

3/87

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : ELECTROTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE DU HACHEUR
SÉRIE ET PARALLELE

Proposé par :

A. MAAZI
O. TOUHAMI

Etudié par :

BENHAMA Abdelkrim
BOUZIDI Md. Saïd

Dirigé par :

O. TOUHAMI
A. MAAZI



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : ELECTROTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE DU HACHEUR

SÉRIE ET PARALLELE

Proposé par :

A. MAAZI
O. TOUHAMI

Etudié par :

BENHAMA Abdelkrim
BOUZIDI Md. Saïd

Dirigé par :

O. TOUHAMI
A. MAAZI

Promotion Janvier 1987

TABLE DES MATIERES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Introduction

CHAPITRE I. - Convertisseur continu-continu	1
I.1- Principe de hacheur.....	1
1.1-Réduction d'une tension continue.....	1
1.2-Elévation d'une tension continue.....	3
I.2- Différents procédés de hachage.....	4
I.3- Hacheur à thyristors.....	5
3.1-Hacheur à deux thyristors auxiliaires.....	5
1.1-Description et schéma.....	5
1.2-Dimensionnement de la cellule d'extinction..	7
3.2-Choix de la fréquence de hachage.....	10
CHAPITRE II. - Etude théorique; débit sur une charge à courant continu	12
II.1-Charge à courant continue	12
II.2-Hacheur série.....	12
2.1-Débit sur charge active	12
2.2-Débit sur charge inductive.....	20
2.3-Débit sur charge résistive.....	20
2.4-Influence de la commutation forcée aux bornes de la charge	21
II.3-Hacheur parallèle	22
II.4-Hacheur survolteur.....	25
II.5-Charge ramenée à la source génératrice; schéma équivalent.....	27
5.1-Cas du hacheur série.....	27
5.2-Cas du hacheur survolteur	28
CHAPITRE III. -Etude expérimentale: Essais sur le hacheur..	30
III.1- Essais sur le hacheur série	32
III.2-Essais sur le hacheur survolteur	45

Conclusion .

Introduction:

La mise en forme de l'onde électrique, afin de l'adapter aux besoins, a longtemps été obtenue au moyen de groupes tournants (groupes convertisseurs, moteur synchrone ou asynchrone génératrices à courant continu, commutatrices etc.....).

Les performances actuelles des composants de l'électronique de puissance (Diodes, thyristors, transistors) permettent de réaliser de telles conversions; on supprime ainsi les parties tournantes et on réduit la masse, l'encombrement et le coût de ces matériels. La conversion continu-continu variable est ainsi réalisée par un variateur à courant continu ou hacheur qui peut être à transistors dans le cas des faibles puissances ou à thyristors dans le cas de grandes puissances.

Les hacheurs à thyristors se sont actuellement imposés dans le domaine de la traction électrique à courant continu en raison des nombreux avantages qu'ils présentent, pour l'exploitant; par rapport aux équipements électromécaniques traditionnels.

Le plan adopté pour mener à sa fin ce travail comporte trois chapitres:

Le premier chapitre traite de la conversion continu-continu le second consiste en l'étude théorique du hacheur (débit sur charge à courant continu) et le dernier traite des essais et des résultats expérimentaux.

CONVERTISSEUR CONTINU-CONTINU

1.1/ Principe du hacheur:

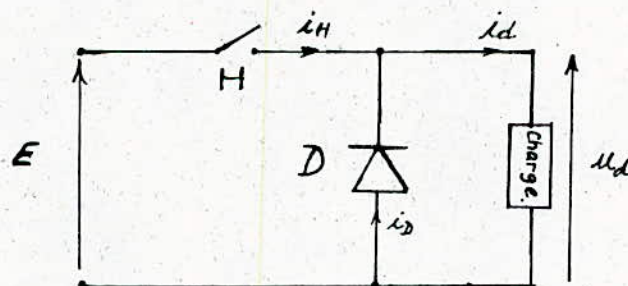
Le hacheur est un équipement qui permet, à partir d'une source de tension continue fixe, d'alimenter une charge à courant continu sous une tension continue et réglable, de la tension nulle à la tension maximale qui peut être la tension d'alimentation. [1]

Le hacheur est, en fait, un interrupteur électronique unidirectionnel permettant, sous l'action d'une grandeur électrique, l'ouverture ou la fermeture d'un circuit électrique de puissance.

Selon que cet interrupteur est placé en série ou en parallèle avec l'utilisation, il permet de fonctionner, respectivement, en abaisseur ou en éleveur de tension.

1.1/ Réduction d'une tension continue; hacheur série:

Le hacheur, symbolisé par un interrupteur H, est placé en série avec la source et la charge, comme représenté à la figure (I.1).



Fig(I.1)

L'interrupteur H est fermé régulièrement à des intervalles de temps égaux à T et reste fermé pendant un temps θ .

On appelle T la période de fonctionnement du hacheur et θ sa durée de conduction.

$\alpha = \frac{\theta}{T}$ est le rapport cyclique; $0 < \alpha < 1$

La charge est ainsi soumise périodiquement à une tension égale à la tension d'alimentation pendant la durée θ et à une tension nulle pendant le reste de la période.

Si la charge est inductive (ce qui est généralement le cas, notamment lorsque la charge est un moteur à courant continu), le courant de charge i_d ne peut être interrompu au temps $t = \theta$ lorsqu'on ouvre H. C'est la raison pour laquelle une diode de roue libre est placée en antiparallèle avec la charge. Elle permet la circulation du courant dans la charge lorsque H est ouvert. [1]

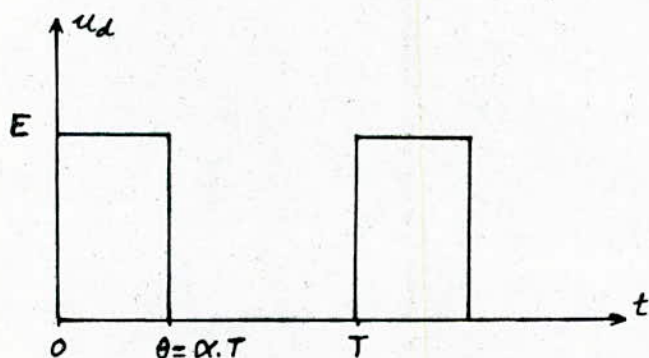
Nous distinguons les deux phases de fonctionnement du hacheur :

- a) $0 < t \leq \theta = \alpha.T$: H fermé. $U_d = E$ et $i_d = i_H$
 b) $\theta < t < T$: H ouvert. $U_d = 0$ et $i_H = 0$

Ainsi la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge vaut : $U_d = \frac{1}{T} \int_0^T u_d \cdot dt = \alpha.E$

C'est cette tension moyenne qui détermine le courant moyen circulant dans la charge : $I_d = \frac{U_d}{R}$ où R est la résistance de la charge. Si cette dernière est un moteur à courant continu, il faut tenir compte de sa force contre-électromotrice. Ainsi, en réglant le rapport cyclique α , on peut contrôler soit la tension moyenne aux bornes de la charge, soit le courant moyen qui la traverse, soit encore un autre paramètre (couple, vitesse).

La figure (I.2) montre la forme d'onde de la tension u_d aux bornes de la charge.



Fig(I.2).

1.2/ Elevation d'une tension continue; hacheur parallèle:

Le schéma de montage est représenté sur la figure (I.3).

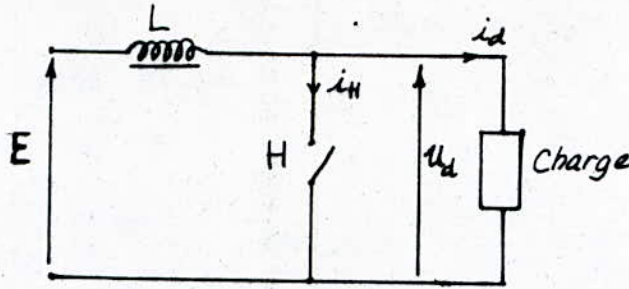


Fig (I.3)

On analyse le fonctionnement de ce convertisseur en supposant la tension aux bornes de la charge constante.

- a) $0 < t \leq \theta$: H fermé. $u_d = U_d = cte$; $u_H = 0$; $i_d = I_d = cte$.
- b) $\theta \leq t < T$: H ouvert. $u_d = u_H = U_d$; $i_d = I_d$.

La forme d'onde de la tension aux bornes du hacheur est re présentée sur la figure (I.4).

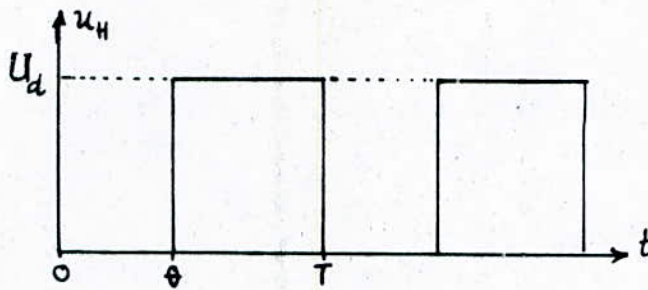


Fig (I.4)

Sa valeur moyenne vaut:

$$U_H = \frac{1}{T} \int_0^T u_H(t) \cdot dt = U_d \cdot (1 - \alpha)$$

La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance L

étant nulle, on peut écrire que: $U_H = E$

Or, d'autre part: $U_H = U_d (1 - \alpha)$

d'où la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge:

$$U_d = E / (1 - \alpha)$$

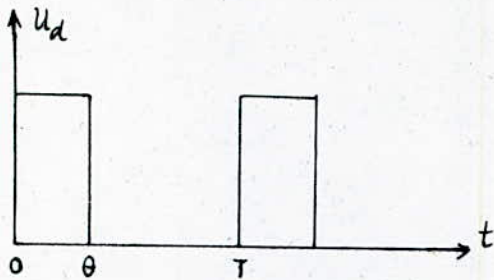
Comme α est un nombre compris entre 0 et 1, U_d est tout le temps supérieure à la tension d'alimentation.

I.2/ Différents procédés de hachage:

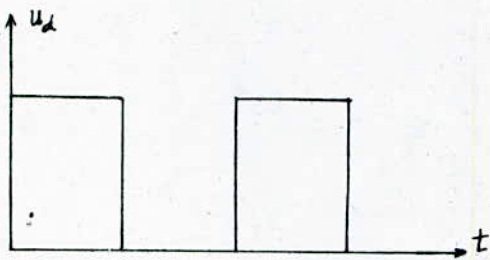
Le hacheur, qui a pour effet de découper la tension continue, fonctionne avec l'un des trois procédés suivants:

- fréquence fixe et durée de conduction variable.
- fréquence variable et durée de conduction fixe.
- fréquence et durée de conduction variables. [5]

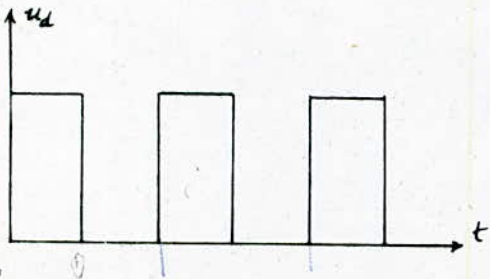
La figure(I.5) illustre les différents modes de hachage, en donnant pour chacun d'eux l'évolution de la tension de sortie.



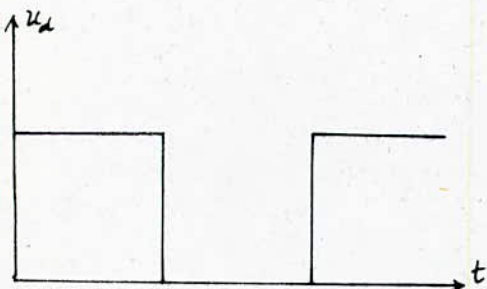
a) Schéma de départ



b) f fixe ; θ variable



c) f variable ; θ fixe



d) f et θ variables

Fig(I.5).

1.3/ Hacheur à thyristors:

L'interrupteur "H" est remplacé par un thyristor qui permet d'assurer l'ouverture ou la fermeture d'un circuit électrique de puissance alimenté par une source de tension continue.

Un thyristor alimenté par une source de tension continue nécessite un circuit auxiliaire pour interrompre sa conduction. C'est précisément ce circuit de désamorçage qui différencie les nombreux schémas de hacheurs à thyristors existants. La différence fondamentale dans les circuits de désamorçage vient du mode de fonctionnement. [2]

On peut distinguer deux types de hacheurs à thyristors:

a) hacheurs à fréquence variable: ils peuvent être réalisés avec un seul thyristor et sont donc plus économiques que les hacheurs à fréquence fixe, toutefois, leur emploi est limité aux faibles puissances. [2]

b) hacheurs à fréquence fixe: la fréquence variable peut se justifier par la simplicité relative du circuit de désamorçage. Mais en dehors de cet aspect, la fréquence fixe est préférable et ceci, du fait que du point de vue de l'asservissement, la fonction de transfert est plus simple et les réactions sur l'alimentation sont plus faciles à maîtriser. [2]

A titre d'exemple de hacheur à fréquence fixe, on citera le hacheur à deux thyristors auxiliaires qui fait l'objet de notre étude.

3.1/ Hacheur à deux thyristors auxiliaires:

3.1.1/ Description et schéma:

La figure (1.6) représente le schéma du hacheur en série avec la charge et la source d'alimentation.

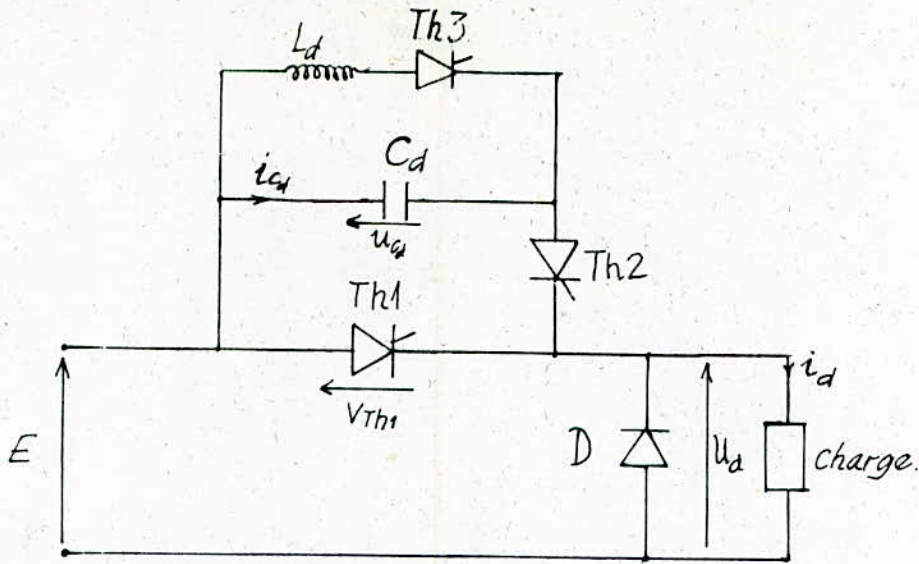


Fig (I.6).

Ce type de hacheur comprend essentiellement le thyristor principal Th1 et la diode de roue libre D.

Le condensateur de désamorçage C_d , l'inductance d'inversion L_d et les thyristors Th2 et Th3 constituent le circuit auxiliaire d'extinction du thyristor principal.

Pour bloquer Th1, il suffit de maintenir ce thyristor sous une tension anode-cathode négative pendant un temps supérieur au temps de désamorçage.

-Description:

On charge la capacité C_d instantanément, sous la tension d'alimentation E, puis on la décharge dans un circuit oscillant peu amorti comportant un thyristor (Th3). Il faut donc charger le condensateur C_d , inverser sa tension et appliquer la tension inversée à Th1. [3]

-Fonctionnement:

A l'état de repos, le condensateur C_d est déchargé; on ne peut allumer Th1 car on ne pourrait plus le bloquer (sauf par la source d'alimentation, ce qui n'est pas désiré). C'est pourquoi la première manoeuvre consiste à allumer Th2.

On amorce le thyristor Th2 à l'instant $t=0$; il en résulte un bref

courant qui provoque la charge de C_d sous la tension d'alimentation E . Dès que C_d est complètement chargé, le courant s'annule et Th_2 s'éteint naturellement. On amorce alors Th_3 , C_d se décharge à travers l'inductance L_d .

L'équation différentielle régissant le circuit oscillant constitué par C_d et L_d pendant le régime transitoire est:

$$u_{cd} + L_d \cdot C_d \cdot \frac{d^2 u_{cd}}{dt^2} = 0$$

Sa solution est: $u_{cd}(t) = E \cdot \cos(\beta_0(t-t_1))$

d'où: $i_{cd}(t) = -E \cdot C_d \cdot \sin(\beta_0(t-t_1))$

$$\text{avec: } \beta_0 = \frac{1}{\sqrt{L_d \cdot C_d}}$$

La tension aux bornes du condensateur C_d s'inverse et devient égale à $-E$ au bout d'un temps $t = \pi \cdot \sqrt{L_d \cdot C_d}$. A cet instant, le thyristor Th_3 se trouve polarisé négativement et s'éteint donc de lui-même.

La tension aux bornes de C_d étant inversée et égale à $-E$, il est alors possible d'amorcer le thyristor principal. Pour le bloquer il suffit d'amorcer Th_2 car la tension à ses bornes (anode-cathode) devient ainsi négative et égale à $-E$, ce qui assure son extinction. En considérant le courant dans la charge constant, on représente les courants et tensions de fonctionnement sur la figure (I.7).

3.1.2/ Dimensionnement de la cellule d'extinction:

a) Temps de protection:

Après l'extinction de Th_1 , il apparaît pendant un certain temps une tension négative entre anode et cathode. Ce temps, désigné par t_f , peut être considéré comme un temps de protection. [6] Comme il apparaît sur la figure (I.7), la tension V_{Th1} entre anode et cathode du thyristor principal à l'état bloqué est égale à la tension U_{cd} du condensateur C_d et cela en vertu du fonctionnement du hacheur décrit précédemment.

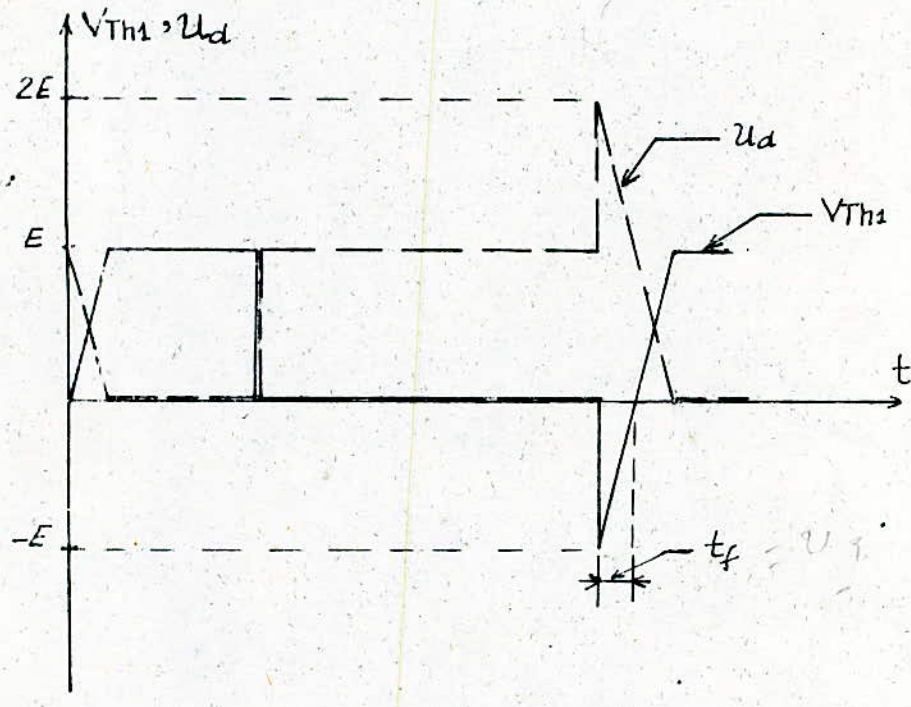
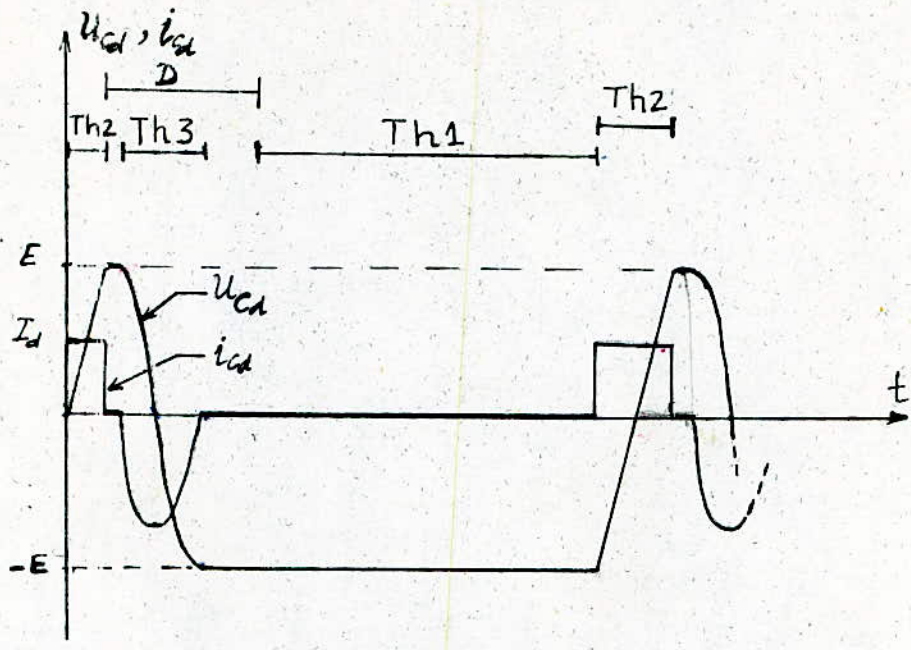


Fig (I.7)

Après l'extinction de Th1, le courant i_d circule à travers le condensateur C_d , le thyristor Th2 et la charge.

Si l'on suppose que i_d est constant, on aura: $i_{cd} = i_d = I_d = Cte$ (pendant la durée de conduction de Th2).

On a alors: $i_{cd} = I_d = C_d \cdot \frac{du_{cd}}{dt}$

d'où: $u_{cd} = \frac{I_d}{C_d} \cdot t' - U_{c0}$ où t' est mesuré à partir de l'extinction de Th1.

On peut alors déterminer le temps de protection t_f en posant:

$$u_{cd} = 0 \text{ à } t' = t_f : t_f = C_d \cdot \frac{U_{c0}}{I_d}$$

t_f doit être plus long que le temps de désamorçage t_q de Th1, afin de garantir un blocage sûr de celui-ci. [6]

Il est judicieux de choisir le temps de protection t_f de 20 à 50% plus élevé que le temps de désamorçage t_q . [6]

b) Dimensionnement du condensateur d'extinction:

Sa capacité C_d doit être dimensionnée de telle manière que le temps de protection minimal t_{fmin} soit garanti pour éteindre le courant continu maximal I_{dmax} : [6]

$$C_d = \frac{I_{dmax} \cdot t_{fmin}}{U_{c0}}$$

où U_{c0} est l'amplitude de la tension aux bornes de C_d .

Remarque: Pour un fonctionnement idéal, $U_{cd} = E$.

c) Dimensionnement de l'inductance d'inversion L_d :

L'inductance L_d détermine le temps $t = \pi \cdot \sqrt{L_d \cdot C_d}$ de la demi-oscillation nécessaire au changement de polarité de la tension u_{cd} aux bornes du condensateur d'extinction lors de l'enclenchement du hacheur.

Pendant cette demi-oscillation, le courant i_{cd} atteint la valeur de crête \hat{I}_{cd} .

Le bilan d'énergie du circuit oscillant donne: $\frac{1}{2} \cdot C_d \cdot U_{c_0}^2 = \frac{1}{2} L_d \cdot \hat{I}_{c_d}^2$

d'où: $\hat{I}_{c_d} = \sqrt{\frac{C_d}{L_d}} \cdot U_{c_0}$

En prescrivant une valeur maximale admissible $\hat{I}_{c_d adm}$ pour le courant de crête afin de limiter le prix du condensateur d'extinction et de Th2, on tire la relation permettant de déterminer

l'inductance L_d : [6]

$$L_d = C_d \cdot \left(\frac{U_{c_0 max}}{I_{c_d adm}} \right)^2$$

3.2/ Choix de la fréquence de hachage:

Le plus souvent, les hacheurs opèrent à fréquence fixe et à rapport cyclique variable. Le choix de la fréquence résulte du meilleur compromis entre le dimensionnement du hacheur et celui des filtres amont et aval. [2]

Pour choisir judicieusement la fréquence de travail, il est nécessaire d'envisager son influence sur le hacheur, sur la charge et sur la source d'alimentation.

a) Influence de la fréquence sur le hacheur:

Dans les semi-conducteurs, les pertes résultent essentiellement de la conduction et des commutations. Augmenter la fréquence revient donc à augmenter ces pertes. De plus, pour les hacheurs à thyristors, un temps minimal est obligatoire pour préparer le circuit d'extinction. [1]

Ces considérations militent en faveur d'une fréquence peu élevée et ceci afin de réduire les pertes dans le hacheur.

D'autre part, une fréquence de hachage élevée réduit la zone d'excursion du rapport cyclique dans la période.

b) Influence de la fréquence sur la charge:

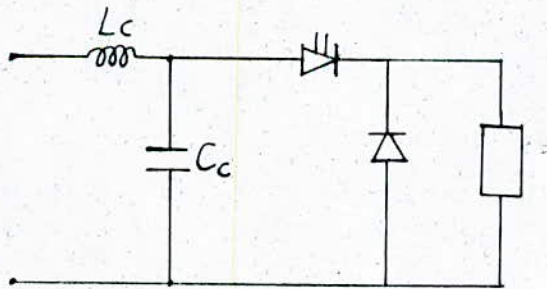
Si on suppose que la constante de temps de la charge est suffisamment grande vis à vis de la période pour assurer un cou-

rant quasi-constant dans la charge, il n'est pas nécessaire d'opérer à fréquence élevée. [1]

Toutefois, lorsque la charge est constituée par un moteur à courant continu, il faut s'assurer que l'ondulation du courant ne dépasse pas ce qui est admissible pour le moteur. L'amplitude de l'ondulation crête à crête du courant dans la charge est d'autant plus grande que la fréquence de hachage est faible et que la self de la charge est petite. Si le hachage s'effectue à trop basse fréquence, il faut prévoir en série avec la charge une self lourde, encombrante et onéreuse.

c) Influence de la fréquence sur la source d'alimentation:

Le courant prélevé à la source est de forme impulsionnelle. Si l'alimentation est une source de tension d'impédance interne négligeable (cas d'une batterie), il est possible de s'en accommoder. Cependant, si l'alimentation comporte une inductance interne non négligeable (cas d'une ligne caténaire, comme dans les réseaux de traction électrique), il devient nécessaire de prévoir entre le hacheur et l'organe de captation, une cellule de filtrage, composée, dans sa forme la plus simple, d'une self L_c et d'un condensateur C_c comme présenté ci-dessous: [2]



Ce filtre aura pour rôle:

- de limiter les surtensions à l'entrée du hacheur.
- de ne pas perturber les autres utilisateurs.
- d'assurer le lissage du courant et le filtrage de la tension de la ligne et celui de la tension à l'entrée du hacheur.

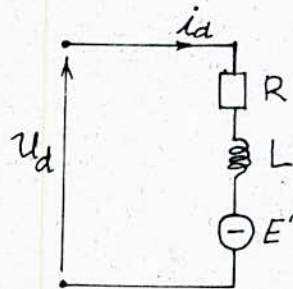
CHAPITRE II/

ETUDE THEORIQUE

DEBIT SUR UNE CHARGE A COURANT CONTINU

II.1/ Charge à courant continu:

Pour les différentes applications des hacheurs, on peut représenter la charge à courant continu par le schéma équivalent illustré sur la figure ci-dessous. [6]

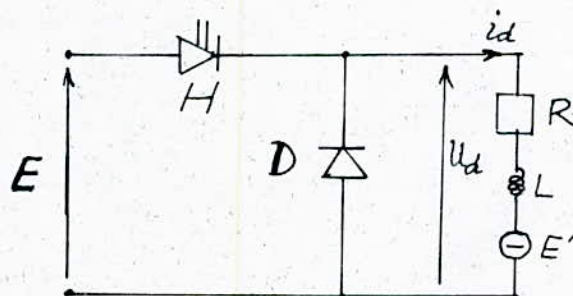


Elle est composée d'une résistance R , d'une inductance L et d'une contre tension continue E' .

N.B: dans tout ce qui suivra, on supposera que la durée de la commutation forcée est nulle ($t_c = 0$). Cette supposition correspond à un contacteur idéal qui permet d'être déclenché rapidement.

II.2/ Hacheur série:

Le schéma de montage est représenté à la figure ci-dessous.



2.1/ Débit sur charge active:

La charge est un moteur à courant continu; R et L représentent respectivement la résistance et l'inductance du circuit d'induit et E' la f.c.e.m. du moteur.

a) Conduction ininterrompue:

Pendant la durée d'enclenchement du hacheur ($0 < t \leq \theta$), on a:

$$\frac{E-E'}{R} = i_d + \tau \cdot \frac{di_d}{dt}$$

où: $\tau = L/R$ est la constante de temps de la charge.

La solution générale de cette équation différentielle est donnée par l'expression suivante:

$$i_d(t) = \frac{E-E'}{R} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) + I_m \cdot e^{-t/\tau} \quad (1)$$

où $I_m = i_d(0)$ est la valeur initiale du courant i_d .

De l'expression (1), on a:

$$i_d(\theta) = I_m = \frac{E-E'}{R} \cdot (1 - e^{-\theta/\tau}) + I_m \cdot e^{-\theta/\tau} \quad (2)$$

Pendant la durée de déclenchement du hacheur, on a:

$$0 \leq t < T: \quad u_d = 0 = E' + R \cdot i_d + L \cdot \frac{di_d}{dt}$$

La solution de cette équation différentielle est donnée par:

$$i_d(t) = -\frac{E'}{R} \cdot (1 - e^{-(t-\theta)/\tau}) + I_m \cdot e^{-(t-\theta)/\tau} \quad (3)$$

Pour le régime permanent, il faut qu'à l'instant $t=T$, i_d soit égal de nouveau à I_m .

De l'expression (3), on aura:

$$i_d(T) = I_m = -\frac{E'}{R} \cdot (1 - e^{-(T-\theta)/\tau}) + I_m \cdot e^{-(T-\theta)/\tau} \quad (4)$$

Des expressions (2) et (4), il vient:

$$I_m = \frac{E}{R} \cdot \frac{(1 - e^{-\theta/\tau}) \cdot e^{-(T-\theta)/\tau}}{(1 - e^{-T/\tau})} - \frac{E'}{R} \quad \text{et} \quad I_m = \frac{E}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\theta/\tau}}{1 - e^{-T/\tau}} - \frac{E'}{R} \quad (5) \text{ et } (6)$$

L'allure du courant i_d se composera de secteurs exponentiels et évoluera entre une limite inférieure I_m et une limite supérieure I_m .

La figure(II.1) représente les allures des courants i_d , i_a et i_D respectivement dans la charge, à l'entrée du hacheur et dans la diode de roue libre, ainsi que l'allure de la tension aux bornes de la charge.

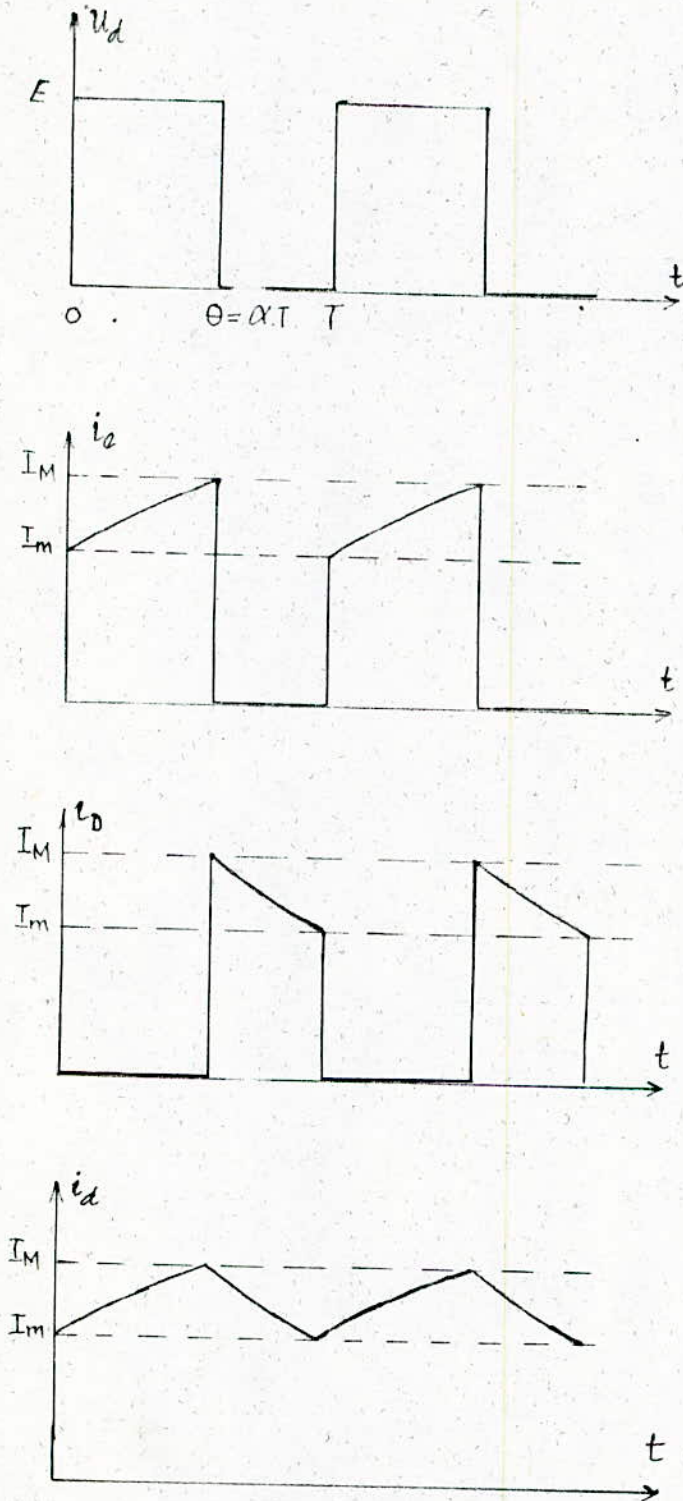


Fig (II.1)

* La valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge est:

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^T u_d \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^{\theta = \alpha T} E \cdot dt = \alpha \cdot E$$

* La valeur moyenne du courant dans la charge est:

$$I_d = \frac{1}{R} (\alpha \cdot E - E')$$

Remarque: L'inductance de charge finie n'a pas d'influence sur la valeur moyenne du courant continu dans la charge, mais ceci n'est valable que sous la condition que le courant i_d ne s'annule pas c'est à dire $I_m > 0$ (conduction continue)

* Ondulation du courant:

Elle est donnée par:

$$\Delta I_d = I_M - I_m$$

Des expressions (5) et (6) donnant les valeurs maximale et minimale du courant i_d , on aura:

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

On remarque, que l'ondulation du courant continu i_d est indépendante de la f.c.e.m du moteur à courant continu (à condition que $I_m > 0$). Elle dépend de la période de hachage T (donc de la fréquence) et de la durée d'enclenchement θ , ainsi que de la constante de temps τ de la charge (donc de son inductance)

L'ondulation est maximale pour $\theta = T/2$ c'est à dire pour un rapport cyclique $\alpha = 0.5$

Pour que l'ondulation ΔI_d reste faible, il faut que la période de fonctionnement T soit très inférieure à la constante de temps τ de la charge.

Pour $\theta = T/2$:
$$\Delta I_d^{\max} = \frac{E}{R} \cdot \frac{1 - e^{-T/2\tau}}{1 + \exp(-T/2\tau)}$$

* Si $\tau \gg T$ On peut approximer $e^{-T/2\tau}$ par $(1 - \frac{T}{2\tau})$

$$\text{d'où: } \Delta I_{d\max} = \frac{E \cdot T}{R \cdot 4\tau} = \frac{E}{4f \cdot L}$$

Ceci correspond au cas où le courant i_d ne s'annule pas
(mode de conduction continu)

On remarque que plus L et f sont grandes, $\Delta I_{d\max}$ est faible.

+ si $\tau \ll T$: conduction discontinue, i_d s'annule c-à-d $I_m = 0$

$$\text{Dans ce cas } e^{-T/2\tau} \rightarrow 0 \text{ et } \Delta I_{d\max} \rightarrow \frac{E}{R}$$

Cette valeur est atteinte pour une charge purement résistive.

La figure (II.2) représente l'ondulation du courant i_d rapportée à E/R en fonction de α , pour divers T/τ

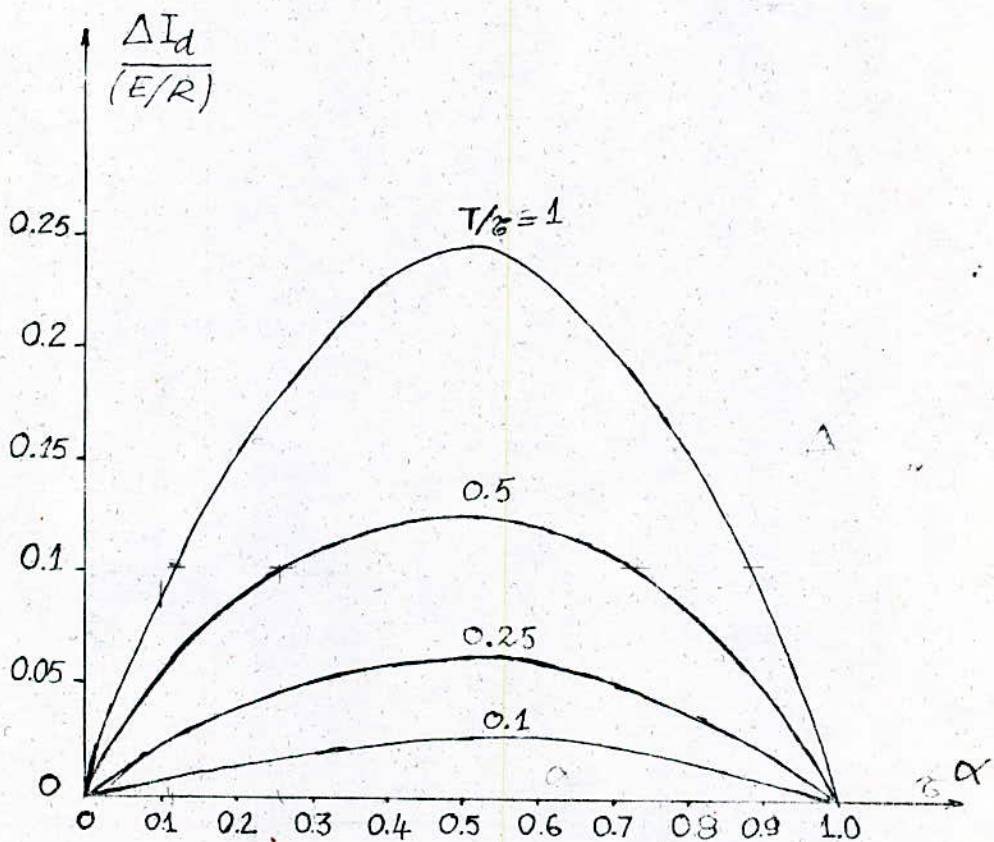


Fig (II. 2)

b) Conduction discontinue:

Il est possible qu'à faibles valeurs du courant, ce dernier s'annule avant que le hacheur ne soit enclenché. [6]

On rencontre ce mode de conduction surtout lorsqu' la charge ne comporte pas une inductance (de lissage) en série avec

l'induit du moteur et que la fréquence de pulsation du hacheur n'est pas assez grande pour assurer la conduction continue.

La condition $\tau = L/R \gg T$ doit être remplie afin que le courant n'ait pas le temps de s'annuler pendant la durée de déclenchement du hacheur.

Les relations établies dans le cas de la conduction continue restent valables si l'on pose à chaque fois $i_d(0) = I_m = 0$

On aura ainsi:

- Pour $0 < t \leq \alpha T$: H enclenché, DRL bloquée

Le courant dans la charge est donné par:

$$i_d(t) = \frac{E - E'}{R} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad \text{Avec: } i(0) = I_m = 0 \quad \text{et } i(\theta) = I_m$$

- Pour $\alpha T < t < \beta T$: H déclenché; DRL conduit

avec $u_d = 0$; $i_d = i_D$; $i_e = 0$

Le courant dans la charge est donnée par:

$$i_d(t) = -\frac{E'}{R} (1 - e^{-(t-\beta T)/\tau})$$

avec: $i(\beta T) = I_m = 0$ et $i(\theta) = I_m$

- Pour $\beta T < t < T$: H déclenché; DRL bloquée

$$i_e = 0; i_D = 0; u_d = E'; i_d = 0.$$

La figure (II.3) représente l'allure des courants i_d , i_m et i_e , ainsi que la tension aux bornes de la charge.

* Calcul de la valeur maximale du courant dans la charge et de β .

$$i_d(\theta) = \frac{E - E'}{R} (1 - e^{-\theta/\tau}) = I_m, \quad \text{ceci à partir}$$

de l'expression de $i_d(t)$ pour $0 < t \leq \alpha T$.

D'autre part, de l'expression de $i_d(t)$ pour $\alpha T < t < \beta T$,

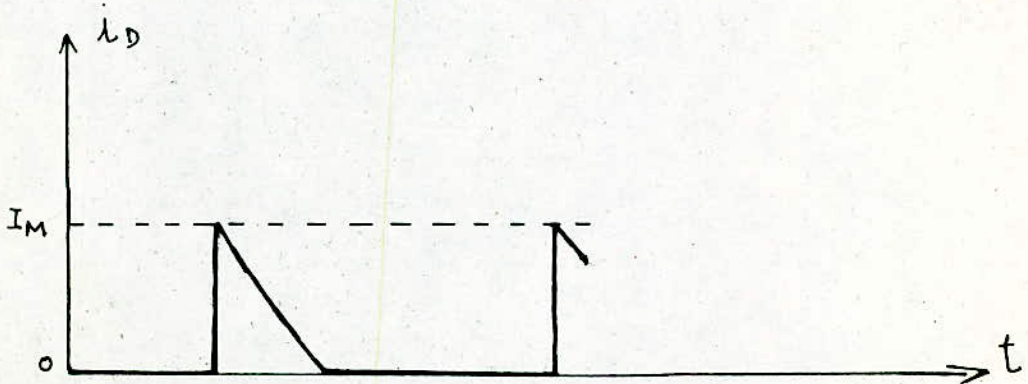
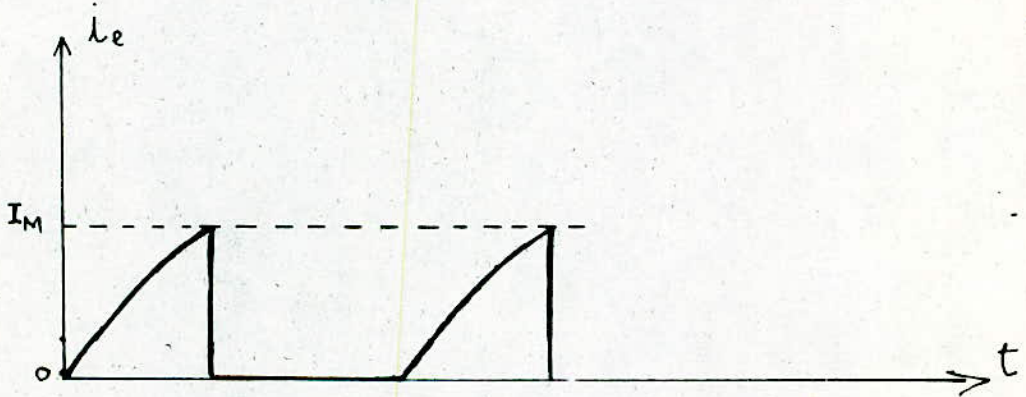
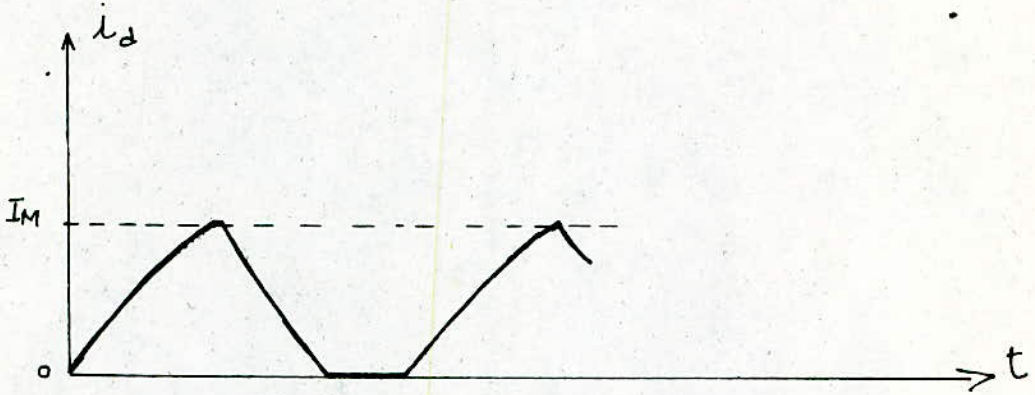
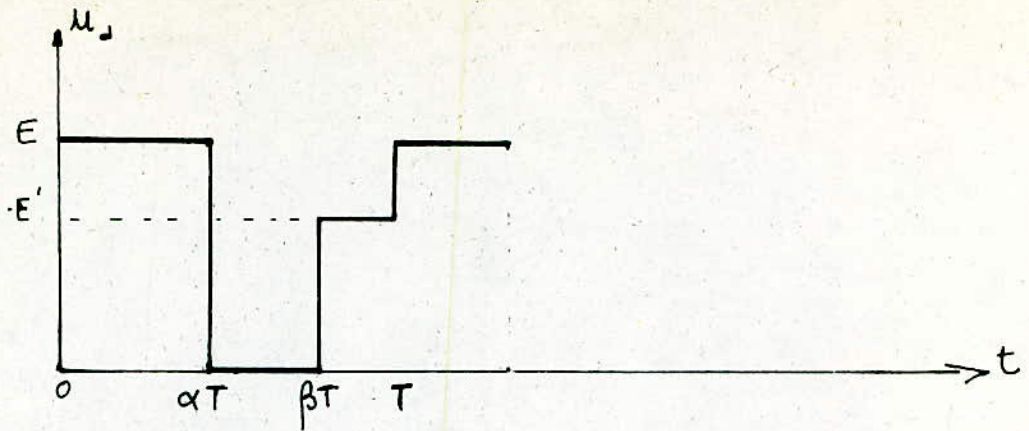


Fig. (II.3)

$$I_M = i_d(\theta) = -\frac{E'}{R} \cdot \left(1 - e^{-(\alpha - \beta) \cdot T/\tau}\right)$$

d'où :

$$\beta = \frac{\tau}{T} \cdot \ln \left(1 + \frac{E}{E'} \cdot \left(e^{\alpha \cdot T/\tau} - 1\right)\right) \quad (7)$$

* L'ondulation crête à crête du courant dans la charge est égale à la valeur maximale de celui-ci

$$\Delta I_d = I_M = \frac{E - E'}{R} \cdot \left(1 - e^{-\alpha \cdot T/\tau}\right)$$

* Calcul des valeurs moyennes de u_d et i_d :

La valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge est donnée par :

$$U_d = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u_d \cdot dt = \frac{1}{T} \left(\int_0^{\alpha \cdot T} E \cdot dt + \int_{\alpha \cdot T}^{\beta \cdot T} 0 \cdot dt + \int_{\beta \cdot T}^T E' \cdot dt \right)$$

Finalement :

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

La valeur moyenne du courant dans la charge est :

$$I_d = \frac{U_d - E'}{R} = \frac{\alpha \cdot E - \beta \cdot E'}{R}$$

- Remarque : Le mode de conduction est :

- Critique pour $\beta = 1$
- Discontinu pour $\beta < 1$
- Continu pour $\beta > 1$

D'après l'expression (7), on voit que β dépend de τ , donc de l'inductance de la charge ; comme la valeur du courant et de la tension moyennes dépendent de β , donc elles dépendent aussi de l'inductance de la charge, contrairement au cas de la conduction continue où la tension et le courant moyens étaient indépendants de l'inductance de la charge.

2.2/Débit sur charge inductive de constantes R et L :

En posant $E' = 0$ dans les expressions du courant et de la tension établies au (1.2), il vient:

* $0 < t \leq \theta$: H enclenché ,

$$i_d(t) = \frac{E}{R} (1 - e^{-t/\tau}) + I_M \cdot e^{-t/\tau}$$

$$u_d = R \cdot i_d + L \cdot \frac{di_d}{dt} = E$$

* $\theta \leq t < T$: H déclenché ,

$$i_d(t) = I_M \cdot e^{-(t-\theta)/\tau}$$

$$u_d = 0$$

Les valeurs maximale et minimale du courant dans la charge sont données par les expressions suivantes:

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

$$\text{et } I_m = i_d(0) = i_d(T) = \frac{E (1 - e^{-\theta/\tau}) \cdot e^{+(\theta-T)/\tau}}{R (1 - e^{-T/\tau})}$$

* Valeurs moyennes de i_d et de u_d :

$$U_d = \alpha \cdot E \quad ; \quad I_d = \frac{U_d}{R} = \frac{\alpha \cdot E}{R}$$

* Ondulation du courant i_d :

L'ondulation crête à crête du courant i_d aura la même expression que dans le cas d'une charge active de f.c.e.m E' et ceci du fait que cette ondulation ne dépend pas de E' .

2.3/Débit sur charge purement résistive de constante R :

Dans les expressions du courant et de la tension, établies au cas (1.2), On pose $E' = 0$ et $\tau = 0$. Il vient:

$$0 < t \leq \theta : \quad u_R = E$$

$$i_R = \frac{u_R}{R} = \frac{E}{R}$$

$$\theta \leq t < T : \quad u_R = 0 \quad \text{et} \quad i_R = 0$$

Expressions des valeurs moyennes du courant et de la tension

$$U = \alpha \cdot E \quad \text{et} \quad I = \frac{\alpha \cdot E}{R}$$

2.4/Influence de la commutation forcée sur la tension aux bornes de la charge.

La commutation forcée provoque, à l'instant de déclenchement du hacheur, une surtension de forme triangulaire sur la tension u_d aux bornes de la charge. On peut ainsi décomposer l'allure de la tension U_d en une composante idéale U_{di} et une composante U_{dc} due à la commutation forcée, comme illustré sur la figure (II.4) [6]

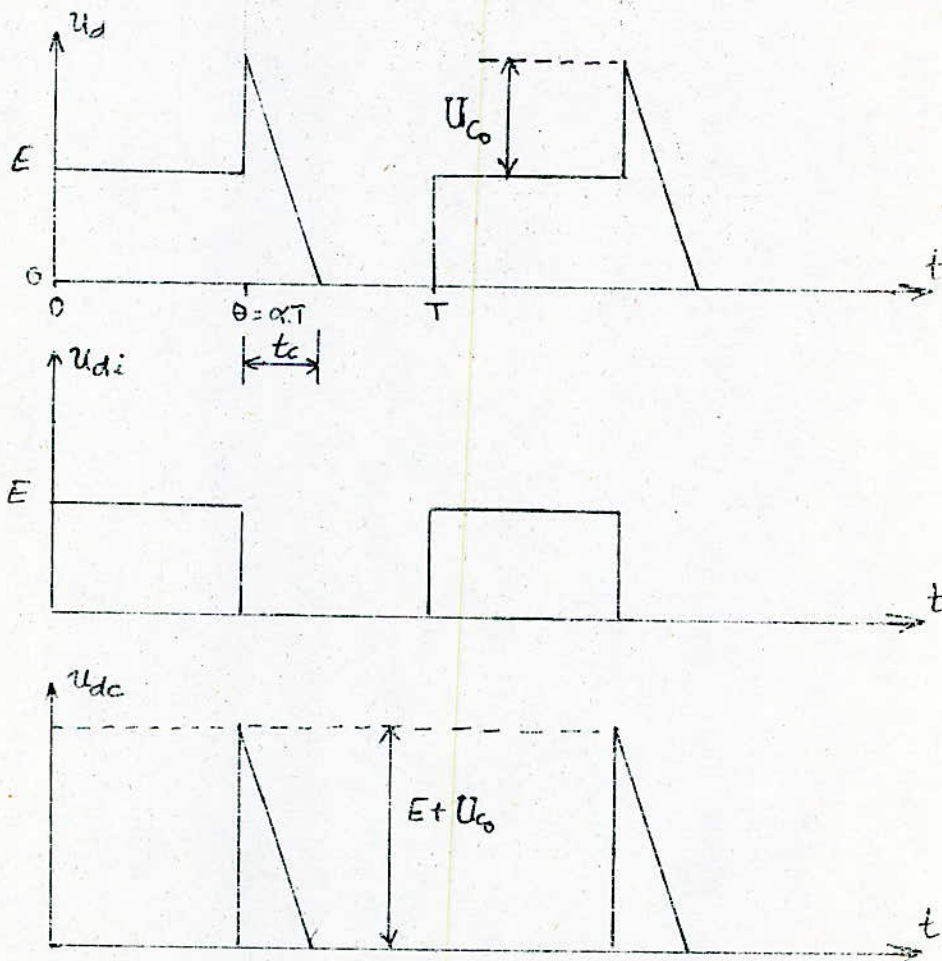


Fig (II.4)

Ainsi pour chaque composante de u_d , on peut déterminer une valeur moyenne :

- U_{di} pour la composante idéale u_{di} avec: $U_{di} = \alpha \cdot E$

- U_{dc} " " " " u_{dc} due à la commutation forcée :

avec:

$$U_{dc} = \frac{t_c}{2T} \cdot (E + U_{co})$$

de telle sorte que: $U_d = U_{di} + U_{dc}$.

On remarque que U_{dc} est proportionnelle à la durée de la commutation forcée (t_c), et à la fréquence de hachage $f = 1/T$.

A fréquence donnée, il importe donc que la durée de la commutation soit assez faible pour réduire U_{dc} .

II.3/ Hacheur parallèle:

Le hacheur est disposé en parallèle aux bornes de la source et de la charge.

Le montage (figure II.5) utilise la propriété des circuits inductifs de produire des f.e.m. élevées à l'ouverture. [7]

On va analyser le fonctionnement de ce convertisseur en ne faisant aucune hypothèse sur la tension aux bornes de la charge.

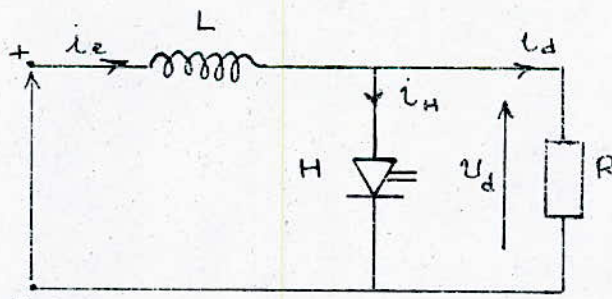


Fig (II.5)

On distingue les deux phases de fonctionnement:

a) H fermé : $0 < t \leq \theta = \alpha T$.

$$u_d = u_H = 0 ; i_d = 0 .$$

$$E - L \frac{di_e}{dt} = 0 ; i_e = i_H$$

d'où : $i_e = i = \frac{E}{L} \cdot t + I_m$; avec $I_m = i_e(0)$

b) H ouvert : $\theta \ll t < T$. $i_e = i_d$; $i_H > 0$; $u_d = u_H$.

Lorsque l'interrupteur s'ouvre, la bobine L est le siège d'une f.e.m. élevée et négative et la tension $(E - L \frac{di_e}{dt})$ devient supérieure à E.

L'équation différentielle régissant le circuit est :

$$E - L \cdot \frac{di_e}{dt} = R \cdot i_d \quad \text{avec : } i_d = i_e$$

Sa solution est : $i_d = i_e = \frac{E}{R} + (I_m - \frac{E}{R}) \cdot e^{-(t-\theta)/\tau}$

où : $I_m = i_d(\theta)$ est la valeur maximale du courant i_d .

$\tau = L/R$ est la constante de temps.

d'où : $u_d = R \cdot i_d = (R \cdot I_m - E) \cdot e^{-(t-\theta)/\tau} + E$.

à $t = T$, le courant i_d prend sa valeur minimale I_m qui, en régime permanent, s'exprime : $I_m = i_d(0) = i_d(T)$.

Les chronogrammes de $i_e(t)$, $i_d(t)$ et de $u_H(t)$ sont représentés à la figure(II.6).

* Valeurs moyennes de u_d et i_d :

La loi des mailles appliquée au circuit de la figure(II.5)

impose : $E = L \cdot \frac{di_e}{dt} + u_d$.

$$\text{d'où : } \frac{1}{T} \int_0^T E \cdot dt = \frac{1}{T} \left[\int_0^T \left(L \cdot \frac{di_e}{dt} + u_d \right) \cdot dt \right]$$

La valeur moyenne de $L \cdot \frac{di_e}{dt}$ est nulle puisque $i_e(t)$ est une

fonction périodique ($i_e(0) = i_e(T)$). Il vient : $U_d = E$.

où U_d est la valeur moyenne de $u_d(t)$.

La valeur moyenne du courant i_d est donnée par : $I_d = \frac{U_d}{R} = \frac{E}{R}$.

* Le résultat ci-dessus montre que la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge est constamment égale à la tension d'alimentation. Le hacheur est alors non surveilleur.

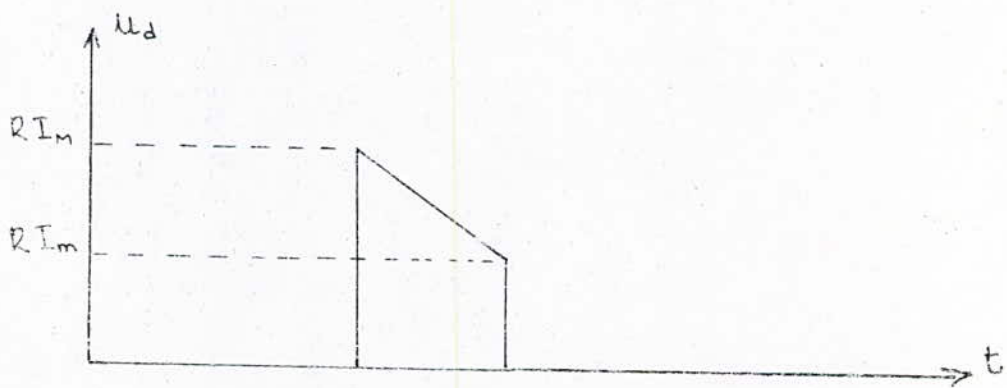
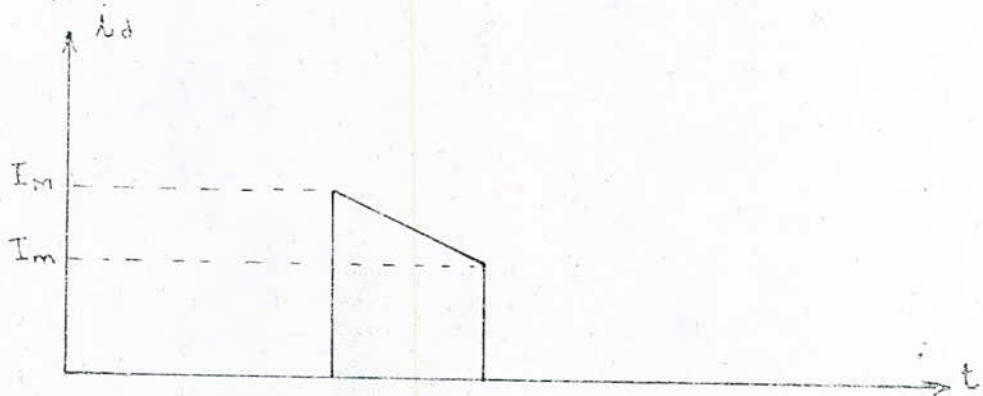
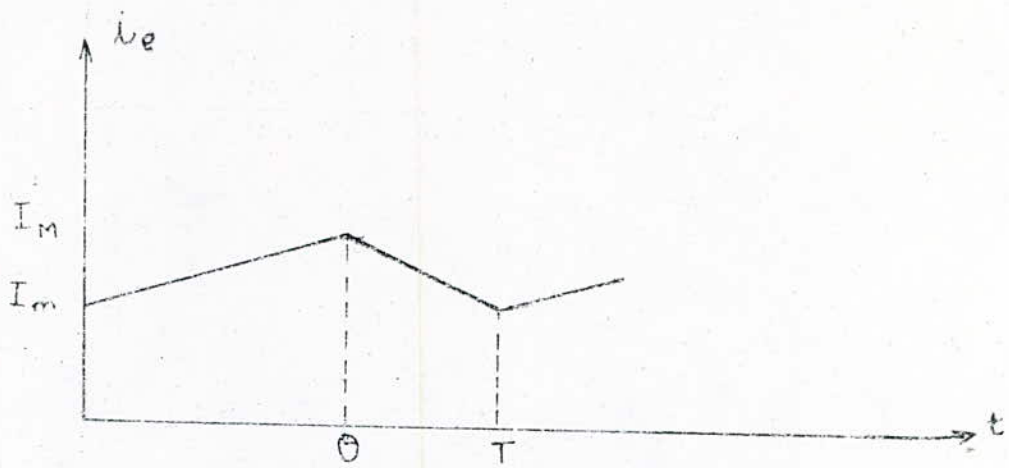


Fig (II.6)

Pour faire fonctionner le hacheur en survolteur, il devient nécessaire de maintenir la tension aux bornes de la charge sensiblement constante. Ceci est réalisé en plaçant en parallèle avec la charge un condensateur de capacité C_T suffisamment grande pour que ce dernier n'ait pas le temps de se décharger dans la charge lors de l'enclenchement du hacheur.

II.4/ Hacheur survolteur; débit sur charge quelconque:

La figure (II.7) illustre le schéma du montage.

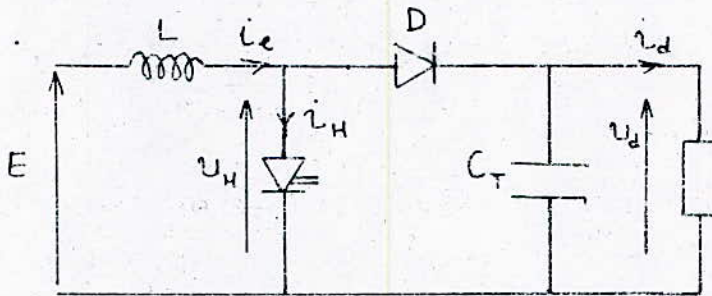


Fig (II.7).

Pour assurer le survoltage du hacheur, la capacité C_T est telle que : $\tau = R.C_T \gg T$.

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

a) $0 < t \ll \theta$, H fermé: $u_H = 0$; $u_d = Cte$; la diode D est bloquée. L'intensité du courant i_d dans la charge est assurée par le condensateur C_T : $i_d = I_d = Cte$.

A l'entrée, on a: $E = L \cdot \frac{di_e}{dt}$.

d'où: $i_e(t) = I_m + \frac{E}{L} \cdot t$ avec: $I_m = i_e(0)$.

b) $\theta \ll t < T$; H ouvert:

La continuité du courant dans la bobine d'inductance L impose la mise en conduction de la diode D ($i_e = i_D$)

d'où: $E = L \cdot \frac{di_e}{dt} + u_d$.

Comme: $u_d = U_d = Cte$, il vient:

$$i_e(t) = I_M + \frac{E - U_d}{L} (t - \theta) \quad \text{où } I_M = i_e(\theta)$$

Au régime établi, $i_e(t)$ doit décroître pour prendre la valeur I_m à l'instant $t=T$; la valeur U_d de u_d est donc supérieure à E .
 D'où les formes d'ondes de $i_e(t)$, $i_D(t)$, $i_H(t)$ et de u_H représentées à la figure(II.8)

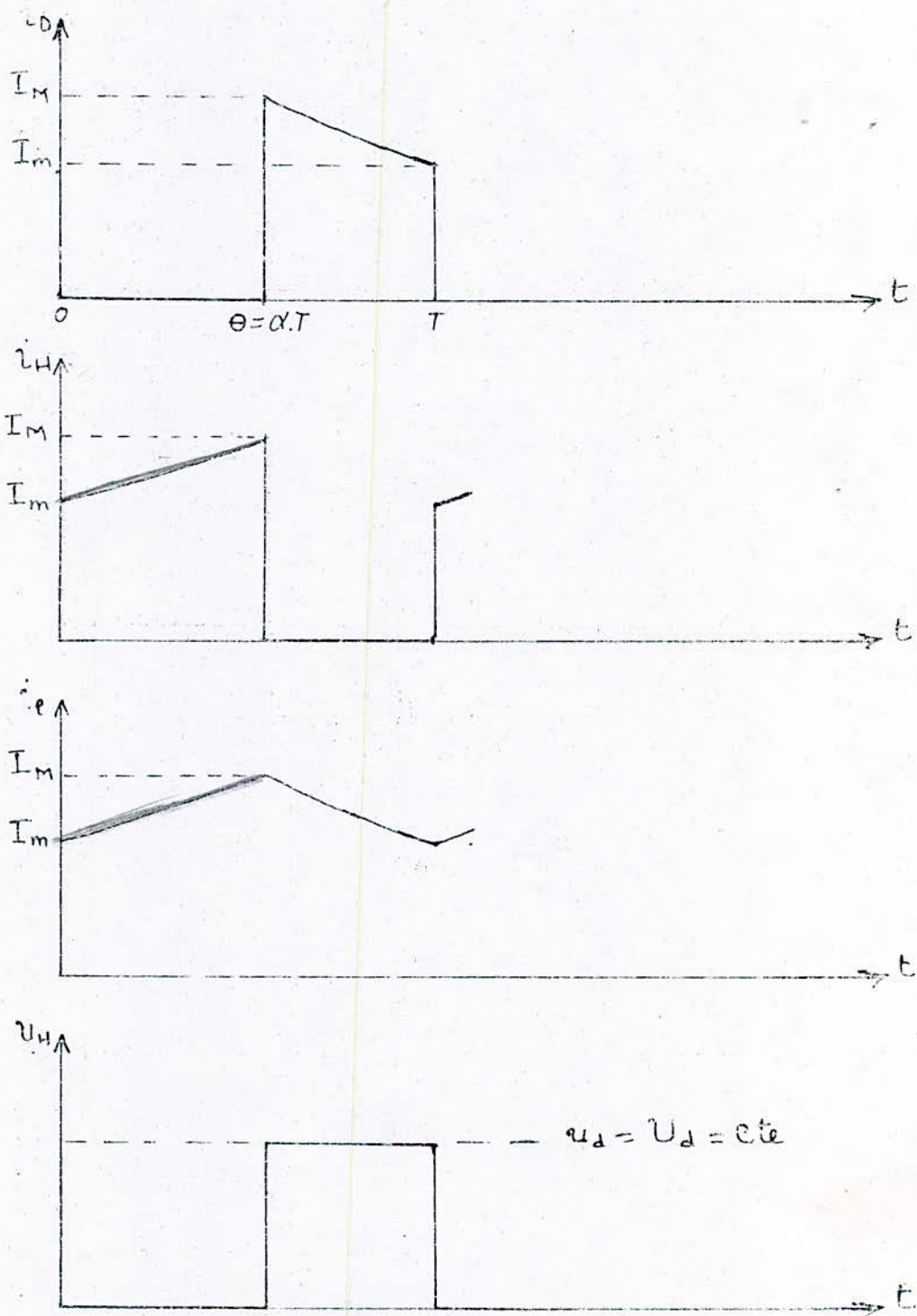


Fig (II. 8)

La valeur moyenne de la tension aux bornes du hacheur est:

$$U_H = \frac{1}{T} \int_0^T u_H \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_d \cdot dt = U_d (1-\alpha).$$

D'autre part, sachant que: $u_H = E - L \cdot \frac{di_e}{dt}$, on aura: $U_H = E - L \cdot \int_0^T \frac{di_e}{dt} dt$.

Comme: $i_e(T) = i_e(0)$, donc: $U_H = E$. D'où: $U_H = U_d (1-\alpha) = E$.

Finalement, la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge est:

$$U_d = \frac{E}{1-\alpha}$$

Sachant que $0 < \alpha < 1$, U_d est tout le temps supérieure à E . Le hacheur est donc survolteur.

La valeur moyenne du courant dans la charge est:

$$* I_d = \frac{U_d}{R} = \frac{E}{R(1-\alpha)}, \text{ si la charge est résistive ou inductive}$$

de résistance R .

$$* I_d = \frac{U_d - E'}{R} = \frac{E - E'(1-\alpha)}{R(1-\alpha)}, \text{ si la charge est active de cons-}$$

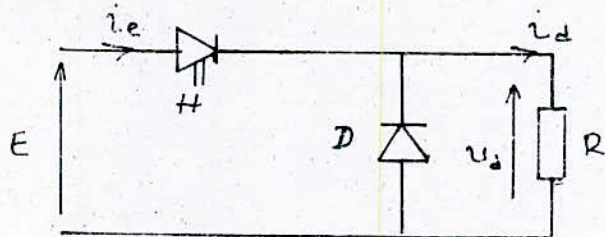
tautes E' , L et R .

II.5/ Charge ramenée à la source génératrice, schéma équivalent:

Le hacheur étant supposé parfait, la puissance fournie par la source est égale à celle absorbée par la charge. Autrement dit: $E \cdot I_e = U_d \cdot I_d$.

5.1/ Cas du hacheur série:

a) La charge est résistive:

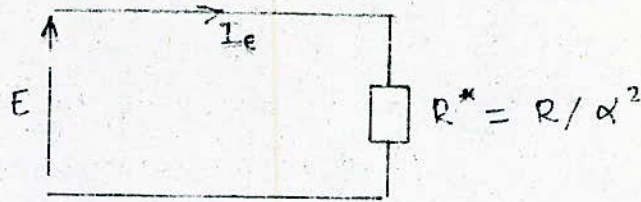


On a: $U_d = R \cdot I_d = \alpha \cdot E$ et $E \cdot I_e = U_d \cdot I_d$

d'où: $E = \frac{R}{\alpha^2} I_e = R^* \cdot I_e$ où R^* est la résistance ramenée du côté

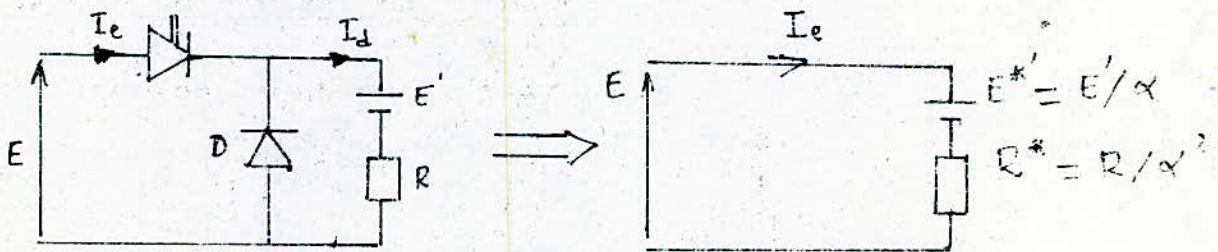
de la source génératrice.

Ainsi, le schéma équivalent à celui de la figure ci-dessus est :



b) La charge est active de constantes E' et R :

En opérant de la même manière que précédemment, on obtient l'équivalence suivante :

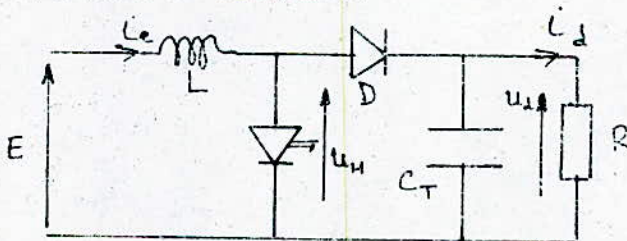


c) Remarque: Tout se passe comme si la source voit une résistance fictive de valeur $R^* = R/\alpha^2$.

Lorsque α varie de 0 à 1, cette résistance varie de l'infini à R , d'où l'utilité d'un tel montage pour le démarrage des moteurs à courant continu.

5.2/ Cas du hacheur survolteur :

a) Charge purement résistive :

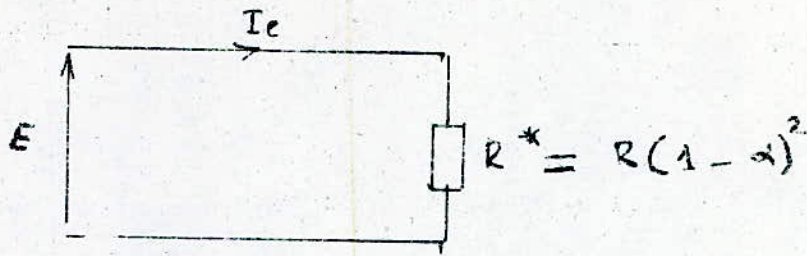


$$\text{On a : } U_d = \frac{E}{1-\alpha} = R \cdot I_d \quad \text{et} \quad E \cdot I_e = U_d \cdot I_d$$

$$\text{d'où : } E = R(1-\alpha)^2 \cdot I_e = R^* \cdot I_e$$

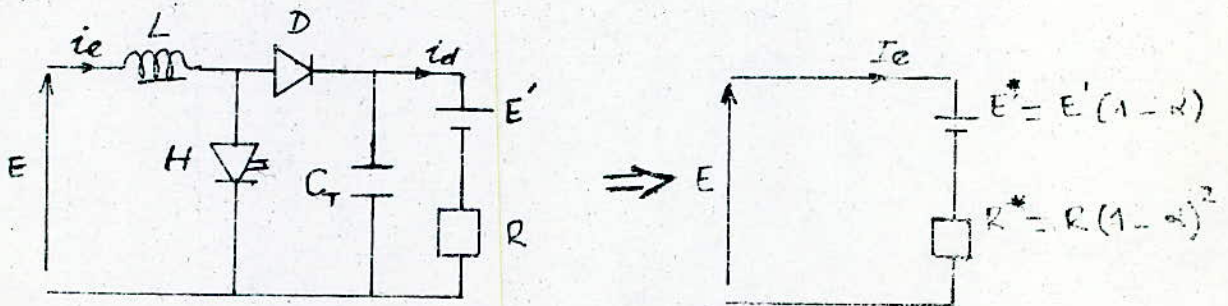
où $R^* = R(1-\alpha)^2$ est la résistance fictive.

Le schéma équivalent au schéma précédent est le suivant:



b) Charge active de constantes E' et R :

En opérant de la même façon que précédemment, on obtient l'équivalence suivante:



c) Remarque: En faisant varier α de 0 à 1, la résistance apparente R^* varie de R à 0, d'où l'utilité d'un tel montage pour freiner rhéostatiquement un moteur à courant continu.

N.B: Les équivalences établies ne concernent que les valeurs moyennes de tensions et de courants à l'entrée et à la sortie du recteur, et non celles des puissances c-a-d: $R^* \cdot I_{e, \text{eff}}^2 \neq R \cdot I_{d, \text{eff}}^2$. [8]

CHAPITRE III /

ETUDE EXPERIMENTALE : ESSAIS SUR LE HACHEUR

Les essais ont été faits sur un hacheur à deux thyristors auxiliaires (entrelacement de trois hacheurs, dont on a utilisé une seule voie [4]) .

Les thyristors Th_1 , Th_2 et Th_3 sont de type SKT55

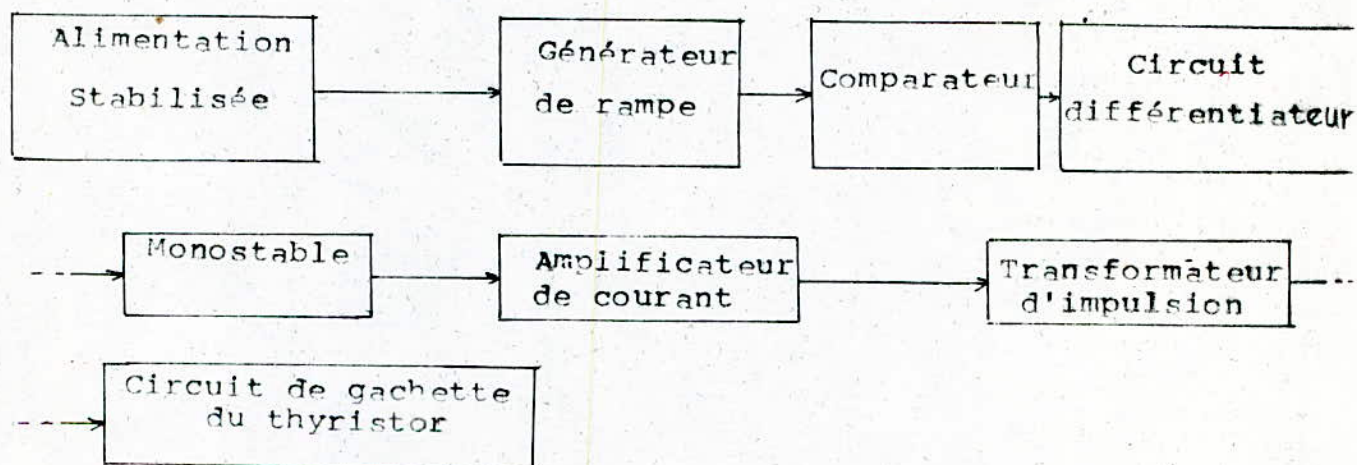
-La diode de roue libre est de type SKN 45/12 .

-L'inductance d'inversion est de $45 \mu H$

-Le condensateur de désamorçage est de capacité $C_d = 10 \mu F$

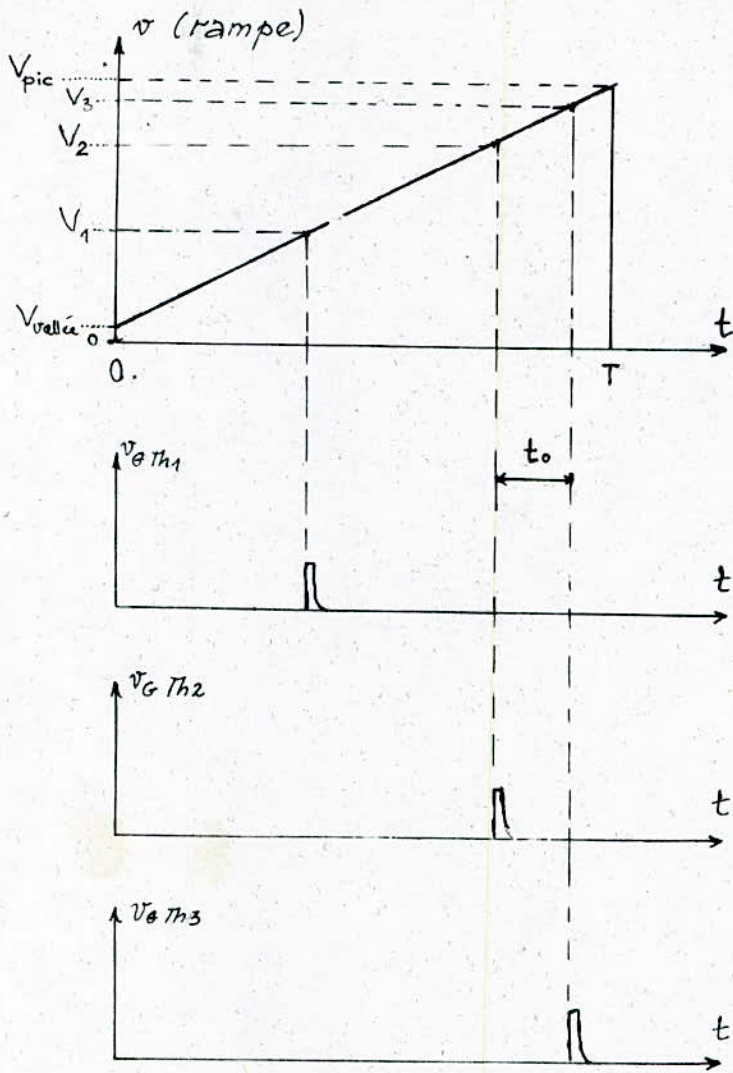
* Elaboration des impulsions d'amorçage des thyristors :

Schéma synoptique de la commande : [9]



Les circuits d'amorçage élaborent des impulsions calibrées et synchronisées et les distribuent, après amplification, aux trois thyristors .

- Positionnement des 3 impulsions :



Impulsion (baladeuse) de Th1.

Impulsion de Th2.

Impulsion de Th3.

V_1, V_2 et V_3 sont des tensions de comparaison.

V_3 et V_2 sont fixes et V_1 variable.

1.1/ Essais sur hacheur série:

* Mode opératoire: La source de tension (E) débitant sur la charge à travers le hacheur (H), on fait varier le rapport cyclique (α) et on relève pour chaque valeur de α :

- La tension moyenne U_d aux bornes de la charge.
- Le courant moyen I_d qui la traverse.
- L'ondulation ΔI_d du courant.

1.1/ Débit sur charge purement résistive (E = 110 V ; f = 50 Hz)

α	0.05	0.1	0.2	0.29	0.46	0.5	0.68	0.75
U_d (V)	5	15	22.5	32.5	47.5	55	75	80
I_d (A)	1.2	1.8	3.6	4.8	7.2	7.8	10.6	12

1.2/ Débit sur charge inductive (E = 110 V ; f = 50 Hz).

α	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75
U_d (V)	32.5	40	52.5	62.5	70	80	90
I_d (A)	4.4	6.0	7.2	8.8	10.4	11.2	12
ΔI_d (A)	1.2	1.4	2.0	2.8	3.2	3	2.6

1.3/ Débit sur charge active de constantes E' ; R_a ; L_a :

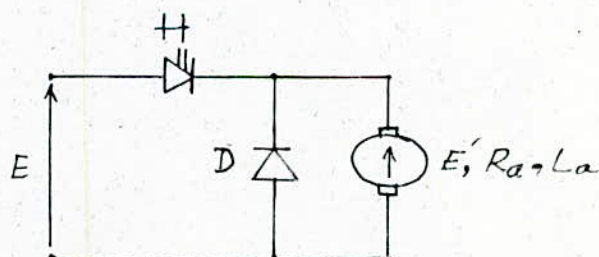
La charge est un moteur à courant continu à excitation séparée dont les caractéristiques nominales sont:

Induit: $U_n = 120$ V ; $I_n = 29$ A ; $N_n = 1500$ tr/min.

Inducteur: $J_n = 1.2$ A .

1.3.1/ La charge ne comporte pas d'inductance de lissage:

Schéma de montage:

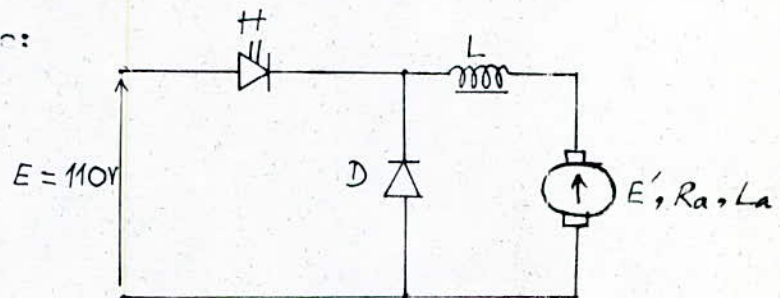


Pour $E = 60 \text{ V}$ et $f = 50 \text{ Hz}$, les résultats obtenus sont consignés dans le tableau suivant:

α	0.05	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
$U_d \text{ (V)}$	8	11.5	20	34	40	43	46	48
$I_d \text{ (A)}$	4	5	6	10	11	12	13	14
$\Delta I_d \text{ (A)}$	20	24	32	38	36	35	34	32
$E' \text{ (V)}$	4	8	17	30	35	38	42	44

1.3.2/ La charge comporte une self de lissage:

Schéma de montage:



a) $f = 50 \text{ Hz}$:

α	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.78
$U_d \text{ (V)}$	30	45	50	62.5	75	82.5	90
$I_d \text{ (A)}$	4.4	5.2	6.4	7.4	8.8	9.8	12.8
$\Delta I_d \text{ (A)}$	1	1.2	1.5	1.7	1.7	1.5	1.3

b) $f = 100 \text{ Hz}$:

α	0.2	0.3	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7
$U_d \text{ (V)}$	45	47.5	57.5	62.5	67.5	70	80	81.5	82.5
$I_d \text{ (A)}$	6.9	7.4	7.4	8	9	9.2	10	10.2	12
$\Delta I_d \text{ (A)}$	0.9	1	1.1	1.15	1.2	1.1	1.1	1	1

c) $f = 200 \text{ Hz}$

α	0.2	0.3	0.36	0.4	0.48	0.52
$U_d \text{ (V)}$	50	60	65	70	72.5	82.5
$I_d \text{ (A)}$	8.8	9.2	10.8	10.8	11.2	12.8
$\Delta I_d \text{ (A)}$	0.8	0.9	1	1	1.1	1.1

d) $f = 250 \text{ Hz}$

α	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4
$U_d \text{ (V)}$	45	48	57.5	60	70
$I_d \text{ (A)}$	7.2	8	8.8	9.6	10.4
$\Delta I_d \text{ (A)}$	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

Interprétation des résultats :

1./ La charge est purement résistive :

La conduction est discontinue et en vertu de la loi d'Ohm $U_d = R \cdot i_d$, la tension u_d aux bornes de la résistance et le courant qui la traverse ont même allure, comme le montre la figure (III. a). On remarque d'après cette figure, que la tension u_d (ainsi que le courant i_d) prend la forme d'une exponentielle avant d'atteindre la valeur E , alors que théoriquement on considère qu'elle passe directement de 0 à E . Ceci est dû au fait que, dans l'étude théorique, on n'a pas tenu compte de la commutation et des selfs des fils des connexions.

La figure (III. 1) montre que les courbes U_d pratique et théorique ($U_{d\text{thé}} = \alpha \cdot E$) sont confondues. Ceci est dû au fait que dans le cas d'une résistance pure la composante de la tension due à la commutation forcée est négligeable.

ou

2./ La charge est inductive

La conduction est continue, la constante de temps de la charge $\tau = L/R$ étant suffisamment grande devant la période de hachage pour que le courant dans la charge n'ait pas le temps de s'annuler durant le déclenchement du hacheur.

Ce courant évolue entre une valeur maximale et une valeur minimale comme le montre la figure (III. b). Cette même figure représente l'allure de la tension aux bornes de la charge inductive ; la surtension due à la commutation (à l'ouverture du hacheur) est nettement supérieure à celle relevée dans le cas de la charge résistive et ceci est principalement dû à la présence de l'inductance ; car la commutation d'une voie non inductive comportant un redresseur (en l'occurrence le thyristor principal) consiste essentiellement en l'extinction de celui-ci .

L'énergie mise en jeu pour celle-ci dépend essentiellement de la rapidité de blocage du redresseur et elle est d'ordinaire très inférieure à celle nécessitée par la commutation d'une voie inductive

Quand la voie à ouvrir comporte à la fois une inductance et un redresseur, on doit chercher lequel des deux phénomènes — le transfert de l'énergie de l'inductance ou l'extinction du redresseur — est le plus important . Et le plus souvent, c'est l'effet de l'inductance qui, de loin, est le plus prépondérant.

Ce qui fait aussi qu'à α donné, la tension moyenne aux bornes de la charge inductive est supérieure à celle aux bornes d'une résistance.

La tension moyenne mesurée est supérieure à celle calculée par la relation $U_d = \alpha \cdot E$ (tension moyenne idéale) ; l'écart entre $U_{d\text{calculée}}$ et $U_{d\text{mesurée}}$ représente la composante due à la commutation forcée (figure III. 2)

La figure (III. 3) montre que l'ondulation du courant i_d augmente avec le rapport cyclique, passe par un maximum pour

$\alpha = 0.6$ (alors que théoriquement elle atteint son maximum pour $\alpha = 0.5$), puis diminue.

3. / La charge est active (moteur à courant continu)

a) Sans inductance de lissage :

* A $f = 50$ Hz, comme le montre la fig. (III. C), la conduction est discontinue ; il en est de même à $f = 100$ Hz et ceci quel que soit α . Ceci s'explique par le fait que l'inductance de la charge est constituée uniquement par l'inductance L_a de l'induit du moteur ; cette inductance étant faible, la constante de temps de la charge ($\tau = L_a / R$) est très petite devant la période de hachage T (faible fréquence) ; ce qui fait que le courant s'annule pendant le déclenchement du hacheur.

L'ondulation du courant est égale à sa valeur maximale.

* A $f = 200$ Hz et pour un faible courant d'induit (fig. (III. d)), on obtient un mode de conduction critique pour $\alpha = 0.54$. A la même fréquence, pour un courant d'induit assez élevé, le mode de conduction est continu et ceci pour $0.1 < \alpha < 0.5$. La fig. (III. e) représente le courant dans le moteur pour $\alpha = 0.5$, à $f = 200$ Hz ; on voit nettement que le courant ne s'annule pas.

* A $f > 200$ Hz, la conduction sera continue, quel que soit α , et ceci sans avoir à insérer une inductance en série avec l'induit du moteur.

A noter aussi, qu'en montant en fréquence, l'ondulation du courant diminue.

b) - Avec self de lissage :

- Quel que soit la fréquence de hachage, la conduction est continue.

- Les figures (III. f), (III. g) et (III. h) représentent les formes d'ondes de la tension U_d et du courant i_d , respectivement pour $f = 50$ Hz ($\alpha = 0.5$), $f = 100$ Hz ($\alpha = 0.5$) et $f = 200$ Hz ($\alpha = 0.5$).

Tension moyenne aux bornes
de la charge en $f = \frac{1}{2}$ du rapport cyclique, $\omega = 50\text{kHz}$

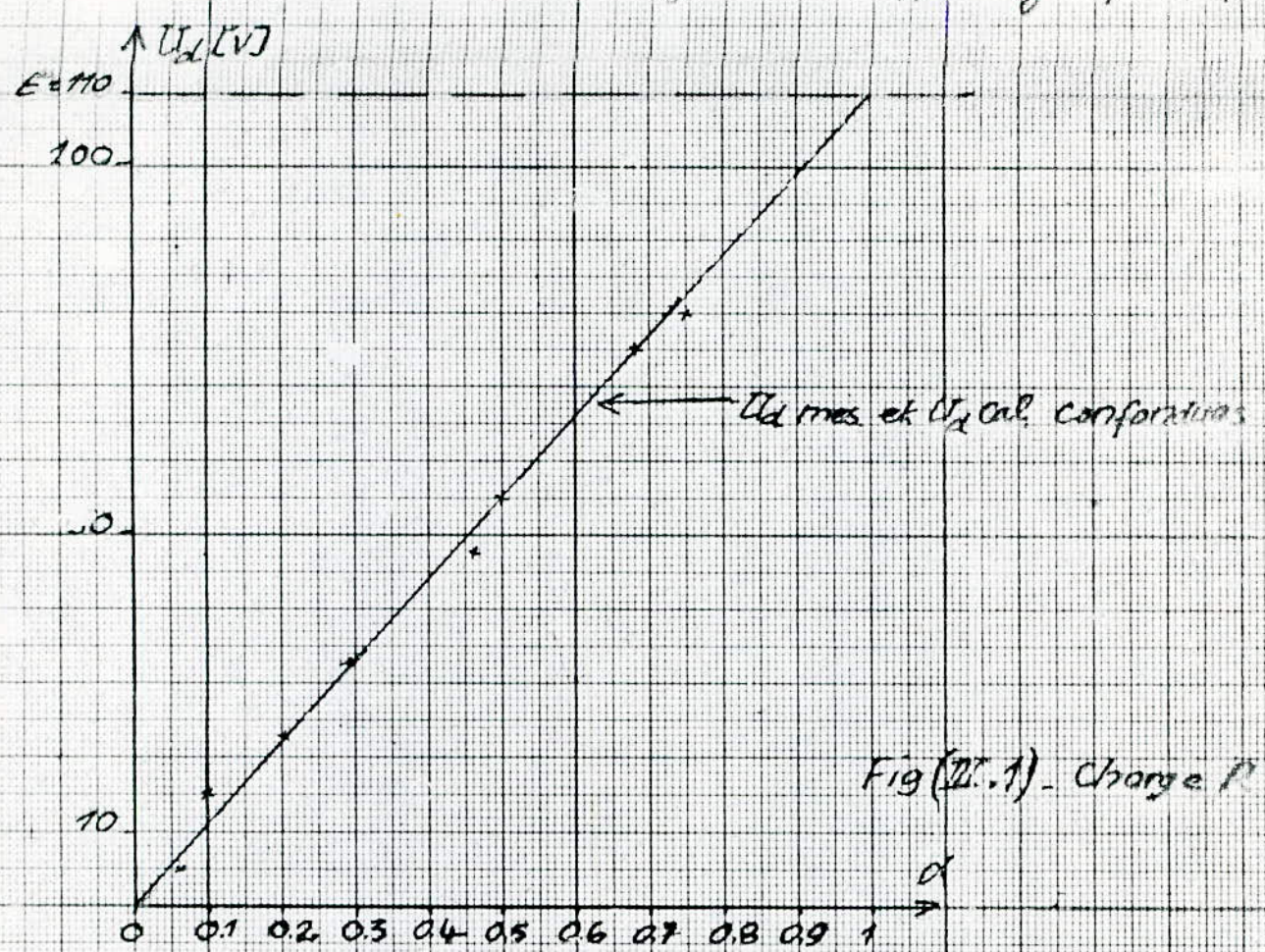


Fig (II.1) - Charge R

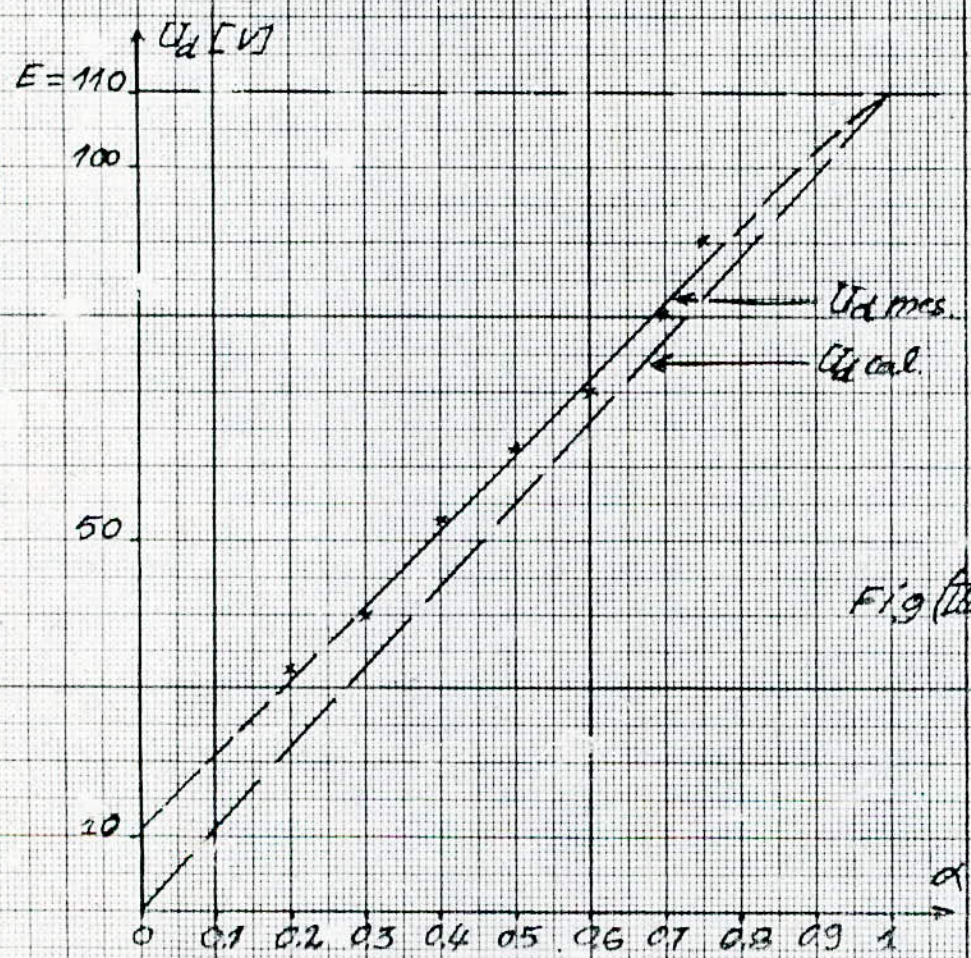


Fig (II.2) - Charge P_L

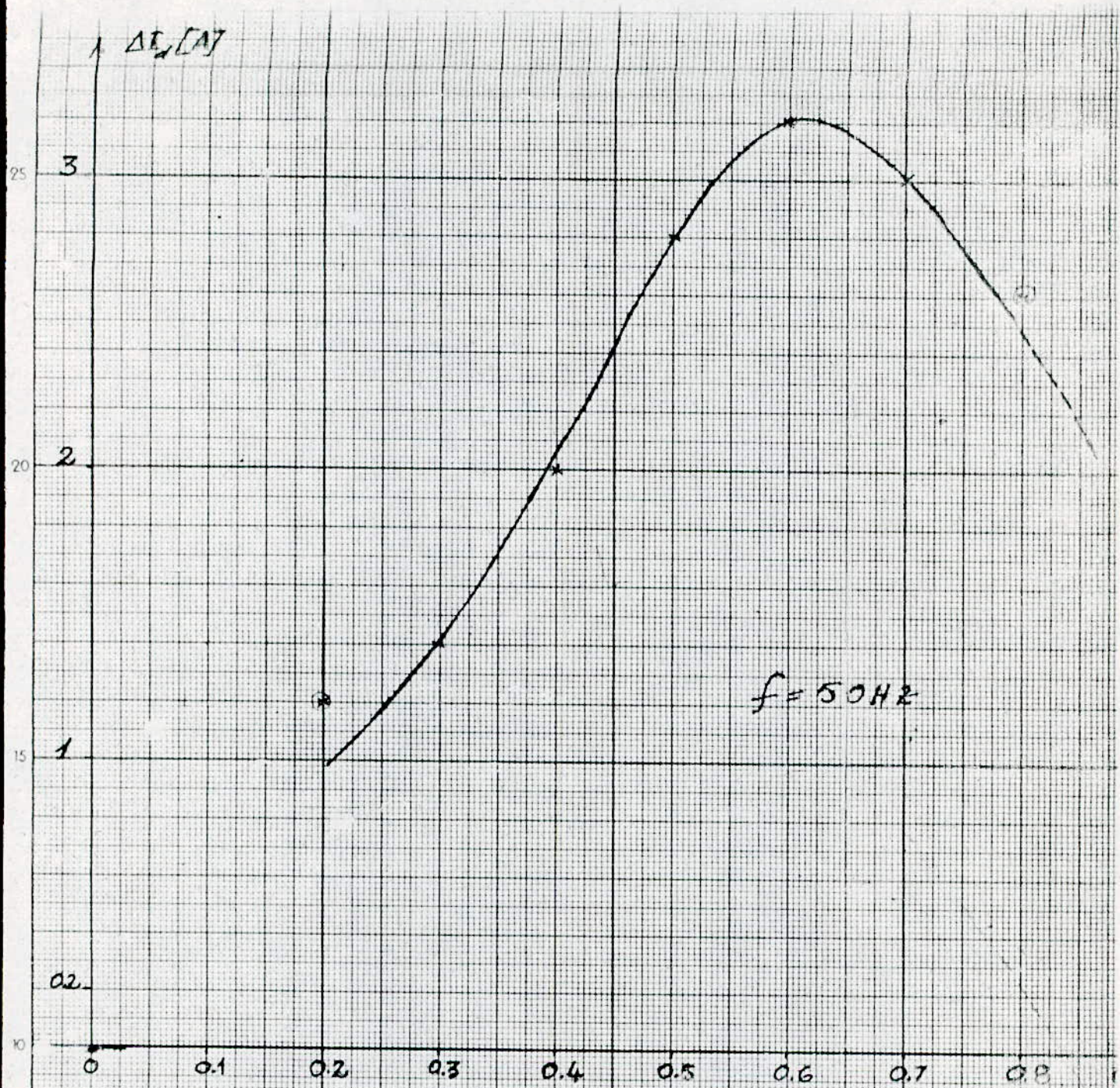
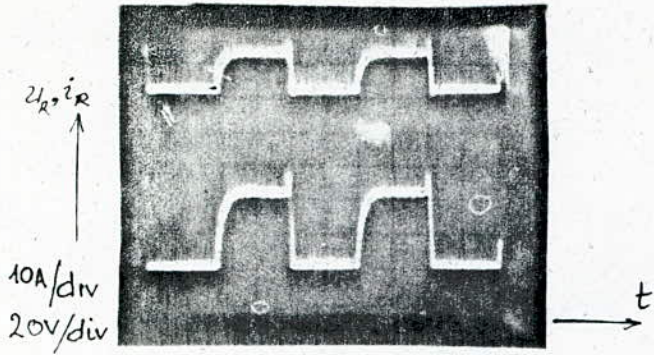
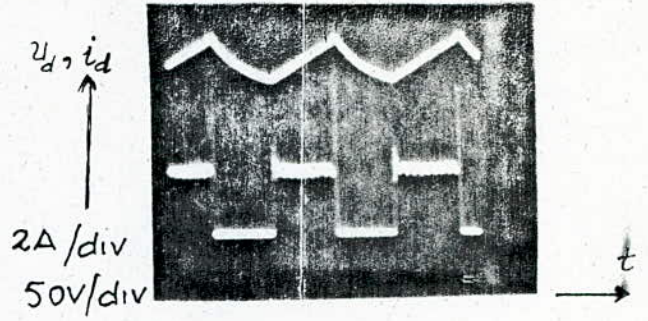


Fig (III.3) - "Ondulation du courant en fonction de α "

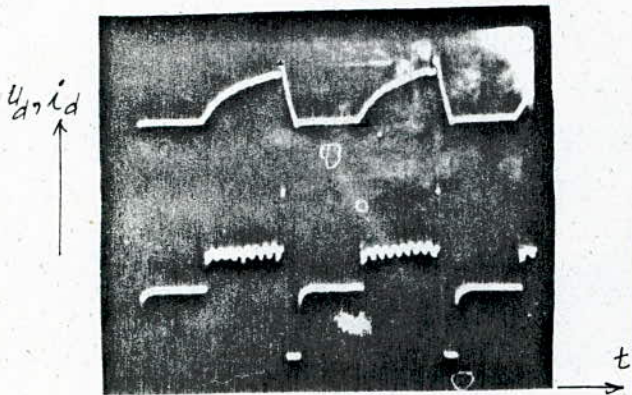
HACHEUR DEVOLTEUR - Charge Inductive (R)



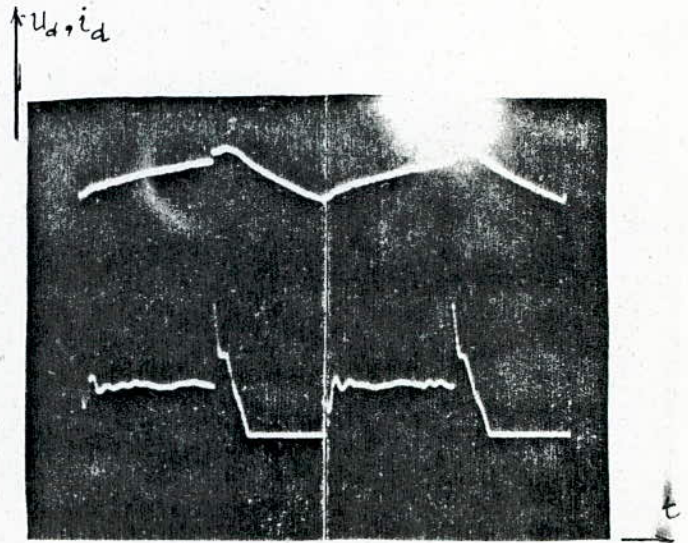
(a) Charge résistive
 $f = 50\text{Hz}$



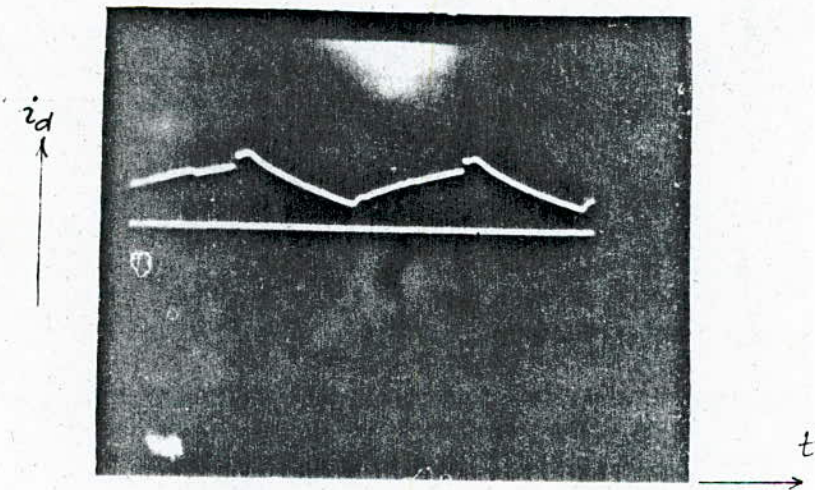
(b) Charge inductive
 $f = 50\text{Hz}$



(c) charge active
 Sans inductance de lissage
 $f = 50\text{Hz}$
 Conduction discontinue



(d) charge active
 Sans inductance de lissage
 $f = 200\text{Hz}$
 Régime critique



(e) Charge active
 Conduction continue, sans self de lissage
 $f = 200\text{Hz}$

Figures (III. a, b; c; d; e)

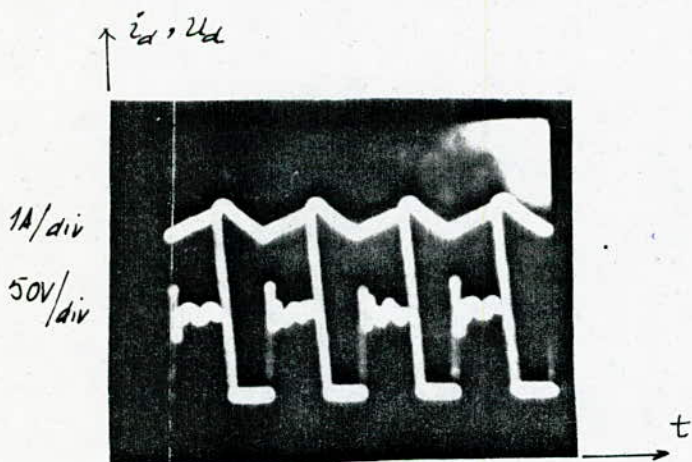
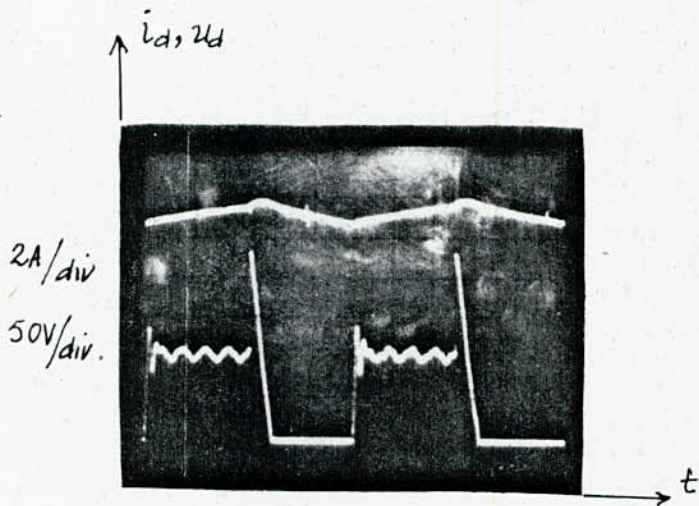
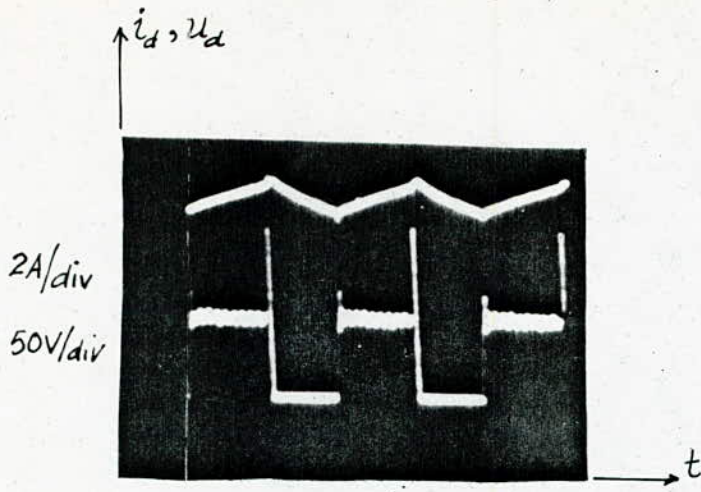


Fig.(III. f; g; h). - Charge active.

Ces figures montrent que l'ondulation du courant (ΔI_d) diminue avec l'augmentation de la fréquence, ainsi qu'on peut le voir à la figure (III.5) qui montre que (ΔI_d) augmente avec α , passe par un maximum (pour $\alpha \approx 0.55$), puis diminue, sauf pour $f=250$ Hz où elle reste pratiquement constante. Ceci concorde bien avec l'allure des courbes théoriques tracées à la figure (II.2).

Comme le montrent les figures (III.4) et (III.4'), ^{la} tension moyenne mesurée est supérieure à celle calculée, à α donné. Ceci est dû au fait que dans le calcul théorique de cette tension moyenne, on n'a pas tenu compte de la commutation (fonctionnement idéal: durée de la commutation nulle), alors que réellement, il existe une composante U_{dc} , due à la commutation forcée, qui s'ajoute à la composante idéale $U_{di} = \alpha.E$. Cette composante U_{dc} a théoriquement pour expression: $U_{dc} = \frac{t_c}{T} (E + U_c)$ où t_c est la durée de la commutation forcée; t_c est inversement proportionnelle au courant moyen appelé dans la charge [6]. U_{dc} est donc proportionnelle à la fréquence et à la durée de la commutation. Ce qui explique que l'écart entre U_{dc} mesurée et U_{dc} calculée est d'autant plus grand que la fréquence est élevée.

On remarque aussi que pour une fréquence donnée, cet écart diminue quand α augmente. Ceci s'explique par le fait que quand α augmente, le courant moyen dans la charge augmente, donc t_c diminue, de même que U_{dc} qui est proportionnelle à t_c . Au delà d'une certaine valeur de α (dépendant de f), le hacheur perd son fonctionnement et $U_d(\alpha)$ n'est plus une droite.

Conclusion:

Lorsque le récepteur est un moteur à courant continu, il est nécessaire ^{d'avoir} un mode de fonctionnement continu et un courant variant très peu autour de sa valeur moyenne, ceci afin de faire travailler le moteur avec un rendement le plus correct possible; car l'ondulation affecte les pertes supplémentaires, donc le ren-

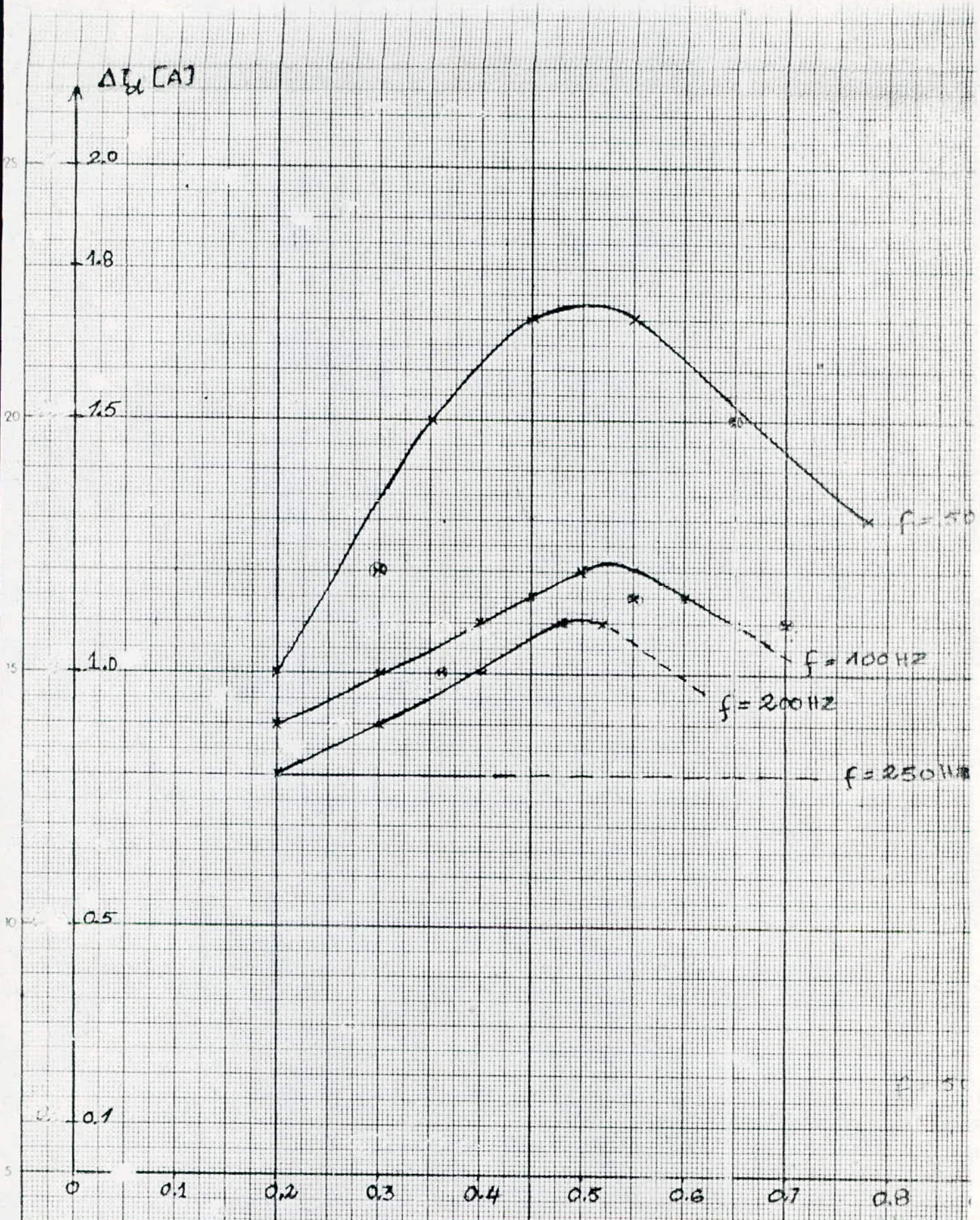


Fig (III.5) -

HACHEUR DEVOLTEUR - Charge active (M.C.C.) ; Conduite continue
 * Ondulation du courant en f_a de la charge

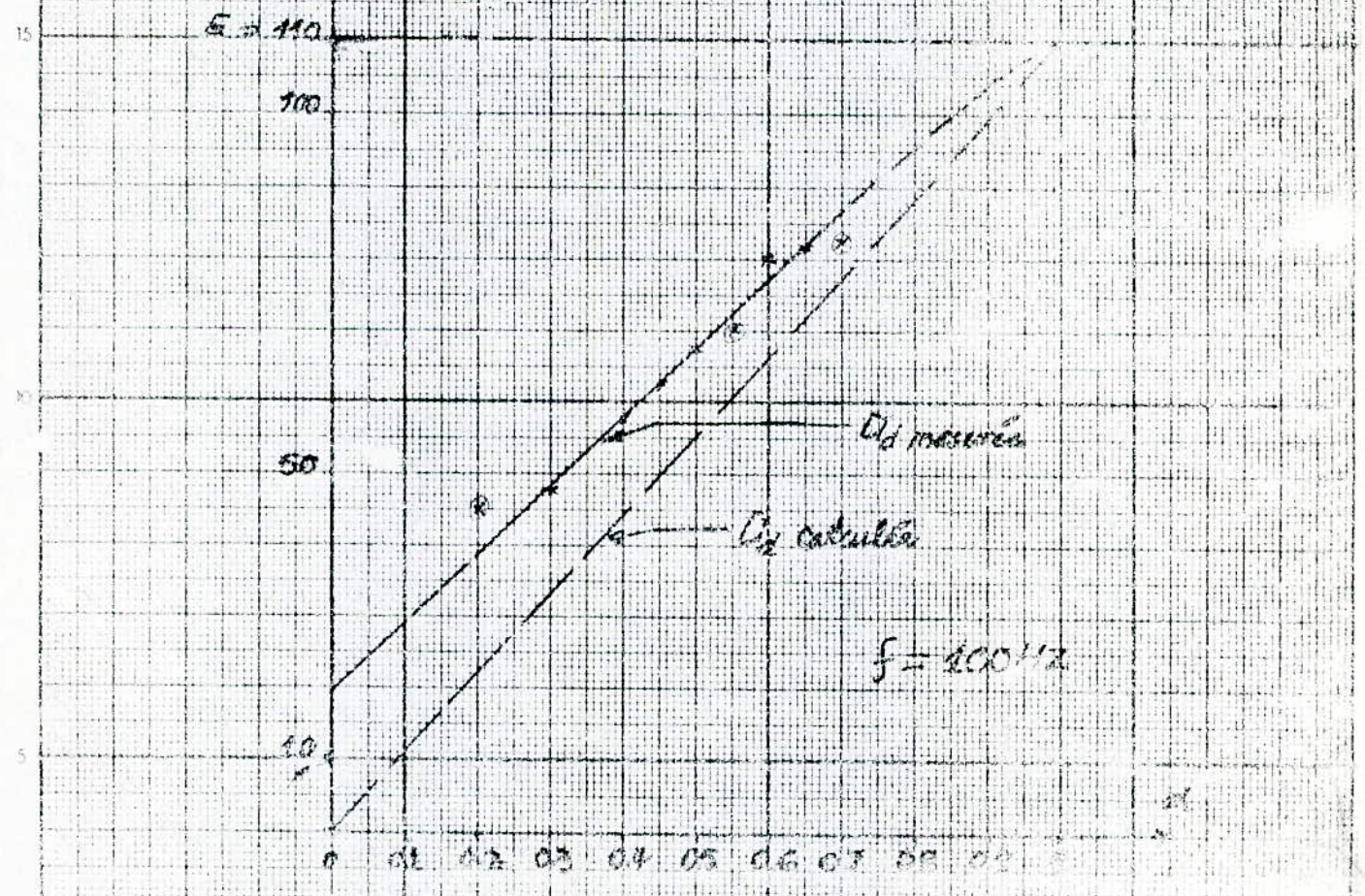
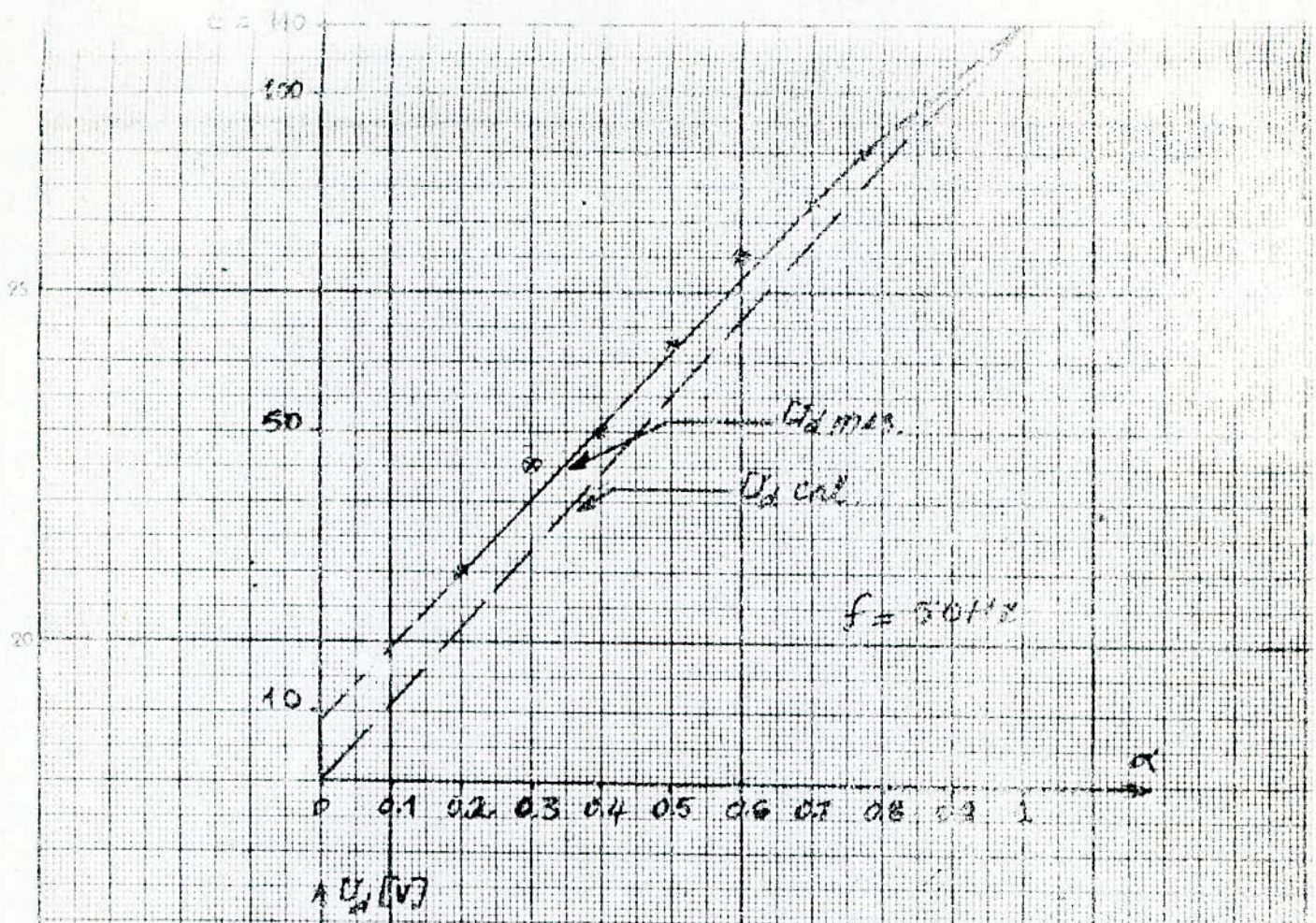
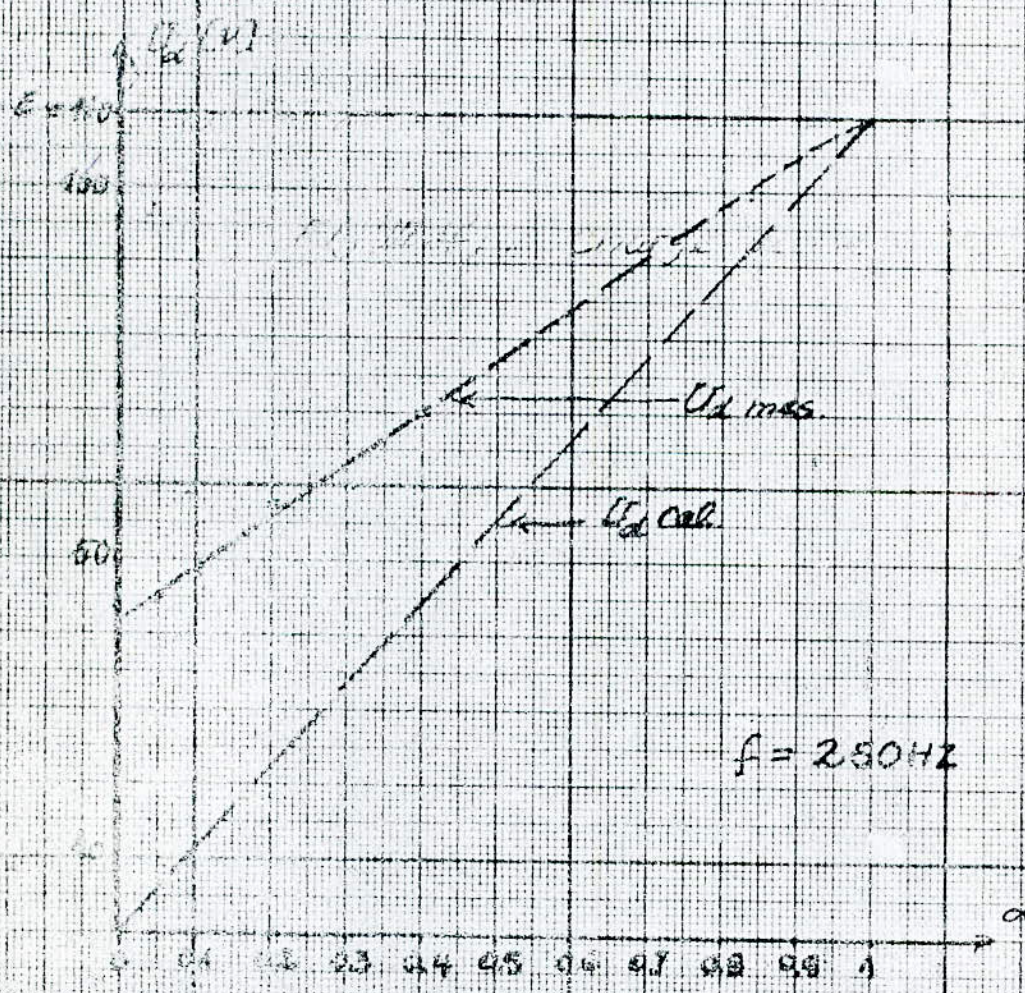
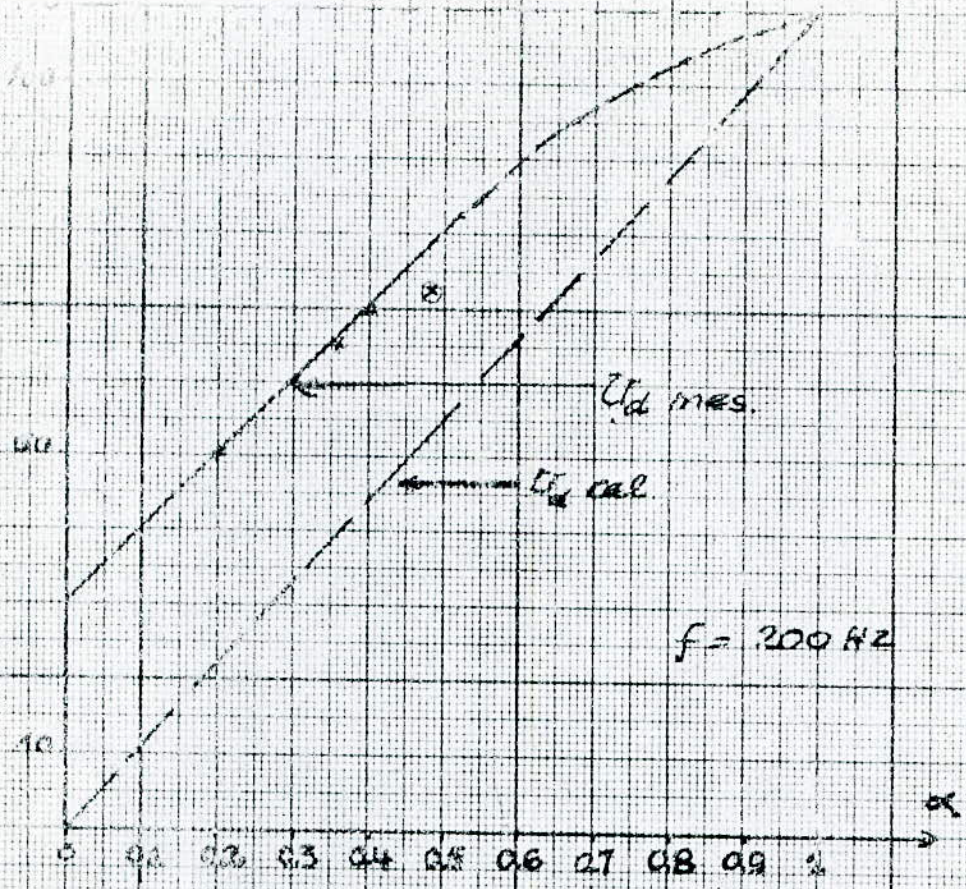


Fig. (III. 4) - Charge transfer curves

Handwritten notes at the bottom of the page, possibly describing the experimental conditions or data sources.

2.2.2



Chargé active (M.C.P.)
 PIRELLA DEVOLTEUR - Travaux réalisés aux bornes

dement du moteur , en plus de la qualité de la commutation . Ceci nous incite à faire fonctionner le hacheur à une fréquence élevée et à insérer une grande self de lissage avec l'induit du moteur . Cependant , une fréquence ^{élevée} réduit considérablement la plage de variation du rapport cyclique et une grande inductance est onéreuse et encombrante . D'où la nécessité d'un compromis entre une fréquence et inductance convenables .

Une solution très intéressante à ce problème est l'entrelacement de hacheurs . Elle consiste à entrelacer deux ou plusieurs hacheurs fonctionnant à la même fréquence , mais dont les commandes sont judicieusement déphasées ; ainsi la charge sera sollicitée à une fréquence multiple de celle de hachage .

III.2/ Essais sur le hacheur survolteur :

Le schéma du montage est celui de la figure(II.7), où C_T est la capacité totale de 26 condensateurs de 30 μF chacun, placés en parallèle. $C_T = 0.78$ mF.

- Mode opératoire:

A fréquence fixe et en faisant varier α , on relève les valeurs moyennes des tensions aux bornes de la charge et du hacheur (U_d et U_H) et des courants dans la charge (I_d) et à l'entrée du hacheur (I_e). La tension d'alimentation est $E = 90$ V.

2.1/ Débit sur charge purement résistive:

a) $f = 50$ Hz

α	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.75
U_H (V)	88	85	80	75	70	65
U_d (V)	107.5	125	140	157.5	180	190
I_d (A)	1.35	1.4	1.85	2.1	2.3	2.5
I_e (A)	2	2.2	3.4	4	6	7.5

b) $f = 100 \text{ Hz}$.

α	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
$U_H \text{ (V)}$	75	74	69	63	50
$U_d \text{ (V)}$	107.5	120	132	150	160
$I_d \text{ (A)}$	2.1	2.25	2.5	2.8	3.1
$I_e \text{ (A)}$	3.1	3.9	5.1	7	10

c) $f = 200 \text{ Hz}$

α	0.34	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65
$U_H \text{ (V)}$	74	70	65	62	58	52	47
$U_d \text{ (V)}$	110	112	116	120	125	130	132.5
$I_d \text{ (A)}$	2.9	3	3.2	3.3	3.45	3.5	3.6
$I_e \text{ (A)}$	4.5	5	6	6.6	7.2	9	10

d) $f = 250 \text{ Hz}$

α	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7
$U_H \text{ (V)}$	66	63	60	54	48	44
$U_d \text{ (V)}$	112.5	120	125	127.5	127.5	130
$I_d \text{ (A)}$	3.15	3.3	3.4	3.5	3.5	3.55
$I_e \text{ (A)}$	5.6	6.5	7.5	8.7	10.2	11.5

e) $f = 300 \text{ Hz}$

α	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7
$U_H \text{ (V)}$	63	62	59	52	47	42
$U_d \text{ (V)}$	110	115	120	120	120	122.5
$I_d \text{ (A)}$	3	3.1	3.3	3.3	3.4	3.35
$I_e \text{ (A)}$	5.4	6.2	7.2	8.2	9.2	11

2.2/ Débit sur charge inductive (R,L):

a) $f = 50$ Hz.

α	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.65
U_H (V.)	84	80	80	75	67	65
U_d (V)	105	115	130	155	180	185
I_d (A)	1.3	1.5	1.7	2	2.25	2.4
I_e (A)	1.9	2.2	3	4	6.5	7.5

b) $f = 100$ Hz.

α	0.35	0.4	0.5	0.6	0.72
U_H (V)	80	75	73	68	54
U_d (V)	120	130	142.5	162.5	175
I_d (A)	1.5	1.75	1.9	2.15	2.4
I_e (A)	2.5	3	3.8	5.5	9

c) $f = 200$ Hz.

α	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65
U_H (V)	72	68	65	62	58	54	45
U_d (V)	107.5	110	117.5	119	120	127.5	130
I_d (A)	2.75	2.9	3	3.2	3.3	3.3	3.4
I_e (A)	4.2	4.9	5.6	6.2	7.2	8	10.2

d) $f = 250$ Hz.

α	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7
U_H (V)	70	65	64	60	56	50	43
U_d (V)	110	115	120	125	130	132.5	135
I_d (A)	2.9	3.05	3.2	3.35	3.4	3.45	3.5
I_e (A)	4.8	5.6	6.4	7.2	8.4	9.8	11.6

e) $f = 300 \text{ Hz.}$

α	0.47	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7
$U_H \text{ (V)}$	65	63	60	55	50	42
$U_d \text{ (V)}$	110	115	117.5	122.5	125	125
$I_d \text{ (A)}$	2.95	3	3.15	3.2	3.25	3.3
$I_e \text{ (A)}$	5.4	5.8	6.6	8	9.4	10.6

Interprétation des résultats:

Pour que le hacheur parallèle soit survolteur, il est nécessaire que la capacité du condensateur, placé en parallèle avec la charge, soit suffisamment grande. Autrement dit, il faut que la constante de temps de la maille constituée par la charge de résistance R et le condensateur soit très grande devant la durée de conduction du hacheur ($\tau = RC \gg T$). Car ainsi, le condensateur C_T n'aura pas le temps de se décharger dans la résistance de la charge durant l'enclenchement du hacheur. Ainsi le courant et la tension dans la charge sont pratiquement constants.

La figure (III. α') représente l'allure de la tension u_H aux bornes du hacheur. On remarque que juste à la fin de conduction du thyristor principal, la tension à ses bornes passe brusquement de la valeur zéro à une valeur négative égale à la tension inversée du condensateur de désamorçage du circuit d'extinction, c'est le début de la commutation forcée, durant laquelle u_H sera égale à la tension aux bornes du condensateur de désamorçage. Une fois ce condensateur complètement chargé (Th_2 s'éteint), u_H devient alors égale à la tension aux bornes de la capacité C_T (comme le montre la figure (III. α')) et le restera durant le déclenchement du hacheur.

Les variations de la tension moyenne U_H en fonction du rapport cyclique α sont représentées aux figures (III.7) et (III.7') pour une

charge R et (III.8) et (III.8') pour une charge (R,L). On remarque qu'à f donnée et α donné, U_H mesurée $< U_H$ calculée (théoriquement: $U_H \text{ cal} = E$). L'existence de cette différence est due au fait que la self placée à l'entrée du hacheur n'est pas pure, ainsi qu'à la commutation forcée qui engendre une composante moyenne négative.

Les figures (III.7;7') et (III.8;8') montrent aussi qu'à f donnée, la tension moyenne U_H aux bornes du hacheur décroît quand α augmente, ce qui confirme la remarque faite précédemment.

Le tracé de $U_d(\alpha)$ représenté aux figures (III.6;6') pour une charge R et (III.9;9') pour une charge (R,L) montre que l'allure de ces courbes correspond à celle prévue théoriquement selon la loi $U_d \text{ théo.} = U_H / (1 - \alpha)$, mais ceci jusqu'à une certaine valeur de α dépendant de la fréquence et au delà de laquelle cette relation n'est plus vérifiée.

Les figures (III. b'), (III. c'), (III. d') et (III. e') pour une charge R et (III. f'), (III. g'), (III. h'), (III. i') et (III. j') pour une charge (R,L) représentent la tension u_d aux bornes de la charge et le courant i_d qui la traverse. Elles montrent que l'ondulation du courant (ainsi que celle de la tension) diminue considérablement avec l'augmentation de la fréquence.

Pour la charge résistive, le courant est parfaitement constant à $f = 300 \text{ Hz}$, alors que pour une charge inductive il l'est à partir de $f = 100 \text{ Hz}$. Ceci s'explique par le fait que l'augmentation de la fréquence fait que la condition $\omega = R.C \gg T = 1/f$ est largement vérifiée.

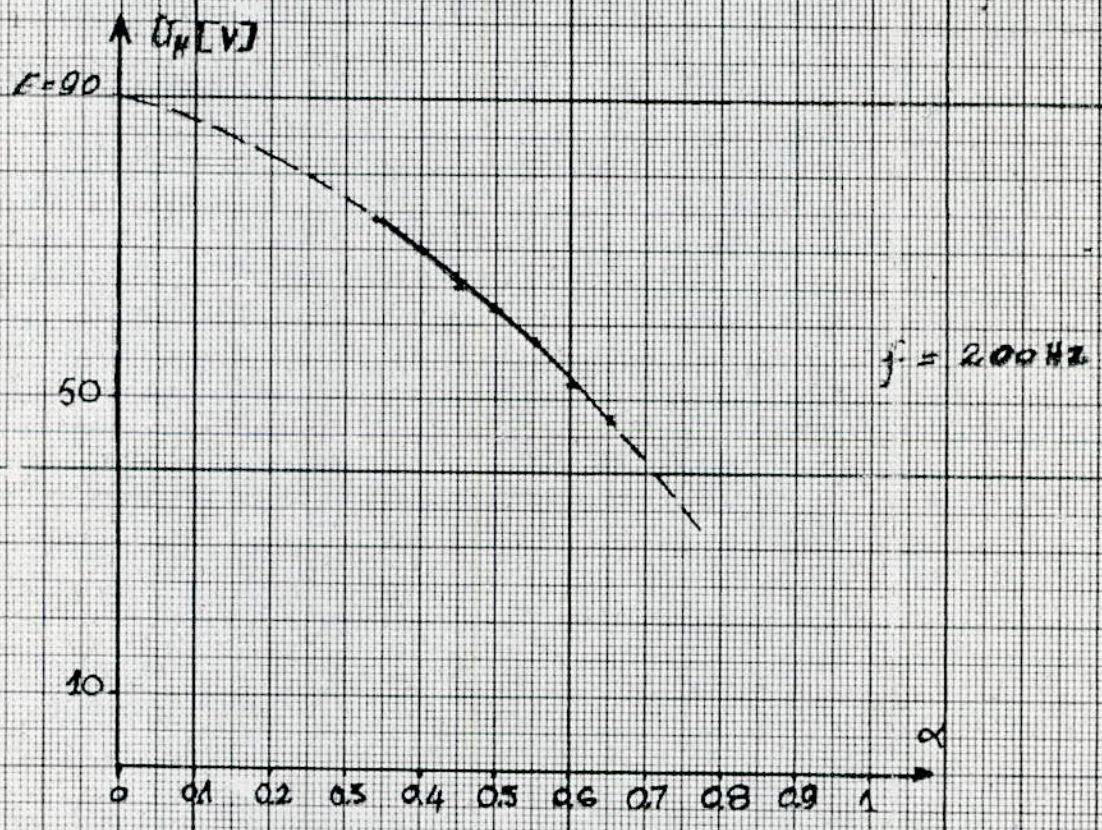
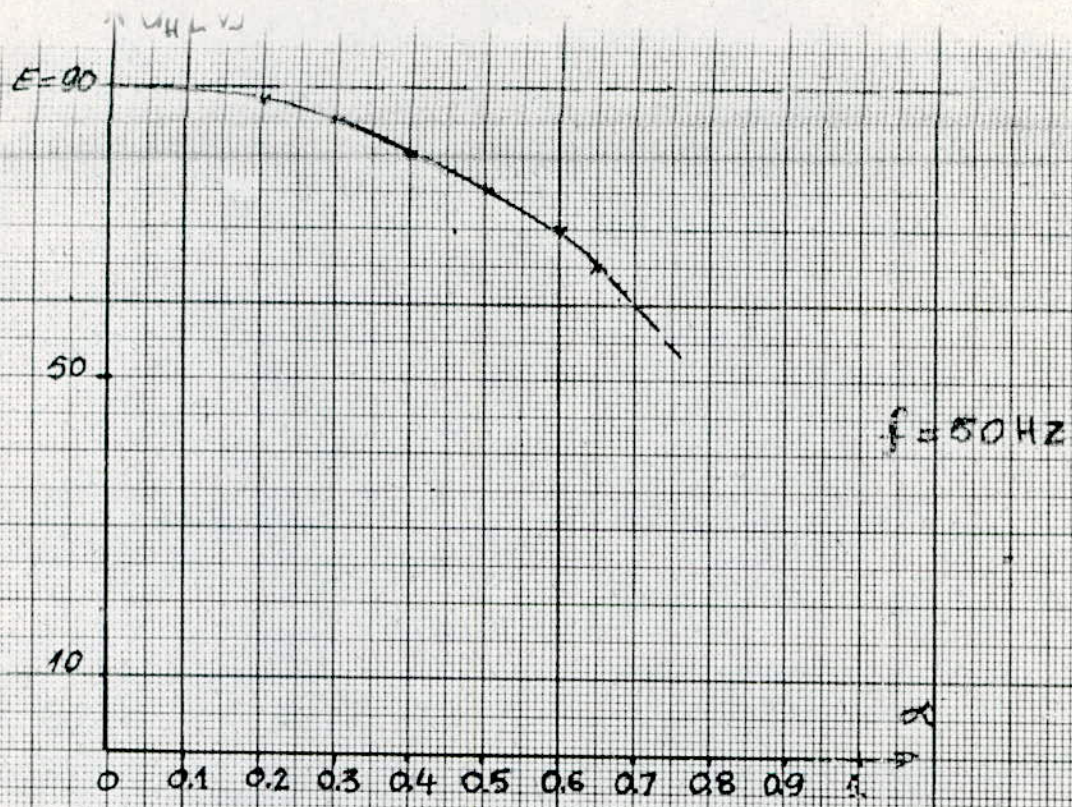
La figure (III. k') montre l'ondulation du courant i_e prélevé à la source d'alimentation. Cette ondulation est due et à la source elle-même (qui ne délivre pas une tension constante) et au hacheur.

En alimentant le hacheur et la charge par batterie qui délivre une tension parfaitement constante, on peut voir l'ondulation du

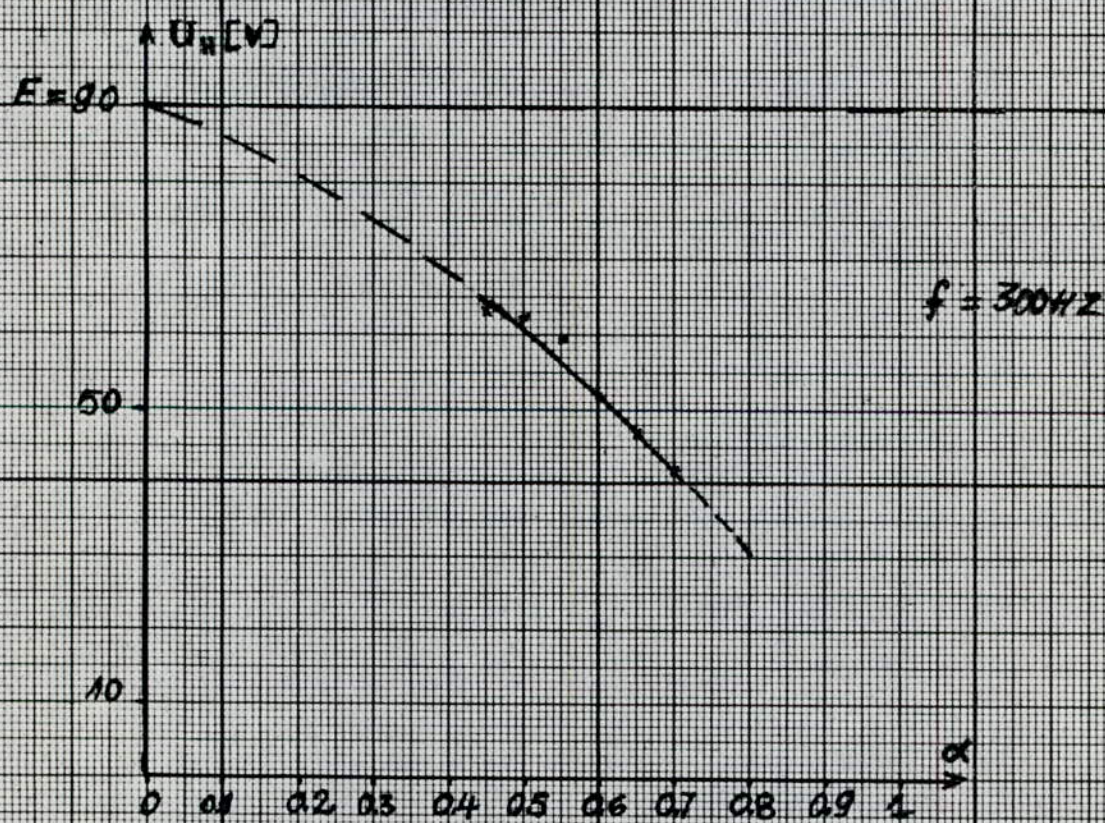
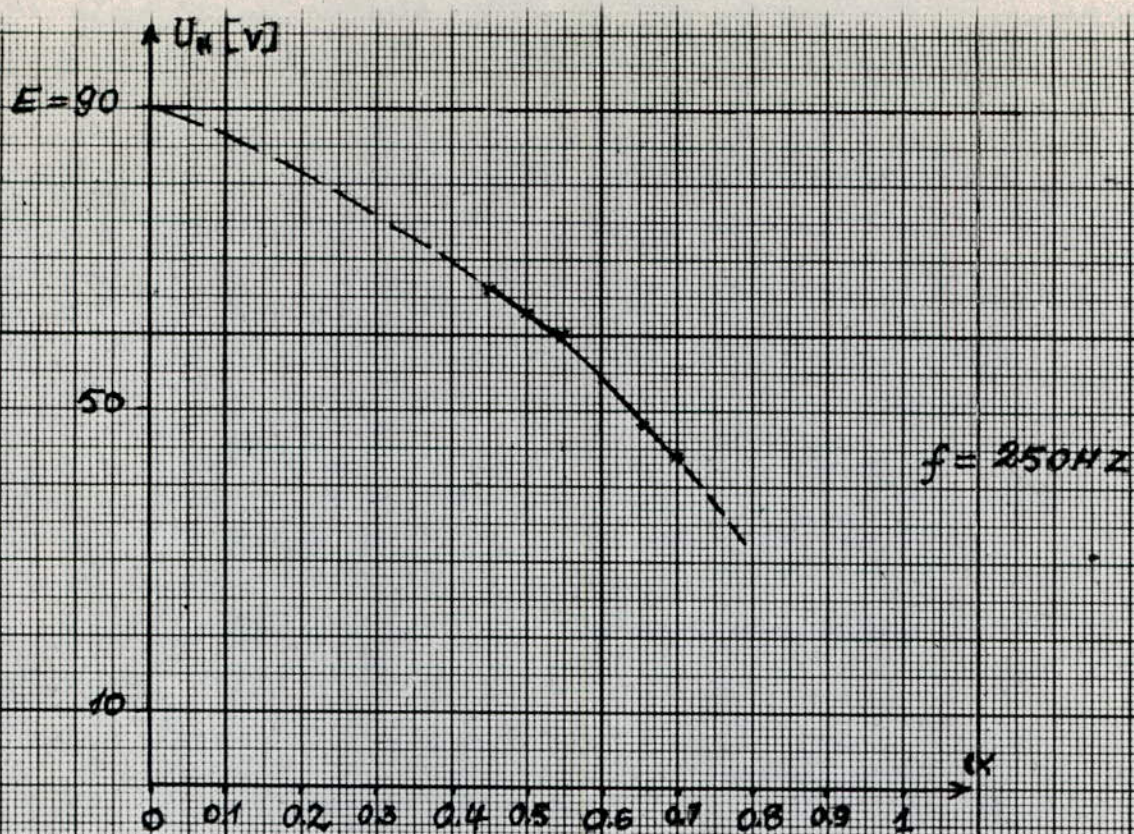
courant d'entrée dûe au hacheur seul, comme représentée à la figure(III. ℓ').

En analysant les résultats obtenus, pour les diverses fréquences, aussi bien dans le cas d'une charge résistive que celui d'une charge inductive, on voit que notre hacheur disposé en parallèle avec la charge est élévateur de tension et abaisseur de courant et qu'à une faible marge d'erreur près, les relations $U_d = U_H/(1-\alpha)$ et $I_d = I_c(1-\alpha)$ sont toujours vérifiées.

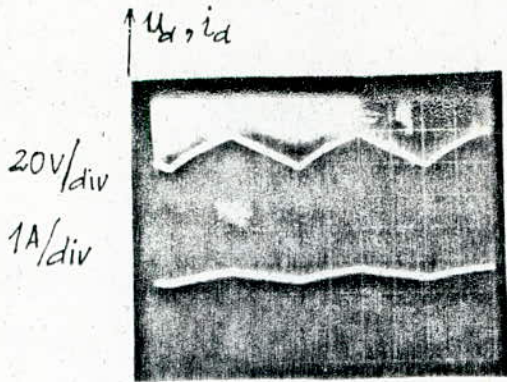
On peut ainsi affirmer que l'on a réussi à faire fonctionner notre hacheur convenablement en survolteur, ce qui était notre principale tâche.



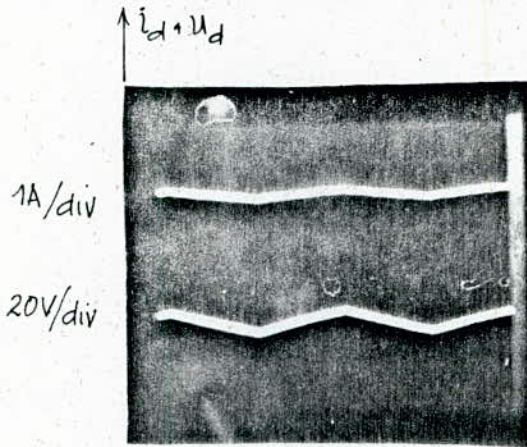
Fig(III.7). "Tension moyenne aux bornes du Hacheur en f^2 du rapport cyclique".
 - HACHEUR SURVOLTEUR; Charge (R).



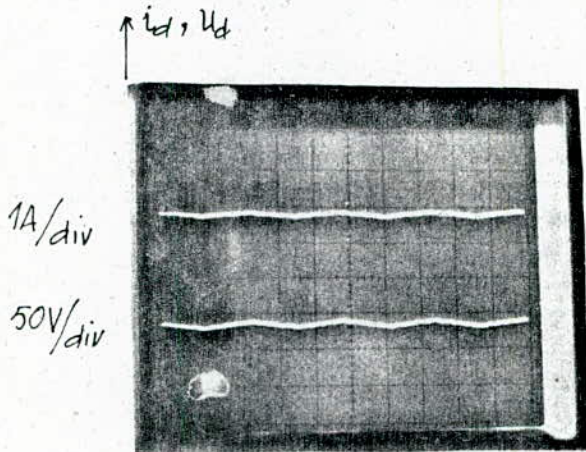
Fig(III.7') - "Tension moyenne aux bornes du hacheur en f^{ct} du rapport cyclique".
- HACHEUR SURVOLTEUR; Charge (R).



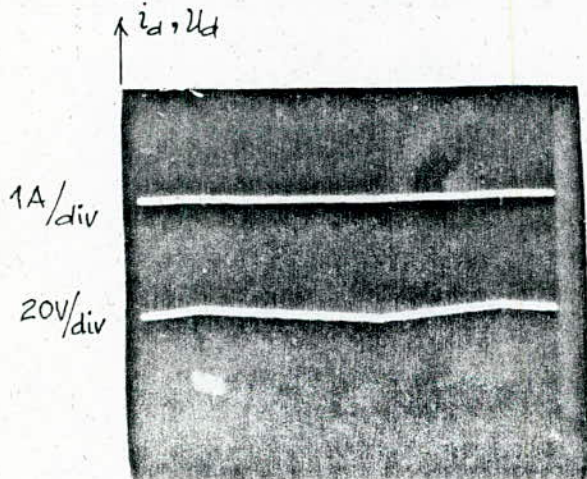
(b') - $f = 50 \text{ Hz}$



(c') - $f = 100 \text{ Hz}$

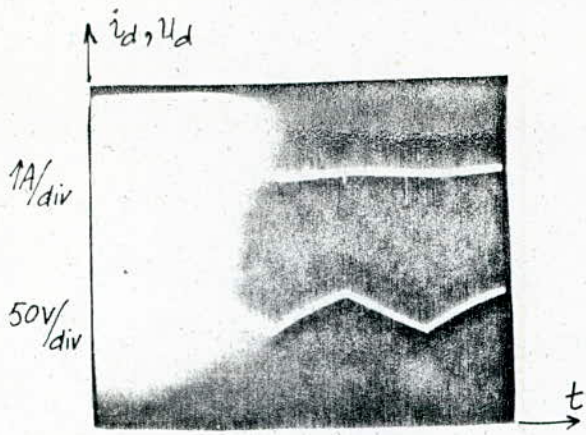


(d') - $f = 200 \text{ Hz}$

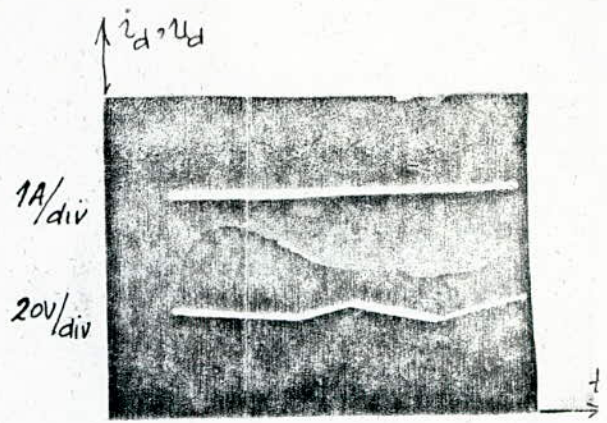


(e') - $f = 300 \text{ Hz}$

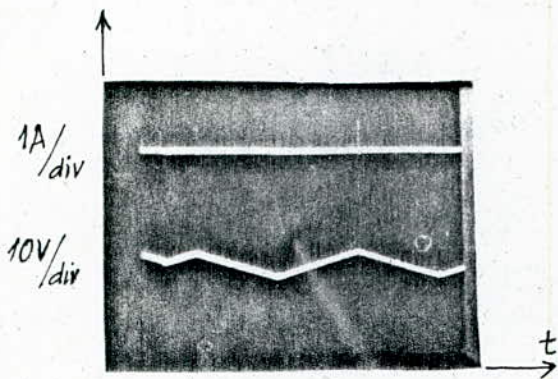
Figures (III. b'; c'; d'; e') - Charge R.



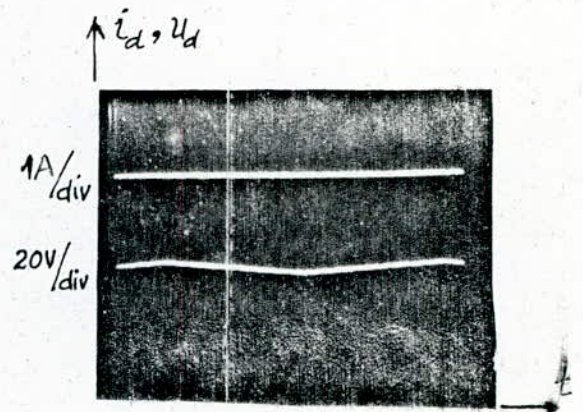
(f') - $f = 50 \text{ Hz}$



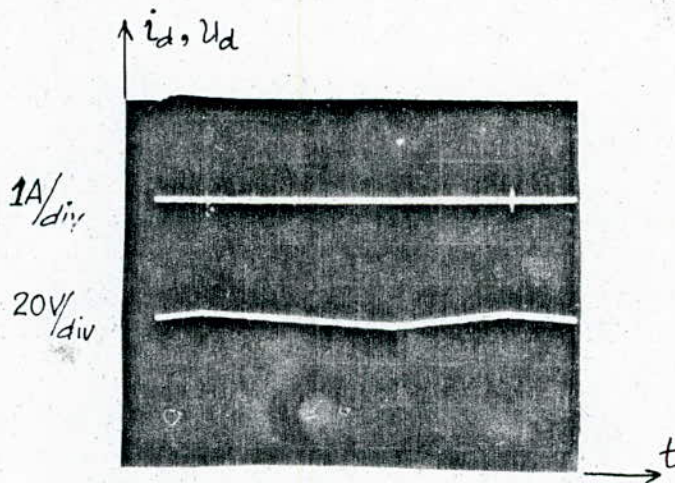
(g') - $f = 100 \text{ Hz}$



(k') - $f = 200 \text{ Hz}$



(i') - $f = 250 \text{ Hz}$



(j') - $f = 300 \text{ Hz}$

Figures (III. f'; g'; k'; i'; j') -
charge (R, L).

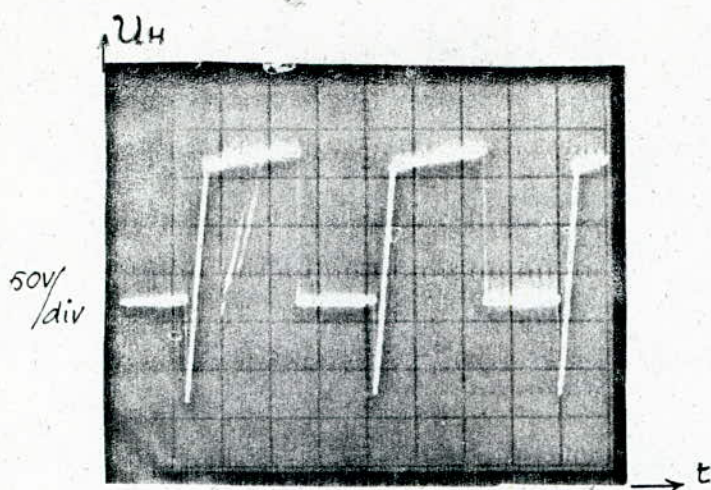


Fig.(III.a')-

Tension U_H aux bornes
du Hacheur. ($f = 50\text{Hz}$).

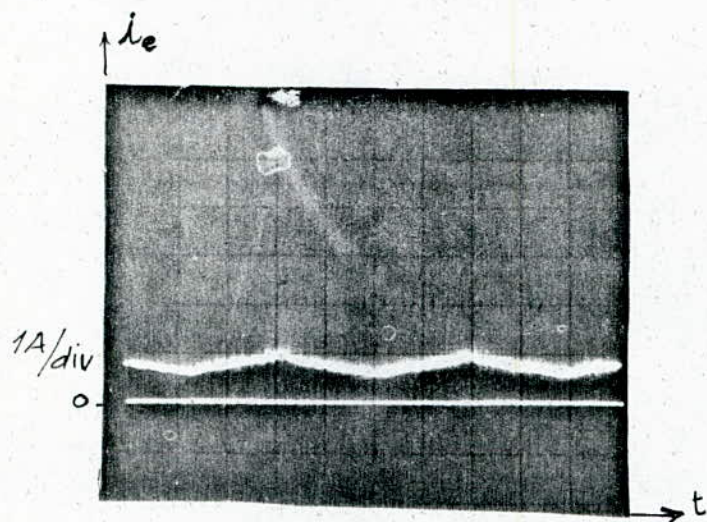


fig.(III.k')-

Courant délivré par le réseau
continu variable.
($f = 50\text{Hz}$)

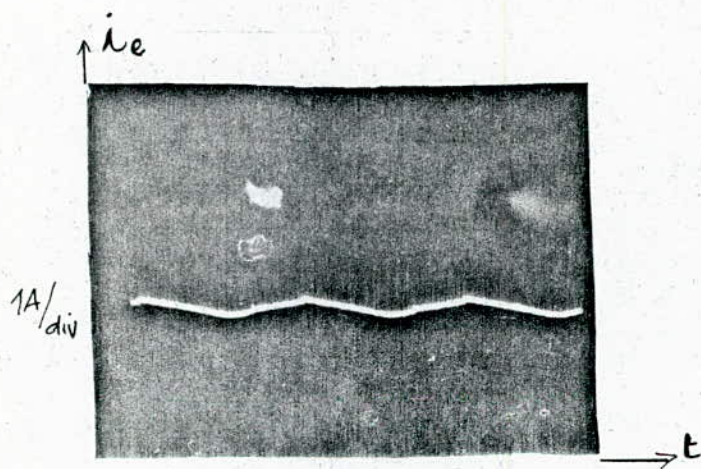
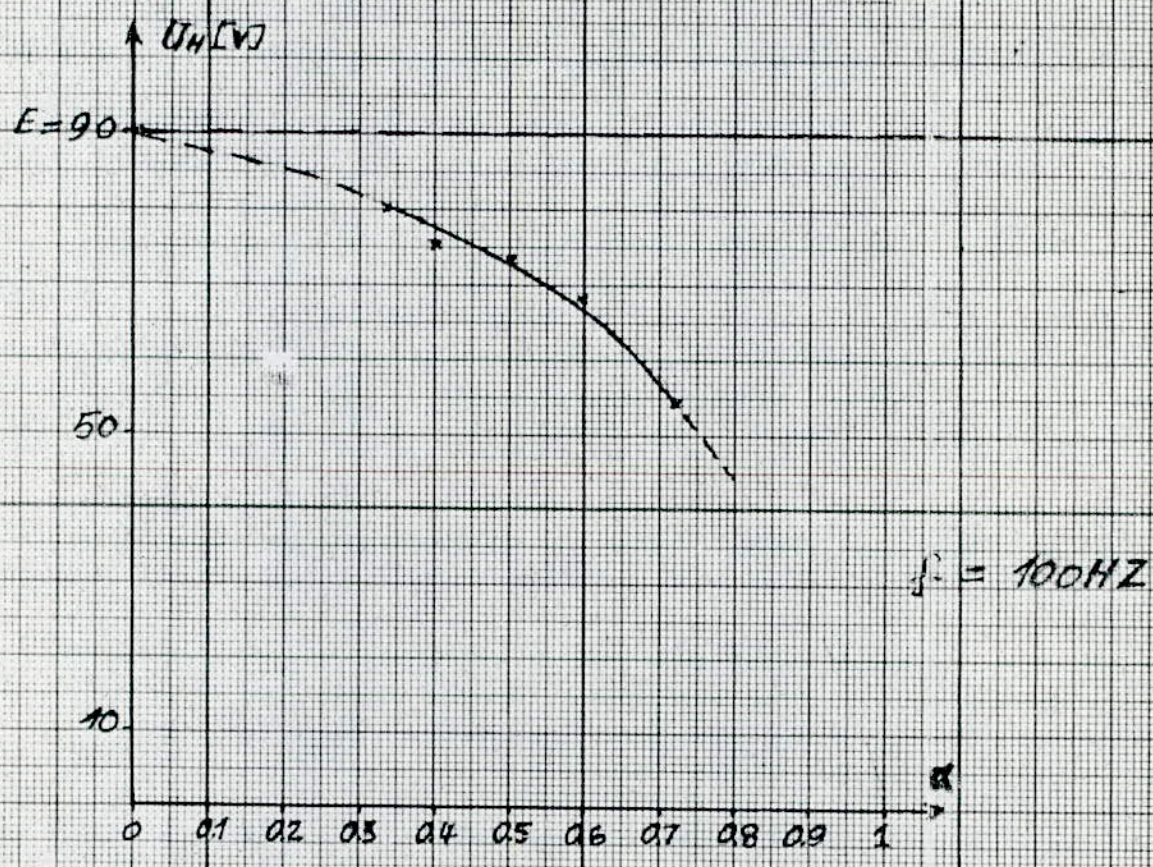
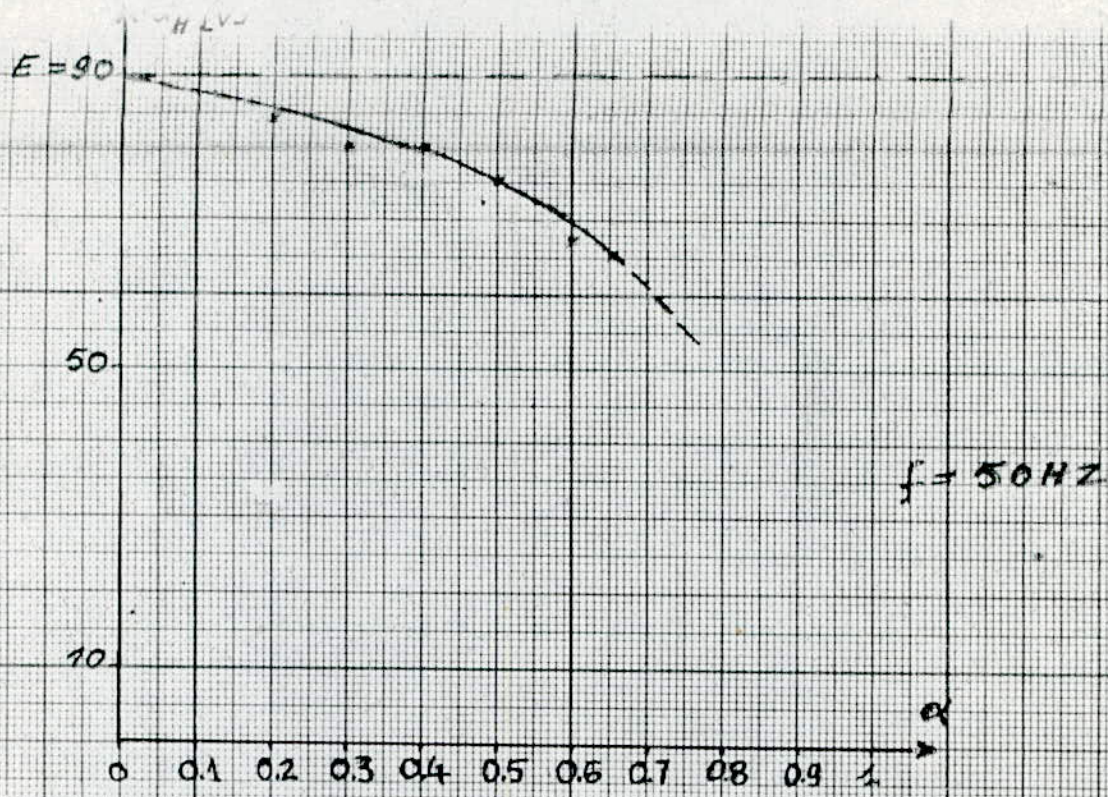


fig.(III.l')-

Courant délivré par
la batterie.
($f = 50\text{Hz}$).



Fig(III.8). " Tension moyenne aux bornes du Hacheur
 HACHEUR SURVOLTEUR, charge (R,L).

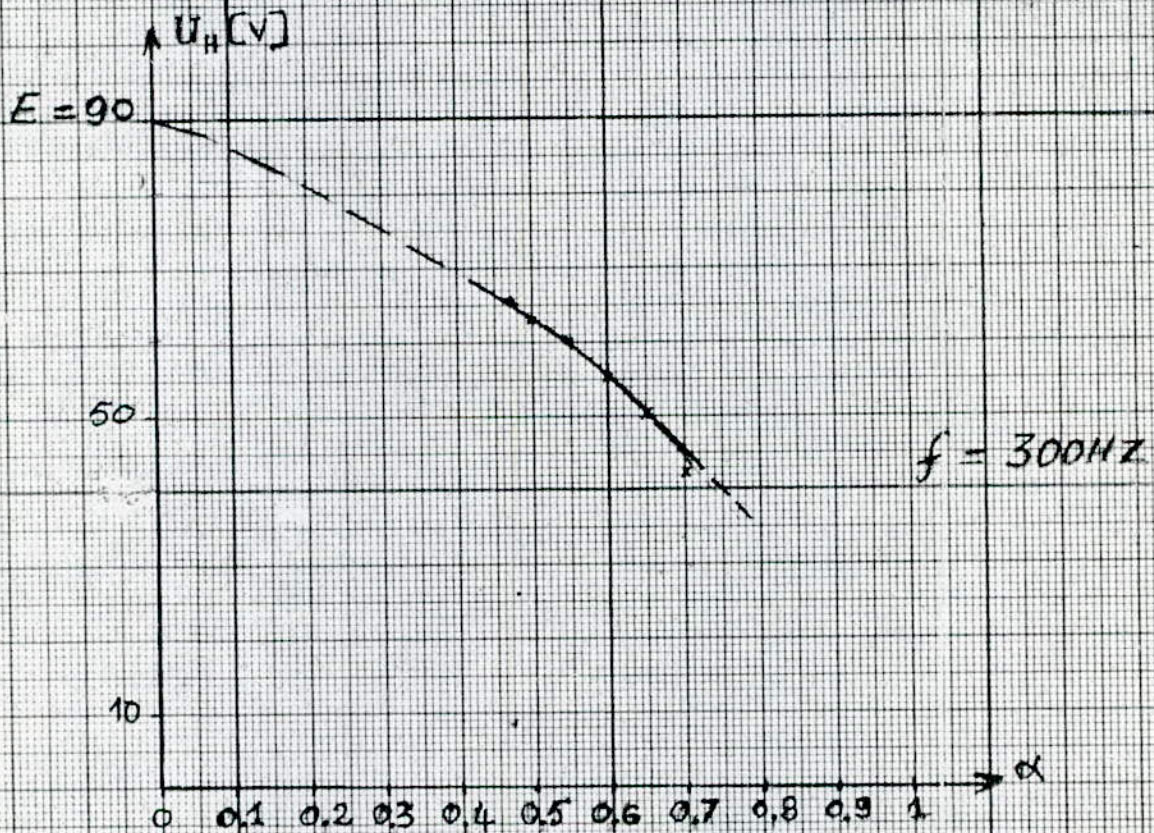
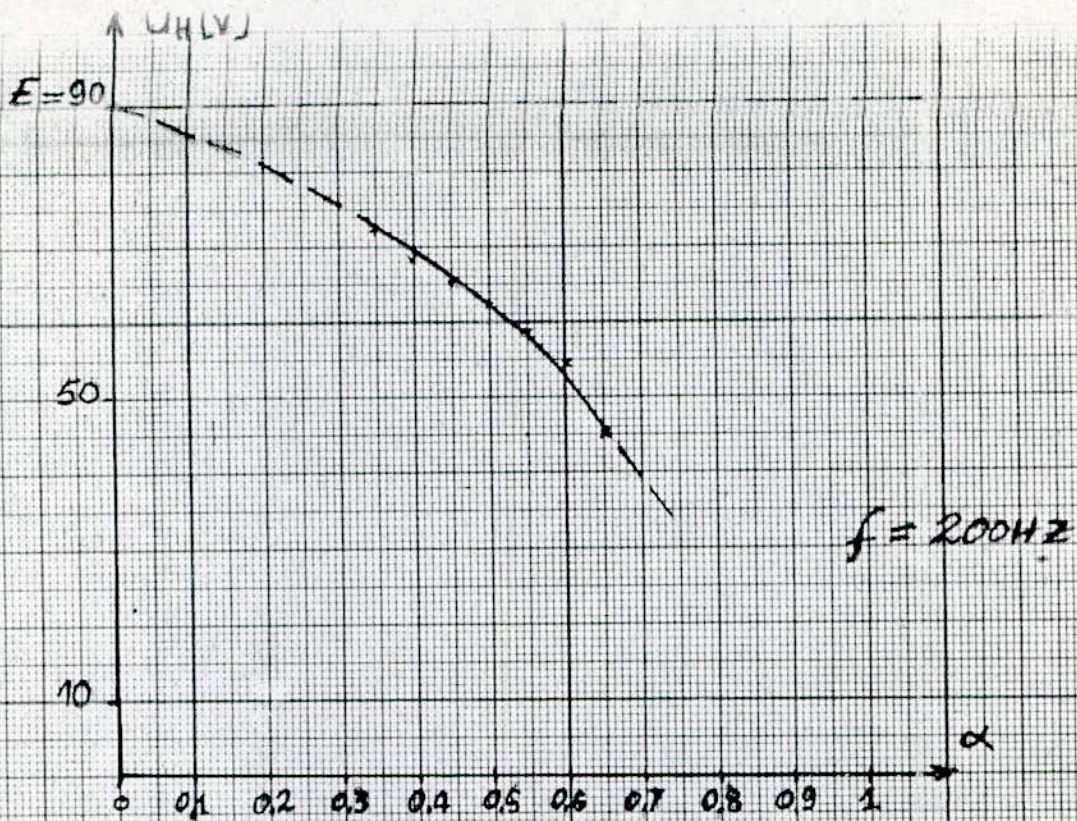


Fig (III.8) - "Tension moyenne aux bornes du Hacheur".
 HACHEUR SURVOLTEUR; charge (R,L).

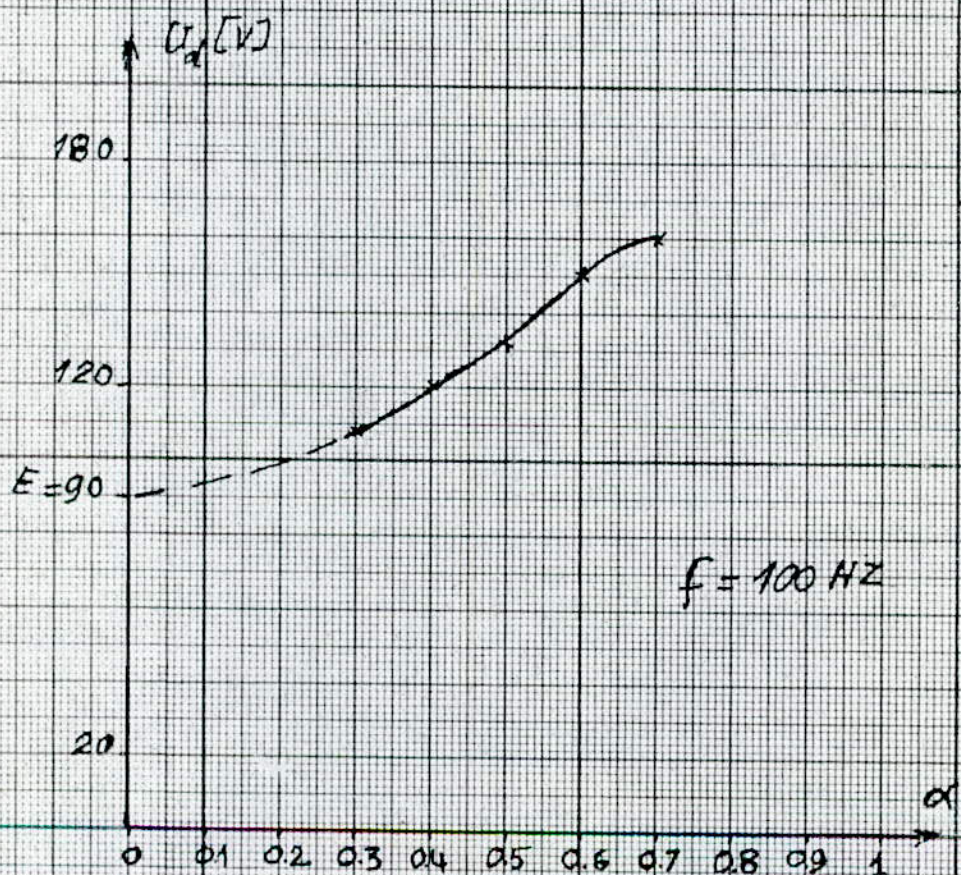
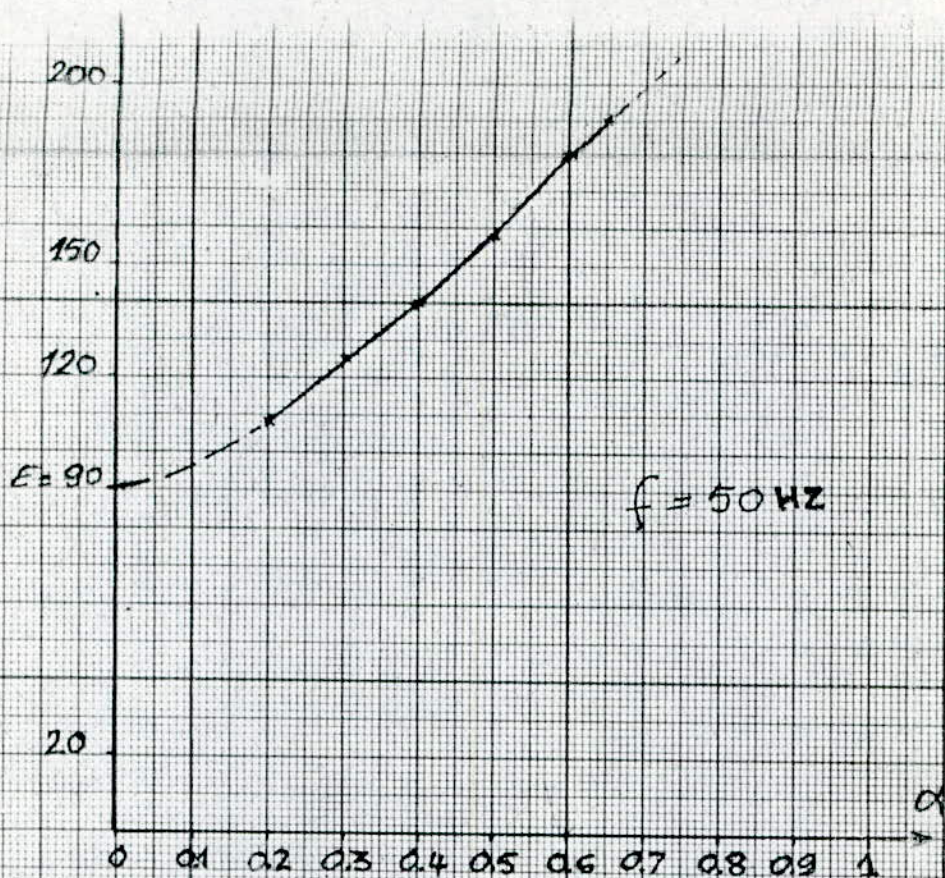
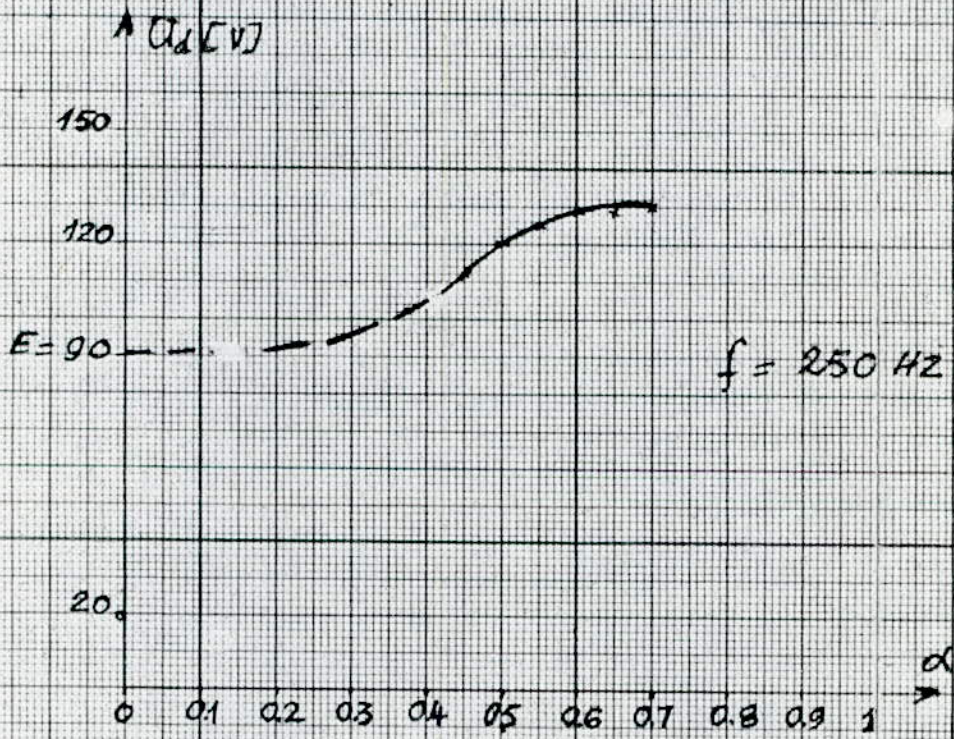
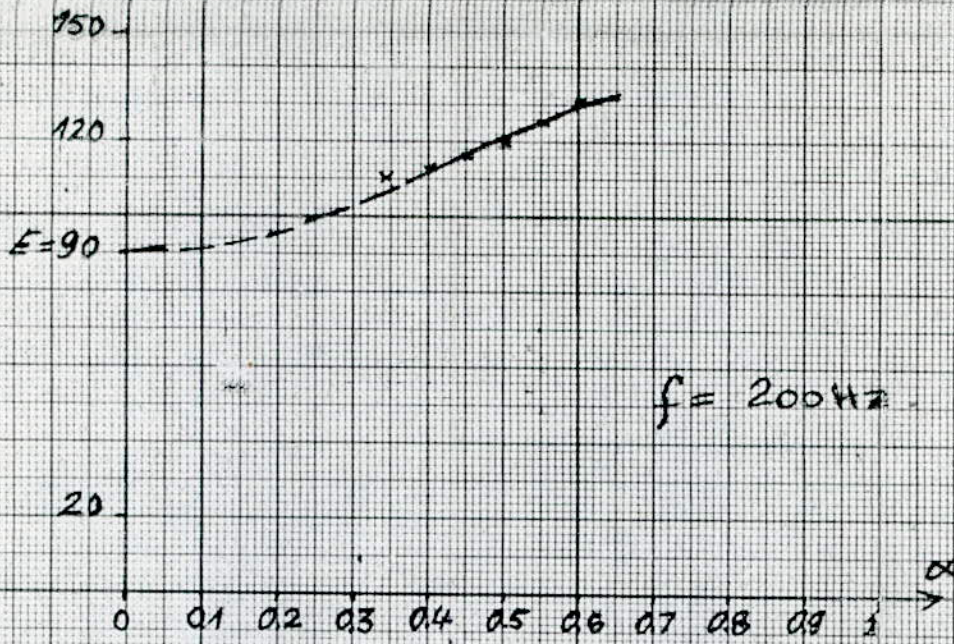


Fig (III.6) - Tension moyenne aux bornes d'une charge résistive.

- HACHEUR SURVOLTEUR -



Fig(III.6') - Tension moyenne aux bornes d'une charge résistive -

- HACHEUR SURVOLTEUR -

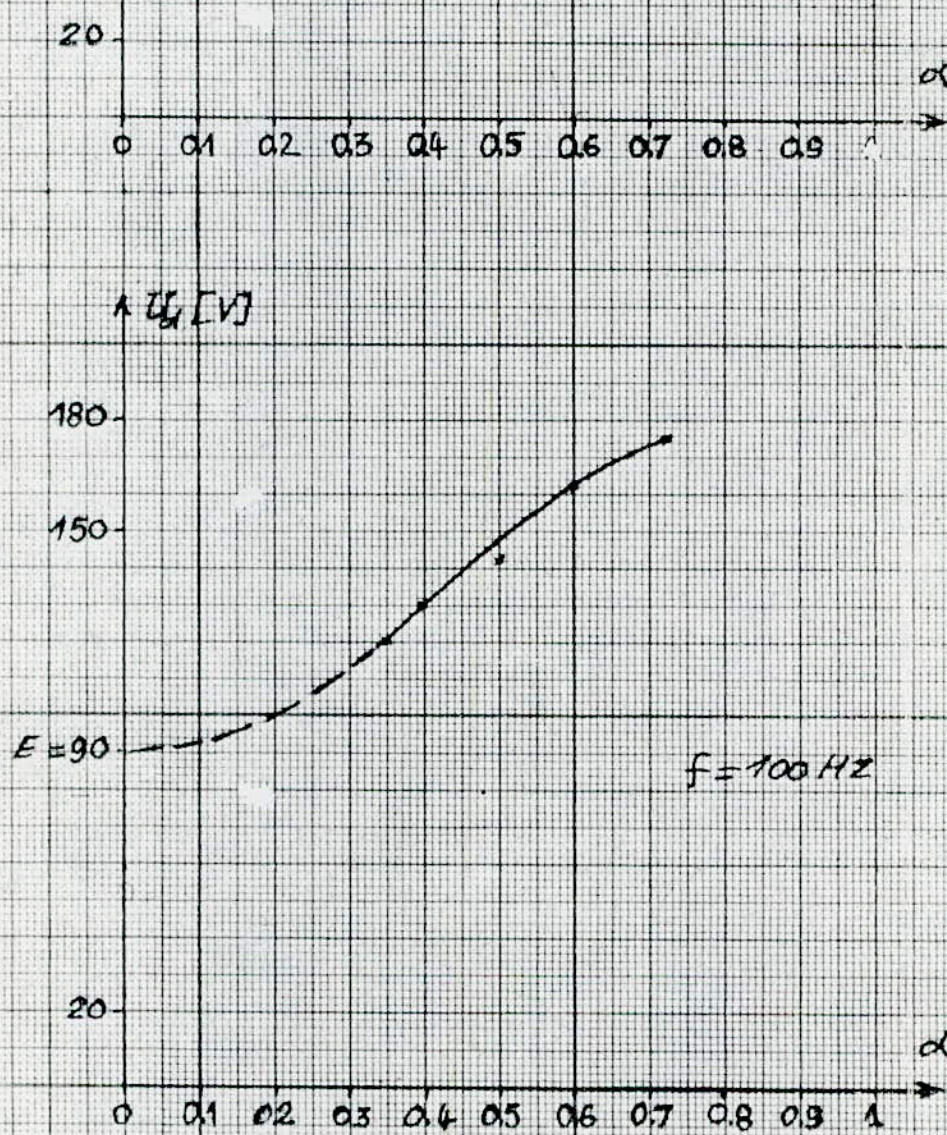
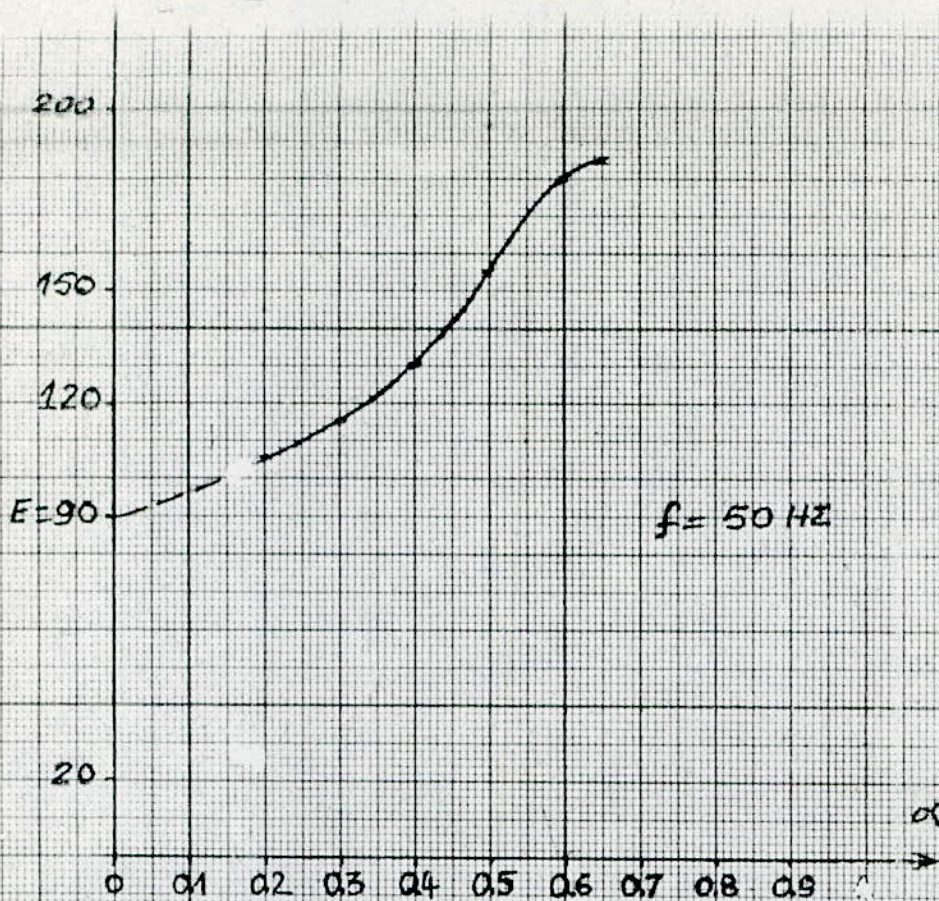


Fig (III.9) "Tensione moyenne aux bornes d'une charge inductive"

HACHEUR SURVOLTEUR

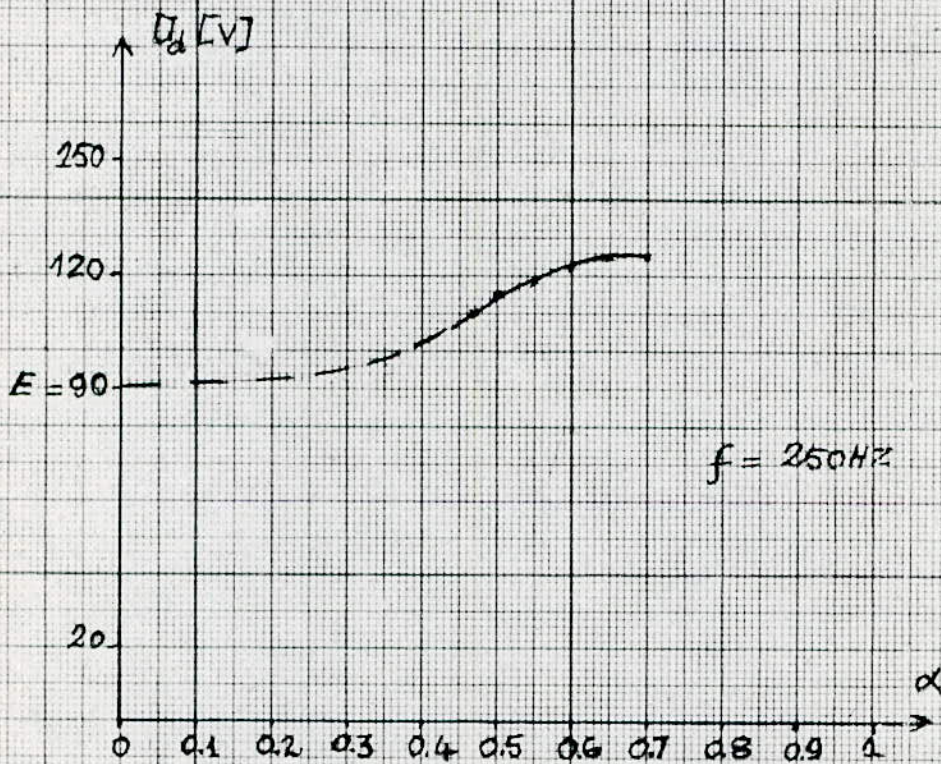
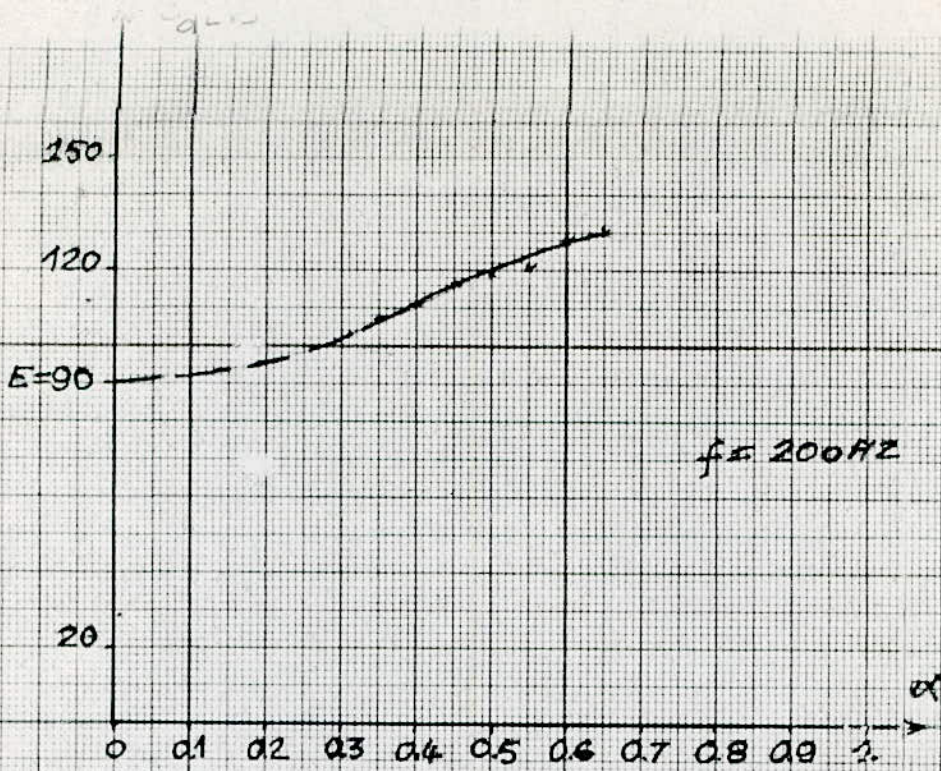


Fig (III.9') - "Tension moyenne aux bornes d'une charge inductive".
- HACHEUR SURVOLTEUR -

Conclusion

L'augmentation de la fréquence de fonctionnement du hacheur simple voie à thyristors, réduit considérablement la plage de variation du rapport cyclique, d'où une mauvaise exploitation du hacheur . Une solution très intéressante à ce problème consiste à entrelacer deux ou plusieurs hacheurs.

Le montage série du hacheur permet de régler avec souplesse la vitesse d'un moteur à courant continu, à partir d'une tension continue fixe, alors que son montage parallèle permet d'assurer et de contrôler le freinage rhéostatique ou en récupération . Il est possible d'assurer le transfert de la puissance dans les deux sens en adoptant le montage :

Hacheur série-parallèle réversible en courant . Ainsi, par cette combinaison, il est possible d'assurer la commande du moteur dans *deux de ses* quadrants de fonctionnement .

Nous espérons que cette étude sera utile et d'un apport non négligeable pour d'éventuelles utilisations du hacheur (Freinage, commande des moteurs à courant continu, réversibilité d'un hacheur).

Références Bibliographiques

- Revue ACEC , "Hacheurs à thyristors en traction électrique" [1]
- R. CHAUPRADE, " Commande des moteurs à courant continu " [2]
- G. SEGUIER, " L'électronique de puissance " [3]
- O. TOUHAMI, " Réalisation du hacheur triphasé " [4]
- F. MILSANT, " Cours d'électronique: 5. Diodes, thyristors, commande des moteurs " [5]
- H. BUHLER, "Electronique de puissance " [6]
- J.L. DALMASSO, "Cours d'électrotechnique : 2. Traitement de l'énergie électrique " [7]
- A. Hebert; C. Naudet et M. Pinard . "Machines électriques Electronique de puissance " [8]
- A. IKHLEF, A. LAKHDARI " Etude et réalisation d'un hacheur série à deux thyristors auxiliaires" P.F.E Juin 1984 . [9]

