

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

22/87

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

20x

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : ELECTROTECHNIQUE

مدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

Dimensionnement du Filtre(L.C) dans le
Cas des Hacheurs

Proposé Par :

A. MAAZI

O. TOUHAMI

Etudié par :

RIANE SADEK

HAMADI ABDELHAMID

Dirigé par :

A. MAAZI

O. TOUHAMI

PROMOTION : JUIN 1987

DEDICACES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

A la mémoire de mon père
A ma mère
A mes frères et soeurs
A mes amis

Hamid

A toute ma famille
A mes amis

Sadek

- R E M E R C I E M E N T S -

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à :

Mr TOUHAMI

Mr MAAZI

Pour nous avoir proposé ce sujet et avoir suivi avec beaucoup d'attention tout notre travail.

Nous remercions aussi tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin pour la réalisation de ce sujet.

SADEK & HAMID.

- 2 -

-o- CHAPITRE -o-

- I -

-o- G E N E R A L I T E S -o-

I-1 - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU HACHEUR :

DEF : Un hacheur est un contacteur statique qui est alimenté à partir d'une source à tension continue fixe, peut fournir à une charge une tension continue variable.

Le hacheur est fermé régulièrement à des intervalles de temps égaux à T_p (T_p : Période de hachage) et reste fermé pendant un temps égale à αT_p avec $0 < \alpha < 1$ (α : rapport cyclique)
 $\alpha = T_1 / T_p$.

La charge est soumise périodiquement à une tension égale à la tension d'alimentation pendant une durée égale à $\alpha \cdot T_p$ et à une tension nulle pendant une durée égale à $(T_p - \alpha T_p)$.

Dans le cas où la charge est active, constituée d'un moteur à courant continu, le courant de charge I_a ne peut être interrompu lorsqu'on ouvre l'interrupteur, c'est la raison pour laquelle on branche une diode de ~~deversement~~ ^{de} (dite diode de roue libre) en parallèle avec la charge.

Si la constante de temps de la charge est suffisamment grande par rapport à la période de hachage, le courant de charge augmente quand le hacheur est fermé et diminue quand le hacheur est ouvert. Quand le hacheur est ouvert la tension aux bornes de la charge est faiblement négative qui est égale à la chute de tension dans la diode de roue libre mais on peut assimiler cette faible tension négative à une tension nulle.

La tension moyenne aux bornes de la charge $U_{moy} = \alpha V_s$, c'est cette tension qui détermine le courant moyen circulant dans la charge, comme cette dernière est un moteur, on tient compte de la f.c.e.m. (force- contre - électromotrice) du moteur.

En réglant le rapport cyclique α , on peut soit contrôler la tension moyenne aux bornes de la charge, soit le courant moyen qui la traverse.

Le hacheur permet donc, à partir d'une tension continue fixe, d'alimenter une charge à tension continue variable.

En se référant aux formes d'ondes, on constate que cette tension variable est réalisée en hachant la tension d'entrée en impulsions rectangulaires de durée égale à $\alpha \cdot T_p$.

I.2 - CHOIX DE LA FREQUENCE DE HACHAGE -

I.2.1 A)- INFLUENCE DE LA FREQUENCE SUR LES COMPOSANTS DU HACHEUR :

Les pertes dans les semi-conducteurs résultent essentiellement de la conduction et des commutations.

Augmenter la fréquence revient donc à augmenter les pertes.

Et par conséquent à déclasser les semi-conducteurs. De plus pour les hacheurs à thyristors, un temps minimal de conduction est obligatoire pour préparer les circuits de désarmorage.

I.2.2 B)- INFLUENCE DE LA FREQUENCE SUR LA CHARGE :

Pour assurer un courant quasi-constant dans la charge, on constate que la constante de temps de la charge est suffisamment grande par rapport à la période de hachage mais lorsque la charge est constituée par un moteur, il faut s'assurer que l'ondulation du courant ne dépasse pas ce qui est admissible pour un moteur à courant continu, compte-tenu des pertes par échauffement dû à la composante alternative du courant et compte-tenu de la bonne commutation du moteur.

Une autre raison peut amener à réduire l'ondulation du courant, le hacheur doit être dimensionné pour couper le courant maximal de la charge, plus ce courant est élevé, plus le dispositif est coûteux.

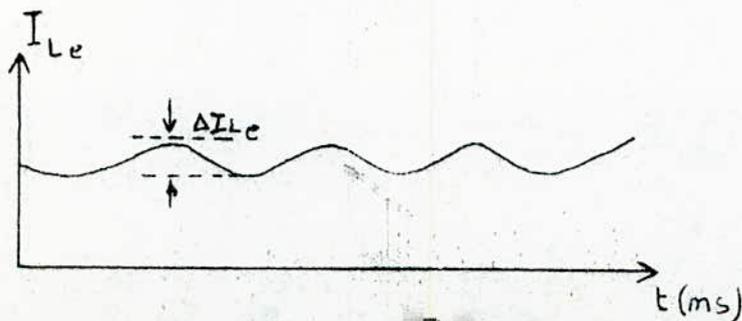
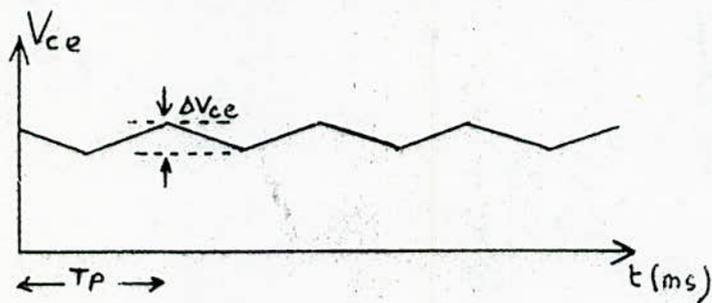
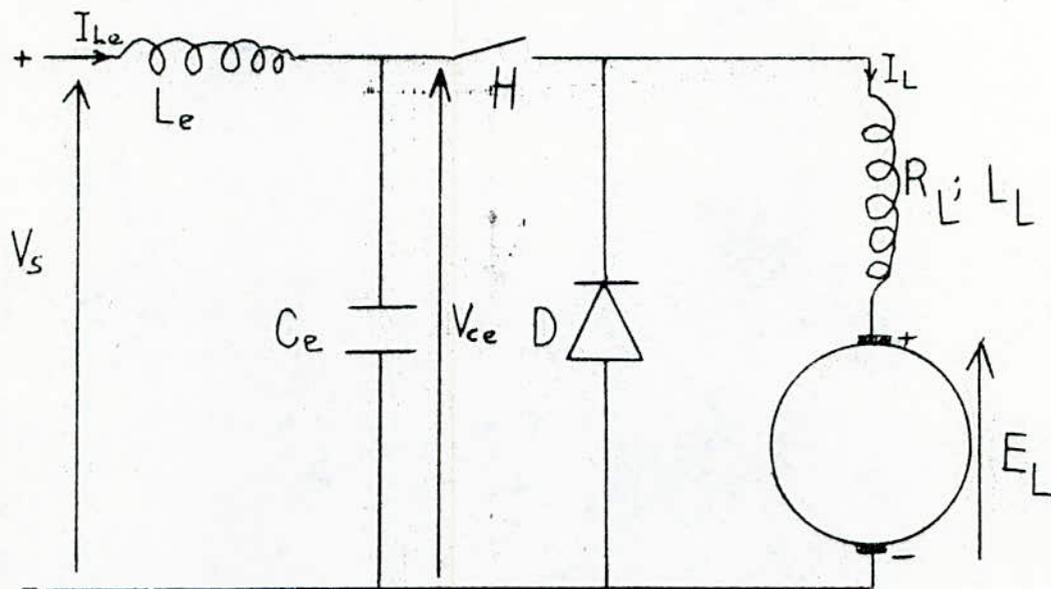
L'amplitude de l'ondulation crête à crête du courant dans la charge est d'autant plus grande que la fréquence de hachage est faible et que la self de la charge est petite.

Si le hachage s'effectue à trop basse fréquence, il faut prévoir en série avec la charge, une self lourde, encombrante et onéreuse.

123 c)- INFLUENCE DE LA FREQUENCE SUR LA SOURCE D'ALIMENTATION.

Dans le cas où l'alimentation est une source de tension d'impédance interne nulle, exemple batterie, la cellule de filtrage n'est pas nécessaire.

Par contre dans le cas le plus général d'une alimentation par ligne caténaire ou par 3ème rails comme dans des réseaux de tractions, il est indispensable 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_e , et d'un condensateur C_e



I.3 - RÔLE DU CONDENSATEUR C_e :

Le condensateur (C_e) rend possible le soutirage, par le hacheur, de courants pulsés et C_e ; malgré la présence de la self du réseau, en plus de son rôle de recevoir d'énergie, il réduit les surtensions présentes de manière à les ramener à un niveau acceptable à l'entrée du hacheur.

- Surtensions de manoeuvres dans la ligne d'alimentation.
- Surtensions provoquées par la coupure du courant de charge dans les thyristors principaux.

La coupure étant réalisée très rapidement par les thyristors, l'énergie magnétique emmagasinée dans la self de ligne et dans celle d'entrée se transforme en énergie potentielle aux bornes du condensateur (C_e) qui voit sa tension s'élever.

- Surtensions provoquées par le fonctionnement normal du hacheur.

I.4 - RÔLE DE LA SELF L_e :

La self (L_e) réduit l'ondulation du courant de ligne à une amplitude suffisamment basse pour ne pas perturber d'autres utilisateurs.

Cela est très important en traction électrique où la présence de courants alternatifs (alternatifs) dans les rails peut perturber les circuits de signalisation ou de télécontrôle.

I.5 - ENTRELACEMENT DES HACHEURS :

Le choix de la fréquence résulte d'un compromis entre les impératifs du hacheur, de l'utilisation et de la source d'alimentation.

Pour réduire les dimensions et le coût de la cellule de filtrage d'entrée et de la self de lissage, nous avons intérêt à faire travailler le hacheur à la fréquence la plus élevée possible. Nous sommes toutefois limités dans cette voie par les caractéristiques propres des thyristors.

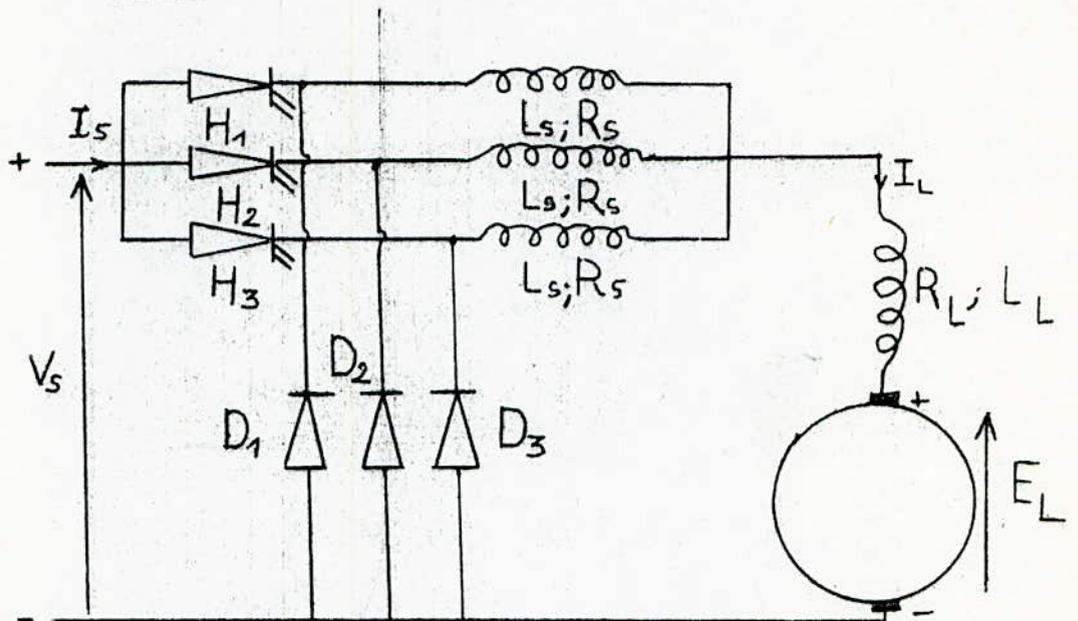
Une solution très intéressante à ce problème du choix de la fréquence est l'entrelacement du hacheur. Elle consiste à utiliser deux ou plusieurs hacheurs qui fonctionnent à la même fréquence, mais dont les commandes sont judicieusement déphasées.

L'entrelacement *des* hacheurs permet de solliciter la charge et la source d'alimentation à une fréquence multiple de celle de hachage.

- PRESENTATION DU HACHEUR ENTRELACE :

Nous présentons comme exemple un hacheur triphasé.

Schéma :



Soit T_p : Période de hachage.

le hacheur H_1 conduit de 0 à $T_p/3$

le Hacheur H_2 conduit de $T_p/3$ à $2 T_p/3$

le Hacheur H_3 conduit de $2 T_p/3$ à T_p .

CHAPITRE

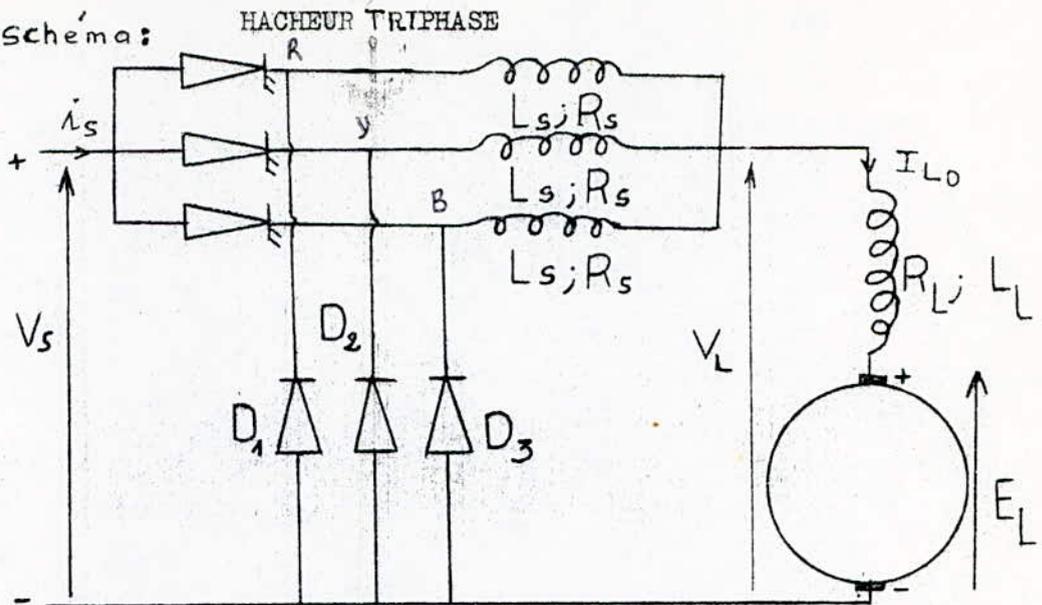
- II -

ÉTUDE DES HARMONIQUES DE TENSION

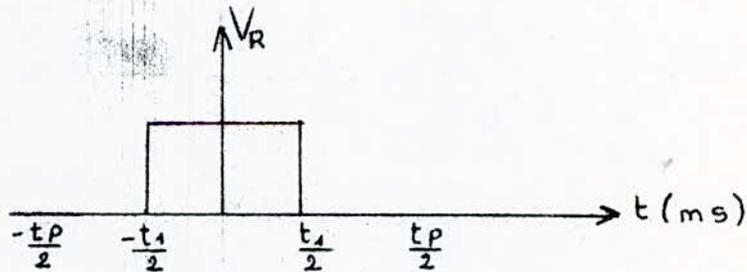
ET DE COURANT

II.1.1

Schéma:



Les thyristors sont allumés et commutés de 120° relatif à la période du hacheur. La conduction est continue quand le thyristor est fermé. Les tensions V_R ; V_y et V_B sont rectangulaires d'amplitude V_s quand le thyristor conduit et d'amplitude zéro quand la diode conduit. La forme de la tension de la phase rouge V_R est donnée par la figure (2), la forme de V_y et V_b sont identiques à V_R mais décalées respectivement de 120° et 240° .



II.1.2

A) Analyse des harmoniques des tensions de phase :

avec le temps t_1 et la période du hacheur t_p , la forme de V_r est représentée par la série de Fourier.

$$V_R = \frac{a_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos m\omega t + \sum_{m=1}^{\infty} b_m \sin m\omega t$$

$b_m = 0$ (Vu qu'on a une symétrie par rapport à l'axe des tensions)

$$a_m = \frac{2}{T_p} \int_{-t_1/2}^{t_1/2} V_s \cos m\omega t \, dt = \frac{2}{T_p m \omega} V_s \left[\sin m\omega t \right]_{-t_1/2}^{t_1/2}$$

$$a_m = \frac{2 V_s}{m \omega T_p} \left[2 \sin m\omega t_1/2 \right] \quad \text{avec } \omega = 2\pi/T_p$$

$$a_m = \frac{2 V_s}{m \cdot \pi} \sin \pi \frac{t_1}{T_p} \cdot m$$

Valeur moyenne :

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T_p} \int_{-t_1/2}^{t_1/2} V_s \, dt = V_s \frac{t_1}{T_p}$$

$$\frac{a_0}{2} = V_s \frac{t_1}{T_p}$$

$$V_1 = R_s I_1 + L_s \frac{d I_1}{d t} + M_s \frac{d I_2}{d t} + M_s \frac{d I_3}{d t}$$

$$V_2 = R_s I_2 + L_s \frac{d I_2}{d t} + M_s \frac{d I_1}{d t} + M_s \frac{d I_3}{d t}$$

$$V_3 = R_s I_3 + L_s \frac{d I_3}{d t} + M_s \frac{d I_1}{d t} + M_s \frac{d I_2}{d t}$$

$$V_R = V_1 + V_{L1}$$

$$V_Y = V_2 + V_{L2}$$

$$V_B = V_3 + V_{L3}$$

avec

$$V_{L1} = R_L I_{L0} + L \frac{d I_{L0}}{d t} + E_{L1}$$

$$V_{L2} = R_L I_{L0} + L \frac{d I_{L0}}{d t} + E_{L2}$$

$$V_{L3} = R_L I_{L0} + L \frac{d I_{L0}}{d t} + E_{L3}$$

Et

$$E_L = E_{L1} + E_{L2} + E_{L3}$$

$$V_L = V_{L1} + V_{L2} + V_{L3}$$

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_{L0}$$

$$V_s \frac{t_1}{t_p} = R_s [I_1 + I_2 + I_3] + L_s \left[\frac{dI_1}{dt} + \frac{dI_2}{dt} + \frac{dI_3}{dt} \right] + 2M_s \left[\frac{dI_1}{dt} + \frac{dI_2}{dt} + \frac{dI_3}{dt} \right]$$

$$+ 3 R_L I_{Lo} + 3 L_L \frac{dI_{Lo}}{dt} + (E_{L1} + E_{L2} + E_{L3})$$

en alternatif : $\frac{d}{dt} = j \omega$ avec $\omega = \frac{2\pi}{t_p}$

$$V_s \frac{t_1}{t_p} = R_s I_{Lo} + j L_s \omega I_{Lo} + j 2 \omega M_s I_{Lo} + 3 R_L I_{Lo} + j 3 L_L \omega I_{Lo} + E_L$$

$$V_s \frac{t_1}{t_p} = \left[(R_s + 3 R_L) + j \frac{2\pi}{t_p} (2 M_s + 3 L_L + L_s) \right] I_{Lo} + E_L$$

$$V_s \frac{t_1}{t_p} - E_L = \left[(R_s + 3 R_L) + j \frac{2\pi}{t_p} (2 M_s + 3 L_L + L_s) \right] I_{Lo}$$

Pour m harmoniques

$$\sum_m \frac{\phi_m}{t_p} = R_s + 3 R_L + j m \frac{2\pi}{t_p} (2 M_s + 3 L_L + L_s)$$

pour $m = 0$

$$Z_0 = R_s + 3 R_L$$

$$I_0 = \frac{V_s \frac{t_1}{t_p} - E_L}{(R_s + 3 R_L)}$$

I_0 : courant moyen

Pour m harmoniques :

$$I_m = \frac{V_s \cdot t_1 / t_p - E_L}{Z_m} = \frac{V_m}{Z_m \cdot L \cdot \phi_m} = \frac{V_m}{Z_m} \quad / - \phi_m$$

$$\text{avec } \phi_m = \arctg \frac{2\pi m (2M_s + 3L_L + L_s)}{t_p (R_s + 3R_L)}$$

II.1.3 B) Les HARMONIQUES POUR LE COURANT :

pour la première phase, le courant est donné par la série de Fourier.

$$I_R = I_0 + \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos m\omega t$$

I_0 : courant moyen

$$a_m = \frac{2}{t_p} \int_{-t_1/2}^{t_1/2} \frac{V_s}{Z_m} \cos m\omega t \, dt$$

$$a_m = \frac{2 V_s}{Z_m \cdot t_p \cdot m \cdot \omega} \cdot 2 \cdot \sin m \cdot \pi \cdot \frac{t_1}{t_p} = \frac{2 V_s}{m \cdot \pi \cdot Z_m} \sin \pi \cdot \frac{t_1}{t_p} \cdot m$$

comme $a_m = I_m \dots$

$$I_R = I_0 + \sum_{m=1}^{\infty} I_m \cos \left(m \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{t}{t_p} - \phi_m \right)$$

d'où

$$I_L = 3 I_0 + \sum_{m=1}^{\infty} I_m \cos \left(m \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{t}{t_p} - \phi_m \right) + \sum_{m=1}^{\infty} I_m \cos \left(m \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{t}{t_p} - \phi_m - 2\pi/3 \right)$$

$$+ \sum_{m=1}^{\infty} I_m \cos \left(m \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{t}{t_p} - \phi_m - 4\pi/3 \right)$$

II.1.4 ANALYSE DE FOURIER Approchée :

pour obtenir les harmoniques de courants continus dans le thyristor, la phase du courant est multipliée par une fonction commutatrice $s(t)$ avec l'amplitude V_s est égale à 1 pour la première phase :

$$S_R(t) = \sum_{n=0} S_{Rn} \cdot \cos n \cdot 2\pi \frac{t}{T_P}$$

$$S_{Rn} = 2 \cdot \frac{\sin n \cdot \pi \cdot t_1 / T_P}{n \cdot \pi}$$

$$\text{Vu que } S_{Rn} = \frac{2}{T_P} \int_{-t_1/2}^{t_1/2} V_s \cos n \cdot 2\pi \cdot \frac{t}{T_P} dt = \frac{2}{n\pi} \sin n\pi \frac{t_1}{T_P}$$

avec $V_s = 1$ volt

En multipliant la première phase du courant qui passe dans le thyristor (R)

$$i_R = \sum_{m=0} I_m \cdot \cos\left(m \cdot 2\pi \frac{t}{T_P} - \phi_m\right)$$

Représente la somme des harmoniques qui passent dans le thyristor R.

$$i_{TR} = \sum_{\substack{m=0 \\ n=0}} I_m S_{Rn} \cdot \cos\left(m \cdot 2\pi \cdot \frac{t}{T_P} - \phi_m\right) \cdot \cos 2\pi \cdot \frac{nt}{T_P}$$

Après plusieurs manipulations, les n èmes harmoniques du courant sont contenues dans le thyristor (R)

La somme des r^{èmes} harmoniques est donné par

$$i_{TR} = I_{TRr} \cdot \cos\left(r \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{t}{T_p} - \phi_{TRr}\right)$$

avec

$$I_{TRr} = \sqrt{D_r^2 + Q_r^2}$$

$$\phi_{TRr} = \arctg\left(\frac{Q_r}{D_r}\right)$$

$$D_i = \sum_{\substack{m=0 \\ n=r-m}} \frac{1}{2} I_m \cdot S_{Rn} \cos \phi_m + \sum_{\substack{m=r \\ n=m-r}} \frac{1}{2} I_m \cdot S_{Rn} \cos \phi_m \\ + \sum_{\substack{m=0 \\ n=r+m}} \frac{1}{2} I_m \cdot S_{Rn} \cos \phi_m$$

$$Q_i = \sum_{\substack{m=0 \\ n=r-m}} \frac{1}{2} I_m \cdot S_{Rn} \sin \phi_m + \sum_{\substack{m=r \\ n=m-r}} \frac{1}{2} I_m \cdot S_{Rn} \sin \phi_m \\ + \sum_{\substack{m=0 \\ n=r+m}} \frac{1}{2} I_m \cdot S_{Rn} \sin \phi_m$$

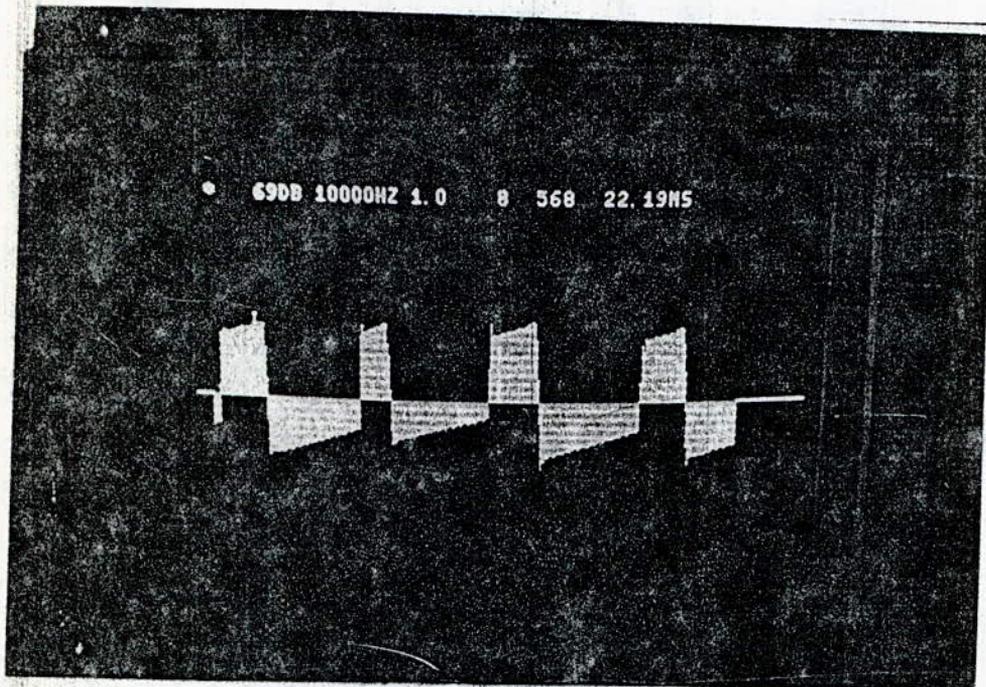
$$\text{avec } S_{Rn} = -2 \frac{\sin n \pi t_1 / T_p}{n \cdot \pi}$$

$$\text{Et } S_{R0} = 1 - t_1 / T_p$$

Le courant d'alimentation i_s est donné par :

$$i_s = 3 \sum I_{TRr} \cos\left(r \cdot 2 \pi \frac{t}{t_P} - \phi_{TRr}\right)$$

$t = 3 K$
 $K = 0$



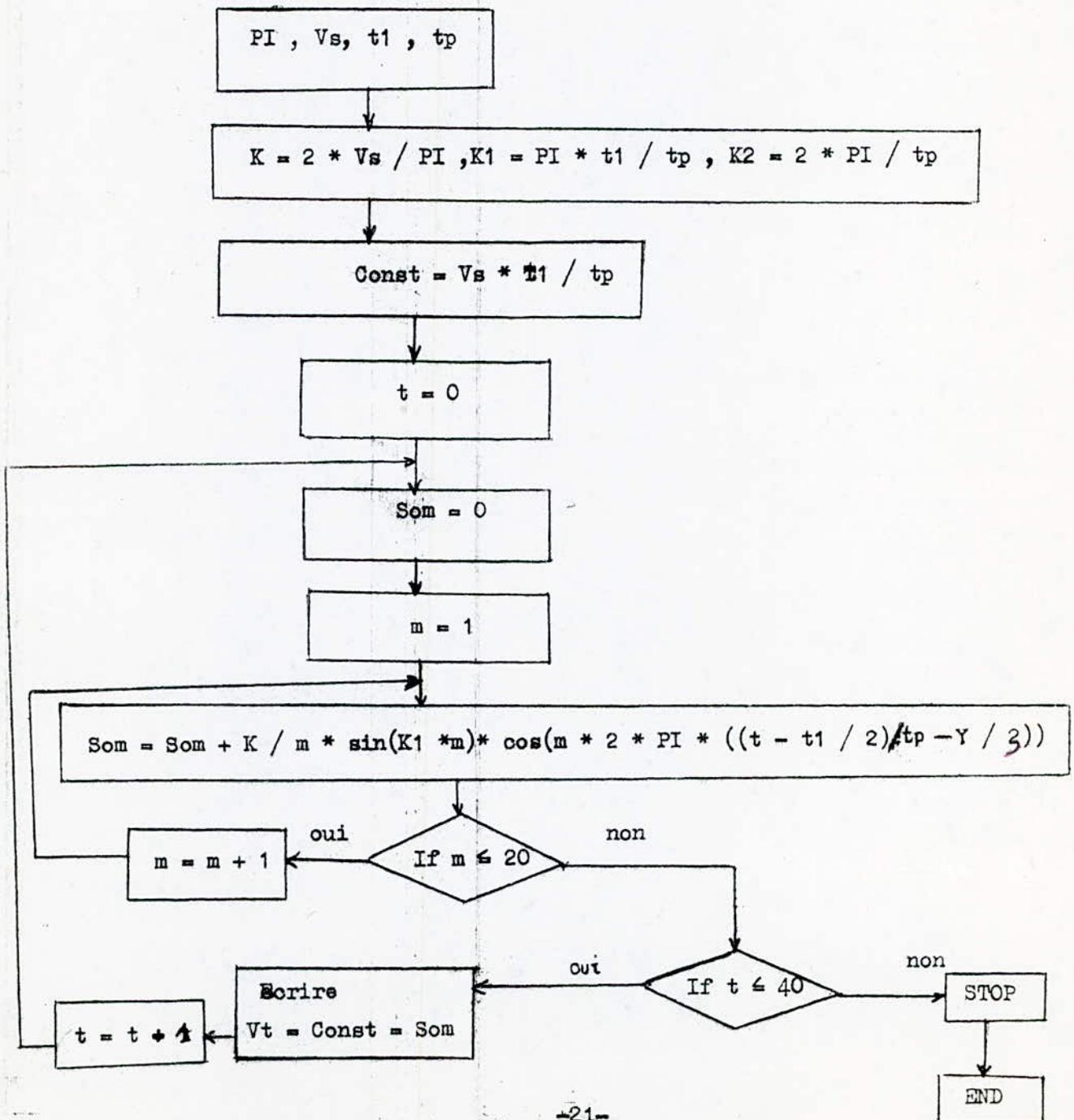
Allure du courant d'entrée pour un
Hacheur(triphasé)

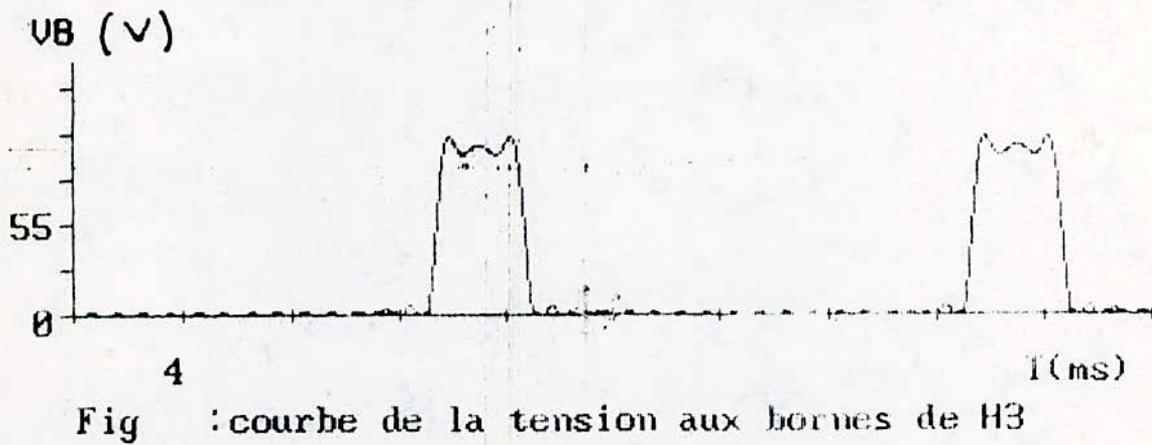
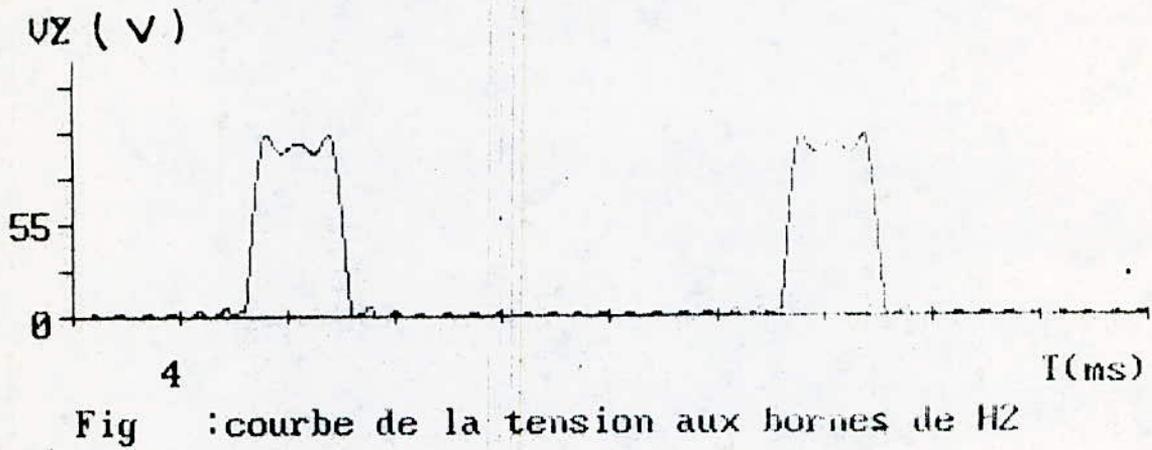
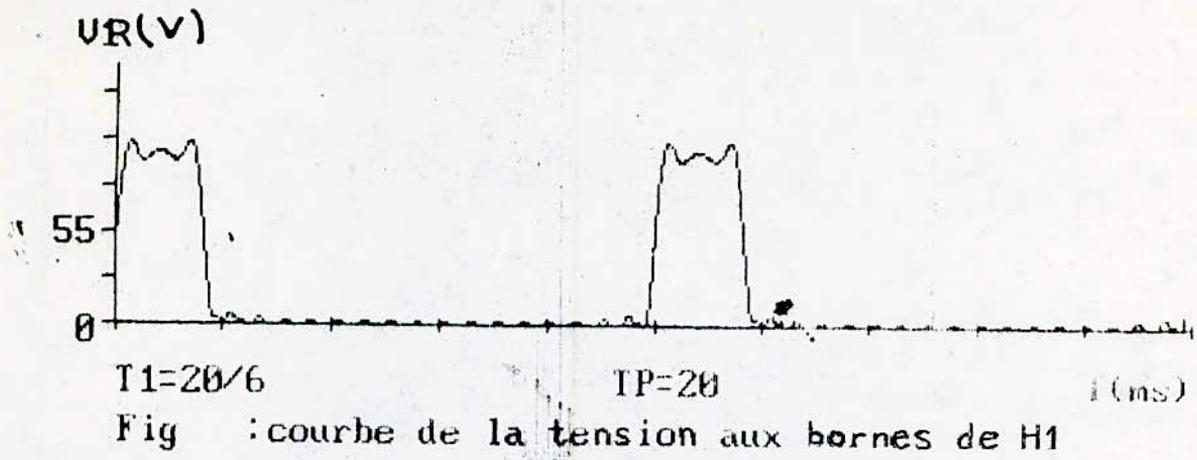
ORGANIGRAMME pour tracer
 les courbes de tensions aux bornes du
 du hacheur triphasé

Y = 0 (Aux bornes de H1)

Y = 1 (Aux bornes de H2)

Y = 2 (Aux bornes de H3)





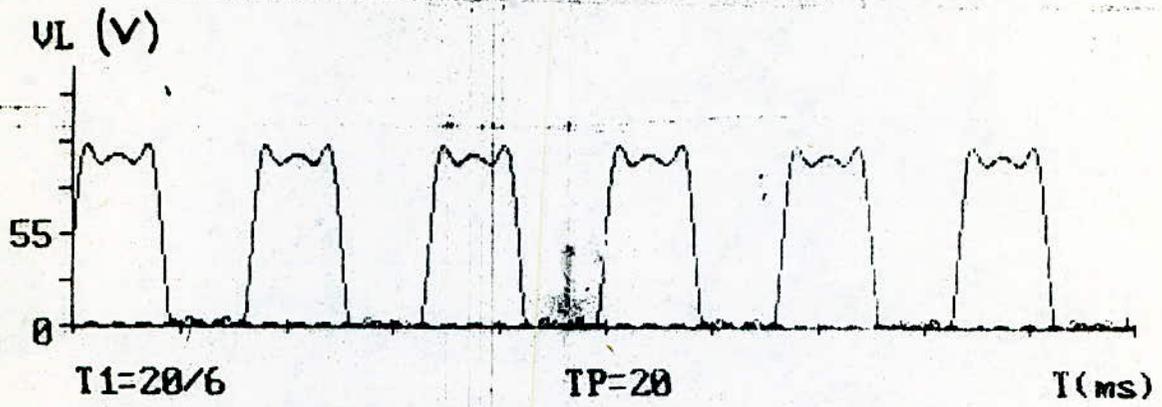
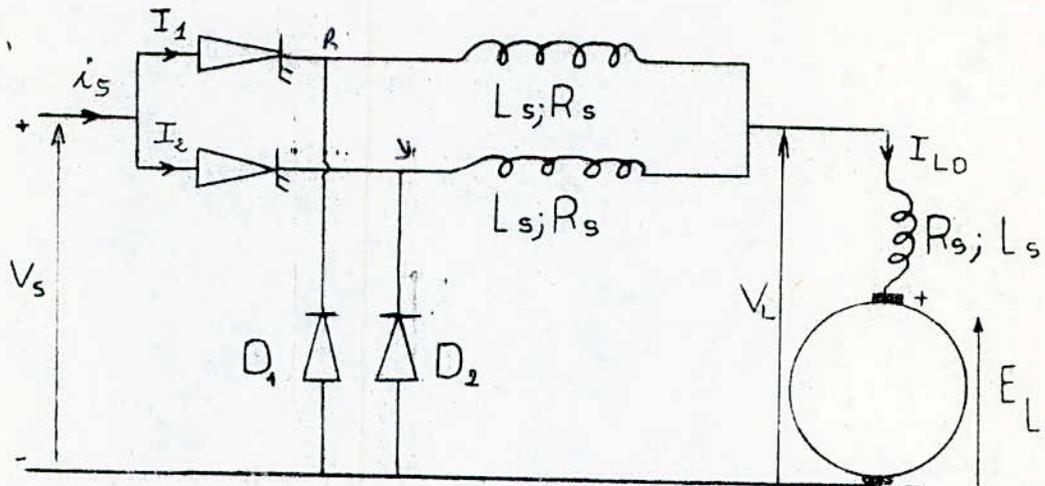


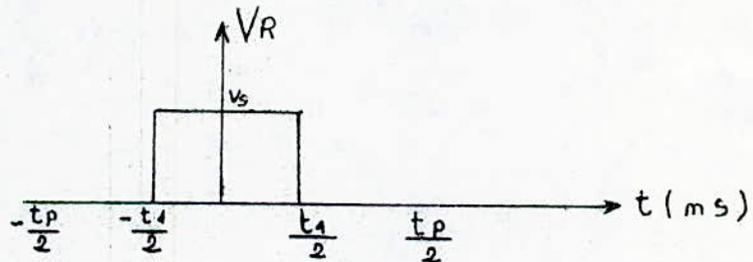
Fig : courbe de la tension aux bornes
du hacheur triphasé

II.2.1 HACHEUR biphasé

schéma de montage :



Forme de la tension



Les thyristors sont allumés et commutés de 180° . La forme de la tension V_R est identique à la tension V_y mais décalée de 180°

II.2.2 A) Analyse des harmoniques de tensions de phase :

$$V_R = \frac{a_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos m\omega t$$

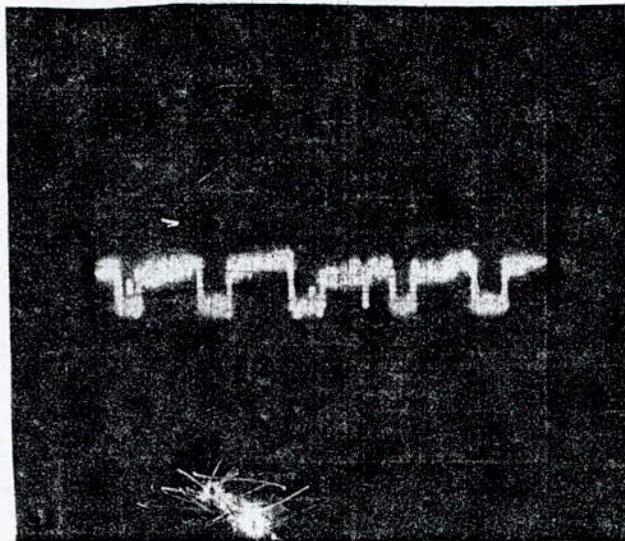
$$a_0/2 = \frac{1}{t_p} \int_{-t_1/2}^{t_1/2} V_s dt = V_s \frac{t_1}{t_p}$$

$$a_m = \frac{2}{t_p} \int_{-t_1/2}^{t_1/2} V_s \cos m \omega t \, dt = \frac{2V_s}{m\pi} \sin m \cdot \pi \frac{t_1}{t_p}$$

$$V_R = V_s \frac{t_1}{t_p} + \sum_{m=1} \frac{2V_s}{m \cdot \pi} \cdot \sin m \pi \frac{t_1}{t_p} \cos m \omega t$$

$$V_y = V_s \frac{t_1}{t_p} + \sum_{m=1} \frac{2V_s}{m \cdot \pi} \cdot \sin m \pi \frac{t_1}{t_p} \cdot \cos m(\omega t - \pi)$$

la forme de la tension $V_L = V_R + V_y$ en pratique est :



Allure de la tension aux bornes du moteur dans le cas du Hacheur biphase.

l'impédance du circuit est :

$$Z_m = R_s + 2 R_L + j m \cdot \frac{2 \pi}{T_P} (M_s + 2 L_L + L_s)$$

Pour $m = 0$

$$Z_0 = R_s + 2 R_L$$

$$I_0 = \frac{V_s t_1 / T_P - E_L}{(R_s + 2 R_L)}$$

Pour m harmoniques

$$I_m = \frac{V_s t_1 / T_P - E_L}{Z_m} = \frac{V_m}{Z_m} \quad \angle - \phi_m$$

$$\text{avec } \phi_m = \arctg \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{T_P} \left[\frac{M_s + 2 L_L + L_s}{R_s + 2 R_L} \right]$$

II.2.3B) harmoniques de courant :

$$i_R = I_0 + \sum_{m=1} a_m \cos m \omega t$$

$$a_m = \frac{2}{T_P} \int_{-t_1/2}^{t_1/2} \frac{V_s}{Z_m} \cos m \omega t dt = \frac{2 V_s}{m \cdot \pi \cdot Z_m} \sin m \pi \frac{t_1}{T_P}$$

Comme $a_m = I_m$

$$i_R = I_0 + \sum_{m=1} I_m \cos \left(m \cdot 2 \cdot \pi \frac{t}{T_P} - \phi_m \right)$$

d'où

$$i_L = 2 I_0 + \sum_{m=1} I_m \cos\left(m \cdot 2 \cdot \frac{\pi t}{T_P} - \phi_m\right) + \sum_{m=1} I_m \cos\left(m \cdot 2 \cdot \frac{\pi t}{T_P} - \phi_m - \pi\right)$$

II.2.4 Analyse Approchée de Fourier :

$$s_R(t) = \sum_{n=0} S_{Rn} \cos n \cdot 2 \cdot \frac{\pi t}{T_P}$$

$s_R(t)$: fonction commutatrice de la phase R d'amplitude $V_s = 1$ volt

$$S_{Rn} = \frac{2}{n \pi} \sin n \cdot \frac{\pi t_1}{T_P} \quad \text{avec } V_s = 1 \text{ volt}$$

On multiplie la 1ère phase du courant qui passe dans le thyristor R

$$i_R = \sum_{m=0} I_m \cos\left(m \cdot 2 \cdot \frac{\pi t}{T_P} - \phi_m\right)$$

$$i_{TR} = \sum_{\substack{m=0 \\ n=0}} I_m \cos\left(m \cdot 2 \cdot \frac{\pi t}{T_P} - \phi_m\right) \cdot \cos\left(n \cdot 2 \cdot \frac{\pi t}{T_P}\right)$$

la somme des r^{èmes} harmoniques contenues dans le thyristor

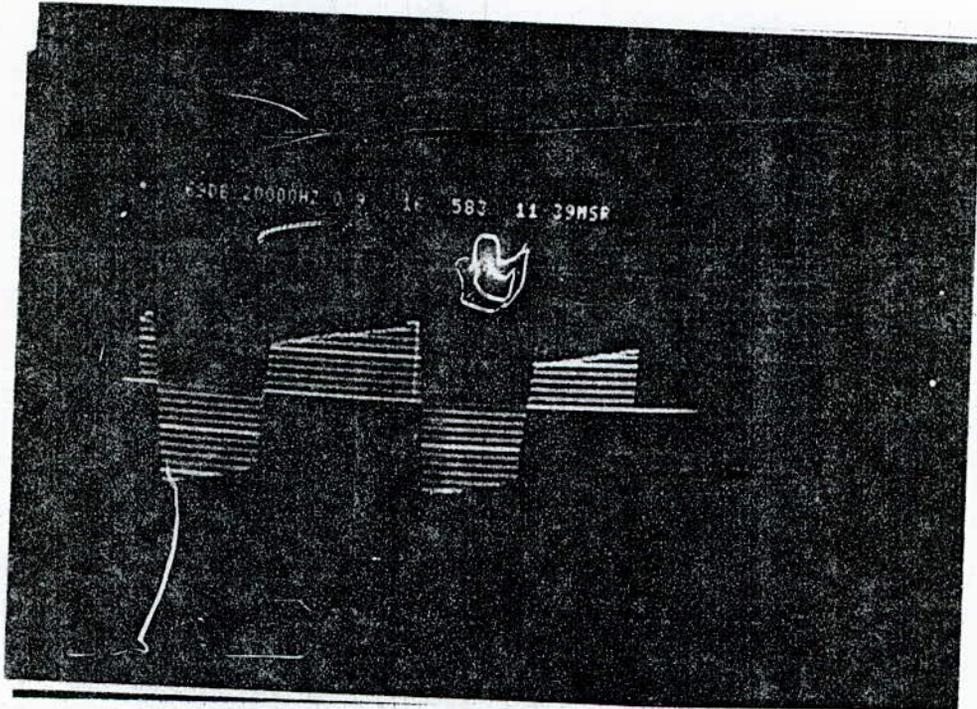
R est donné par:

$$i_{TRr} = I_{TRr} \cos\left(r \cdot 2 \cdot \frac{\pi t}{T_P} - \phi_{TRr}\right)$$

$$I_{TRr} = \sqrt{D_r^2 + Q_r^2} \quad \text{et} \quad \phi_{TRr} = \arctg \frac{Q_r}{D_r}$$

Les formules de D_r et Q_r ont été définies dans le cas du triphasé
 le courant d'entrée est donné par

$$i_s = 2 \sum_{r=2K}^{K=0} I_{TRr} \cos\left(r \cdot 2\pi \frac{t}{T_P} - \phi_{TRr}\right)$$

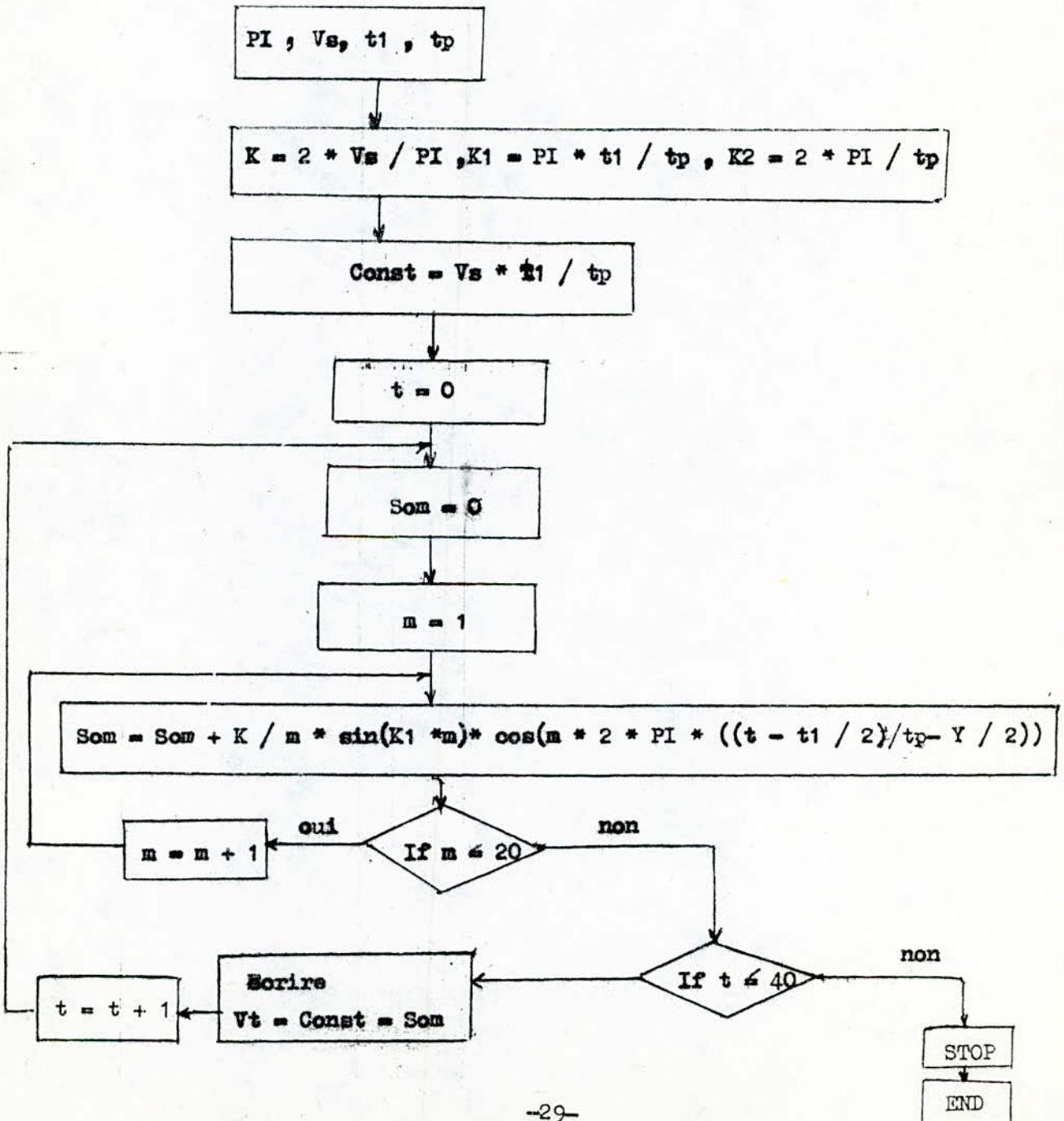


Allure de courant d'entrée pour un
 Hacheur **b**iphasé.

ORGANIGRAMME pour tracer
 les courbes de tensions aux bornes du
 du hacheur biphasé

Y = 0 (Aux bornes de H1)

Y = 1 (Aux bornes de H2)



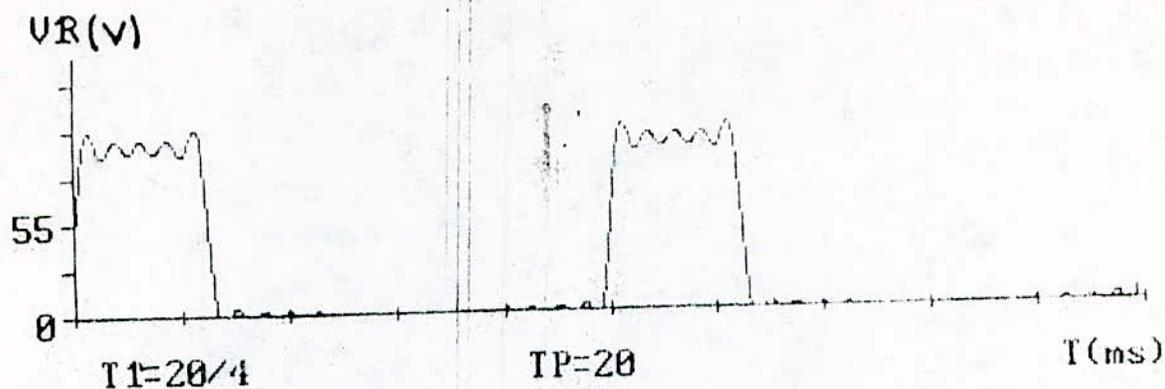


Fig : courbe de la tension aux bornes de H1

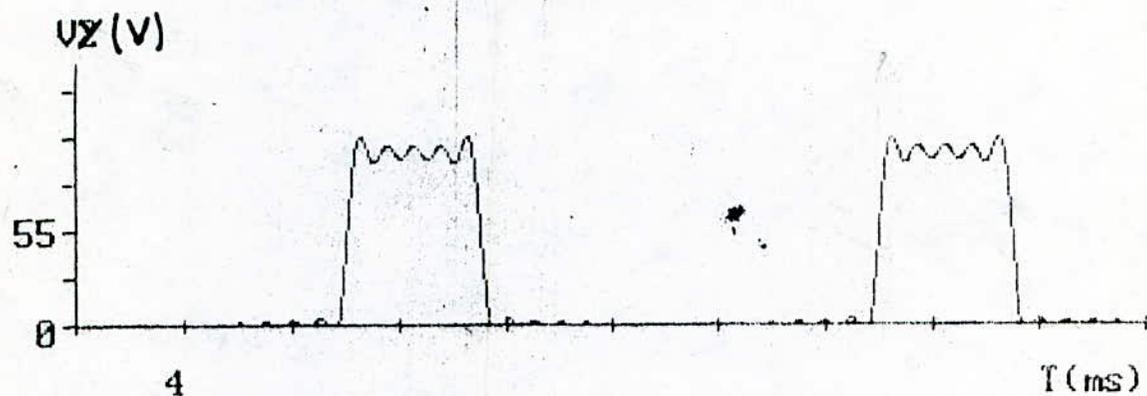


Fig : courbe de la tension aux bornes de H2

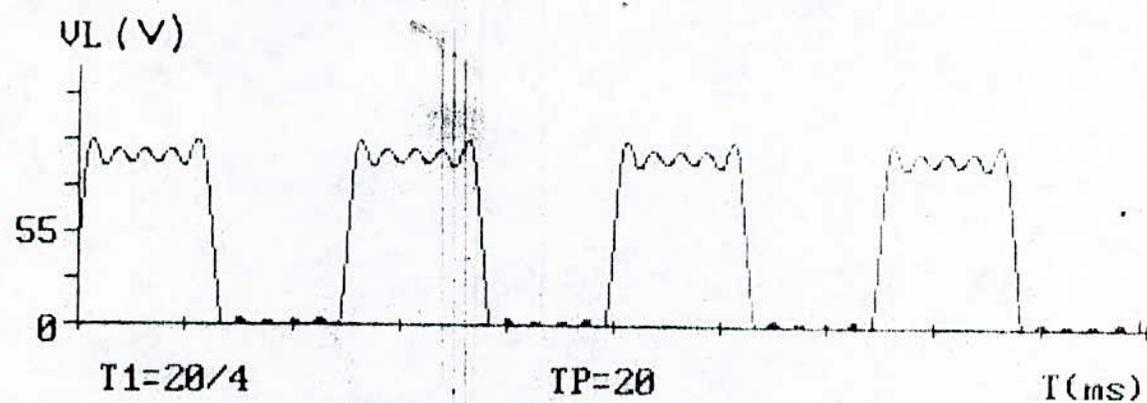
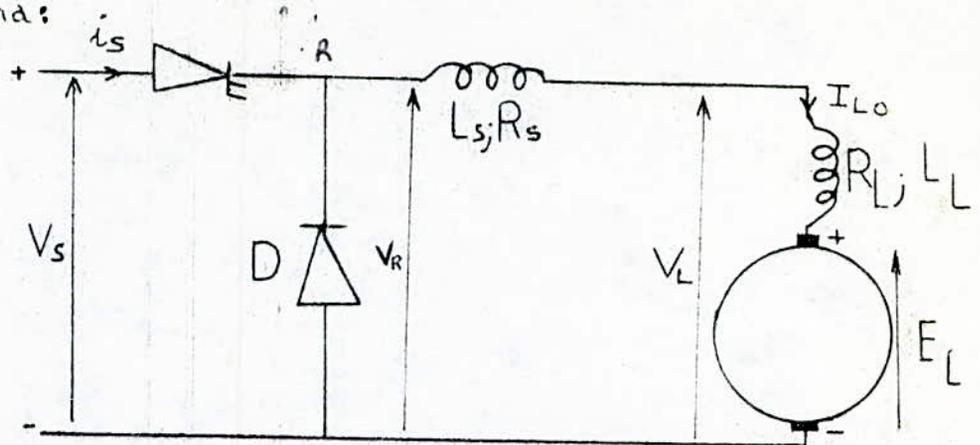


Fig : courbe de la tension aux bornes
du hacheur biphasé

II 31 Hacheur monophasé

schéma:



II 32 A) Analyse des harmoniques de tensions :

$$V_R = \frac{a_0}{2} + \sum_{m=1} a_m \cos m\omega t$$

$$V_R = V_s \frac{t_1}{t_p} + \sum_{m=1} \frac{2 \cdot V_s}{m \cdot \pi} \sin m \frac{2\pi t_1}{t_p} \cos m\omega t$$

Détermination de l'impédance : pour $m = 1$

$$V_1 = R_s I_{10} + L_s \frac{d I_1}{dt} I_{10}$$

$$V_L = R_L I_{10} + L \frac{d I_{10}}{dt} + E_L$$

$$\overline{V_R} = V_1 + V_L$$

Valeur moyenne de V_R : $V_s \frac{t_1}{t_p}$

$$V_s \frac{t_1}{t_p} + E_L = \left(R_s + R_L + j \frac{2\pi}{t_p} (L_L + L_s) \right) I_{10}$$

Pour m $Z_m = R_s + R_L + j m \cdot \frac{2\pi}{t_p} (L_L + L_s)$

Pour $m = 0 \Rightarrow Z_0 = R_s + R_L$

$$I_{10} = \frac{V_s \frac{t_1}{t_p} - E_L}{(R_s + R_L)}$$

$$I_m = \frac{V_s \frac{t_1}{t_p} - E_L}{Z_m} = \frac{V_m \angle \phi_m}{Z_m}$$

$$\phi_m = \arctg \frac{2 \cdot \pi \cdot m (L_L + L_s)}{t_p (R_S + R_L)}$$

II.3.3 B) harmoniques de courant :

$$I = I_0 + \sum_{m=1}^{\infty} I_m \cos m \omega t \quad I_0 : \text{valeur moyenne.}$$

$$I = I_0 + \sum_{m=1}^{\infty} I_m \cos \left(m \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{t}{T_p} - \phi_m \right)$$

$$\text{avec } I_m = \frac{2 V_s}{m \pi Z_m} \sin m \cdot 2 \pi \frac{t_1}{t_p}$$

$$\text{d'où } I_L = I_0 + \sum_{m=1}^{\infty} I_m \cos \left(m \frac{2 \pi t}{t_p} - \phi_m \right)$$

II.3.4 Analyse de Fourier approchée:

$$SR(t) = \sum_{n=0}^{\infty} SR_n \cos n \frac{2 \pi t}{T_p}$$

avec

$$SR_n = -2 \frac{\sin n \pi t_1 / t_p}{n \pi}$$

la somme des Harmoniques dans TR est : $i_R = \sum_{m=0}^{\infty} I_m \cos \left(m \frac{2 \pi t}{t_p} - \phi_m \right)$

$$I_R = I_{TR} = \sum_{n=0}^{\infty} SR_n I_m \cos \left(m \frac{2 \pi t}{t_p} - \phi_m \right) \cos n \frac{2 \pi t}{t_p}$$

La somme des ^{rièmes} harmoniques dans TR est donné par

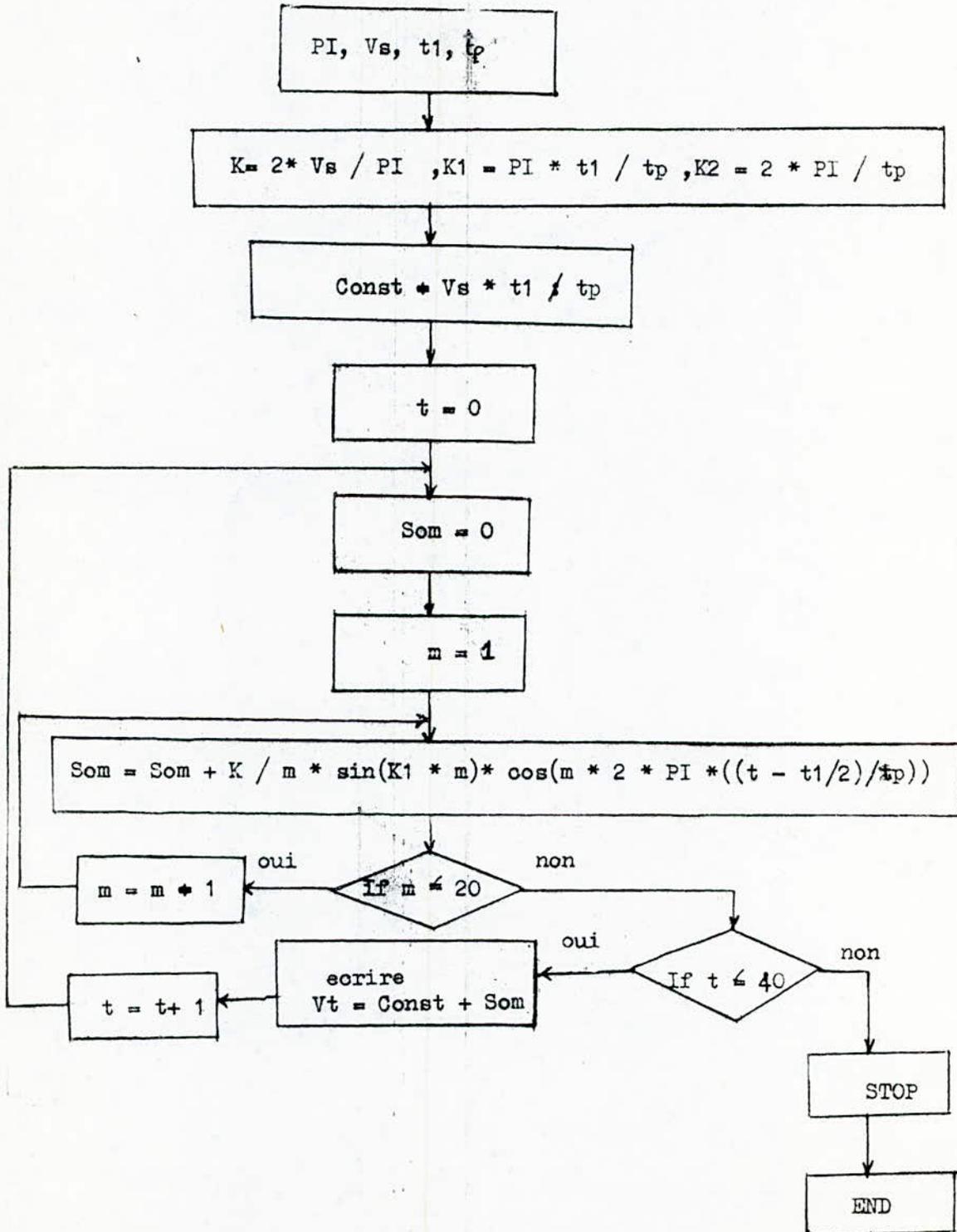
$$I_{TR} = I_{TR} \cos \left(r \cdot 2 \cdot \pi \frac{t}{T_p} - \phi_{TR} \right)$$

$$I_{TR} = \sqrt{D_r^2 + Q_r^2}$$

$$\phi_{TR} = \arctg \frac{Q_r}{D_r}$$

$$\text{courant d'entrée : } i_s = \sum_{\substack{v=k \\ k=0}}^{\infty} I_{TR} \cos \left(r \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{t}{T_p} - \phi_{TR} \right)$$

ORGANIGRAMME pour tracer
la courbe de tension aux bornes du
hacheur monophasé



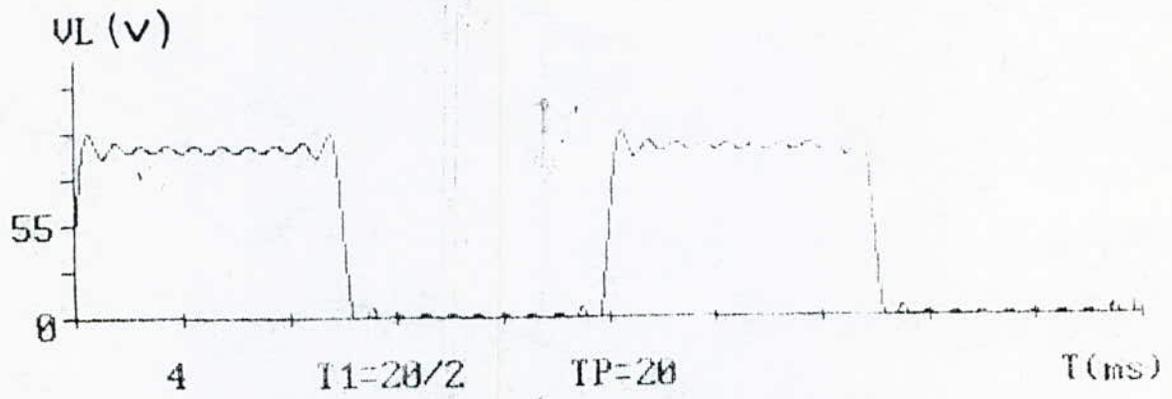


Fig : courbe de la tension aux bornes du hacheur monophasé

∟ CHAPITRE III

PRESENTATION DE *NO* MODELE

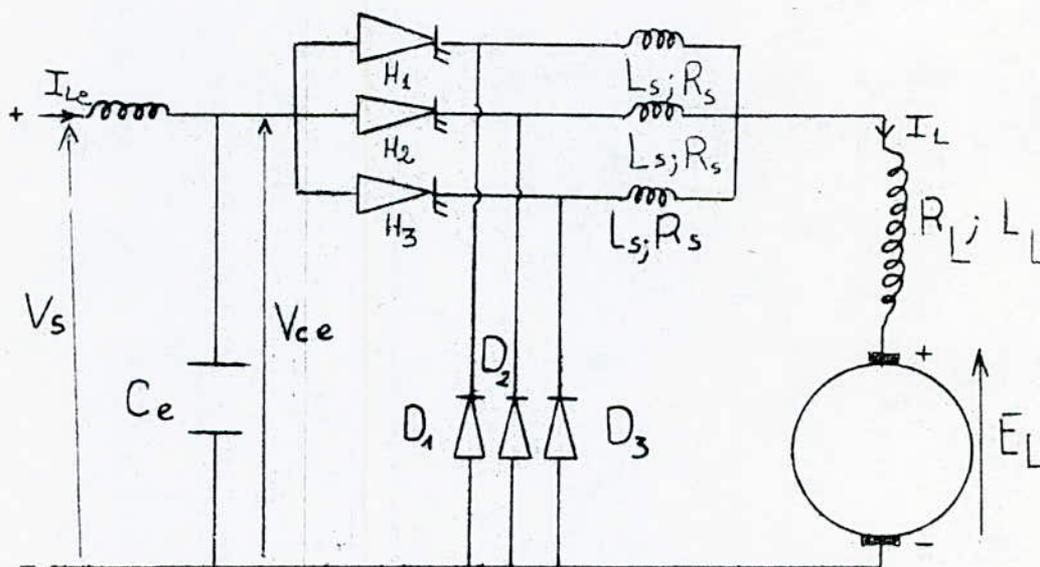
DE DIMENSIONNEMENT DU FILTRE

III.1 INTRODUCTION

Nous présentons un modèle de conception du filtre (I_e , C_e), les limites de ce modèle sont à discuter et présentent l'établissement des équations basées sur des conditions pratiques, les cas généraux de l'opération multiphase (deux ou plusieurs hacheurs) travaillent à la même fréquence mais leurs commandes sont décalées.

III.2 LE MODELE DE CONCEPTION DU FILTRE

Le diagramme du circuit pour n hacheurs travaillant avec un filtre commun, avec un changement de phase mutuelle de $2\pi/n$ est représenté sur la figure ci-dessous.

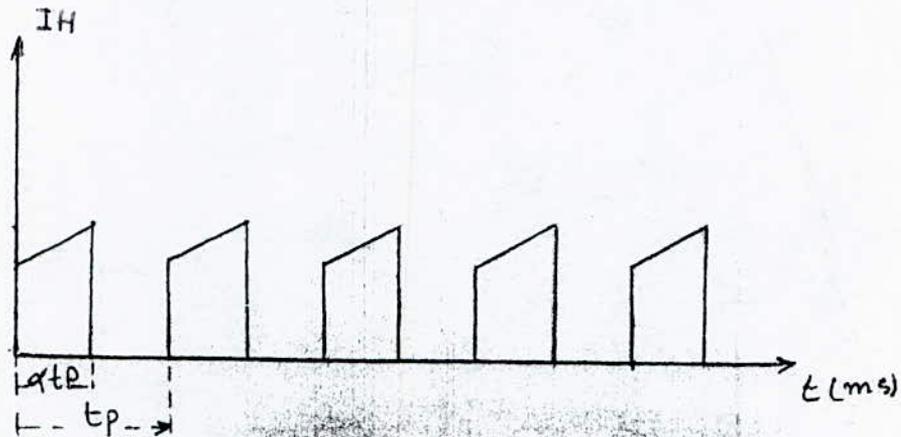


Dans cet arrangement, chaque hacheur est séparé par une inductance de lissage et une diode de roue libre, il est assumé que .

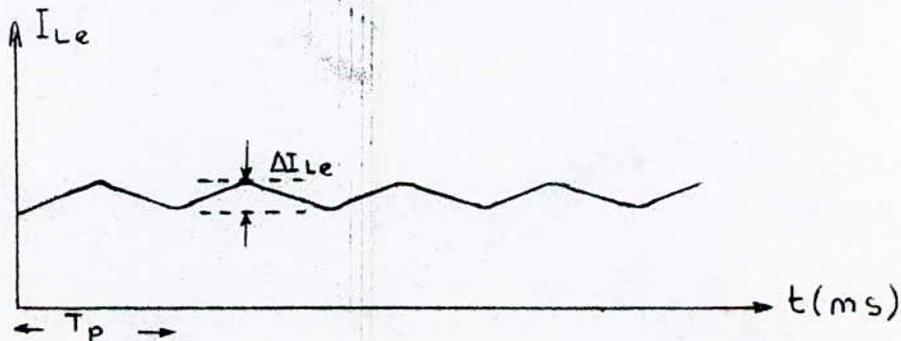
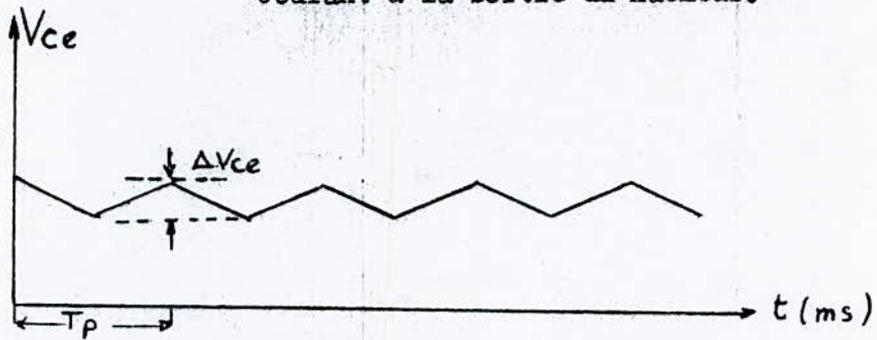
.../...

- Le courant total de charge est fractionné par égalité pour les hacheurs.

Le diagramme dont lequel est représenté la forme de l'onde du hacheur et les symboles correspondants sont représentés dans la figure ci-dessous.



Courant à la sortie du Hacheur.



La charge et la décharge de la capacité d'entrée correspond respectivement à la fermeture et à l'ouverture du hacheur.

Pour les calculs, nous considérons ce modèle, basé sur le courant de charge et le courant de ligne.

-le courant de charge lisse et le temps de conduction variable:

Dans ce cas, le courant de charge est constant et $\Delta IL = 0$ (ondulation du courant de charge nulle) mais le courant de ligne est à temps de conduction variable, ce cas est défini dans ce modèle et l'ondulation de la tension est donnée par :

$$\Delta V_{ce} = \frac{2 \cdot IL}{\omega_o \cdot C_e} \left[\frac{\sin(\pi \cdot \alpha \cdot x) \cdot \sin(\pi \cdot x \cdot (1-n \cdot \alpha) / n)}{\sin(\pi x / n)} \right]$$

IL : Courant de charge

α : Rapport cyclique

n : Nombre de hacheur

x : FO/FH rapport des fréquences

F₀: Fréquence de résonance

F_H: Fréquence de hachage

ΔV_{ce} : Ondulation de la tension à l'entrée du hacheur

Cette équation est valable pour $0 \leq \alpha \leq 1/n$

L'ondulation maximum de la tension d'arrivée à $\alpha = \frac{1}{2} n$

est donné par :

$$(\Delta V_{ce})_{\max} = \frac{I_L}{\omega_0 C_e} \operatorname{tang} \left(\frac{\pi \cdot X}{2 n} \right)$$

La configuration de la tension est trop sensible aux variations dans les inductances des filtres et X est normalement limité à la valeur inférieure à $0,5 \cdot n$.

De même la méthode de A.C.E.C. nous permet de définir l'ondulation maximum du courant de ligne

$$(\Delta I_{Lr})_{\max} = I_L \left[\frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\omega_0}{\omega_H}\right)} - 1 \right]$$

qui est valable pour $f_H > 2 f_0$

L'ondulation $(\Delta V_{ce})_{\max}$ en fonction de L_e est donnée

$$\text{par } (\Delta V_{ce})_{\max} = I_L \cdot L_e \cdot \omega_0 \operatorname{tang} \left(\frac{\pi \cdot X}{2 n} \right).$$

III.3 CHOIX DE f_0 (Fréquence de résonance)

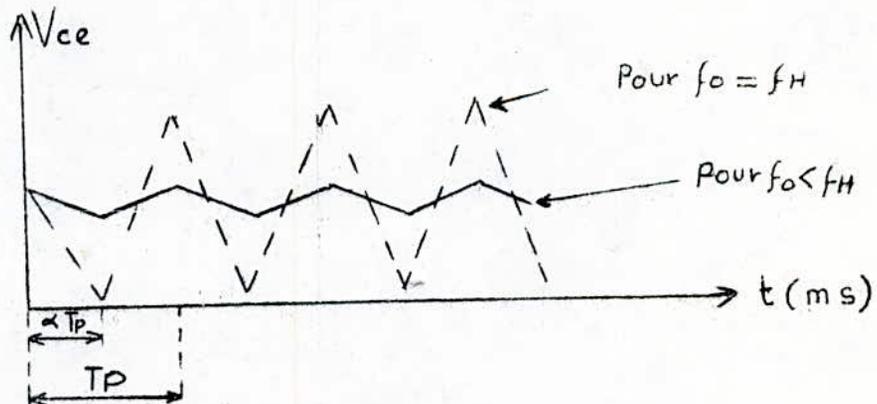
D'après les équations

$$(\Delta V_{ce})_{\max} = \frac{I_L}{\omega_0 C_e} \left[\tan\left(\pi \cdot x / \varrho \cdot n\right) \right] \text{ du modèle}$$

$$(\Delta I_{Le})_{\max} = I_L \left[\frac{1}{\cos\left(\pi \varrho - \frac{\omega_0}{\omega_H}\right)} - 1 \right] \text{ de A.C.E.C.}$$

On constate que lorsque $f_0 \ll f_H$ l'ondulation maximum du courant et les ondulations de la tension maximale sont très faibles.

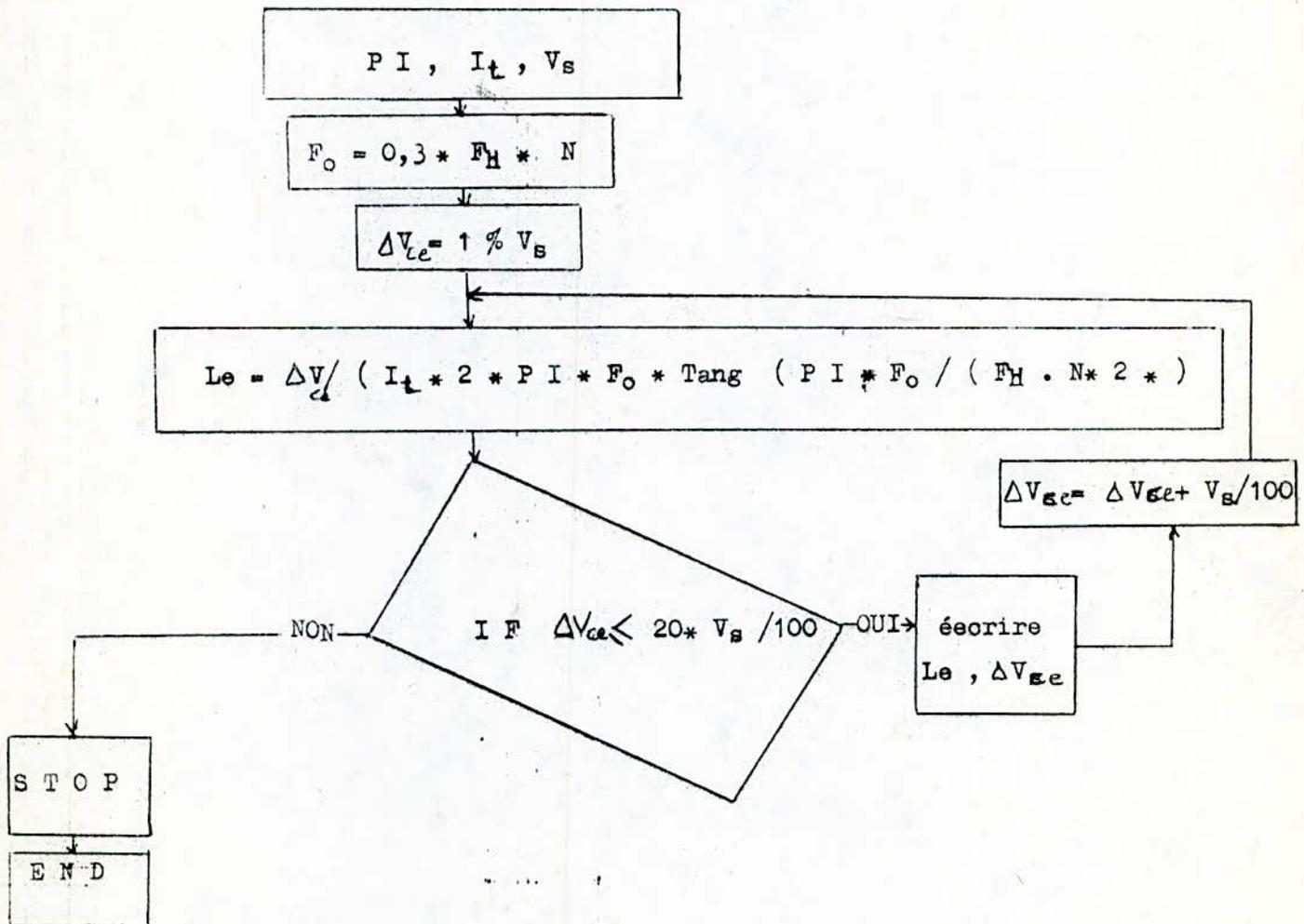
Nous devons éviter les résonances qui pourraient se produire si la fréquence de hachage était un multiple entier de f_0 . $f_H \neq n f_0$
(n : entier)



Avec notre choix de $f_0 = 0,3 \cdot N \cdot f_H$, nous avons rempli toutes les conditions pour que le filtrage soit satisfaisant. Si nous choisissons $f_0 = 0,1 \cdot N \cdot f_H$ nous trouverons une valeur de la capacité impossible à réaliser qui correspond à l'ondulation de courant faible (presque nulle).

O R G A N I G R A M M E P O U R L E C A L C U L D E
L'INFLUENCE DE L'INDUCTANCE S U R L'ONDULATION
D E L A T E N S I O N

- N = 1 (M O N O P H A S E)
N = 2 (B I P H A S E)
N = 3 (T R I P H A S E)



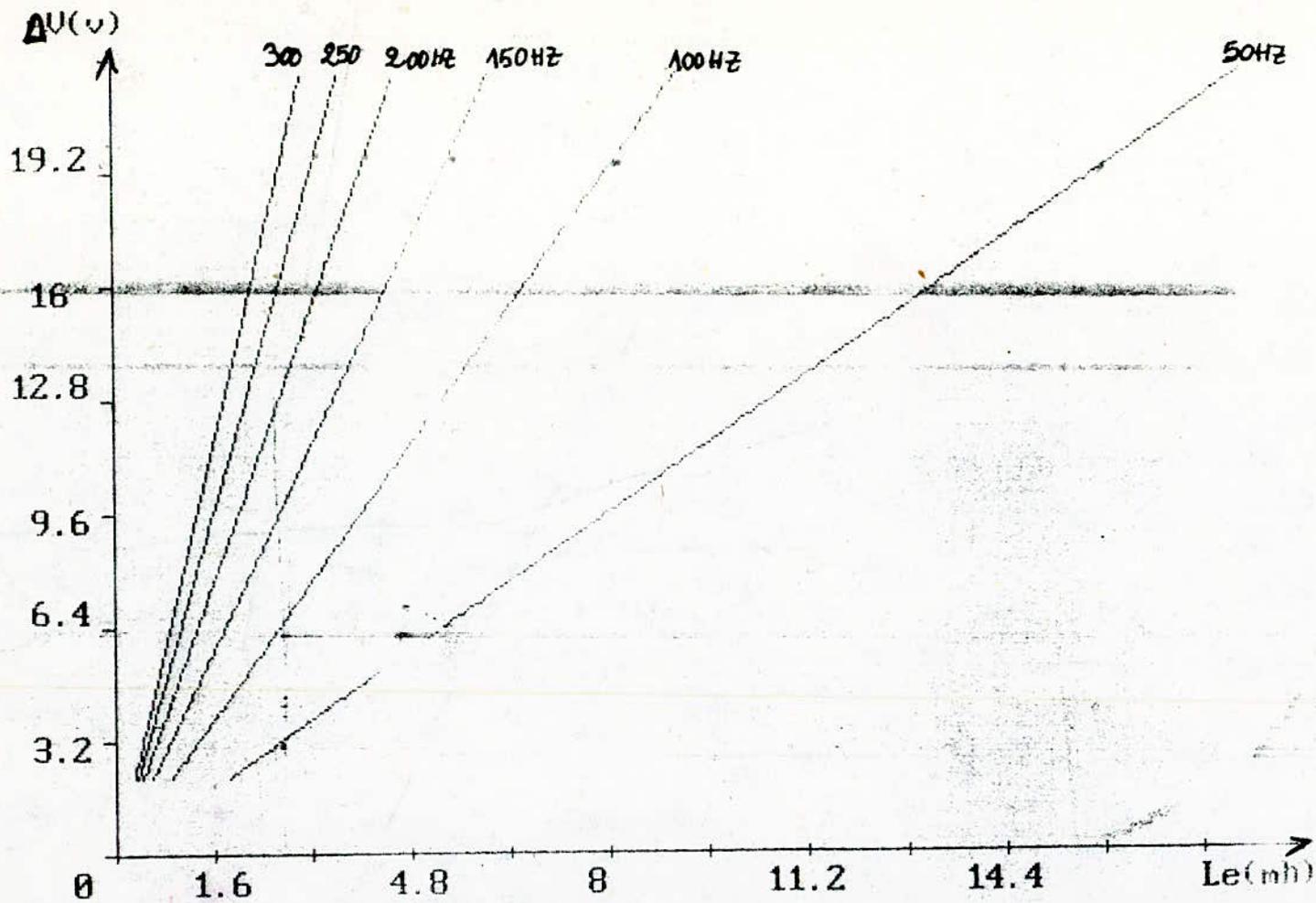


fig : courbes $\Delta U = F(L_e)$

influence de l'inductance sur l'ondulation de la tension
cas du hacheur monophasé

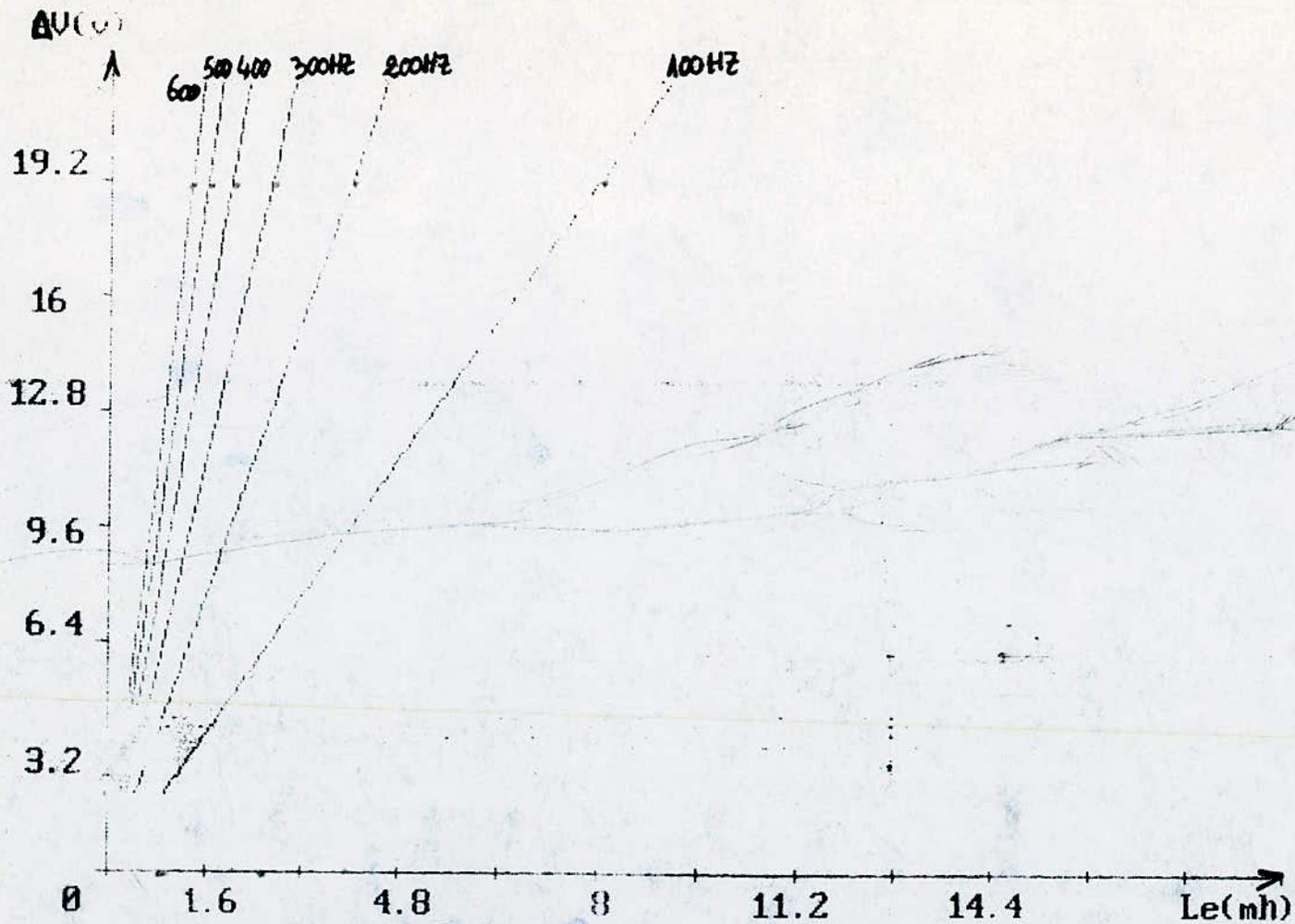


fig : courbes $\Delta U = F(L_e)$

influence de l'inductance sur l'ondulation de la tension
cas du hacheur biphasé

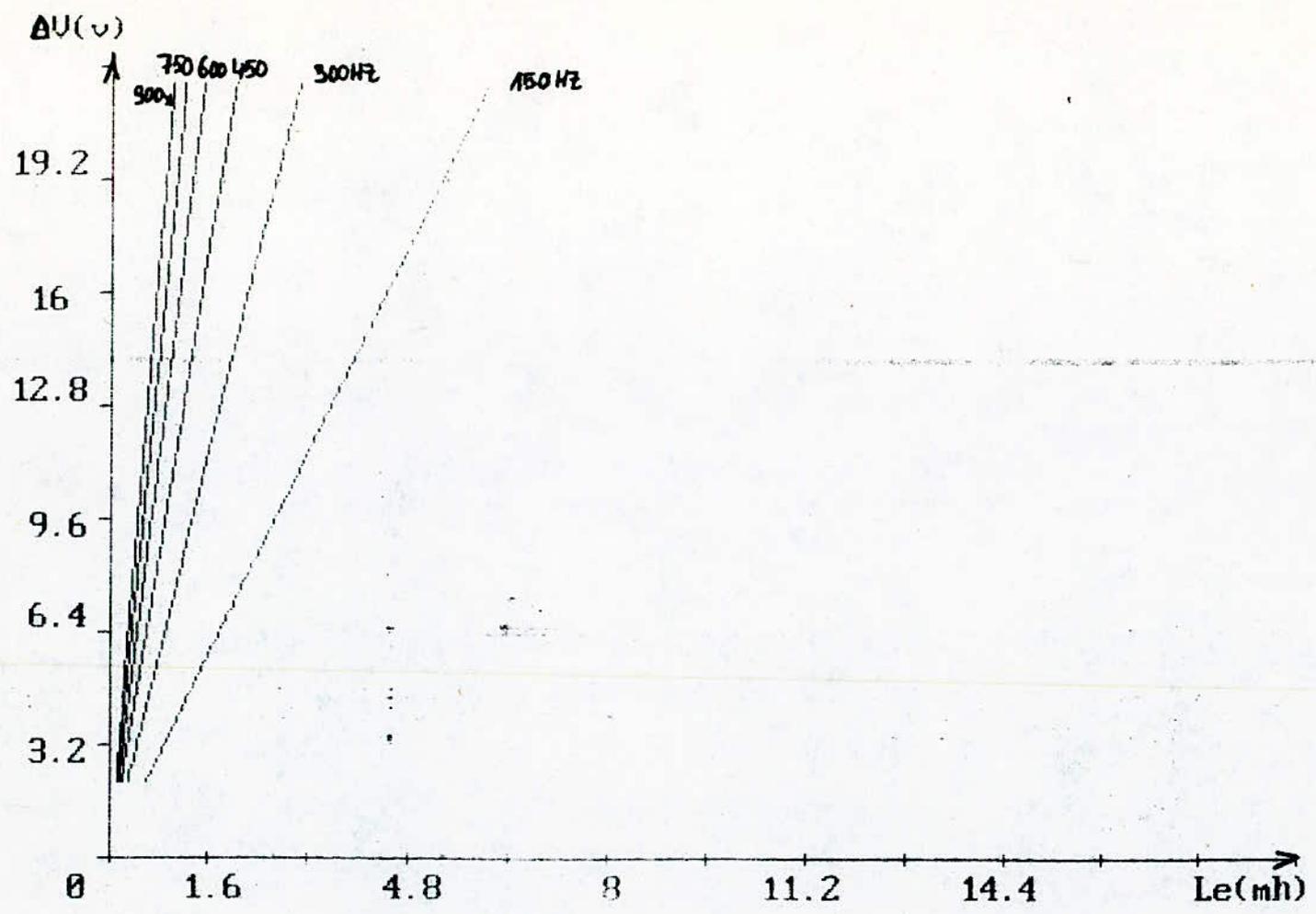


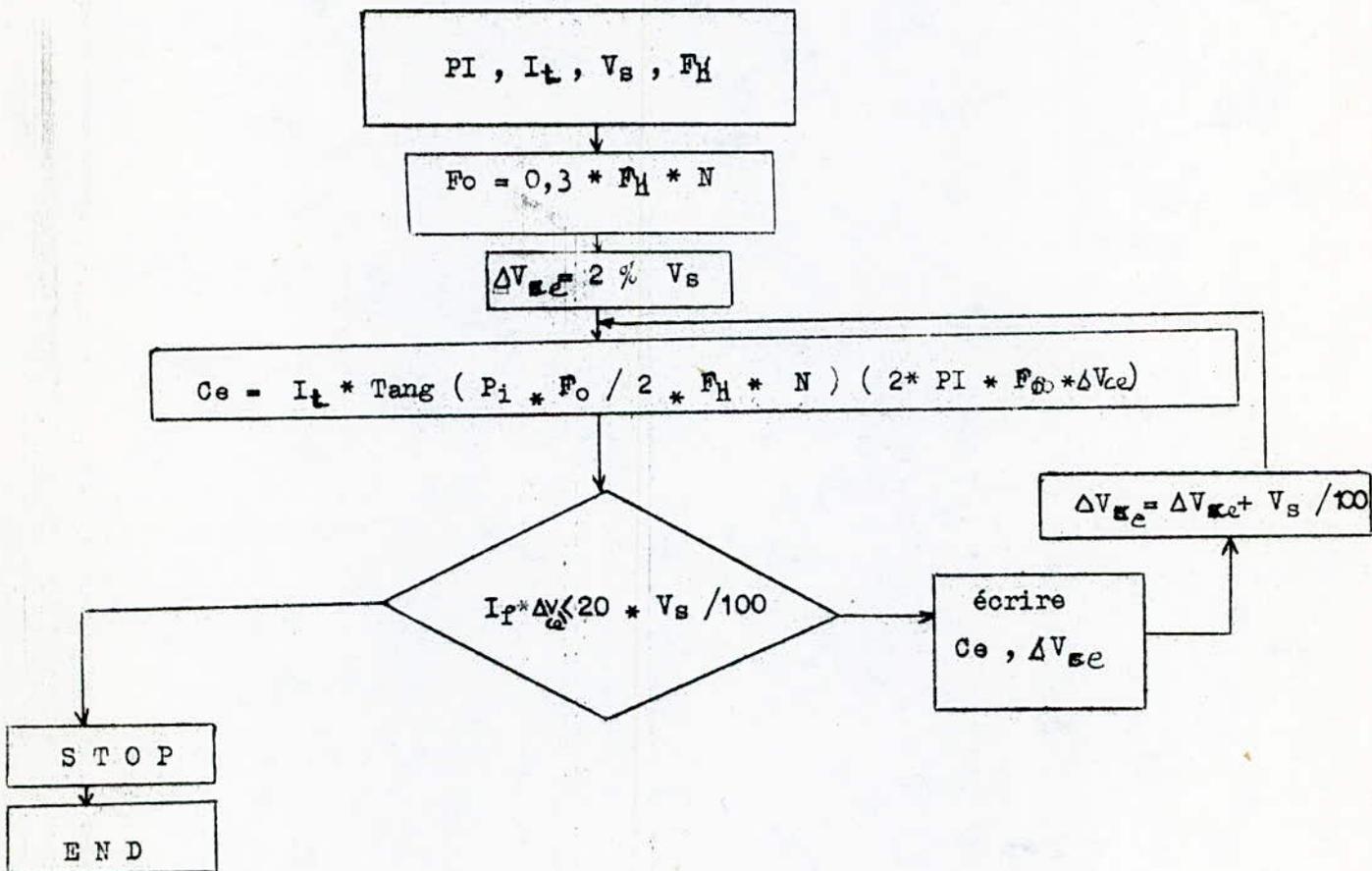
fig : courbes $\Delta U = F(L_e)$
 influence de l'inductance sur l'ondulation de la tension
 cas du hacheur triphasé

ORGANIGRAMME pour le calcul de
l'influence de la capacité sur
l'ondulation de la tension.

N = 1 (MONOPHASE)

N = 2 (BIPHASE)

N = 3 (TRIPHASE)



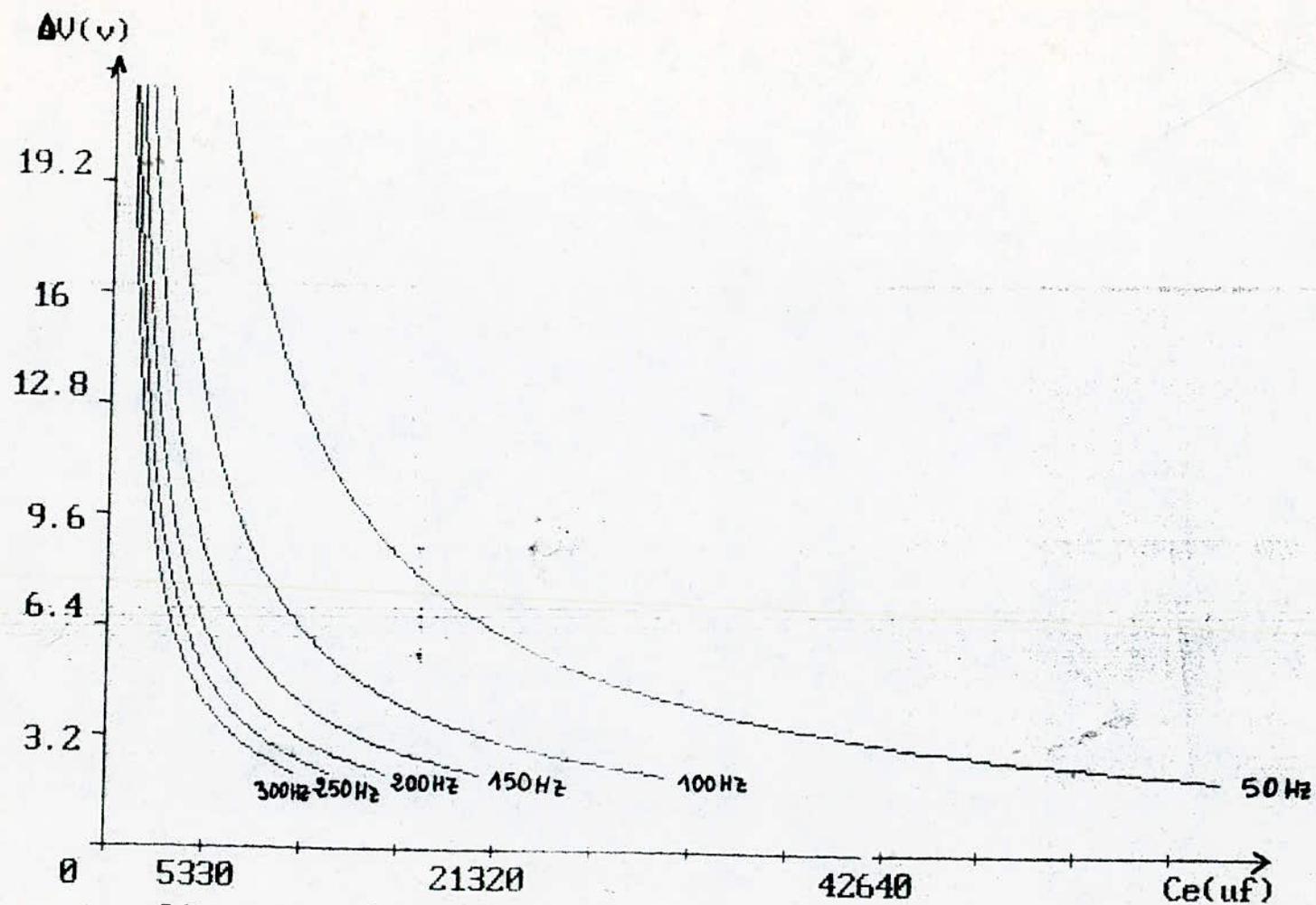


fig : courbes $\Delta U = F(C_e)$
 influence de la capacité sur l'ondulation de la tension
 cas du hacheur monophasé

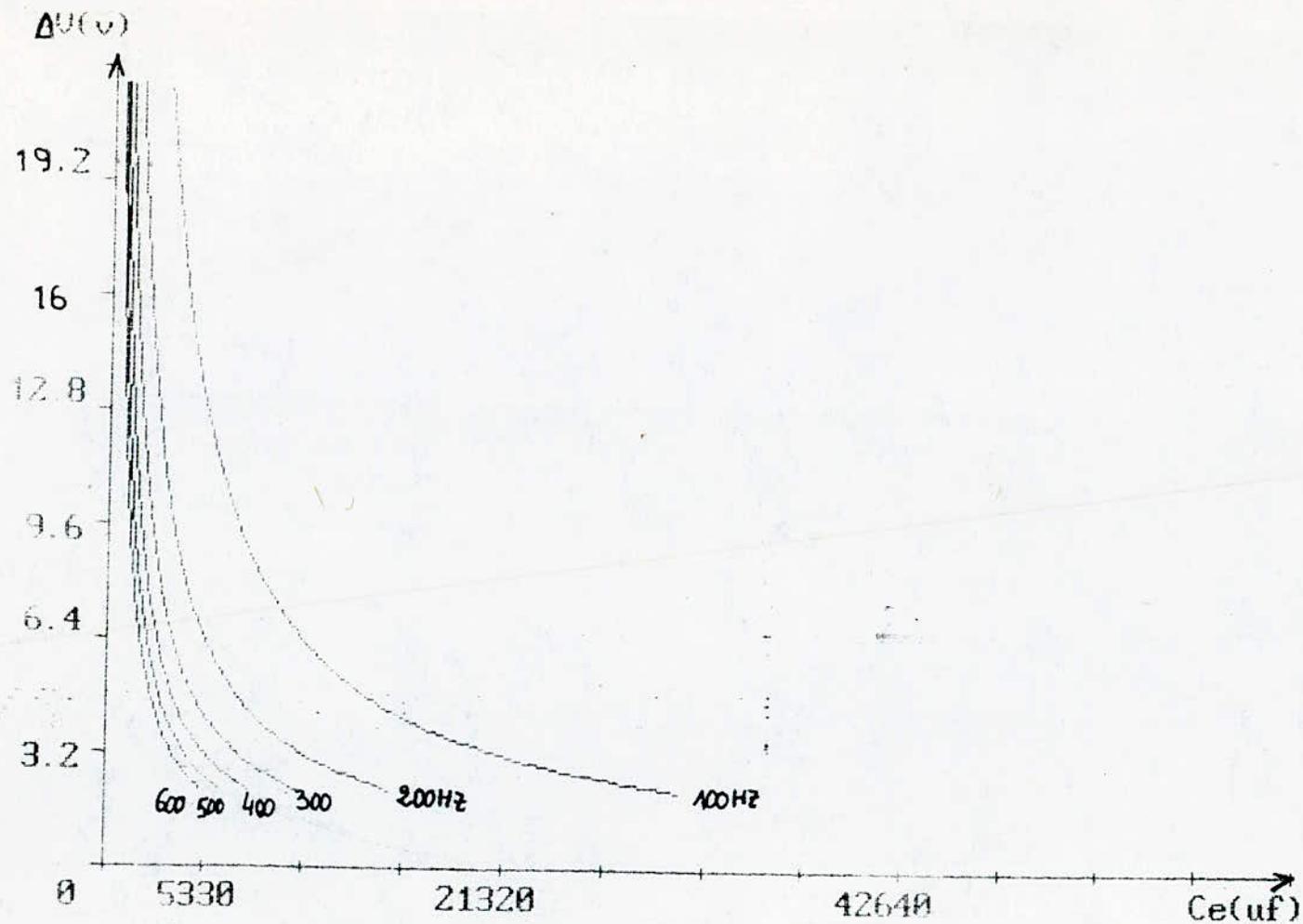


fig : courbes $\Delta U = F(C_e)$

influence de la capacité sur l'ondulation de la tension
cas du hacheur biphasé

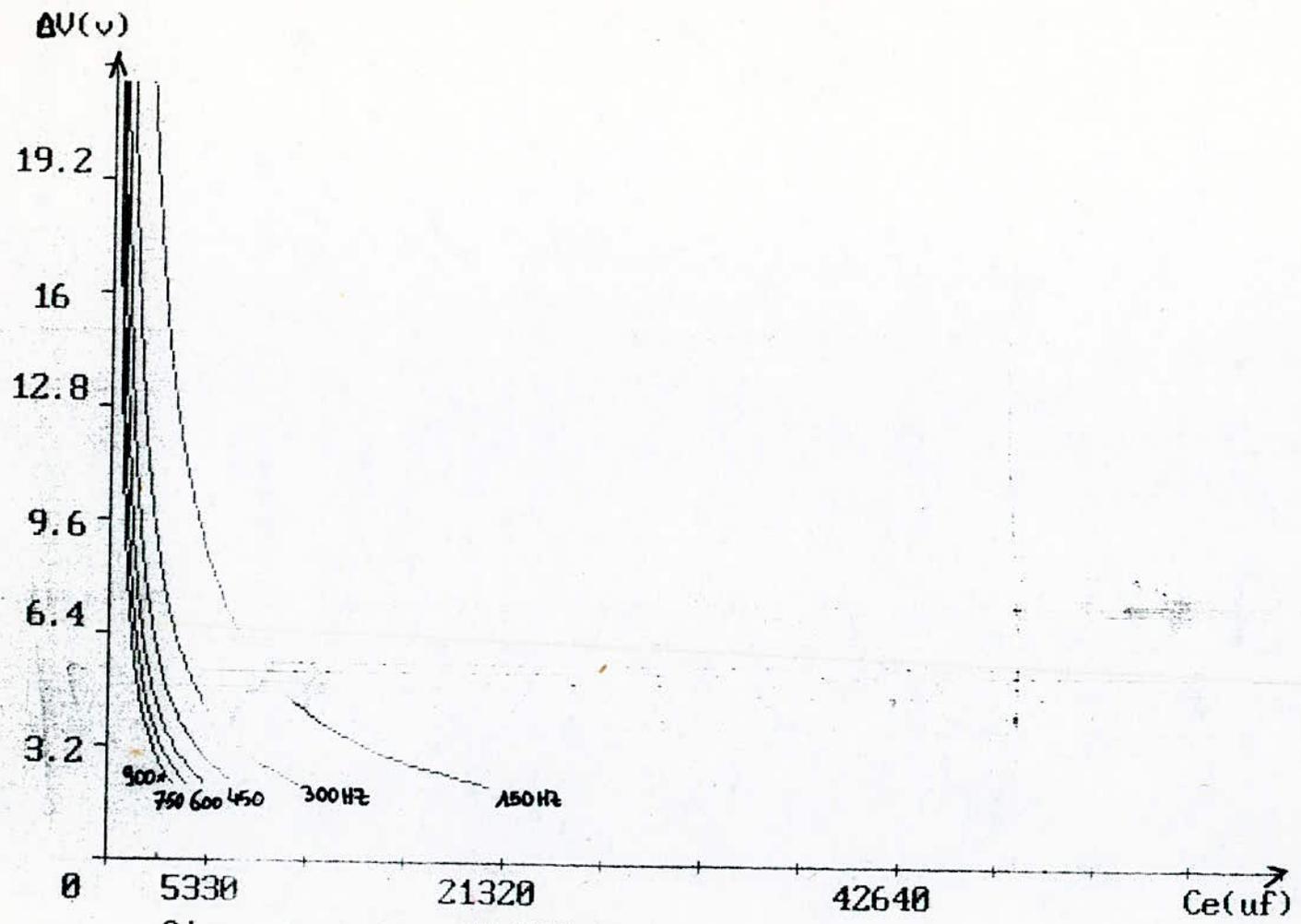
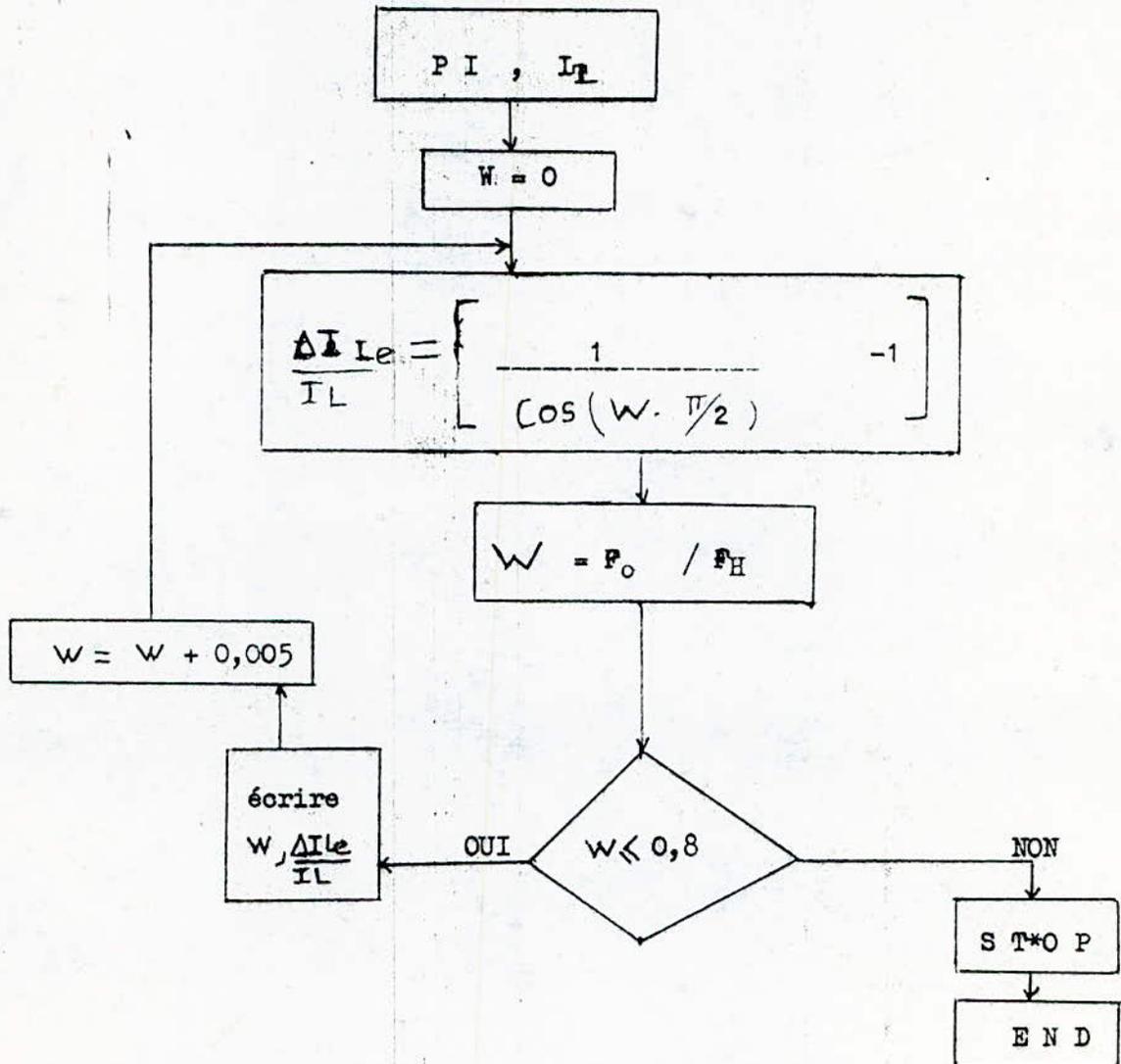


fig : courbes $\Delta U = F(C_e)$

influence de la capacité sur l'ondulation de la tension
cas du hacheur triphasé

O R G A N I G R A M M E P O U R L E C A L C U L D E
L'ONDULATION DU COURANT EN FONCTION DU RAPPORT
DES FREQUENCES



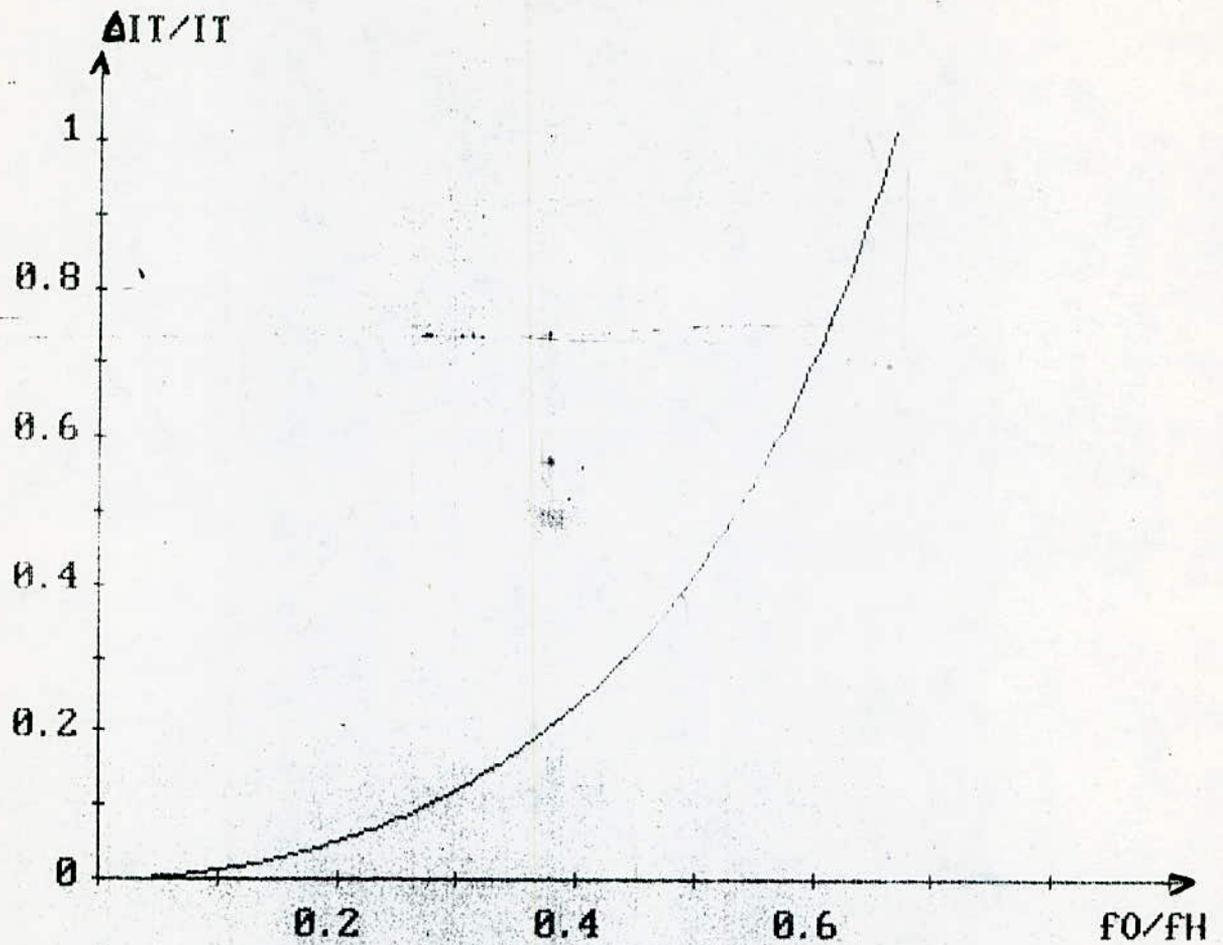


fig : courbe de l'ondulation relative du courant en fonction du rapport fréquence de resonance sur fréquence de hachage $A=F(f_0/f_h)$

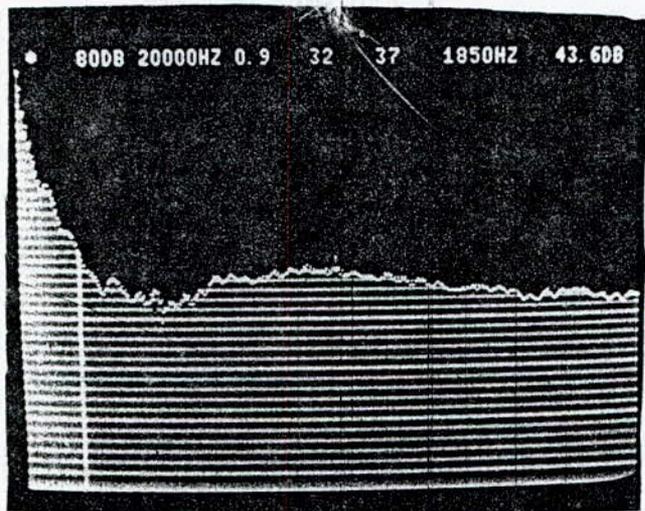
ESSAIS PRATIQUES

En pratique, nous avons relevé le spectre du courant d'entrée $i(t)$ avant et après l'insertion de la cellule de filtrage.

Comme exemple, cette cellule de filtrage se compose de ($L_e = 53\text{mH}$ et $C_e = 760\mu\text{F}$)

Avec L_e et C_e inductance et capacité de la cellule de filtrage

Cas du hacheur triphasé:



Spectre du courant $i(t)$
sans cellule de filtrage

Avec la cellule de filtrage nous avons remarqué que les raies du spectre sont atténuées d'environ de 30db

- C O N C L U S I O N -

Quand l'ondulation de la tension est très faible, on voit que la valeur de (C_e) est très grande et (L_e) très petite, de là nous déduisons que nous avons réduit l'ondulation de la tension en plaçant uniquement des capacités de grandes valeurs.

Et nous remarquons aussi plus nous montons en fréquence plus les valeurs de L_e et C_e diminuent, pour de très hautes fréquences les valeurs de L_e et C_e sont très faibles ce qui explique qu'on n'a pas besoin de placer un filtre, cas des hacheurs à transistors.

La présence du filtre est par ailleurs, un élément favorable sur l'engin hacheur.

Les surtensions inévitablement rencontrées sur les réseaux de tractions et provenant des causes diverses (ouvertures en charge du disjoncteur, fusion du fusible) sont considérablement atténuées grâce au filtre.

En contre partie, l'arrêt brutal du hacheur sur détection de défaut entraîne, par oscillations du circuit (L_e, C_e) l'apparition d'une surtension aux bornes du hacheur. La limitation de la valeur de cette surtension en choisissant convenablement les caractéristiques du filtre, conduirait à une valeur pratiquement inadmissible.

TABLE DES MATIERES

* CHAPITRE I		GENERALITES
1	-Principe de fonctionnement du hacheur	4
2	-Choix de la fréquence de hachage	6
2.1	-Influence de la fréquence sur les composants du hacheur	6
2.2	-Influence de la fréquence sur la charge	6
2.3	-Influence de la fréquence sur la source d'alimentation	7
3	-Rôle du condensateur C_e	8
4	-Rôle de la self L_e	8
5	-Entrelacement des hacheurs	9
* CHAPITRE II		ETUDES DES HARMONIQUES DE TENSION ET DE COURANT-
1-1	-Hacheur triphasé	-12
1.2	-Analyse des harmoniques de tensions de phase	-12
1.3	-Les harmoniques pour le courant	17
1.4	-Analyse de Fourier approchée	-18
2.1	-Hacheur biphasé	24
2.2	-Analyse des harmoniques de tensions de phase	-24
2.3	-Harmoniques de courant	-26
2.4	-Analyse approchée de Fourier	-27
3.1	-Hacheur monophasé	31
3.2	-Analyse des harmoniques de tensions	31
3.3	-Harmoniques de courant	-32
3.4	-Analyse de Fourier approchée	-32
* CHAPITRE III		PRESENTATION DU MODELE DE DIMENTIONNEMENT DU FILTRE
1	-Introduction	36
2	-Modèle de conception du filtre	36
3	-Choix de fréquence de résonance	-40

B I B L I O G R A P H I E

- * R . CHAUPRADE
Electronique de puissance, Commande des moteur
à courant continu.
- * H . BUHLER
Electronique de puissance
- * THOMAS H . BARTON
Hacheur polyphasé -revue IEEE
- * M. H. RASHID
Conception du filtre(L C)-revue IEEE

Les hacheurs à thyristors en traction électrique
-revue ACEC

Filtres numériques