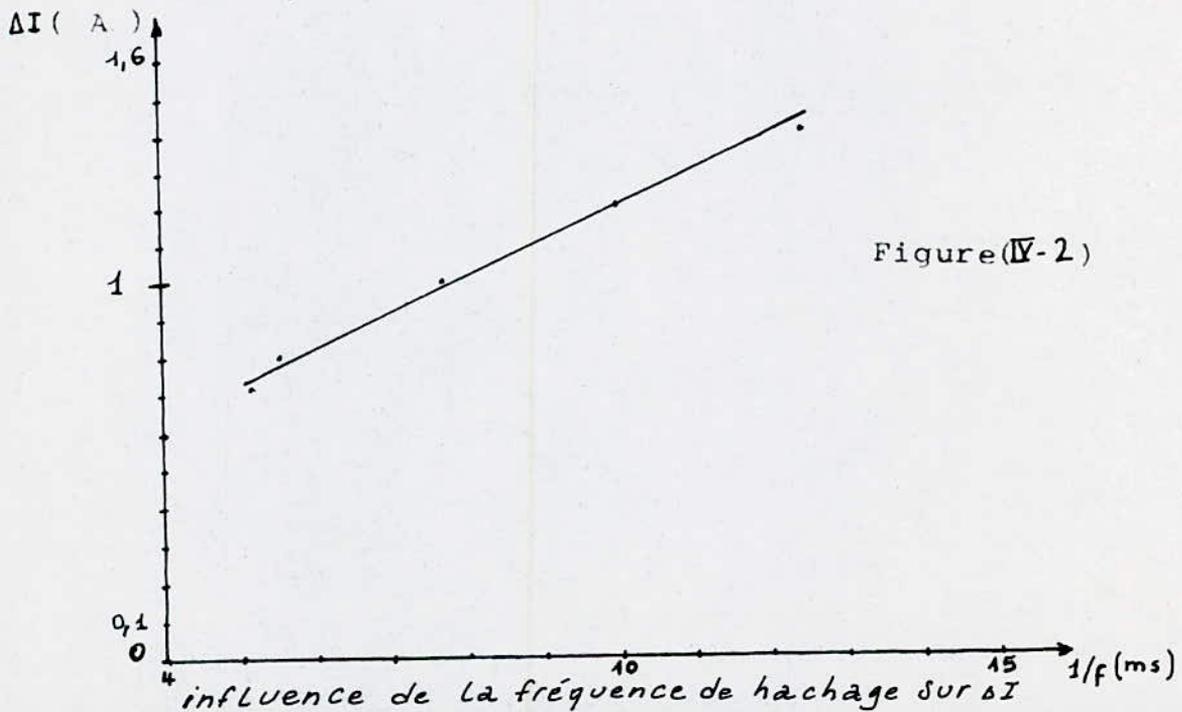
(nous avons pris $\alpha = 0,22$)

Les résultats obtenus sont :

F (Hz)	69	80	100	133	182	200
ΔI (A)	1.4	1.4	1.2	1	0.8	0.7
I_M (A)	2.4	2.6	3.6	4.4	5.4	5.9

avec $\alpha = 0,22$

La courbe représentative des résultats obtenus est donnée par la figure (IV-2)



Le tracé de la courbe ΔI ($1/f$) montre que l'ondulation du courant est quasiment inversement proportionnelle à la fréquence (figure (IV-2))

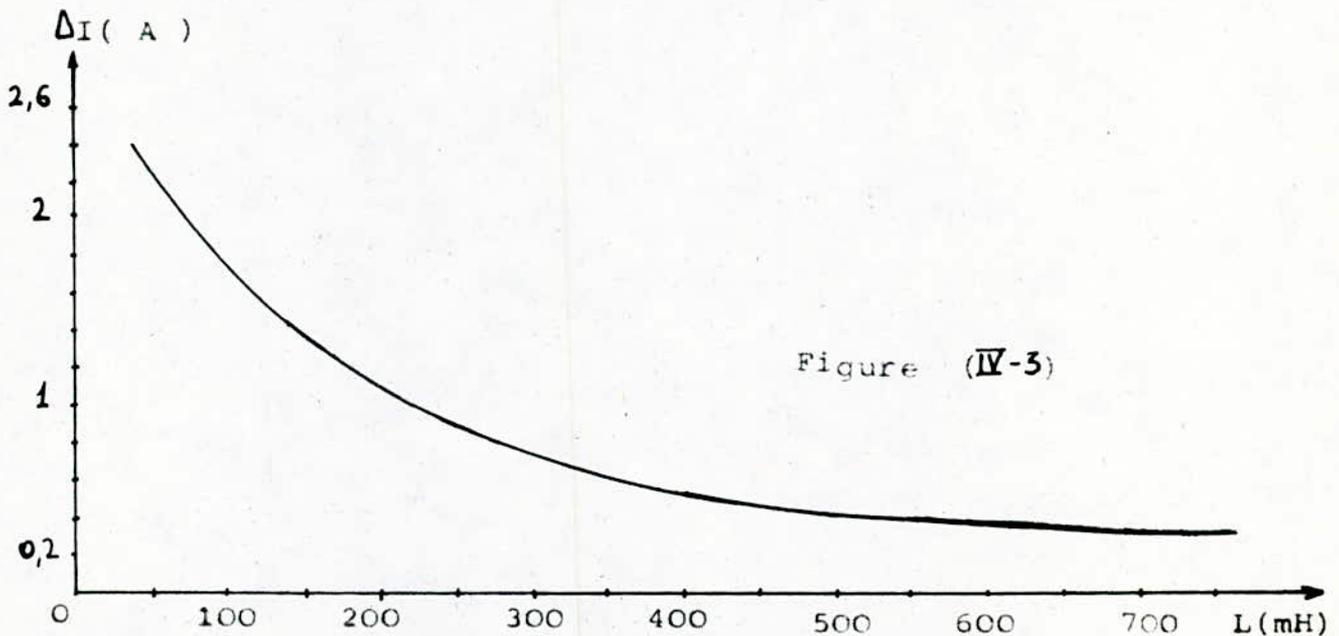
4-1-3 Influence de la self sur l'ondulation du courant :

Nous considérons un rapport cyclique et une fréquence constants (nous avons pris $\alpha = 0,37$ et $f = 74$ Hz)

Les résultats relevés sont les suivants:

L(mH)	40	110	150	210	280	320	420	550	650	760
ΔI (A)	2,4	1,6	1,4	1,1	0,8	0,7	0,5	0,4	0,4	0,4
I_M^* (A)	5,8	5,4	5,4	5,3	5	5	4,9	4,8	4,6	4,4

La courbe représentative est donnée par la figure (IV-3)



Influence de la self sur l'ondulation du courant.

Cette courbe ($\Delta I (L)$) montre que les ondulations sont d'autant plus faibles que l'inductance de la charge est grande. Cette constatation prévisible justifie dans le cas d'autres circuits (moteurs , charge R , L , batterie à charger ,etc) l'incorporation de la self de lissage .

- Conclusions .

Pour réduire l'ondulation du courant dans la charge on doit :

- 1 - réduire la durée relative des intervalles de coupure,
- 2 - augmenter la fréquence de hachage,
- 3 - augmenter la self L (donc la constante de temps $\frac{L}{R}$ de la charge).

Cependant :

Premièrement, l'augmentation de la fréquence de hachage dégrade le rendement du hacheur; deuxièmement, l'augmentation de la self entraîne une augmentation de la constante de temps électrique, donc elle introduit des limites de commande pour les systèmes rapides.

Un compromis doit alors être fait selon l'utilisation (ondulation, rapidité, rendement)

4.2 ESSAIS SUR MOTEUR.

Le schéma de montage est donné par la figure (III.1).

La self de lissage mise en série avec le moteur et la D.R.L,

a pour inductance et résistance respectivement :

$$L_s = 0,28 \text{ H} \quad \text{et} \quad R_s = 2,14 \Omega.$$

Quand on alimente une charge inductive, (passive ou active)

plusieurs modes de fonctionnement peuvent apparaître :

la conduction peut être soit discontinue, soit critique, soit continue.

4.2-1 Conduction discontinue.

En tenant compte de la faible inductance de la charge, le courant est ondulé. A de faibles valeurs moyennes du courant continu il est possible que la valeur instantanée i s'annule avant que le contacteur statique ne soit de nouveau enclenché.

En effet, le courant i ne peut pas devenir négatif parce que la diode (D.R.L) empêche ce courant de circuler dans le sens inverse.

Aussi le régime discontinue du courant apparaît dans certaines étapes du fonctionnement du moteur telle que, par

exemple, dans le cas de freinage pendant une courte durée de fonctionnement pour laquelle le couple résistant est faible.

Dans notre cas nous avons obtenue une forme discontinue pour

une faible valeur moyenne du courant d'induit, et ce en diminuant brusquement le rapport cyclique (figure (e))
 Cette variation provoque une diminution du courant .

Celui-ci passe par un minimum,transitoirement,pour devenir nul dans certains intervalles de temps . la tension aux bornes de la charge est alors égale à la f.c.é.m E' .

La discontinuité disparaît quand le nouveau régime permanent s'établit.

Les allures du courant et de la tension sont représentées sur la figure suivante:

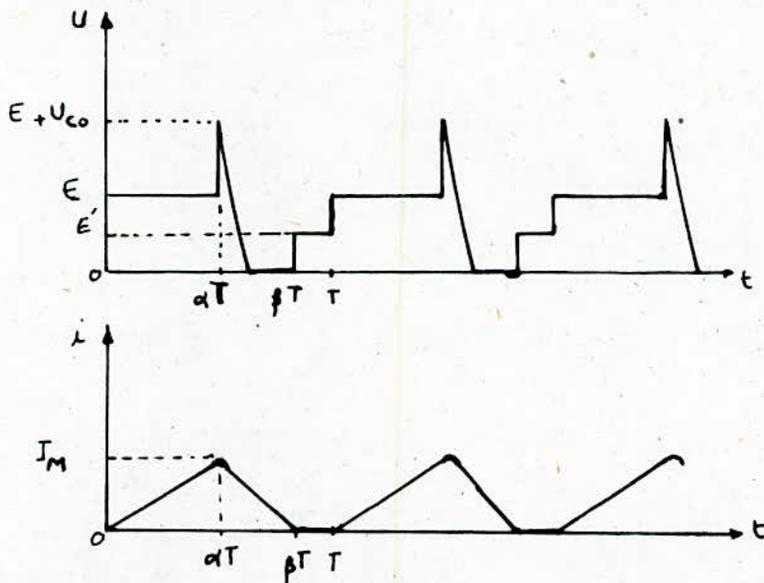


Figure (e)

4.2.2 Conduction continue.

dans tout ce qui suit la conduction est continue.
 Pour optimiser le fonctionnement de l'association " hacheur- moteur ", il est nécessaire d'étudier l'influence de certains paramètres sur l'ondulation du courant, sur la tension moyenne alimentant le moteur et sur sa vitesse de rotation

4.2.2.1 Ondulation du courant.

Il est important d'évaluer

- l'ondulation du courant vu les effets de cette dernière sur le fonctionnement électromécanique du moteur, de même
- l'influence de la charge sur ces ondulations qui peuvent conduire à des surintensités.

Dans ce (dernier) sens , nous avons procédé à deux

- essais: un essai à vide
 un essai en charge

- Influence du rapport cyclique.

- Essais (sur moteur) à vide ($L_s = 0,28 \text{ H}$)

Les résultats suivants sont obtenus à fréquence (paramètre) et inductance de lissage constantes et rapport cyclique variable. Pour chacune des trois valeurs de la fréquence 67 Hz (minimum possible avec la maquette); 100 Hz et 143 Hz nous avons dressé un tableau tel que:

pour $f = 67$ Hz

α	0,13	0,20	0,27	0,3	0,43	0,5	0,67
ΔI (A)	2,20	2,40	2,60	2,60	2,80	2,70	2,10
I_M (A)	3,8	4	4,2	4,4	4,5	4,6	4,8

pour $f = 100$ Hz

α	0,20	0,30	0,43	0,50	0,60	0,70
ΔI (A)	1,80	1,90	2,10	2	1,60	1,30
I_M (A)	3,8	3,9	4,1	4,2	4,2	4,4

pour $f = 143$ Hz

α	0,27	0,32	0,43	0,54	0,71
ΔI (A)	1,30	1,40	1,50	1,30	0,80
I_M (A)	3,8	4	4,1	4,2	4,2

Les courbes correspondantes sont données par la figure (IV-4)

Essais (sur moteur) en charge.

Le moteur entraine une génératrice qui débite sur une résistance. Nous avons travaillé avec les fréquences de hachage 70; 90 et 110 Hz. Les résultats obtenus sont les suivants

α	0,15	0,17	0,23	0,31	0,42	0,55	0,62
ΔI (A)	1,80	1,90	2,20	2,70	3,60	4,20	3,70
I_M (A)	8	8,8	10,4	12	15,2	18,5	19,5

pour $f = 70$ Hz

pour $f = 90 \text{ Hz}$

α	0,18	0,27	0,36	0,46	0,56	0,64	0,68
$\Delta I \text{ (A)}$	1,60	2,00	2,40	3,00	3,40	3,00	2,80
$I_M \text{ (A)}$	8,8	11,6	12,6	17	18	20	21,1

pour $f = 110 \text{ Hz}$

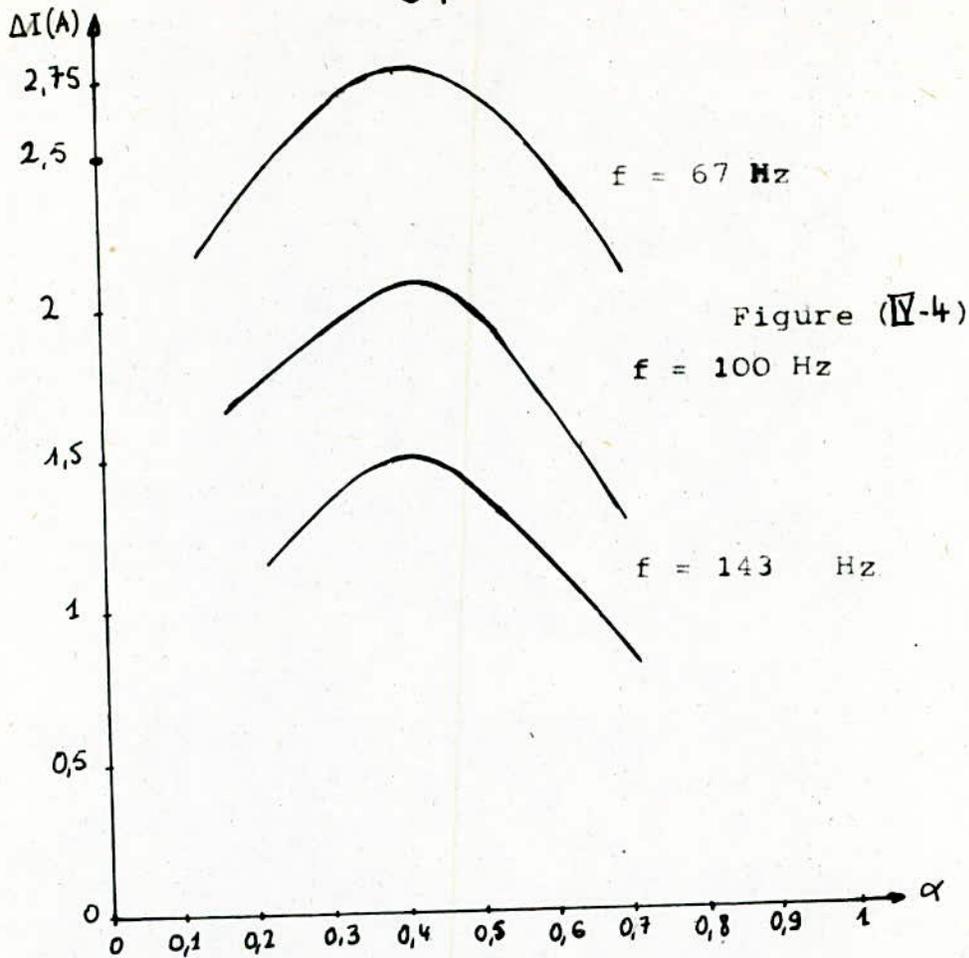
α	0,22	0,28	0,39	0,5	0,56	0,61	0,71
$\Delta I \text{ (A)}$	1,60	1,80	2,20	2,60	2,70	2,60	2,40
$I_M \text{ (A)}$	5,00	11,6	14,8	18,2	19,5	20,5	21

Les courbes représentatives de ces résultats sont sur la figure (IV-5)

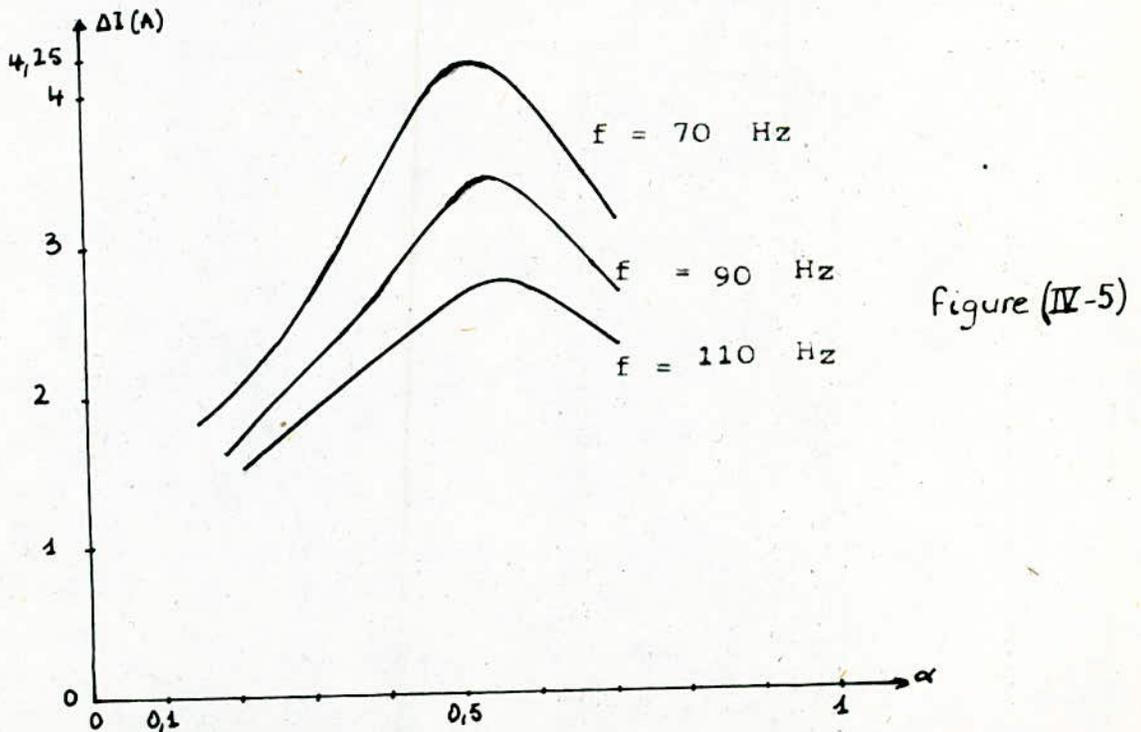
Les courbes obtenues permettent de constater que :

- la variation de l'ondulation du courant avec le rapport cyclique présente un maximum se situant au voisinage de la valeur 0,5 (du rapport cyclique)
- l'amplitude de l'ondulation décroît quand la fréquence de hachage augmente
- cette même ondulation est plus importante en charge qu'en fonctionnement à vide.

54



Influence du rapport cyclique sur l'ondulation du courant.



Influence du rapport cyclique sur l'ondulation du courant

Influence de la fréquence sur l'ondulation du courant.

Nous avons opéré à rapport cyclique (paramètre) et inductance de lissage constants

Essais (sur moteur) à vide ($L_s = 0,28H$)

pour $\alpha = 0,13$

f (Hz)	67	76	80	90	100	125	155	200
ΔI (A)	2,2	2,0	1,9	1,8	1,6	1,3	0,9	0,5
I_M (A)	4	4,2	4,2	4,3	4,2	4,2	4,4	4,5

pour $\alpha = 0,2$

f (Hz)	67	80	90	105	120	150	200
ΔI (A)	2,4	2,1	2,0	1,8	1,5	1,0	0,7
I_M (A)	4,2	4,2	4,2	4,2	4,1	4,1	4,2

pour $\alpha = 0,43$

f (Hz)	67	80	90	105	120	150	200
ΔI (A)	2,8	2,5	2,3	2,0	1,8	1,4	0,8
I_M (A)	4,4	4,3	4,3	4,3	4,2	4,2	4,2

Essais en charge

pour $\alpha = 0,27$

f (Hz)	67	100	125	154	182
ΔI (A)	2,5	1,9	1,8	1,7	1,6
I_M (A)	11	12,3	13,2	14,4	15,2

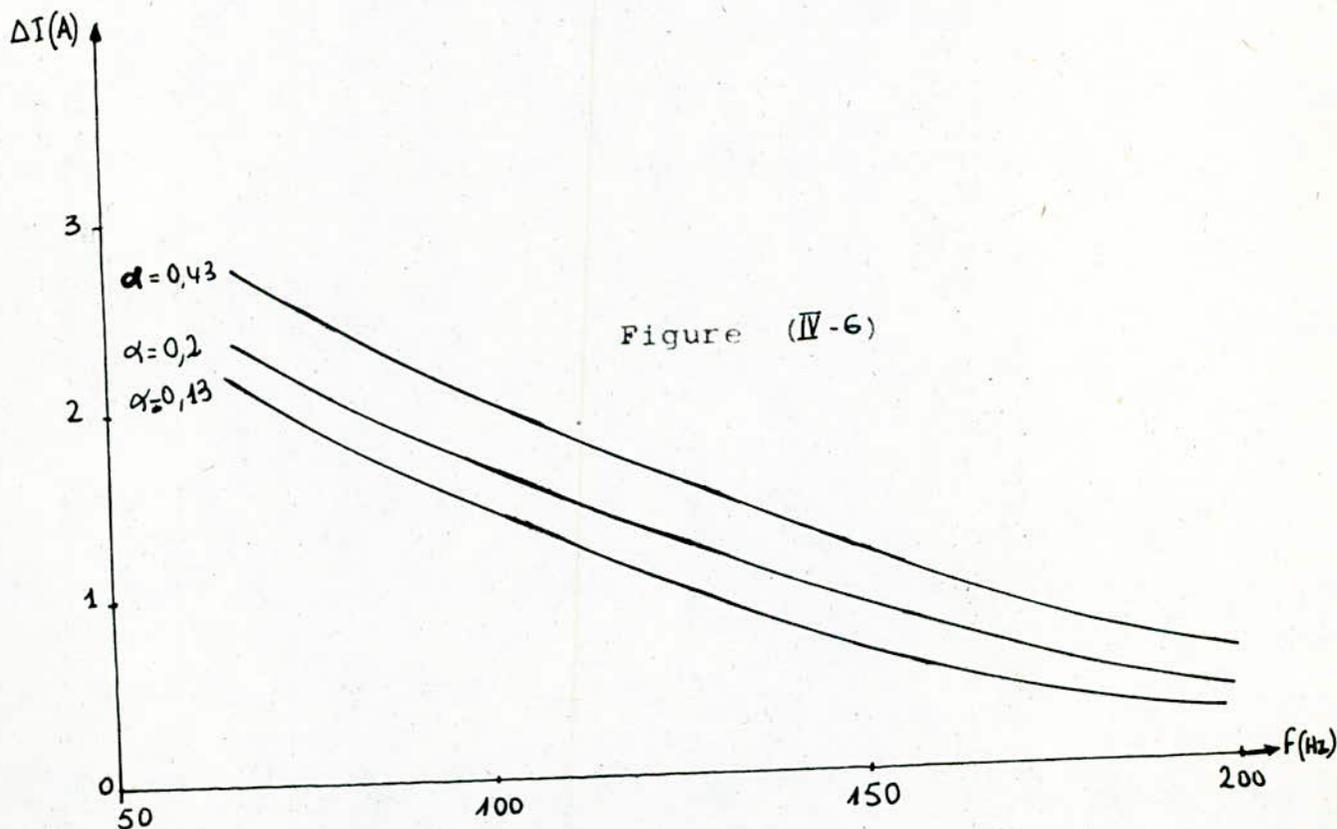
pour $\alpha = 0,33$

F (Hz)	67	83	93	125	148
ΔI (A)	2,9	2,4	2,2	1,9	1,8
I_m (A)	12,9	13	13,6	14,5	15,4

pour $\alpha = 0,4$

F (Hz)	67	74	90	105	125	143	154	190
ΔI (A)	3,4	3,0	2,5	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
I_m (A)	13,8	14,4	14,8	15,2	15,6	16	16,2	16,5

Les courbes correspondantes (à vide et en charge) sont données par les figures (IV-6) et (IV-7)



Influence de la fréquence sur l'ondulation du courant (à vide)

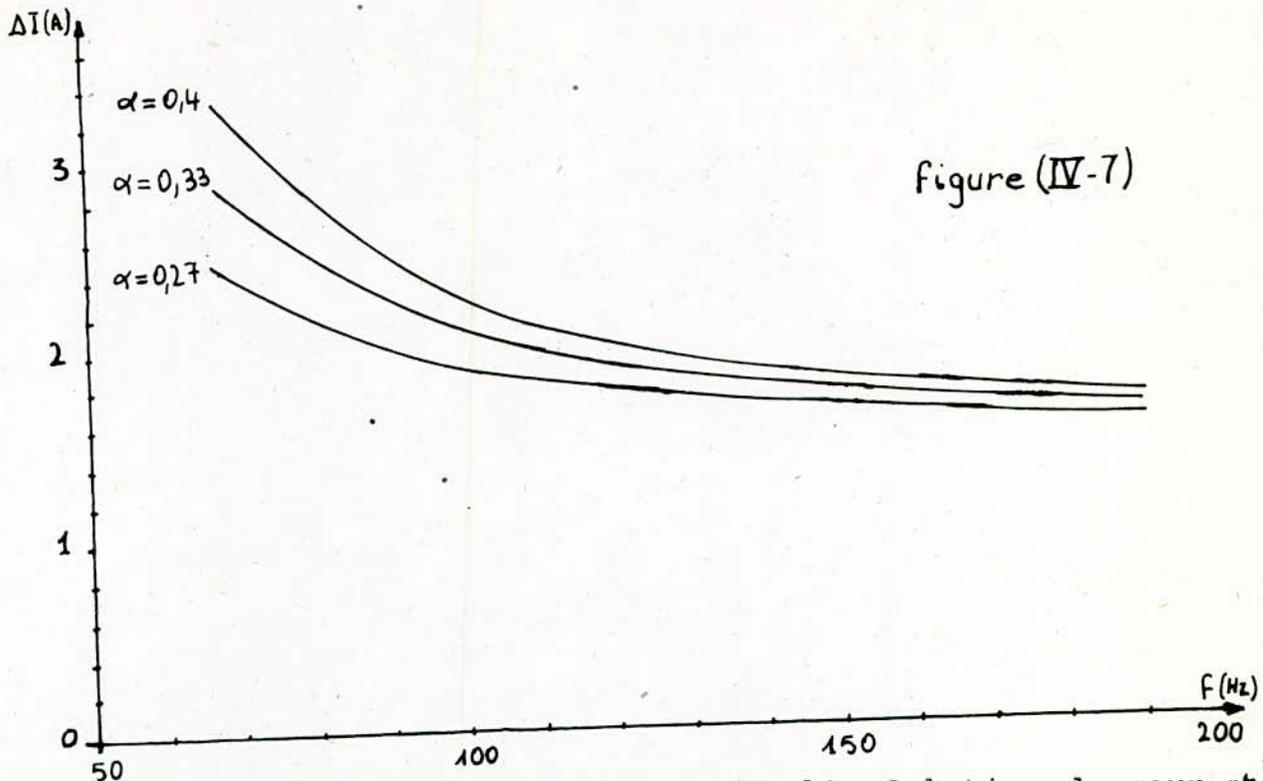


figure (IV-7)

Influence de la fréquence de hachage sur l'ondulation du courant

D'après les courbes représentatives des résultats obtenus expérimentalement on constate que l'ondulation du courant diminue quand la fréquence de hachage augmente.

Conclusion

- En conclusion, pour réduire l'ondulation du courant il faut :
- augmenter la fréquence de hachage, car si elle est trop basse, il faut prévoir une inductance qui peut être lourde onéreuse et encombrante. Cependant, nous ne pouvons augmenter indéfiniment cette fréquence car cette augmentation entrainerait une diminution du rendement du hacheur à cause des pertes dans les semi-conducteurs (même des temps de commutations et de leurs préparation limitent cette fréquence).
 - augmenter l'inductance de lissage dans les limites du possible car elle peut engendrer des pertes.

- réduire les intervalles de coupure.

4.2-2-2 Variation de la tension moyenne

-Influence du rapport cyclique sur la tension moyenne de la charge .

pour $f = 110$ Hz

α	0,22	0,28	0,33	0,39	0,42	0,44	0,5	0,56	0,61	0,67
U_{moy} (V)	29,50	35	40	45	49	52	56	62	67	72

La courbe représentative de ces résultats est donnée par la figure (IV-8)

- Influence de la fréquence sur la tension moyenne de la charge

pour $\alpha = 0,4$

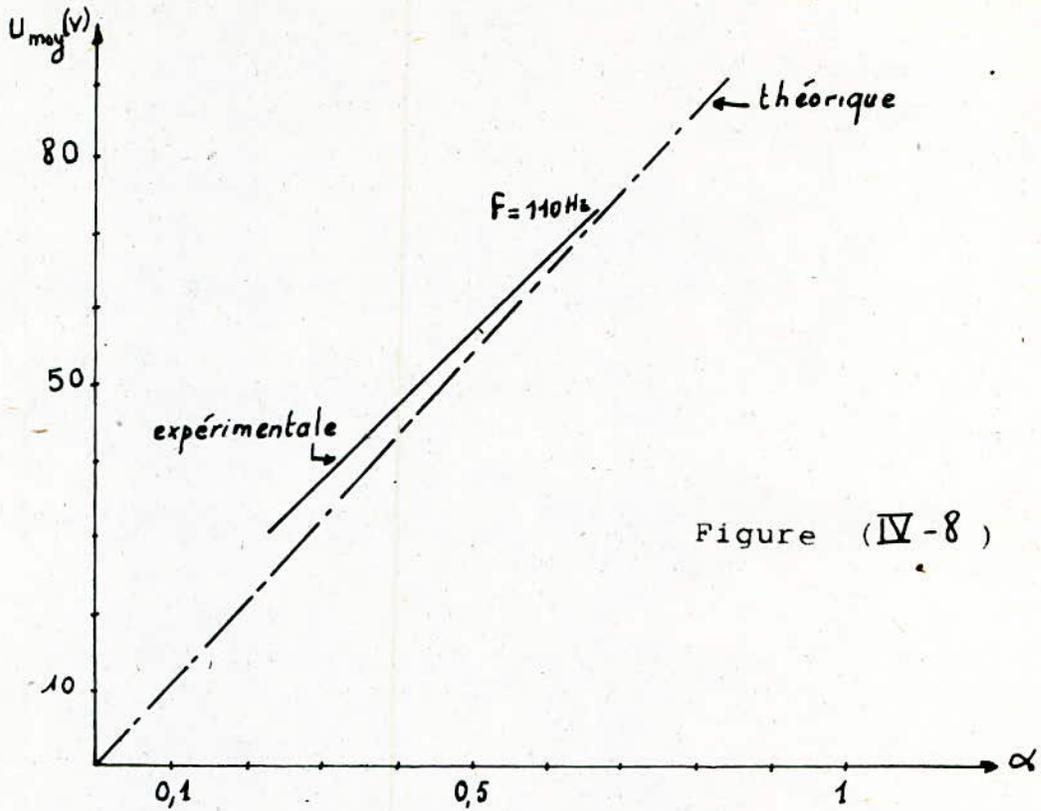
f (Hz)	67	74	90	105	125	143	154	190
U_{moy} (V)	42	44	46	48	50	52	53	56

La courbe représentative de ces relevés est donnée par la figure (IV-9)

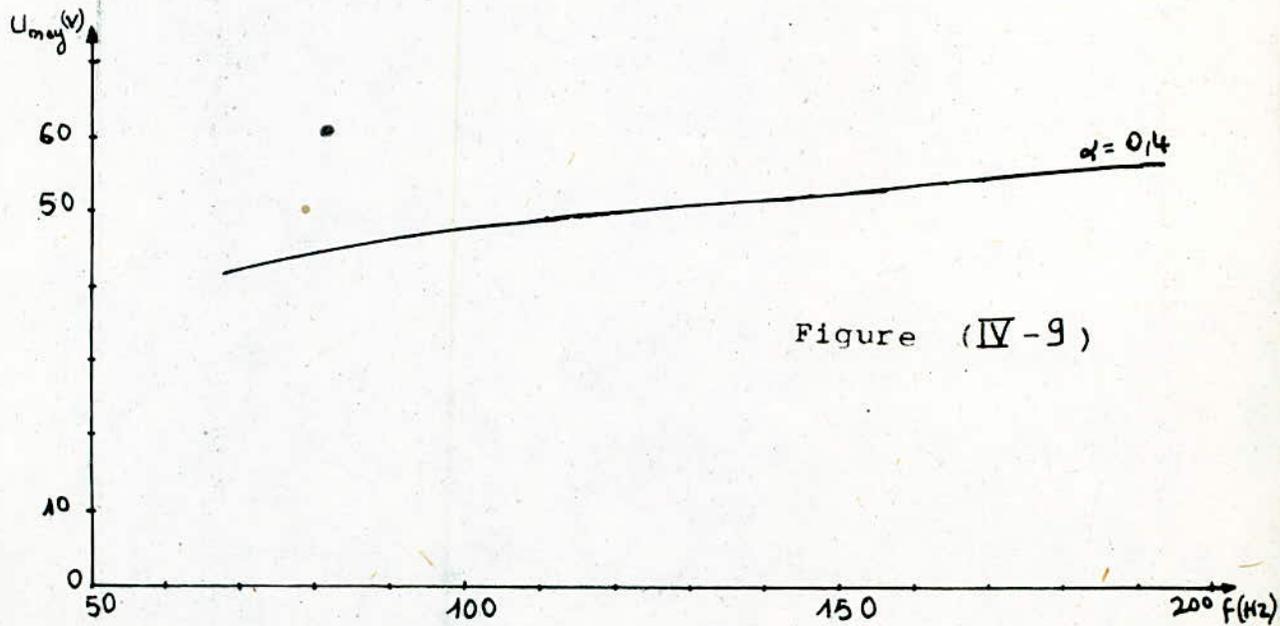
Interprétation

D'après les courbes tracées, la variation de la tension moyenne en fonction du rapport cyclique est une droite. On constate que la valeur de la tension moyenne est légèrement supérieure à $\alpha \cdot E$ et ceci est dû aux phénomènes de la commutation forcée.

La variation de la tension par rapport à la fréquence est faible et devient de plus en plus faible pour les grandes fréquences utilisées.



Influence du rapport cyclique sur la tension moyenne



Influence de la fréquence de hachage sur la tension moyenne

4-2-2-3 Variation du courant

La charge est traversée par un courant ondulé dont la valeur moyenne varie avec la variation de la tension aux bornes de la charge .

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

Influence du rapport cyclique sur le courant moyen.

pour $f = 110 \text{ Hz}$

α	0,22	0,28	0,33	0,39	0,44	0,5	0,56	0,61	0,67
$I_{\text{moy}} \text{ (A)}$	10,40	11,40	12,40	13,40	15	15,80	17,50	18	19

La courbe représentative de ces résultats est donnée par la figure (IV-10)

Influence de la fréquence sur le courant moyen.

pour $\alpha = 0,4$

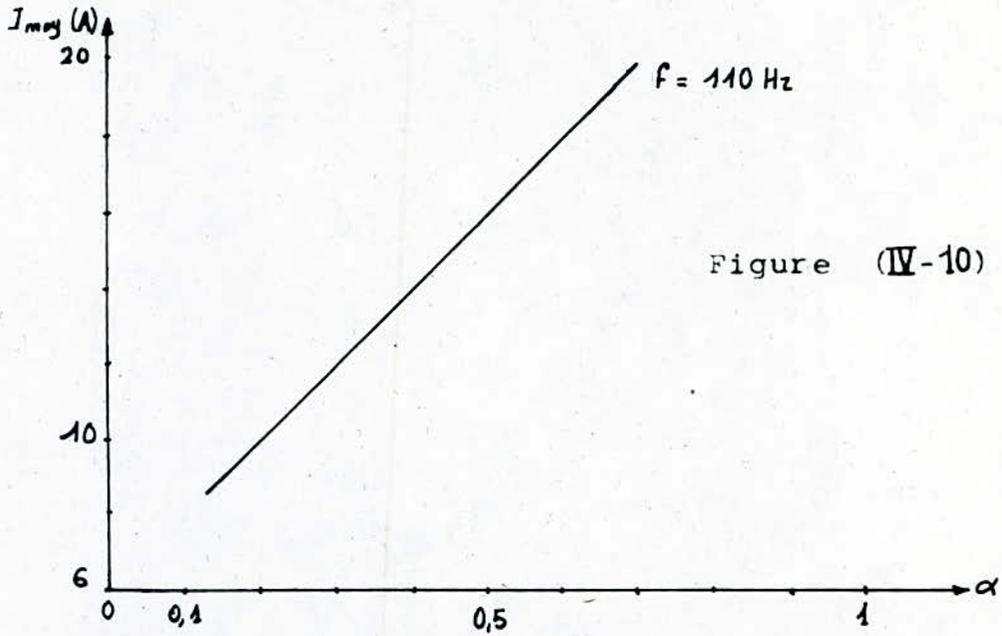
$f \text{ (Hz)}$	67	74	90	105	125	143	154	190
$I_{\text{moy}} \text{ (A)}$	12,20	12,50	13	13,50	14	14,50	15	16

La courbe représentative de ces résultats est donnée par la figure (IV-11)

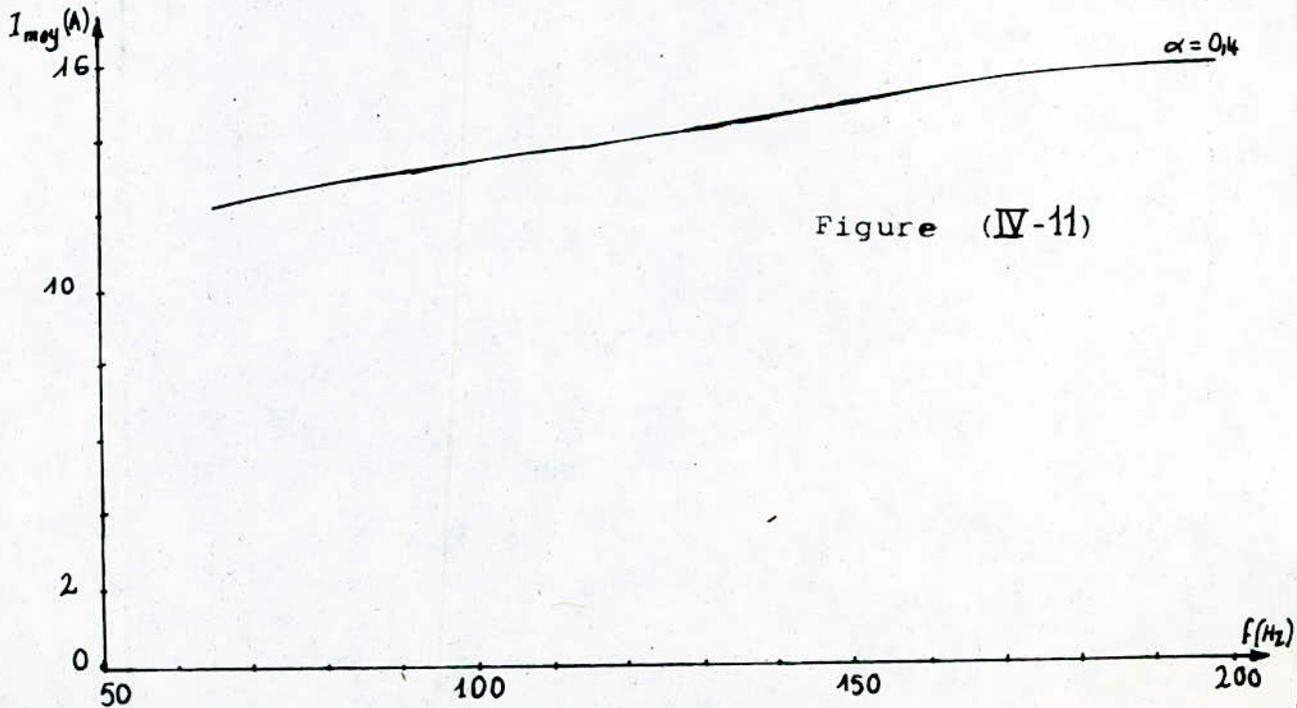
Interprétation

D'après les courbes obtenues la variation du courant moyen en fonction du rapport cyclique est une droite. Sa variation en fonction de la fréquence est faible et devient de plus en plus faible pour les grandes fréquences utilisées. (le courant devient plus lisse)

(voir aussi l'interprétation de l'effet de la fréquence sur la variation la vitesse ϕ plus loin)



Influence du rapport cyclique sur le courant moyen



Influence de la fréquence sur le courant moyen

4-2-2.4 Variation de la vitesse

La variation de la vitesse d'un moteur à courant continu à excitation séparée est obtenue en agissant sur la valeur (moyenne) de la tension d'alimentation.

Dans notre cas, la valeur de cette tension est réglée par l'intermédiaire du rapport cyclique.

Nous pouvons, cependant, voir aussi l'influence de la fréquence de sur la vitesse.

Influence du rapport cyclique sur la vitesse.

pour $f = 67 \text{ Hz}$

α	0,13	0,17	0,20	0,27	0,30	0,37	0,48	0,57	0,60
Ω (tr/mn)	133	158	183	225	243	283	367	408	450

La courbe représentative de ces résultats est donnée par la figure, (IV-12)

Influence de la fréquence sur la vitesse.

pour $\alpha = 0,4$

f (Hz)	67	74	90	105	125	143	154	190
Ω (tr/mn)	290	310	325	335	350	370	375	400

La courbe représentative de ces résultats est donnée par la figure (IV-13)

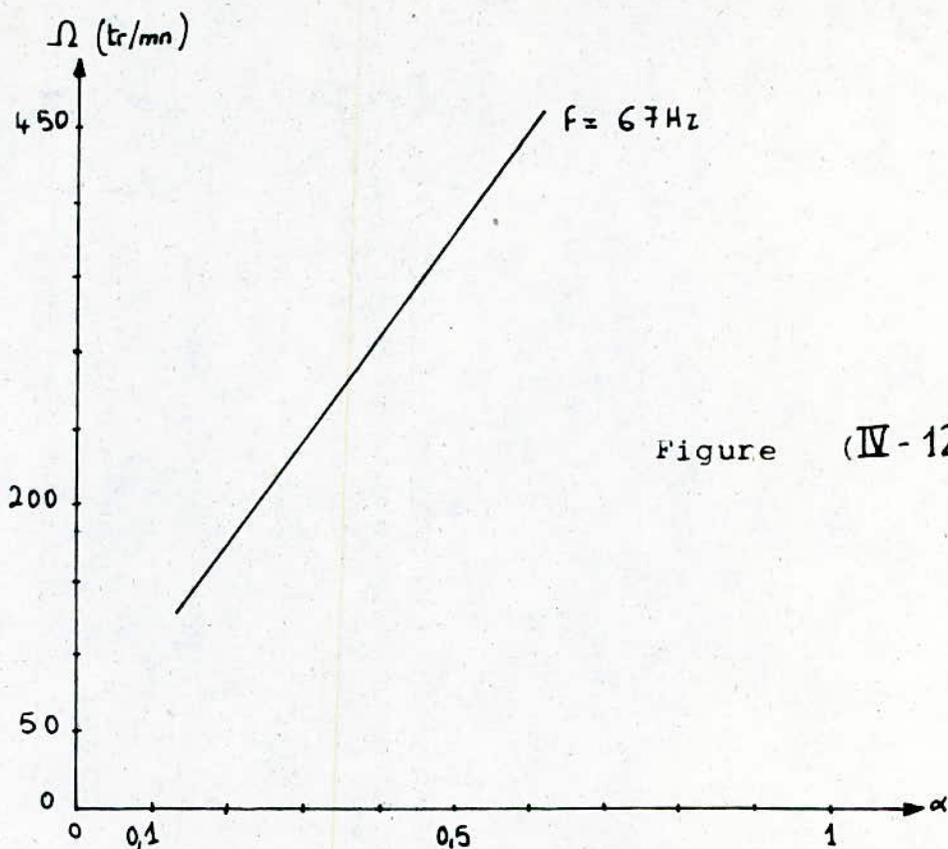


Figure (IV-12)

Influence du rapport cyclique sur la vitesse du moteur

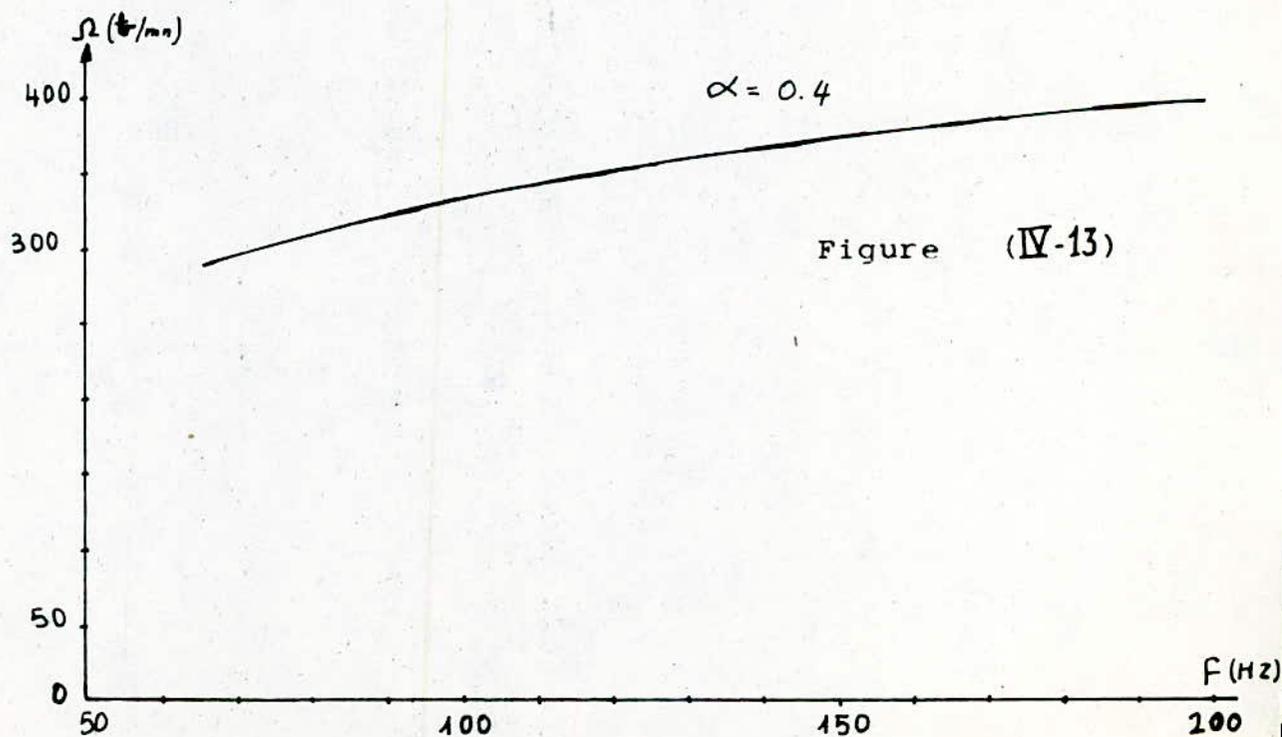


Figure (IV-13)

Influence de la fréquence sur la vitesse du moteur

CONCLUSION GENERALE

Parvenir à une commande d'un moteur à courant continu alimenté par l'intermédiaire d'un hacheur suppose:

- la connaissance du fonctionnement du hacheur associé à une telle charge .Dans ce fonctionnement nous devons déterminer les grandeurs électriques variables afin de pouvoir dimensionner les composants du convertisseur (surintensité; surtension)
- la connaissance du comportement du moteur alimenté par un courant présentant d'éventuelles non négligeables ondulations

Nous avons donc dans une première étape , commencé à étudier le fonctionnement du hacheur alimentant des charges de différents types

L'influence des différents paramètres de fonctionnement (rapport cyclique ; fréquence de hachage ; self de lissage) a été étudiée et une conclusion faite,

un compromis est nécessaire selon le type de charge considérée (intensité du courant et tension moyenne nécessaires)

Les essais expérimentaux de l'association " hacheur-moteur " ont mis en relief le fonctionnement pour différentes valeurs du rapport cyclique et celles de la fréquence de hachage.

L'analyse théorique, utilisant le calcul numérique,

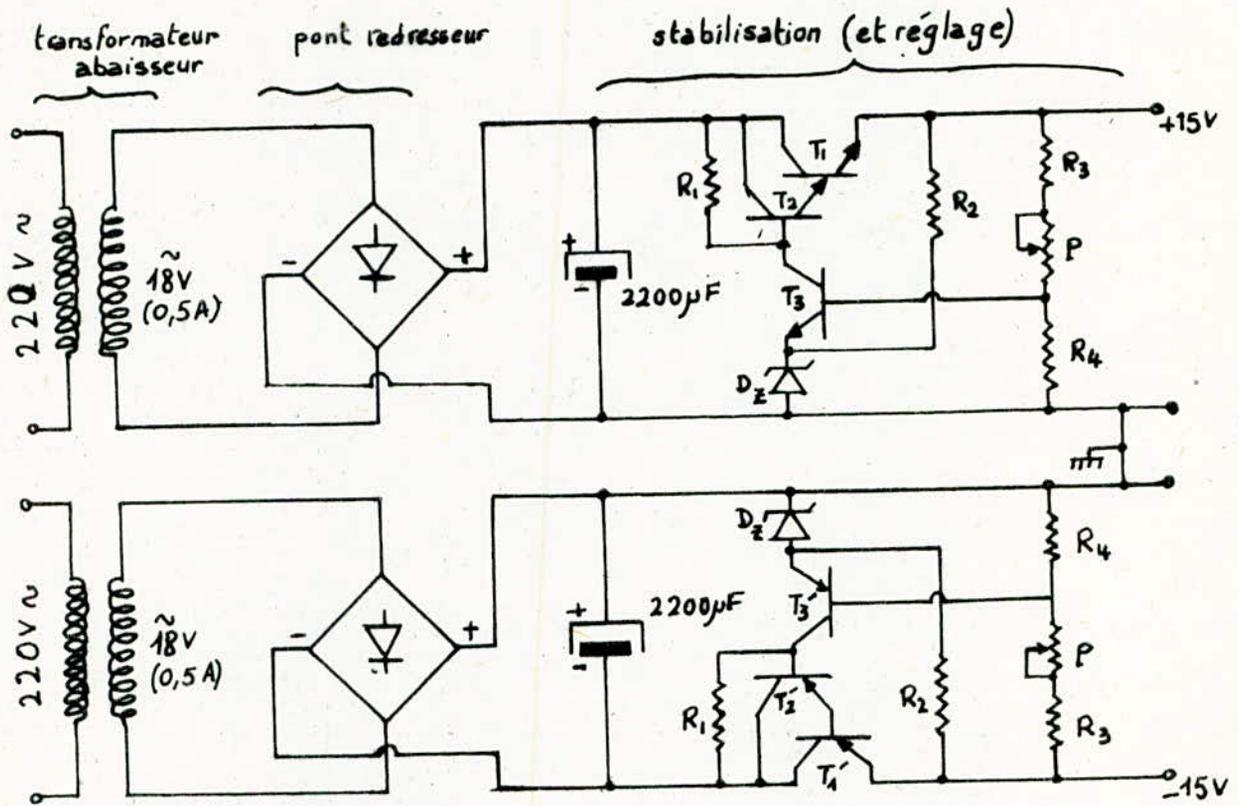
a permis :

- de constater la similitude entre résultats expérimentaux et théoriques et,
- de faire ressortir les ondulations de la vitesse non observables avec le matériel dont nous disposons.

Les études faites sont à compléter par l'introduction de régulateurs (courant et vitesse) que nous suggérons par la continuation de ce sujet.

Ce dernier a permis :

- l'établissement d'un rapport faisant ressortir un certain nombre de résultats permettant de se faire une idée sur la souplesse d'alimentation variable et sur les effets d'une telle alimentation sur le fonctionnement du moteur;
- d'augmenter nos connaissances sur une partie de l'électronique de puissance .



$$D_Z = 5,6V$$

$$R_1, R_2, R_3 = 1,5 k\Omega$$

$$T_1 : 2N 3055$$

$$T_1' : BDX 18$$

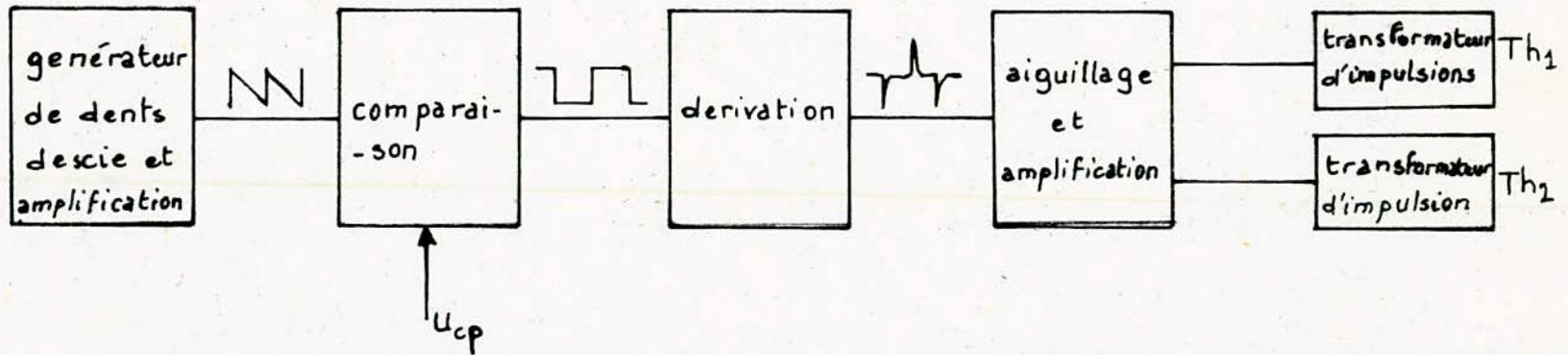
$$R_4 = 1 k\Omega \quad P = 1 k\Omega$$

$$T_2, T_3 : 2N 2222$$

$$T_2', T_3' : 2N 2905$$

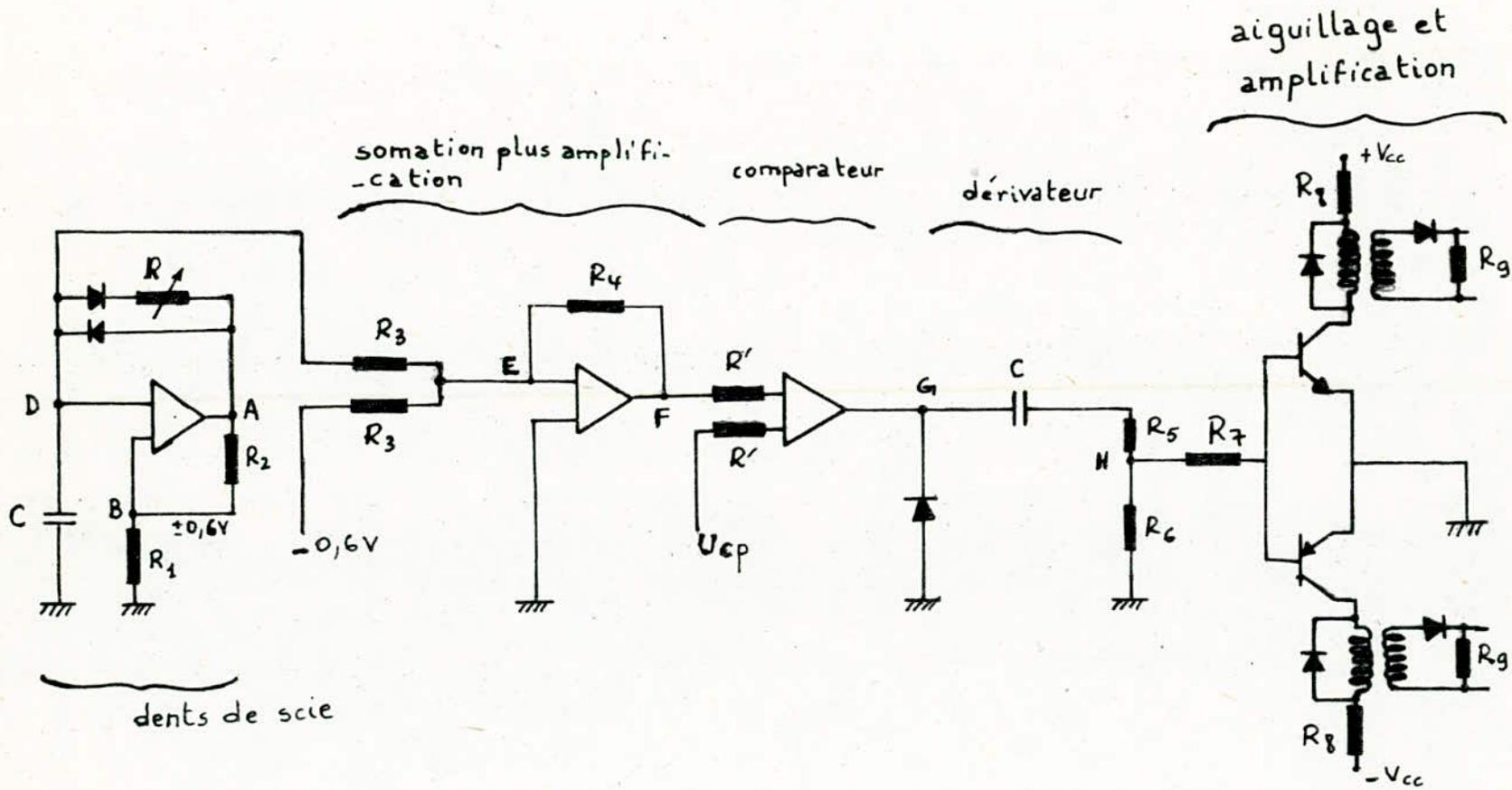
B - GENERATEUR DES SIGNAUX DE COMMANDE

B.1 Synoptique

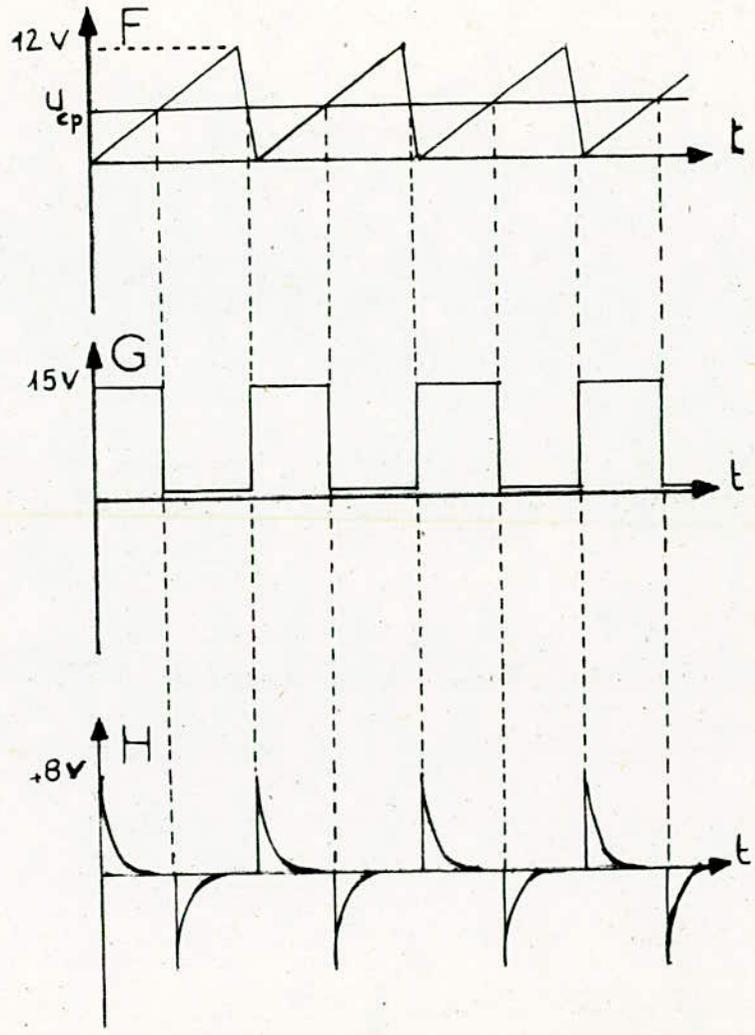
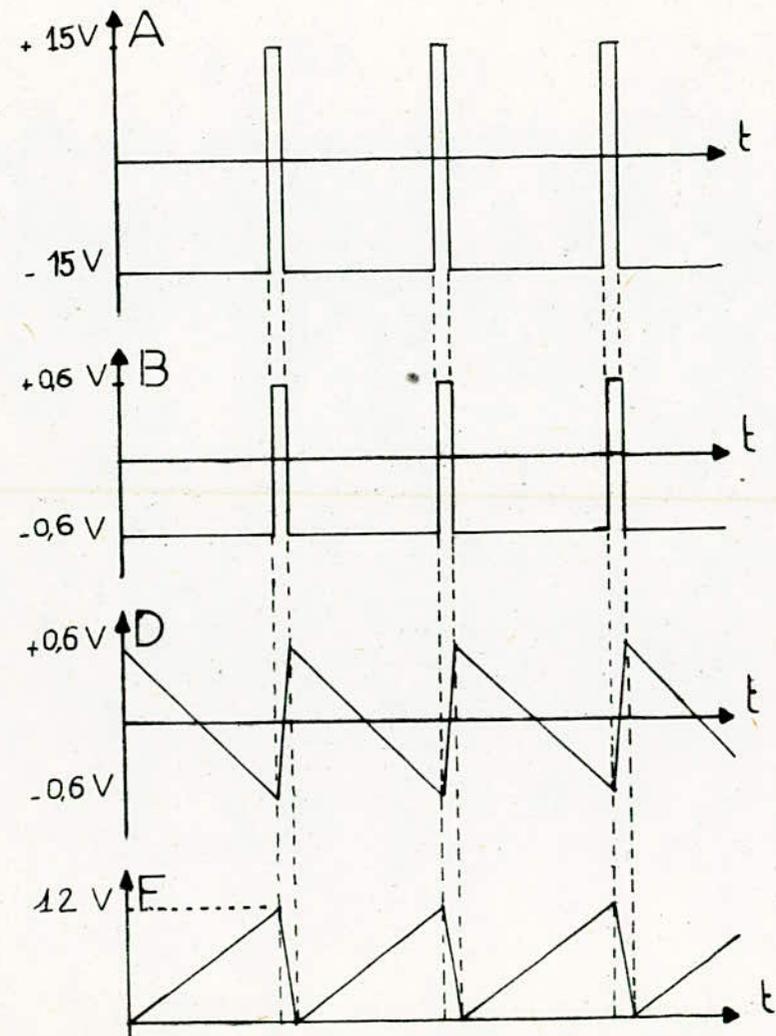


B-2

Schéma du montage



B.3 Signaux



BIBLIOGRAPHIE

1 -H . **BUHLLER**

1-1 Electronique de puissance

par Dunod 1981

1-2 Electronique de réglage et de commande

par Dunod 1979

2 - R. **Chauprade**

Commande électronique des moteurs a courant continu

3 - F. **Milsant**

Diodes thyristors

commande des moteurs

Eyrolles 1985

4 - G; **Seguier**

Electronique de puissance

Dunod

5 - A; **Fouillé**

Electrotechnique à l'usage des ingénieurs

Tome3

Machine à courant continu électronique de puissance

Dunod 1980

6 - **Verbeek (Christian)**

Les fonctions essentielles en commutation

Paris Dunod 1960

7 - P.Roberjot et J.Loubignac

Electrotechnique appliquée

Essais des machines électriques

Paris ,Dunod 1963

8 - Revue E.R.KOHLI

"Anew approach to perfomance analysis of chopper
controlled D.C motor drive "

Electric machines and electroechanics

Nov 1980

9-H.Chekireb

Thèse de magistère

Etude du courant discontinu d'un moteur à courant continu
alimenté par convertisseurs à thyristors.

Soutenue en mars 1986 .

NOTATION

a	-	coefficient d'amortissement (circuit R,L,C) .
α	-	rapport cyclique du hacheur.
C_o (F)		condensateur du filtre.
C (F)	"	" " circuit d'extinction du hacheur.
ΔI (A)		ondulation du courant de la charge.
E (V)		tension d'alimentation du hacheur.
E' (V)		f.c.é.m.
f (Hz)		fréquence de hachage.
f_o (Hz)		fréquence du filtre.
H		hacheur.
K (m-N/A)		coefficient.
K_f (Nm par rad/s)		coefficient de frottement du moteur.
i (A)		courant dans la charge (valeur instantanée).
i_c (A)	"	à travers le condensateur (valeur instantanée).
i_D (A)	"	traversant la D.R.L (" ") .
I_d (A)	"	direct maximum de l'élément semi-conducteur.
i_{Ddem} (A)	"	de démarrage traversant la D.R.L (instantané).
i_{dem} (A)	"	" " " traversant l'induit du moteur.
i_{Dp} (A)	"	pérmant dans la D.R.L (valeur instantanée).
I_g (A)	"	de gâchette des thyristors Th1 et Th2
i_H (A)	"	dans le hacheur (valeur instantanée).
i_{Hdem} (A)	"	de démarrage dans le hacheur (instantané).
i_{Hp} (A)	"	pérmant " " " (" ") .
I_M (A)		valeur maximale du courant i
I_m (A)	"	minimale " " "

I_{mn} (A) courant de maintien des thyristors .
 I_{moy} (A) " moyen dans la charge .
 J (Kg-m²) moment d'inertie du groupe moteur-génératrice
 L (H) inductance de la charge (=L_a + L_s) .
 L_a (H) " de l'induit du moteur .
 L_s (H) " de la self de lissage .
 L_o (H) " du filtre .
 n nombre de cycles (de hachage) .
 R (Ω) résistance de la charge (R = R_a + R_s)
 R_a (Ω) " de l'induit du moteur .
 R_s (Ω) " " la self de lissage .
 T (s) période de hachage .
 t_e (s) temps de conduction du hacheur .
 t_d (s) temps de blocage du hacheur .
 t_{α} (s) temps de désamorçage des thyristors Th_1 et Th_2 .
 U (V) la tension aux bornes de la charge .
 U_c (V) " " " " du condensateur .
 U_{co} (V) " maximale aux bornes du condensateur .
 U_{moy} (V) " "moyenne " " de la charge .
 U_{id} (V) la composante idéale de la tension de la charge (U) .
 U_{com} (V) " " (due à la commutation) de la tension U .
 Γ_e (m.N) couple électromagnétique du moteur .
 Γ_u (m.N) " utile du moteur .
 Ω (rd/s) la vitesse du moteur .
 Ω_{dem} (rd/s) " " " " au démarrage .

- Ω_{Ddem} (rd/s) la vitesse du moteur au démarrage quand la D.R.L conduit.
- Ω_{Dp} (rd/s) la vitesse du moteur au régime permanent quand la D.R.L conduit.
- Ω_{Hp} (rd/s) la vitesse du moteur au régime permanent quand le hacheur conduit.
- Ω_{Hdem} (rd/s) la vitesse du moteur au démarrage quand le hacheur conduit.
- Ω_p (rd /s) la vitesse du moteur au régime permanent.
- ω_0 (rd/s) la pulsation propre du circuit R, L, C.
- ω (rd/s) la pseudo-pulsation " " R, L, C.
- ω_r (rd/s) la pulsation du réseau alternatif.