

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état : \_

**SUJET**

COMMANDE REVERSIBLE  
d'une MACHINE à COURANT CONTINU  
"à circulation de courant"

Proposé Par :

M<sup>r</sup> A. MAAZI

M<sup>r</sup> R. TAHMI

Etudié par :

M<sup>r</sup> A. BOUAROURA

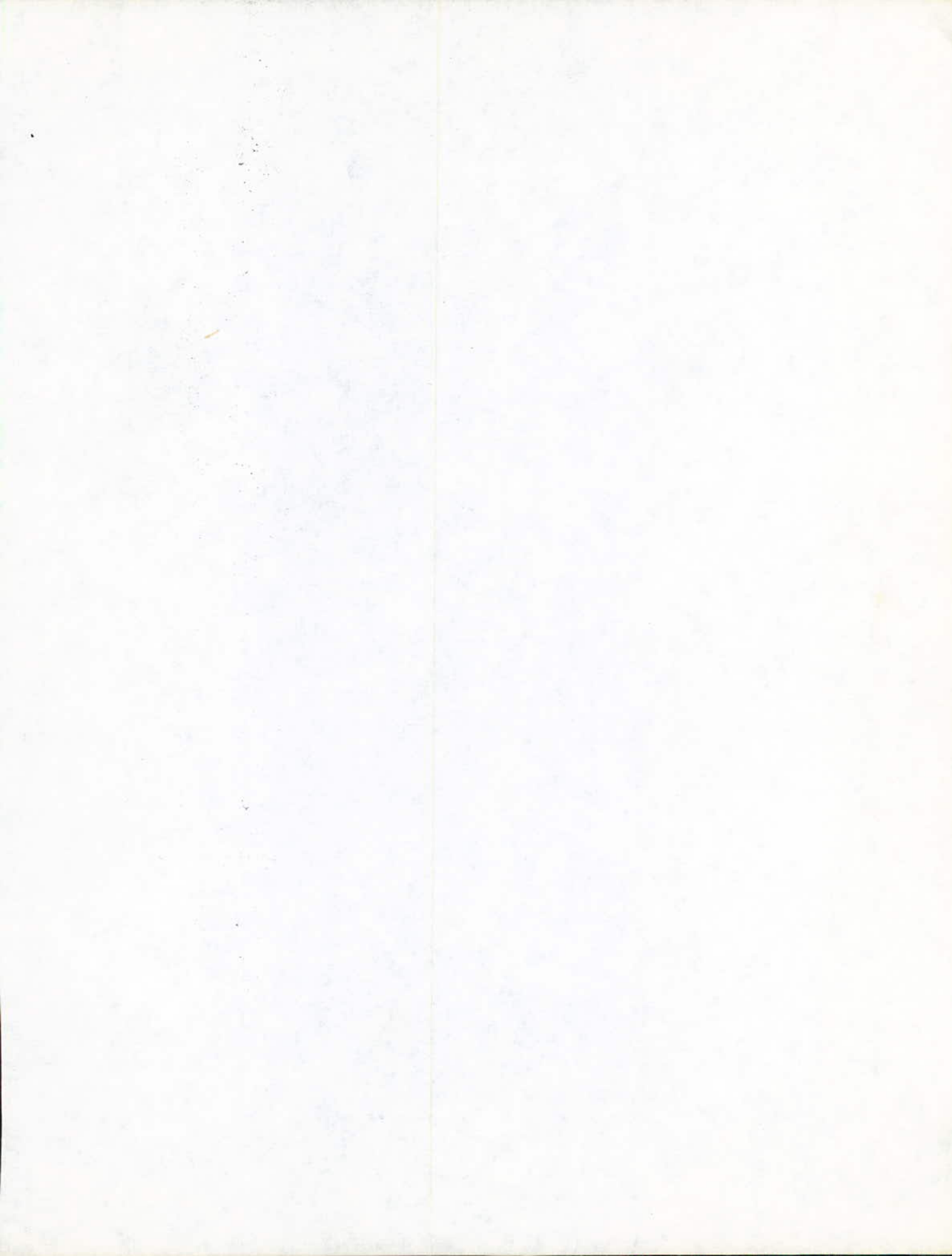
M<sup>r</sup> M. KHEMIRI

Dirigé par :

M<sup>r</sup> A. MAAZI

M<sup>r</sup> R. TAHMI

PROMOTION : Janvier 1987



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

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

## ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT : DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

### PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

COMMANDE REVERSIBLE  
d'une MACHINE à COURANT CONTINU  
"à circulation de courant"

Proposé par :

M<sup>r</sup> A. MAAZI

M<sup>r</sup> R. TAHMI

Etudie par :

M<sup>r</sup> A. BOUAROURA

M<sup>r</sup> M. KHEMIRI

Dirigé par :

M<sup>r</sup> A. MAAZI

M<sup>r</sup> R. TAHMI

Promotion Janvier 1987

# DEDICACES

---

Cet humble travail est dédié :

- A mes parents.
- A mes frères et sœurs.
- A toute ma famille.
- A tous mes amis.



BOWAROURA Abdelhak.

Je dédie ce modeste travail :

- A mon père.
- A ma mère.
- A mes frères et sœurs.
- A tous mes amis

KHEMIRI Menouar.

# Remerciements

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

- Notre gratitude va à Messieurs A. MAAZI et R. TAHMI pour nous avoir suivi et conseillé durant tout notre travail.
- Que tous les professeurs ayant contribué à notre formation trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.
- Que tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin trouvent ici notre profonde reconnaissance.

# Sommaire

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

- Introduction.

Chapitre I - Etude des convertisseurs alternatif - continu.

I.1. Généralités.

I.2. Dispositif de commande des gâchettes des Thyristors

I.3. Essais et relevés des caractéristiques ( $\alpha$  constant):

$U_r(I_r)$ ,  $N(I_r)$ ,  $P(I_r)$ ,  $Q(I_r)$  - Interprétations -

Chapitre II - Les convertisseurs réversibles alternatif - continu

II.1. Etude théorique.

II.2. Etude des puissances.

II.3. Mode de fonctionnement d'un convertisseur réversible.

Chapitre III - Les montages "à circulation de courant" - Le montage antiparallèle.

III.1. Variation du courant de circulation avec l'angle de retard d'allumage.

III.2. Etude du chemin parcouru par le courant de circulation et le courant redressé.

III.3. Etude de l'inversion du courant et de la vitesse du moteur.

III.4. Essais et relevés des caractéristiques ( $\alpha$  constant):

$U_r(I_r)$ ,  $P(I_r)$ ,  $Q(I_r)$  et  $P_m(I_r)$  - Interprétations -

III.5. Comparaison entre convertisseur non-réversible et convertisseur réversible.

Conclusion.

# PLAQUE SIGNALÉTIQUE DE LA MCC

LUTILISÉE :

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

- Tension D'induit  $U_N = 120 \text{ V}$
- Courant D'induit  $I_N = 24 \text{ A}$
- Vitesse Nominale  $N_n = 1800 \text{ tr/min}$
- Puissance Nominale  $P_N = 2,2 \text{ Kw.}$
- Courant D'excitation  $i_{exc} = 0,95 \text{ A}$

Caracteristiques Des Thyristors  
Utilisés Dans les Convertisseurs

$$I = 100 \text{ A}$$

$$V_{inv_{max}} = 1200 \text{ V.}$$

$$\Delta U_d = 1 \text{ V}$$

### INTRODUCTION :

Dans de nombreuses applications (monte-charge, laminaires, ...) on veut des moteurs réversibles capables d'effectuer des inversions de marche rapides avec des freinages contrôlés permettant de récupérer l'énergie de freinage. Dans ces conditions, on doit pouvoir inverser brusquement le courant  $I_r$  dans l'induit du moteur sans avoir besoin d'arrêter celui-ci.

Pour cela, on utilise deux ponts de Graetz à thyristors qui sont montés en "tête bêche" aux bornes de l'induit.

Les redresseurs des deux ponts, sont commandés en permanence de façon qu'ils donnent toujours aux bornes du moteur des tensions redressées moyennes égales et de signe opposé : C'est le montage dit à "courant de circulation".

$$U_{d1} = -U_{d2} \quad \text{avec} \quad \alpha_1 + \alpha_2 = \pi$$

Ce montage a l'avantage de ne pas présenter de temps mort car dès que le courant  $I_r$  devient négative, le courant passe instantanément du pont (I) au pont (II).

Bien que la somme  $U_{d1} + U_{d2}$  des valeurs moyennes est nulle, il n'en est pas de même de la somme  $u_{d1} + u_{d2}$  des valeurs instantanées. Il en résulte donc, un courant de circulation à l'intérieur du circuit formé par les deux ponts du convertisseur.

On essaye alors de diminuer ce courant de circulation en plaçant des inductances de limitation dans le circuit d'induit.



# CHAPI. ETUDE DES CONVERTISSEURS ALTERNATIF-CONTINU

## I.1. GENERALITES :

Les progrès et les performances actuels des composants électroniques ont complètement transformé la commande, à vitesse variable des moteurs à courant continu, qui peut être réalisée à l'aide de convertisseurs statiques.

Pour des raisons purement économiques (coût élevé des installations, encombrement et mauvais rendements) le groupe Ward-Léonard est abandonné au profit des convertisseurs statiques.

L'alimentation de ces convertisseurs s'effectue par le réseau.

L'amorçage des thyristors est commandé, leur désamorçage est naturel ou forcé.

- Nature de la conduction :

- a/ La conduction est dite continue si le courant se maintient durant toute la période à une valeur non nulle. En conduction continue l'angle d'extinction  $\theta_e$  est lié à l'angle d'allumage  $\theta_a$  ( $\theta_e = \theta_a + \frac{2\pi}{p}$  où  $p$  est l'indice de pulsation) et la tension du groupe est fixée par la connaissance de cet angle.
- b/ La conduction est discontinue si le courant s'annule à un moment quelconque de la période. En conduction discontinue, les deux angles  $\theta_e$  et  $\theta_a$  ne sont pas liés et la tension du groupe n'est pas fixée par la seule connaissance de l'angle  $\theta_a$ .

- Mode de conversion :

Lorsque l'énergie active va du réseau vers le moteur, le convertisseur fonctionne en redresseur, en sens inverse, il fonctionne en onduleur.

Parmi les convertisseurs électroniques de puissance, on distingue :

⊗ Le variateur non-réversible ou convertisseur de courant unidirectionnel :

Si la machine entraînée ne nécessite pas un freinage rapide, on utilise habituellement un variateur non-réversible constitué par un seul groupe de thyristors. Dans ces conditions, le convertisseur de courant fonctionne en redresseur contrôlable ( $U_n > 0$ )...

La présence des éléments redresseurs (thyristors) fait que le courant de sortie  $I_n$  ne peut circuler que dans un seul sens.

Dans certaines conditions, un tel montage est réversible du point de vue énergétique. Pour que le convertisseur de courant unidirectionnel puisse fonctionner en onduleur, il faut que la tension de sortie  $U_n$  soit négative, alors que le courant  $I_n$  garde toujours le même sens (positif). La tension moyenne  $U_n$  devient négative pour  $\alpha > 90^\circ$ , si la charge assure la continuité du courant. On peut alors faire fonctionner le convertisseur, en onduleur, en utilisant une charge active constituée par un moteur à courant continu et après avoir pris les précautions nécessaires, on inverse les polarités de l'induit à l'aide d'un interrupteur mécanique. Ainsi la machine à courant continu devient génératrice et dans ce cas l'énergie active  $P$  transite depuis la charge vers le réseau alternatif.

Le mode de fonctionnement est indiqué par les figures - 1. et - 1'.

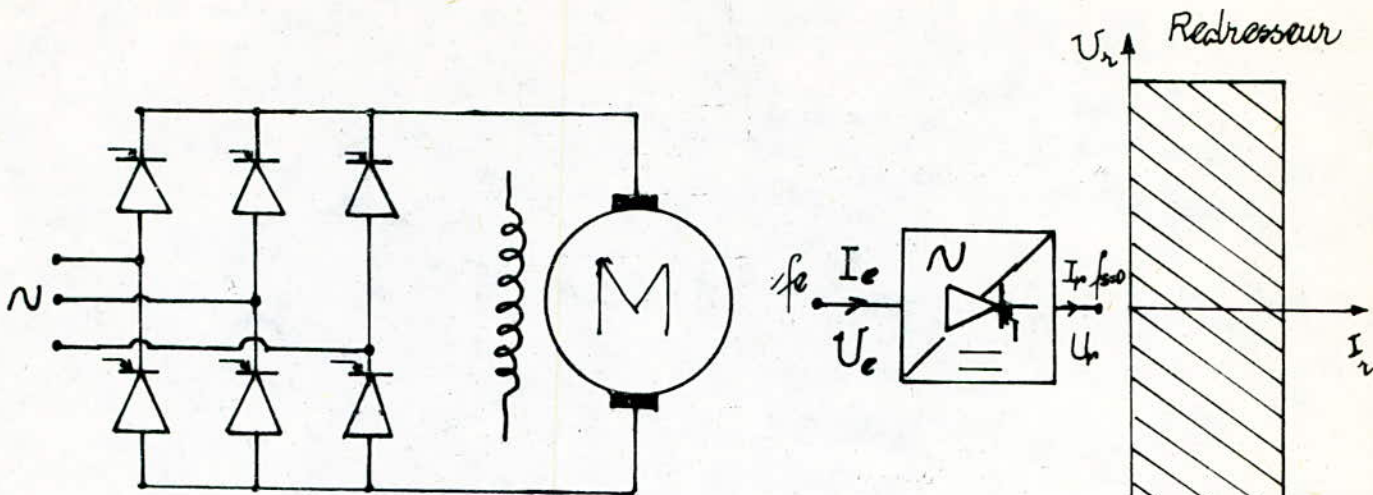


fig. 1. Mode de fonctionnement d'un convertisseur de courant unidirectionnel

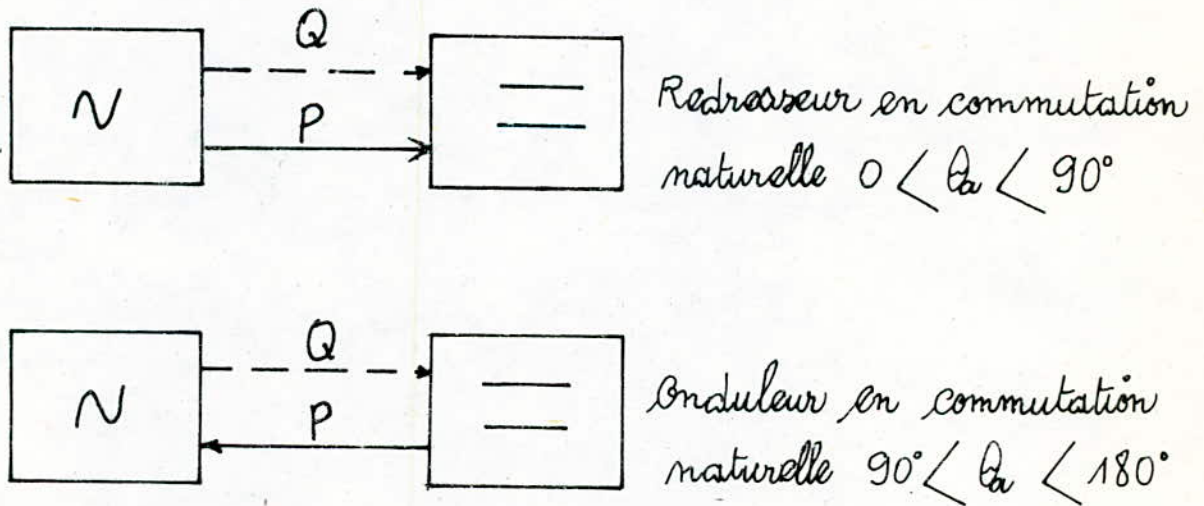


fig. 1'. Représentation schématique d'un convertisseur de courant unidirectionnel.

I.2- Principe de fonctionnement du dispositif de commande des gâchettes:  
L'allumage des thyristors du convertisseur de courant nécessite l'application d'impulsions à leurs gâchettes. Ces impulsions doivent avoir un certain angle de retard d'allumage  $\alpha$  par rapport au point d'intersection des tensions alternatives alimentant le convertisseur de courant.

Il est indispensable de pouvoir faire varier cet angle de retard d'allumage  $\alpha$  à l'aide d'une tension de commande  $U_c$  continu. Les éléments essentiels du dispositif de commande sont donnés par la figure - 2.

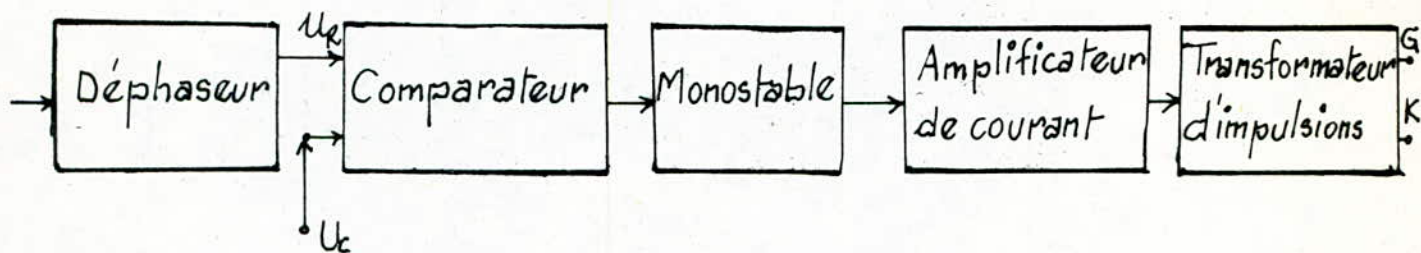


fig-2. Schéma synoptique du dispositif de commande des gâchettes. Le déphaseur fournit une tension sinusoïdale  $U_r$  qui possède une position de phase bien déterminée ( $120^\circ$ ), par rapport aux tensions d'alimentation du convertisseur de courant.

La tension de commande  $U_c$  est comparée à la tension  $U_r$  dite tension de référence. Le comparateur convertit la tension sinusoïdale, décalée verticalement, en une tension rectangulaire.

Un monostable, agissant sur le flanc montant de cette tension, fournit des impulsions de durée égale à 4 ms.

Le monostable est un dispositif possédant un état stable en l'absence

d'impulsion extérieure, mais susceptible sous l'effet d'une impulsion de basculer dans son état instable d'où il retourne spontanément à l'état stable.

A la sortie du monostable, on place successivement un amplificateur de courant et un transformateur d'impulsions, qui nous permettent d'obtenir des impulsions aptes à allumer le thyristor.

Le transformateur d'impulsion est indispensable pour garantir une séparation galvanique entre les circuits de commande et les gâchettes des thyristors.

Dans notre cas, on a utilisé la commande verticale: "Arc-cosinus", qui est obtenue par la superposition de deux tensions:

- \* La première est la tension de référence  $U_r$ .
- \* La deuxième est la tension de commande  $U_c$ .

Les impulsions d'allumage ont la même fréquence que la tension de référence  $U_r$  et sont décalées de l'angle  $\alpha_a$  par rapport au passage par la valeur de crête de  $U_c$  (fig. 3.). On en déduit:

$$U_{cm} \cos \alpha_a = U_{cm}$$

Ce qui donne une fonction de transfert du circuit de commande de la forme:

$$\alpha_a = \text{Arc. cos} \frac{U_{cm}}{U_{cm}} \quad (I) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} U_{cm}: \text{ tension de commande continue} \\ U_{cm}: \text{ valeur de crête de } U_r. \end{cases}$$

Cette relation permet de linéariser la fonction de transfert du convertisseur.

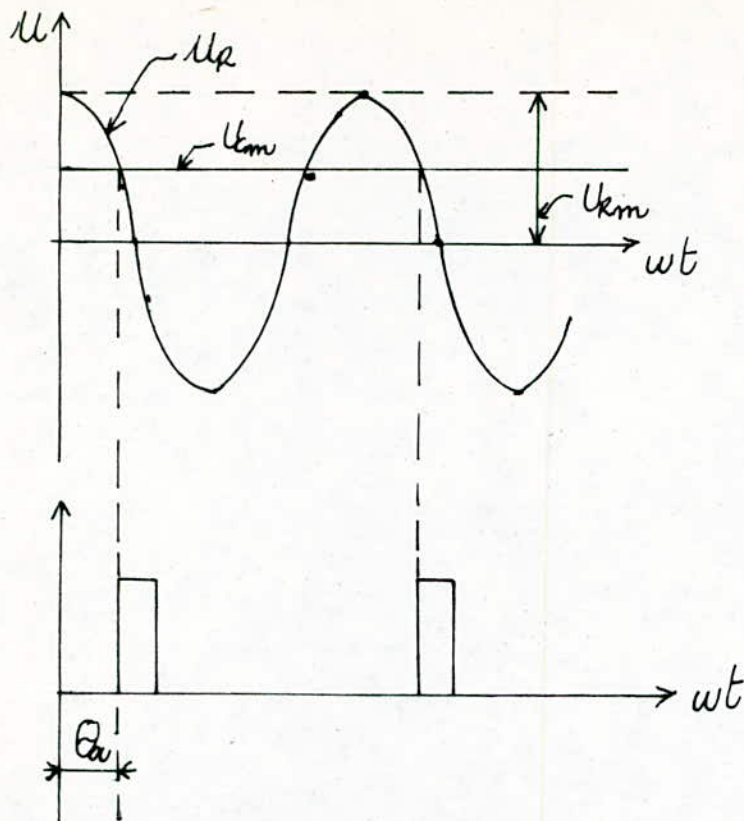


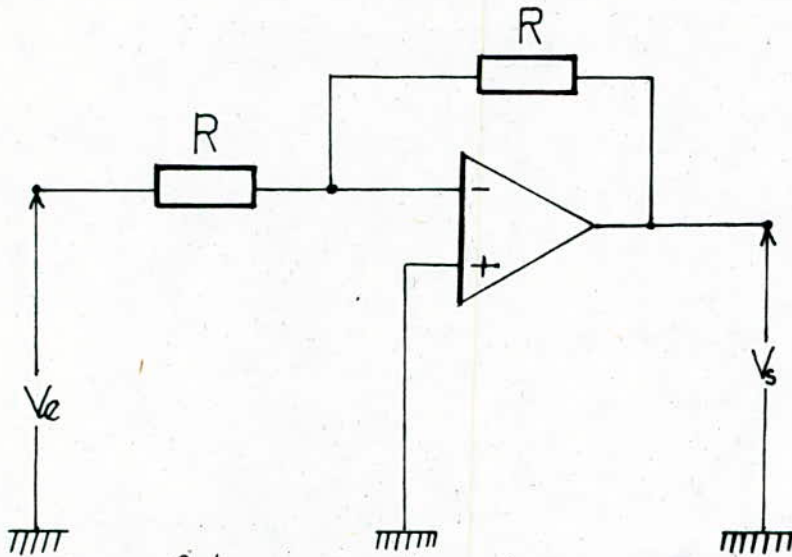
fig. 3. Fonctionnement d'un dispositif de commande de gâchettes. Il est nécessaire de limiter le domaine de variation de la tension de commande  $U_c$  en correspondance avec une limitation de l'angle  $\theta_a$  entre les limites  $\theta_{amin}$  et  $\theta_{amax}$ .

D'après la relation (I) entre  $\theta_a$  et  $U_c$ , on constate qu'à  $\theta_{amin}$  correspond  $U_{cmax}$  et qu'à  $\theta_{amax}$  correspond  $U_{cmin}$ .

Pour assurer le fonctionnement simultané, en redresseur de l'un des deux ponts constituant le convertisseur réversible, tandis que l'autre pont fonctionne en onduleur, on dispose d'un amplificateur opérationnel inverseur dont la tension d'entrée est variable à volonté à l'aide d'un potentiomètre dans l'intervalle  $[-2,4V, +2,4V]$ .

La tension de sortie de cet amplificateur peut donc varier dans l'intervalle  $[+2,4\text{ V}, -2,4\text{ V}]$  avec  $V_s = -V_e$ .

De cette manière le pont attaque par la tension UE  $[-2,4\text{ V}, 0\text{ V}]$  fonctionnera en redresseur, alors que celui attaqué par la tension UE  $[0\text{ V}, +2,4\text{ V}]$  fonctionnera en onduleur.



- Schéma de l'amplificateur opérationnel inverseur.

- Précautions expérimentales concernant la commande:

Lorsque la conduction est continue, la valeur maximale théorique de l'angle d'allumage  $\alpha_a$  est égale à  $180^\circ$ . En réalité, en raison de la durée de la commutation, la valeur maximale de  $\alpha_a$  est généralement de  $150^\circ$ .

Lors du fonctionnement en onduleur, le temps de commutation revêt une importance capitale:

\* L'angle de retard à l'amorçage doit être inférieur à  $180^\circ$  pour permettre la commutation complète ou le transfert du courant d'un thyristor à un autre pendant que la tension a la polarité convenable.

Si la commutation n'est pas terminée avant l'inversion de la polarité de la tension, le premier thyristor reste conducteur et s'oppose à la conduction de celui qui doit prendre le relais: c'est le phénomène de reconduction. Le convertisseur fonctionne alors en redresseur et il s'ensuit une surintensité importante dans les circuits alternatif et continu. La limite de déphasage est égale à:

$$\alpha_{max} = 180^\circ - \beta \quad \text{avec } \beta = \mu + \delta$$

$\beta$ : angle de garde.

$\mu$ : angle de commutation ou d'empiètement.

$\delta$ : angle de marge (désamorçage des thyristors plus une sécurité).

Dans la réalisation de la commande, on prévoit un angle de garde de  $30^\circ$ . La valeur supérieur de  $\alpha$  est donc limité à  $150^\circ$  par sécurité. De cette manière, on a tenu compte du temps de blocage  $t_b$  du thyristor et de la durée du phénomène d'empiètement.

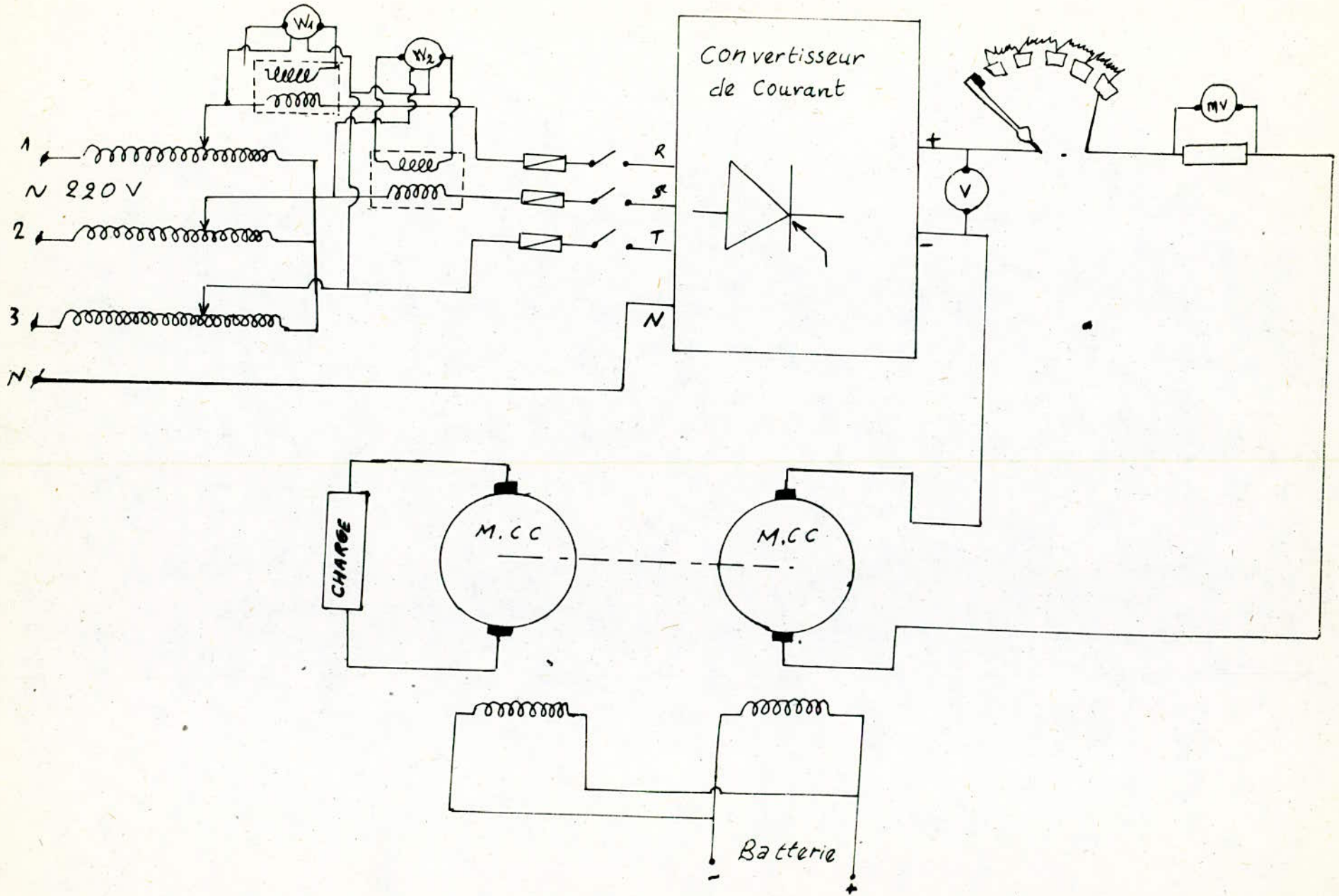
De ce fait, on a été amené à réaliser des butées côté redresseur maximum et onduleur maximum. Dans notre cas ces butées, ont été réglé l'une à  $30^\circ$  et l'autre à  $150^\circ$ , donc  $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ . On évite ainsi la conduction discontinue et la zone d'impossibilité d'allumage.

\* Zone d'impossibilité d'allumage:

La tension aux bornes d'un thyristor ne permet pas son allumage tant que la tension du réseau est inférieure à la f.c.e.m du moteur. La limite de la zone de conduction continue est caractérisée par le fait que le courant devient nul au moment de l'égalité des tensions des phases et de la f.c.e.m de la machine à courant continu.



~ Montage ~



- 40 -

- I. 3. Essais et relevés des caractéristiques ( $\theta_a$  constant) :  $U_h(I_m)$ ,  $N(I_m)$ ,  $P(I_m)$ ,  $Q(I_m)$  :

- Relevés des caractéristiques  $U_h(I_m)$  à  $\theta_a$  constant :

\*  $\theta_a = 30^\circ$

$U_h(V)$	112	106	105	100	99	98	96
$I_m(A)$	3,9	9,3	9,7	13,7	14,3	17,6	18

\*  $\theta_a = 45^\circ$

$U_h(V)$	104	98	93	92	88	86
$I_m(A)$	3,7	8,5	12,7	13,1	16,6	19,6

\*  $\theta_a = 60^\circ$

$U_h(V)$	86	78	75	72	70	66	64
$I_m(A)$	3,4	7,2	10,5	13,2	15,6	17,8	19,8

\*  $\theta_a = 75^\circ$

$U_h(V)$	60	51	47	44,3	43	42	39	37	35	32
$I_m(A)$	3	5,2	7,2	8,8	10,2	11,4	13,7	15,6	17	20

- Relevés des caractéristiques  $N(I_p)$  à  $\theta_a$  constant:

\*  $\theta_a = 30^\circ$

$N(\text{tr/min})$	1933,72	1800,36	1767,02	1683,67	1667	1600,32	1583,65
$I_p(\text{A})$	3,9	9,3	9,7	13,7	14,3	17,6	18

\*  $\theta_a = 45^\circ$

$N(\text{tr/min})$	1800,36	1667	1566,98	1550,31	1466,96	1383,61
$I_p(\text{A})$	3,7	8,5	12,7	13,1	16,6	19,6

\*  $\theta_a = 60^\circ$

$N(\text{tr/min})$	1483,63	1333,6	1250,25	1166,9	1116,89	1066,88	1000,2
$I_p(\text{A})$	3,4	7,2	10,5	13,2	15,6	17,8	19,8

\*  $\theta_a = 75^\circ$

$N(\text{tr/min})$	1016,87	833,5	766,82	716,81	633,46	600,12	583,45	533,44	500,1	416,75
$I_p(\text{A})$	3	5,2	7,2	8,8	11,4	12,6	13,7	15,6	17	20

- Relevés des caractéristiques  $P(I_p)$  à  $\theta_a$  constant:

\*  $\theta_a = 30^\circ$

$P(w)$	450	1020	1060	1440	1480	1790	1820
$I_p(A)$	3,9	9,3	9,7	13,7	14,3	17,6	18

\*  $\theta_a = 45^\circ$

$P(w)$	400	890	1270	1320	1590	1820
$I_p(A)$	3,7	8,5	12,7	13,1	16,6	19,6

\*  $\theta_a = 60^\circ$

$P(w)$	310	640	890	1080	1230	1360	1470
$I_p(A)$	3,4	7,2	10,5	13,2	15,6	17,8	19,8

\*  $\theta_a = 75^\circ$

$P(w)$	190	320	430	590	640	670	710	770	800	870
$I_p(A)$	3	5,2	7,2	10,2	11,4	12,6	13,7	15,6	17	20

- Relevés des caractéristiques  $Q(I_n)$  à  $\theta_a$  constant:

\*  $\theta_a = 30^\circ$

Q(var)	17,3	173,2	174,2	277,12	277,12	353,72	381,04
I(A)	3,9	9,3	9,7	13,7	14,3	17,6	18

\*  $\theta_a = 45^\circ$

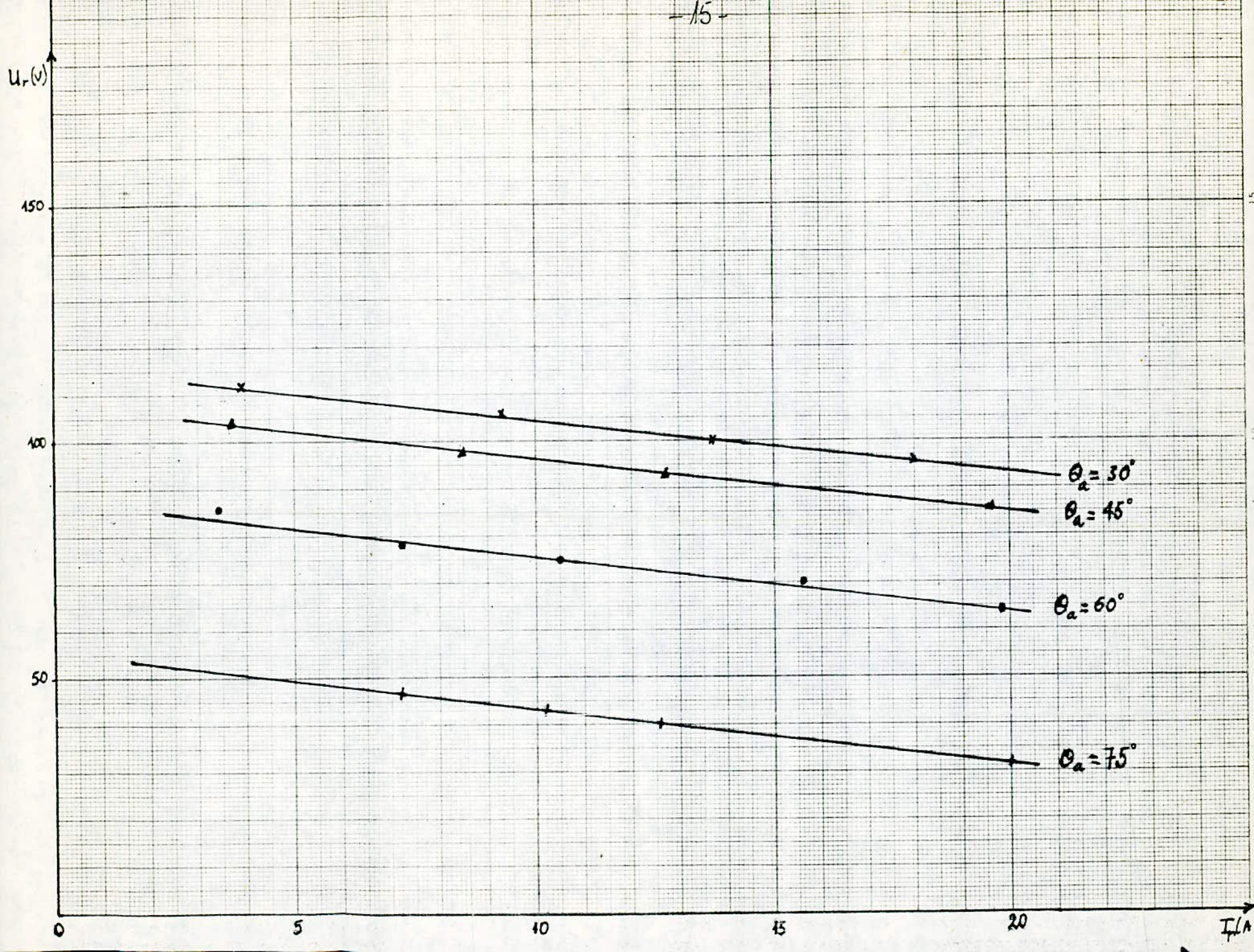
Q(var)	69,28	259,8	398,36	415,68	536,92	658,16
I(A)	3,7	8,5	12,7	13,1	16,6	19,6

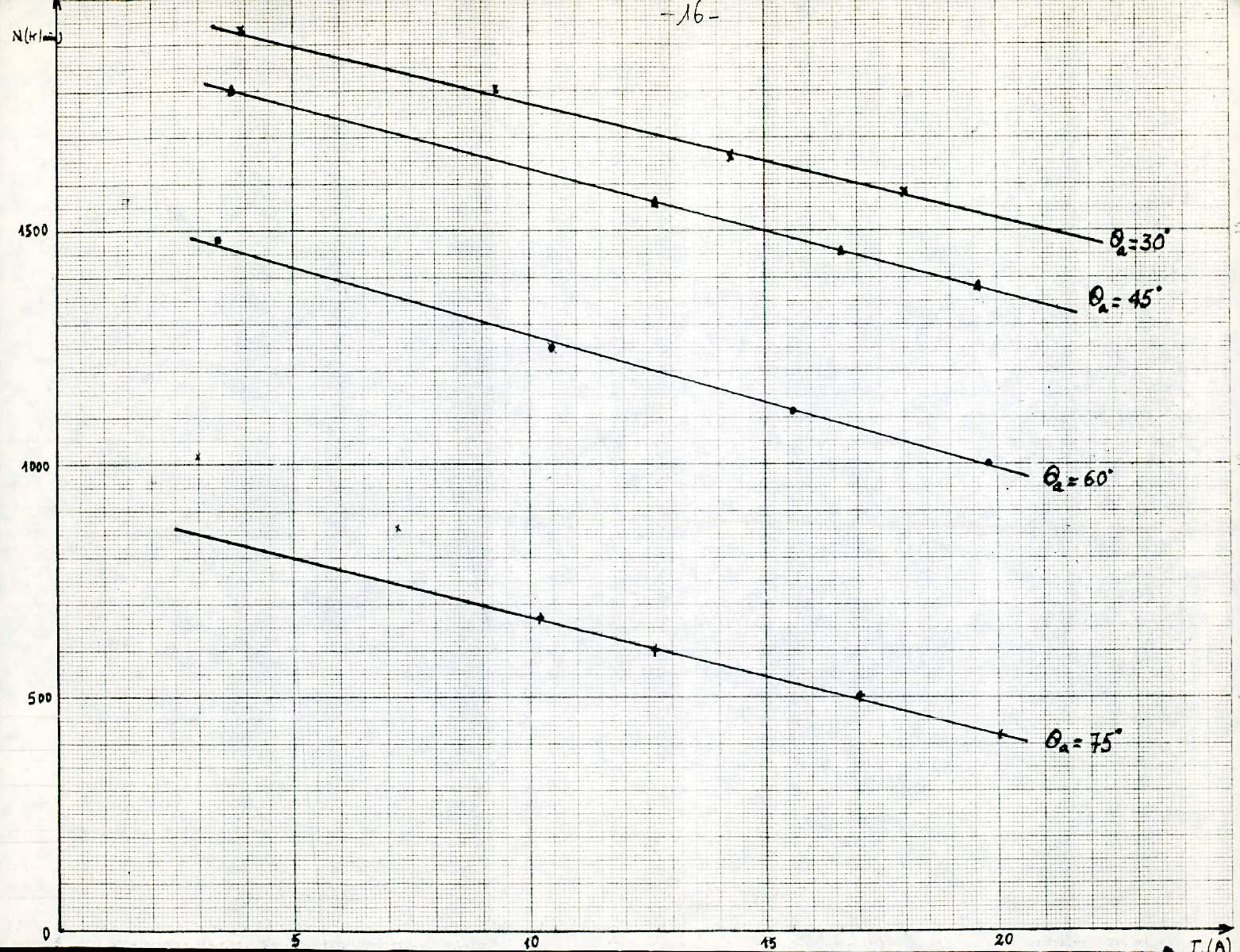
\*  $\theta_a = 60^\circ$

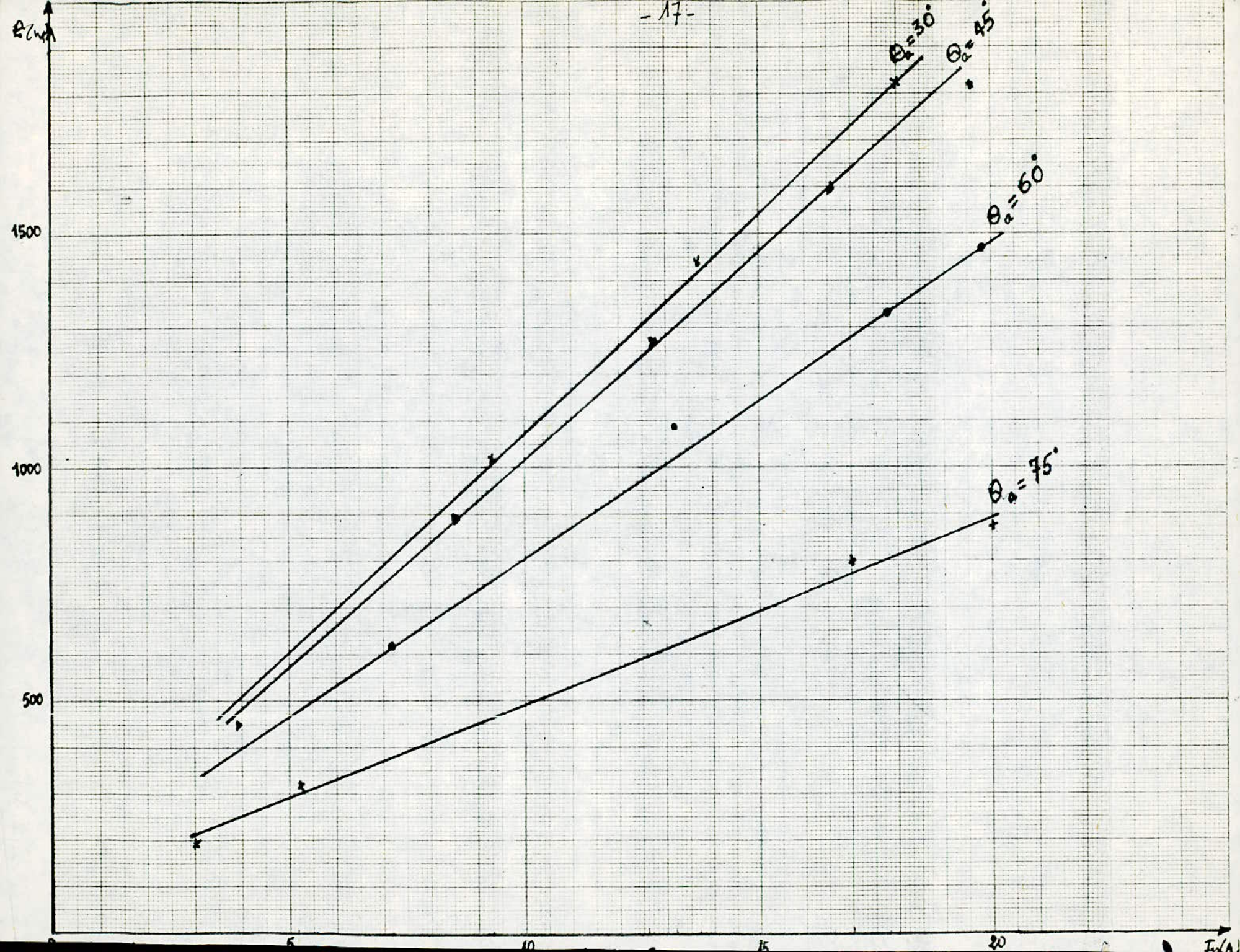
Q(var)	155,88	381,04	606,2	762,08	917,96	1039,2	1160,44
I(A)	3,4	7,2	10,5	13,2	15,6	17,8	19,8

\*  $\theta_a = 75^\circ$

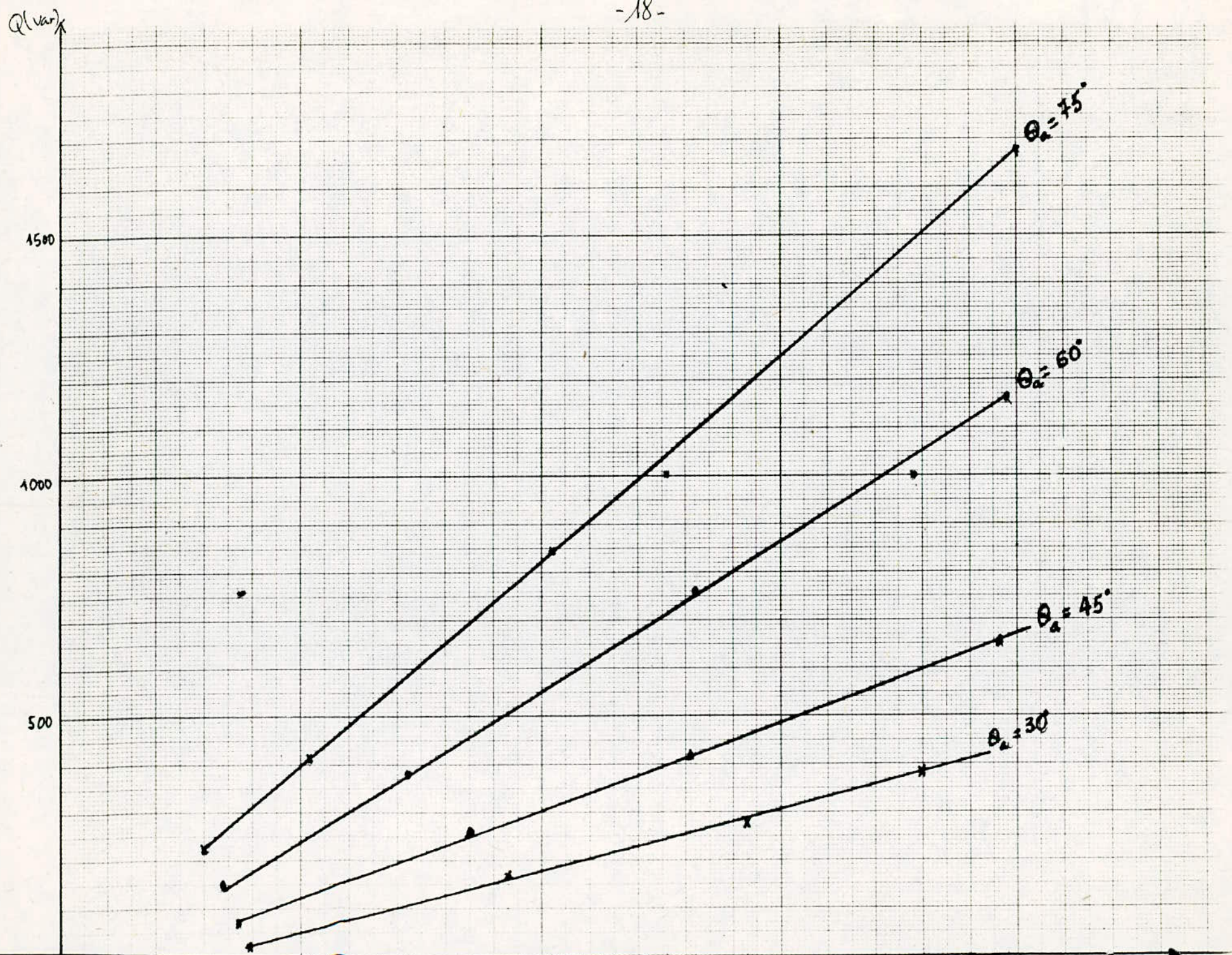
Q(var)	225,16	415,68	571,56	848,68	969,92	1056,52	1160,44	1299	1454,88	1680,04
I(A)	3	5,2	7,2	10,2	11,4	12,6	13,7	15,6	17	20











- Essais avec un seul pont de Graetz - Fonctionnement en redresseur - :

Interprétation des caractéristiques  $U_p(I_p)$  à  $\alpha_a$  constant :

Les caractéristiques  $U_p(I_p)$  à  $\alpha_a$  constant, du convertisseur alimenté sous tensions alternatives constantes, présentent une pente négative montrant l'effet d'une chute de tension  $\Delta U$  qui est la somme :

- \* d'une chute de tension dans les inductances du circuit d'alimentation lors de la commutation qu'on note  $\Delta U_t$ .
- \* d'une chute de tension due aux résistances des enroulements du transformateur d'alimentation et éventuellement de la ligne en amont. On la note  $\Delta U_k$ .

\* d'une chute de tension directe dans les thyristors, qu'on note  $\Delta U_d$   
Donc la tension redressée moyenne en charge s'écrit :

$$U_p = U_p \cos \alpha_a - \Delta U$$

ou bien : 
$$U_p = U_p \cos \alpha_a - (\Delta U_t + \Delta U_k + \Delta U_d)$$

Les caractéristiques  $U_p(I_p)$  restent parallèles du fait que, pour un courant redressé  $I_p$  donné, les chutes de tensions partielles, et donc leur somme  $\Delta U$ , sont indépendantes de  $\alpha_a$ .

On constate aussi qu'à courant redressé donné, la tension redressée moyenne  $U_p$  augmente quand l'angle  $\alpha_a$  diminue, ceci s'explique par la relation précédente donnant la tension redressée moyenne en charge.

- Interprétation des caractéristiques  $N(I_p)$  à  $\alpha$  constant:

Soient  $U_p'$  et  $E'$  respectivement la tension et la f.c.e.m du moteur:

$$U_p' = U_p \cos \alpha - \Delta U = E' + R I_p$$

$$\text{or } E' = k N \quad (\text{le flux } \Phi \text{ est constant})$$

donc:

$$N = \frac{U_p \cos \alpha - (\Delta U + R I_p)}{k}$$

Si on ne tient pas compte de la réaction d'induit et étant donné que le flux est constant la caractéristique de vitesse  $N(I_p)$  à  $\alpha$  constant est une droite de pente négative, ceci s'explique par la relation ci-dessus. En augmentant l'angle  $\alpha$ , la tension appliquée aux bornes du moteur diminue et on obtient ainsi pour différents angles  $\alpha$ , une famille de caractéristiques parallèles. C'est ce qu'on appelle: le mode de réglage (par la tension) permettant de réduire la vitesse d'un groupe moteur-machine entraînée.

- Interprétation des courbes  $P(I_p)$  et  $Q(I_p)$  à  $\alpha$  constant:

Les caractéristiques  $P(I_p)$  et  $Q(I_p)$  à  $\alpha$  constant sont des droites, donc les puissances active et réactive prélevées sur le réseau alternatif sont proportionnelles au courant redressé  $I_p$ .

Par ailleurs, on constate que pour un courant  $I_p$  donné, si on augmente l'angle  $\alpha$ , la puissance active  $P$  fournie par le réseau alternatif diminue, tandis que la puissance réactive  $Q$  augmente.

## CHAP. II. LES CONVERTISSEURS REVERSIBLES ALTERNATIF - CONTINU

### II.1. Etude Théorique:

Pour divers cas d'application, les convertisseurs alternatif-continu réversibles sont utilisés pour la commande de moteurs à courant continu par l'induit, devant opérer des inversions de marche rapides ou des freinages contrôlés. Le courant d'induit pouvant changer de sens et par conséquent, ces convertisseurs doivent fonctionner dans les 4 quadrants du plan  $(U_p, I_p)$ . Pour cela, on a utilisé le convertisseur réversible alternatif-continu ou convertisseur de courant bidirectionnel, constitué de deux groupes de convertisseur de courant unidirectionnel montés en tête-bêche.

Nous désirons réaliser un transfert d'énergie, par l'intermédiaire de deux groupes de puissance, entre:

- \* Un réseau alternatif.
- \* Une machine tournante à courant continu.

Les groupes utilisés travaillent uniquement dans une zone où la tension du réseau amène aux bornes du redresseur une tension permettant son allumage c'est à dire dans la zone de commutation naturelle; dans notre cas  $30^\circ \leq \theta_a \leq 150^\circ$ .

Donc le transit de l'énergie active est possible dans les deux sens. Selon le signe du produit  $U_p \cdot I_p$ , la puissance active peut être positive ou négative.

## II.2 - Etude des puissances :

En triphasé, les puissances active et réactive sont données par les relations :

$$P = 3VI \cos \varphi$$

$$Q = 3VI \sin \varphi$$

En négligeant le phénomène d'empiètement, les pertes dans le convertisseur et dans le transformateur, on peut écrire :

$$U_p = U_g \cos \alpha \quad \text{avec} \quad U_g = \frac{P}{\pi} V_m \sqrt{3} \sin \frac{\pi}{p}$$

$U_p$  : tension moyenne redressée

$p$  : indice de pulsation du convertisseur ( $p = 6$ )

La tension  $V$  et le courant  $I$  peuvent être donnés en fonction de  $U_p$  et du courant redressé  $I_p$  par :

$$V = \frac{\pi}{3\sqrt{6}} U_p \quad \text{et} \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_p$$

$$\text{donc :} \quad 3VI = 3V \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\pi}{3\sqrt{6}} U_p \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_p = U_g I_p$$

$$\text{d'où :} \quad P = U_g I_p \cos \varphi$$

$$Q = U_g I_p \sin \varphi$$

- Influence de l'angle de retard d'allumage :

La répartition en puissance active et réactive résulte du déphasage de l'onde fondamentale du courant du réseau par rapport à la tension simple correspondante. Pour un courant redressé donné, la puissance apparente est constante et le déphasage de l'onde fondamentale  $\varphi$  est égal à l'angle de retard d'allumage  $\alpha$ .

donc  $P = P_a$

Cette relation est déduite de la fig. 4. qui montre que le déphasage  $\varphi$  de l'onde fondamentale du courant de réseau par rapport à la tension simple correspondante est égale à l'angle de retard d'allumage  $\alpha_a$ .

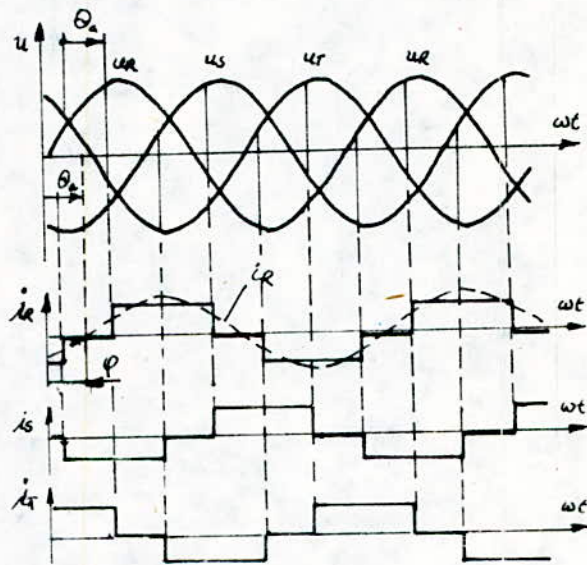


fig. 4. Allure des tensions et courants de réseau pour un convertisseur en montage en pont triphasé.

En tenant compte du fait que :  $U_p = U_0 \cos \alpha_a$ , on peut écrire :

$$P = U_0 I_p \cos \alpha_a = U_p I_p$$

$$Q = U_0 I_p \sin \alpha_a$$

A partir de là, on peut dire que :

Pour un angle de retard d'allumage  $\alpha$  constant, les puissances active et réactive sont proportionnelles au courant redressé  $I_r$ .

Pour un courant redressé donné, la puissance active fournie par le réseau est maximale pour  $\alpha = 30^\circ$  (dans notre cas), elle diminue lorsque  $\alpha$  augmente pour s'annuler à  $\alpha = 90^\circ$ . Tandis que la puissance active renvoyée au réseau ( $\alpha > 90^\circ$ ) augmente avec  $\alpha$  et elle est maximale pour  $\alpha = 150^\circ$  (dans notre cas).

Par contre la puissance réactive augmente avec  $\alpha$  pour atteindre le maximum à  $\alpha = 90^\circ$ . Pour  $\alpha > 90^\circ$  la puissance réactive prélevée sur le réseau diminue et tend vers une valeur faible si  $\alpha$  tend vers  $150^\circ$ .

Facteur de puissance de l'installation :

Lorsqu'on augmente l'angle d'amorçage d'un thyristor, la forme du courant absorbé sur le réseau ne varie pas, ou peu, mais la phase de ce courant vis à vis de la tension de ligne varie.

A grand déphasage, le facteur de puissance sera mauvais.

La puissance apparente est donnée par :

$$S = 3VI_{\text{eff}} \quad \text{avec } I_{\text{eff}} : \text{valeur efficace du courant de réseau}$$

Le facteur de puissance est défini par :

$$F = \frac{P}{S} = \frac{I}{I_{\text{eff}}} \cos \alpha = g \cdot \cos \alpha \quad \text{avec } g = \frac{I}{I_{\text{eff}}}$$

Pour un convertisseur de courant en montage en pont triphasé :

$$g = \frac{3}{\pi} = 0,955$$

Donc le facteur de puissance varie comme le cosinus de l'angle de retard d'allumage  $\alpha$ .

La commutation entraînant une absorption de puissance réactive, rajoute un déphasage supplémentaire au courant et diminue donc légèrement le facteur de puissance de l'équipement.

- Effet des harmoniques sur la puissance apparente :

En désignant par  $S$ , la puissance apparente correspondant au courant global ou courant en ligne  $I_L$ , on a :

$$S = 3VI_L = 3V\sqrt{I^2 + (I_L^2 - I^2)}$$

ou bien 
$$S = \sqrt{(3VI)^2 + 9V^2(I_L^2 - I^2)}$$

On présente cette relation sous la forme :

$$S = \sqrt{S_1^2 + D^2} \quad \text{avec : } S_1 = 3VI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$
$$D = 3V\sqrt{I_L^2 - I^2}$$

$S_1$  : puissance apparente <sup>correspondant</sup> au terme fondamental du courant.

ou  $D$  : puissance déformante.

La puissance déformante  $D$ , traduit l'effet des harmoniques sur la puissance apparente.

A valeur donnée du courant redressé  $I_p$ , les valeurs de  $I_L$  et  $I$ , donc celles de  $S$ ,  $S_1$  et  $D$  sont indépendantes de l'angle de retard d'allumage  $\alpha$ , ce qui n'est pas le cas pour  $P$  et  $Q$ .



### - II.3. Mode de fonctionnement d'un convertisseur réversible :

Pour inverser le sens de marche d'une machine à courant continu, en agissant uniquement sur l'induit, on est conduit au schéma de puissance (fig. 5 -) dont le fonctionnement est explicité par le diagramme (fig. 6 -), la f.c.e.m et le courant pouvant s'inverser. Avec les conventions indiquées (fig. 6 -), les quadrants (1) et (3) correspondent à des fonctionnements en moteur, les quadrants (2) et (4) à des fonctionnements en génératrice.

On est ainsi conduit au schéma de puissance de la fig. 5 -.

Avec les mêmes conventions que précédemment, le groupe -I- couvre les quadrants (1) et (4), le groupe -II- les quadrants (2) et (3).

Soient  $V_{AB}$  et  $V_{CO}$ , les tensions aux bornes des groupes, il est possible d'imaginer que les deux groupes sont allumés en permanence de telle manière que :  $V_{AB} \equiv - V_{CO}$ .

Le groupe qui aurait une tension algébriquement supérieure à la f.c.e.m de la machine fournirait le courant.

Mais, puisque on travaille en commutation naturelle, on ne peut réaliser que l'égalité des valeurs moyennes des tensions :

$$U_1 = - U_2 \quad \text{avec} \quad \begin{cases} U_1 = (V_{AB})_{\text{moy}} \\ U_2 = (V_{CO})_{\text{moy}} \end{cases}$$

Il en résultera l'existence de tensions alternatives  $V_{AO}$  et  $V_{BO}$  et un courant dit "de circulation".

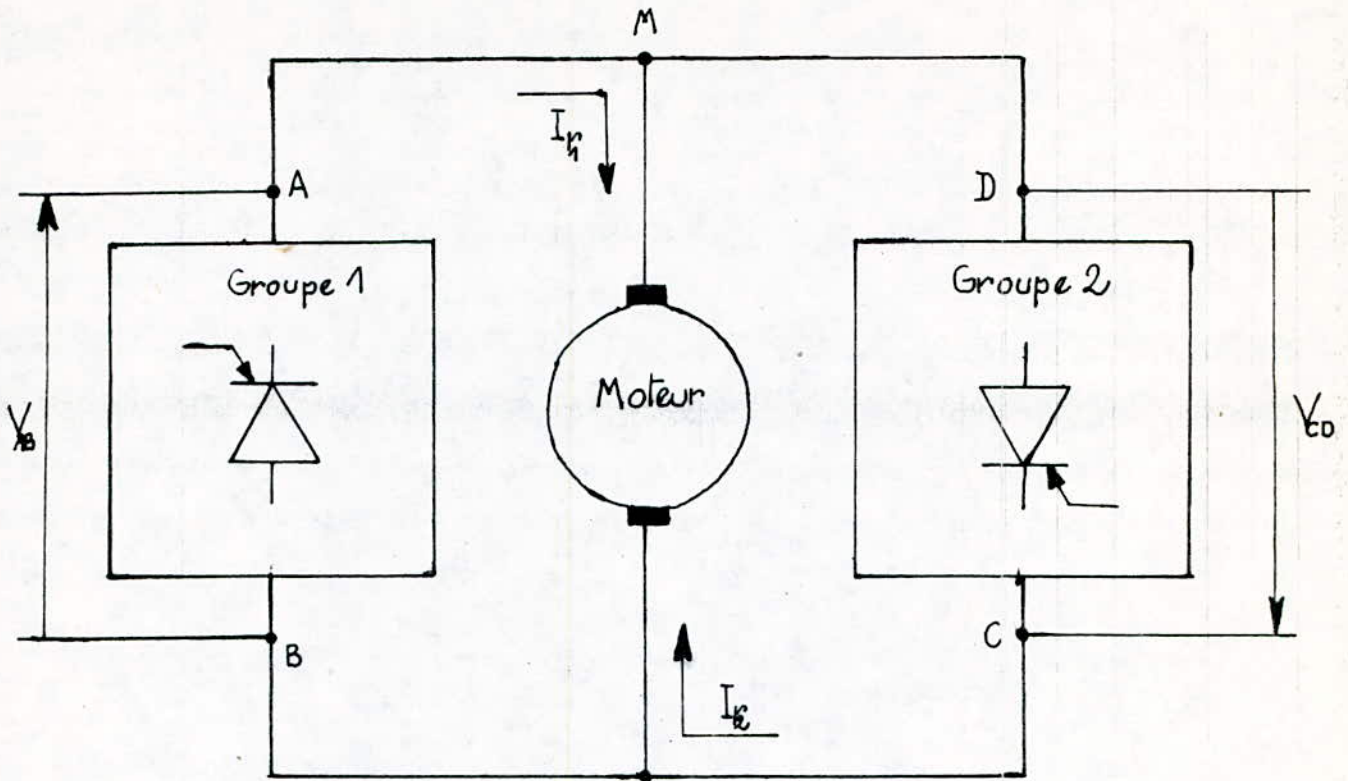


fig. 5 - Schéma simplifié d'une commande réversible d'un moteur à courant continu par l'induit.

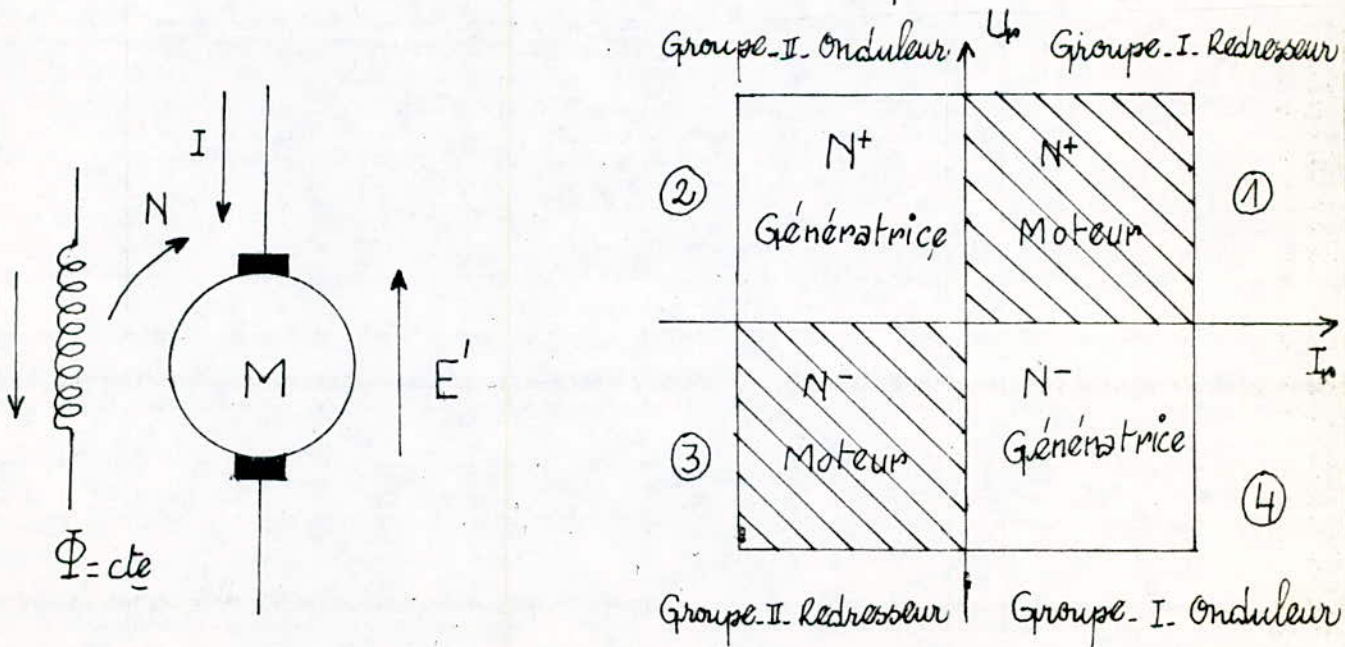


fig. 6 - Modes de fonctionnement d'un convertisseur réversible dans un système d'axes ( $U_p, I_r$ )

- Les montages dits "à circulation de courant":

On distingue :

le montage antiparallèle, le montage croisé et le montage en H.

Tous ces montages sont caractérisés par le fait qu'un courant peut circuler d'un convertisseur de courant à l'autre sans passer par la charge. Les tensions instantanées  $u_1$  et  $u_2$  sont à l'origine de ce courant de circulation.

Dans notre cas, on a utilisé le montage antiparallèle.

Le montage antiparallèle:

Les deux ponts de Graëtz sont connectés en antiparallèle (fig. 7 -), les sens de conduction des deux convertisseurs de courant sont opposés.

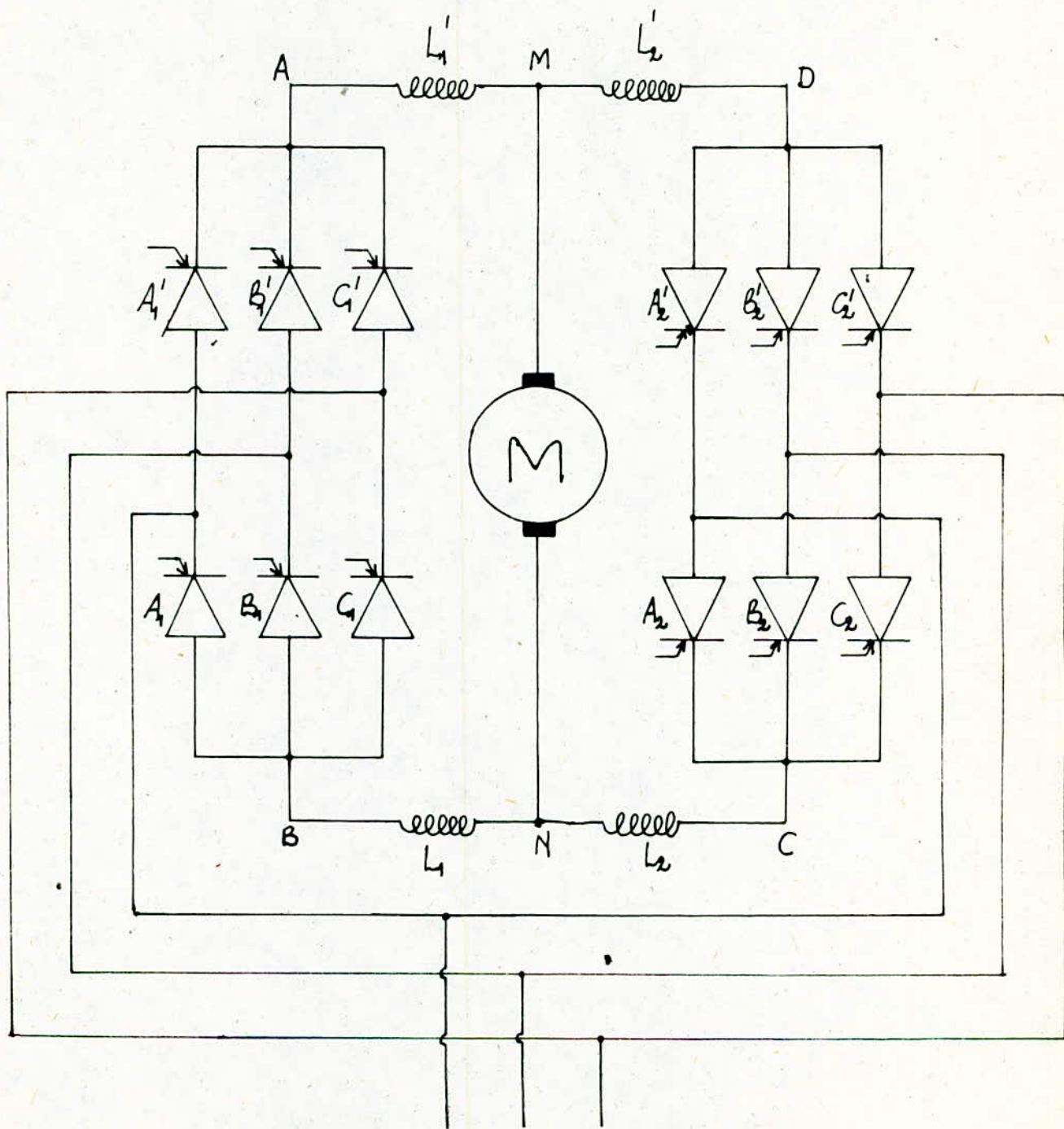
La valeur moyenne des deux tensions  $V_{AB}$  et  $V_{CD}$  doit être égale mais opposée car la valeur moyenne aux bornes des selfs doit s'annuler.

Il suffit pour cela que les angles d'allumage des deux groupes soient déphasés de manière symétrique autour de la valeur  $\alpha_a = 90^\circ$  qui correspond à une tension moyenne de sortie nulle. A chaque instant, un groupe fonctionne donc en redresseur, l'autre en onduleur.

Les montages antiparallèles sont employés de manière plus fréquente car ils ne nécessitent qu'un seul transformateur.

Les tensions  $V_{AD}$  et  $V_{BC}$  ont une valeur moyenne nulle et le courant de circulation qu'elles engendrent est unidirectionnel et peut être limité de façon avantageuse par des selfs (fig. 7 -).

fig. 7 - Montage antiparallèle.



Les valeurs instantanées des tensions  $V_{AO}$  et  $V_{BO}$  dépendent :

\* de la nature du groupe et du montage utilisé.

\* de la valeur de l'angle d'allumage  $\alpha$ .

Le montage antiparallèle de deux ponts de Graetz est caractérisé par la présence de deux courants de circulation, l'un circulant dans les moitiés inférieures des ponts (I) et (II) et l'autre dans les moitiés supérieures. La tension de circulation présente donc un indice de pulsation  $p=3$  bien que la tension redressée  $U_1$  possède un indice de pulsation  $p=6$ .

Les courants de circulation dans les enroulements du transformateur ont cependant une valeur moyenne nulle, chaque enroulement étant traversé par des courants inverses et ceci en opposition de phase.

La valeur moyenne des deux tensions redressées  $U_1$  et  $U_2$  devant être égales et opposées ; on a :

$$U_1 = -U_2 \text{ ou bien } U_0 \cos \alpha_1 = -U_0 \cos \alpha_2$$

$$\text{donc } \alpha_2 = 180^\circ - \alpha_1$$

Cette condition implique qu'un des deux ponts constituant le convertisseur réversible, fonctionne en redresseur et l'autre en onduleur. En tenant compte de la relation ci-dessus et des contraintes citées au chapitre - I - ,  $\alpha_1$  ne peut varier qu'entre  $30^\circ$  et  $150^\circ$ .

Le courant redressé  $I_p$  est donné par :

$$I_p = i_1 - i_2$$

Selon que  $i_1 > i_2$  ou  $i_1 < i_2$ , le courant de sortie  $I_p$  est positif ou négatif. Avec la supposition d'une forte inductance de lissage, le courant  $I_p$  sera lissé.

Par contre, les courants  $i_1$  et  $i_2$  présentent une ondulation car le courant de circulation est ondulé.

Les selfs de "limitation" du courant de circulation sont généralement calculés de telle manière que le courant moyen maximal de circulation soit de l'ordre de 10% du courant nominal du moteur, ce qui suppose des selfs relativement importantes. Les selfs peuvent donc limiter le courant de circulation car son amplitude dépend de l'impédance du trajet qu'il parcourt.

- Détermination de la valeur des selfs en fonction du courant de circulation admis.

Dans le circuit du courant de circulation  $i_c$ , on trouve toujours deux inductances de limitation pour que, quel que soit le sens du courant redressé  $I_n$ , l'une d'elles ne soit pas saturée. Puisque dans le montage antiparallèle existe deux voies possibles pour le courant de circulation, ceci nécessite donc quatre selfs de limitation.

On suppose que le circuit des deux courants de circulation est entièrement selfique, étant donné que les courants de circulation dans les enroulements du transformateur ont une valeur moyenne nulle, chaque enroulement étant traversé par des courants inverses en opposition de phase.

La courbe des valeurs moyennes du courant de circulation en fonction de l'angle d'allumage  $\alpha_a$ , nous permet de déterminer la valeur des selfs en fonction du courant de circulation admis.

Pour cela, on relève la valeur moyenne du courant de circulation, pour différents angles d'allumage  $\alpha_a$ , puis on trace la totalité de la courbe, en sachant qu'elle est symétrique par rapport à  $\alpha_a = \frac{\pi}{2}$

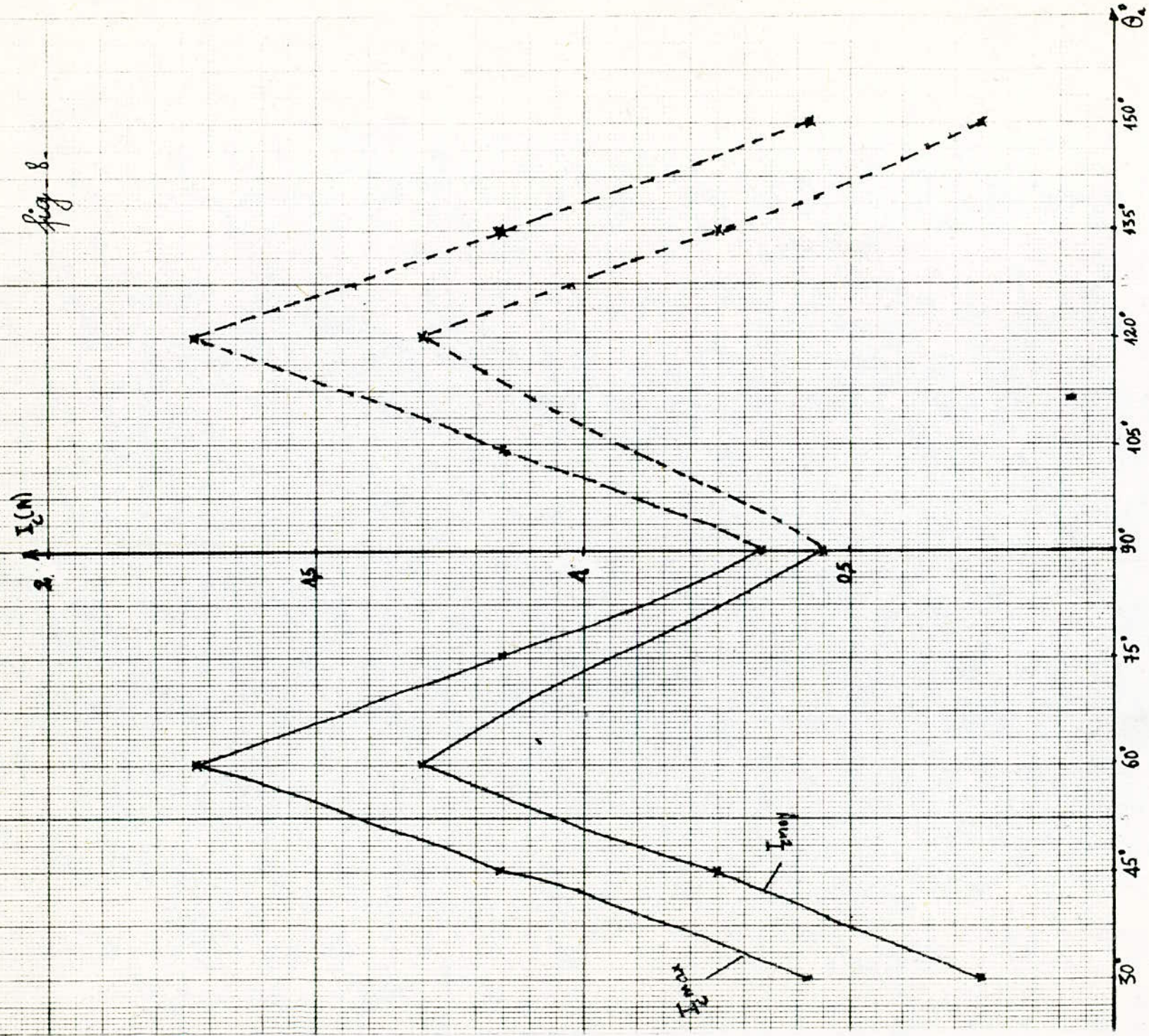
(fig-8).

III.1. Variation du courant de circulation avec l'angle de retard d'allumage  $\theta_a$ :

- Relevés du courant de circulation en fonction de l'angle  $\theta_a$ :

$\theta_a^\circ$	30	45	60	75	90
$I_{\text{moy}}^{(A)}$	0,25	0,75	1,3	1,15	0,55
$I_{\text{max}}^{(A)}$	0,583	1,166	1,728	1,598	0,676

fig. 8.





Le courant de circulation moyen est donné par:

$$i_{c\text{moy}} = \frac{3\sqrt{3} V_m}{\pi L \omega} (\sin \alpha_n - \alpha_n \cos \alpha_n)$$

On constate que le courant de circulation moyen est maximum pour  $\alpha_n = 60^\circ$  (fig. 8 -).

$$(i_{c\text{moy}})_{\text{max}} = 1,34 = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \frac{V_m}{L \omega} \Rightarrow L \omega = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \frac{V_m}{1,3}$$

or  $V_m = 68V$  d'où on tire:

$$L = 94,23 \text{ mH}$$

La valeur de chaque self est:

$$L_i = \frac{L}{2} = 47,12 \text{ mH.}$$

Ce qui est déjà considérable et justifie l'approximation selon laquelle le circuit du courant de circulation est purement selfique.

La valeur de chaque self mesurée par la méthode directe est:

$$L_{ip} = 48,2 \text{ mH.}$$

La valeur déterminée précédemment est donc appréciable.

Dans notre cas la valeur du courant de circulation moyen est maximum pour 5,4% du courant nominal du moteur.

De plus, la résistance du circuit du courant  $i_c$  contribue un peu à la limitation de celui-ci.

III.2. Etude du chemin parcouru par le courant de circulation et le courant redressé :  
Le chemin parcouru par le courant redressé  $I_r$  d'une part et par le courant de circulation  $i_c$ , d'autre part, dans les deux moitiés (inférieure et supérieure) des ponts de Graëtz (I) et (II) est donné par la figure - 9.

\* Dans le cas où  $I_r$  est positif, c'est le pont (I) qui conduit le courant de charge  $I_r$ .

Le courant de circulation  $i_c$  circule à travers les thyristors  $A_1$  et  $B_2$ , tandis que  $i_c'$  circule à travers les thyristors  $B_2'$  et  $A_1'$ .

La somme des courants  $I_r + i_c$  commute du thyristor  $A_1$  au thyristor  $B_1$  et ensuite au thyristor  $C_1$ . Alors que la somme  $I_r + i_c'$  commute du thyristor  $A_1'$  au thyristor  $B_1'$  et enfin le thyristor  $C_1'$ , selon l'angle de retard d'allumage  $\alpha_{a1}$ .

Le courant de circulation  $i_c$  passe du thyristor  $B_2$  à  $C_2$  et  $A_2$ , en relation avec l'angle de retard d'allumage  $\alpha_{a2}$ .

De même le courant de circulation  $i_c'$  passe du thyristor  $B_2'$  à  $C_2'$  et  $A_2'$ , toujours en relation avec l'angle de retard d'allumage  $\alpha_{a2}$ .

\* Dans le cas où  $I_r$  est négatif, c'est le pont (II) qui conduit le courant de charge  $I_r$ , tandis que le pont (I) ne conduit que les courants de circulation  $i_c$  et  $i_c'$ .

La tension aux bornes des deux selfs  $L_1$  et  $L_2$  de courant de circulation est :  $u_c = u_1 - u_2$  où  $u_1$  et  $u_2$  sont les tensions alternatives des deux phases conduisant momentanément le courant de circulation.

En utilisant les deux tensions instantanées  $u_1$  et  $u_2$ , on obtient de manière plus générale pour la tension de circulation :

$$u_c = u_1 + u_2$$

De la même manière, la tension aux bornes des deux selfs de limitation du courant de circulation,  $L_1$  et  $L_2$ , on a :

$$u_c' = u_1 + u_2.$$

Quand  $\alpha_1$  varie de  $\frac{\pi}{2}$  à  $\frac{5\pi}{6}$ , on retrouve les mêmes formes d'ondes pour la tension de circulation  $u_c$  et pour  $i_c$  et la même valeur pour  $i_{c\text{moy}}$  que lorsque  $\alpha_1$  varie de  $\frac{\pi}{6}$  à  $\frac{\pi}{2}$ . Cela tient du fait que les deux ponts jouent le même rôle en ce qui concerne le courant de circulation. Lorsque l'angle  $\alpha_1$  va de  $\frac{\pi}{2}$  à  $\frac{5\pi}{6}$ , l'angle  $\alpha_2$  va de  $\frac{\pi}{6}$  à  $\frac{\pi}{2}$ .

La courbe  $i_{c\text{moy}} = f(\alpha_1)$  est symétrique par rapport à  $\alpha_1 = \frac{\pi}{2}$ . Lorsque le courant débité  $I_p$  change de signe, cela n'affecte pas le courant de circulation si le pont passant est en conduction continue. Par exemple pour faire passer  $I_p + i_c$  par l'un des thyristor  $A_1, B_1$  ou  $C_1$  et  $i_c$  par  $A_2, B_2$  ou  $C_2$ , cela ne modifie pas les formes d'onde de  $u_1 + u_2$  et de  $i_c$ .

La courbe  $i_{c\text{moy}} = f(\alpha_1)$  est indépendante du sens de  $I_p$ .

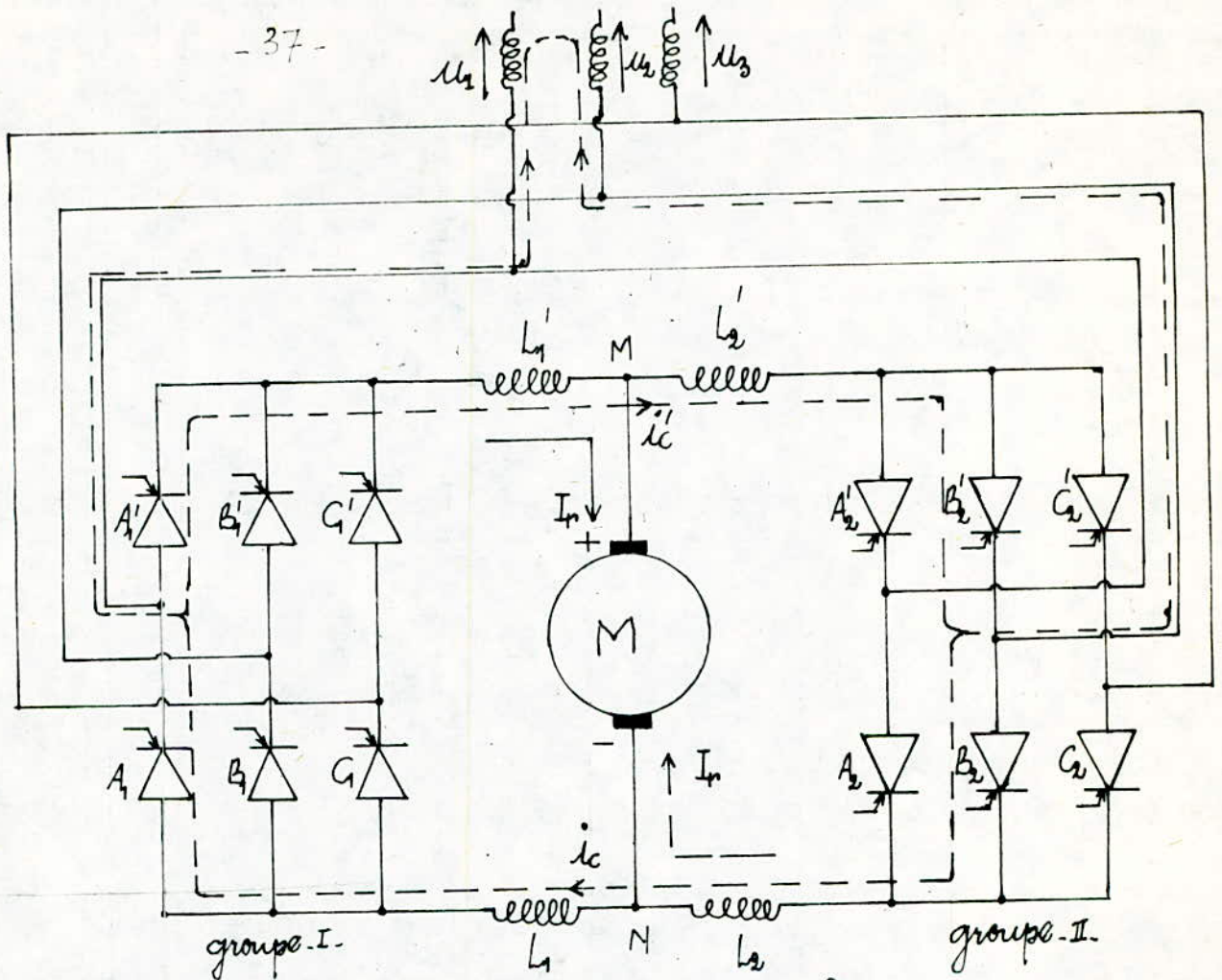


fig. 9. Courant redressé  $I_d$  et courants de circulation dans un montage antiparallèle.

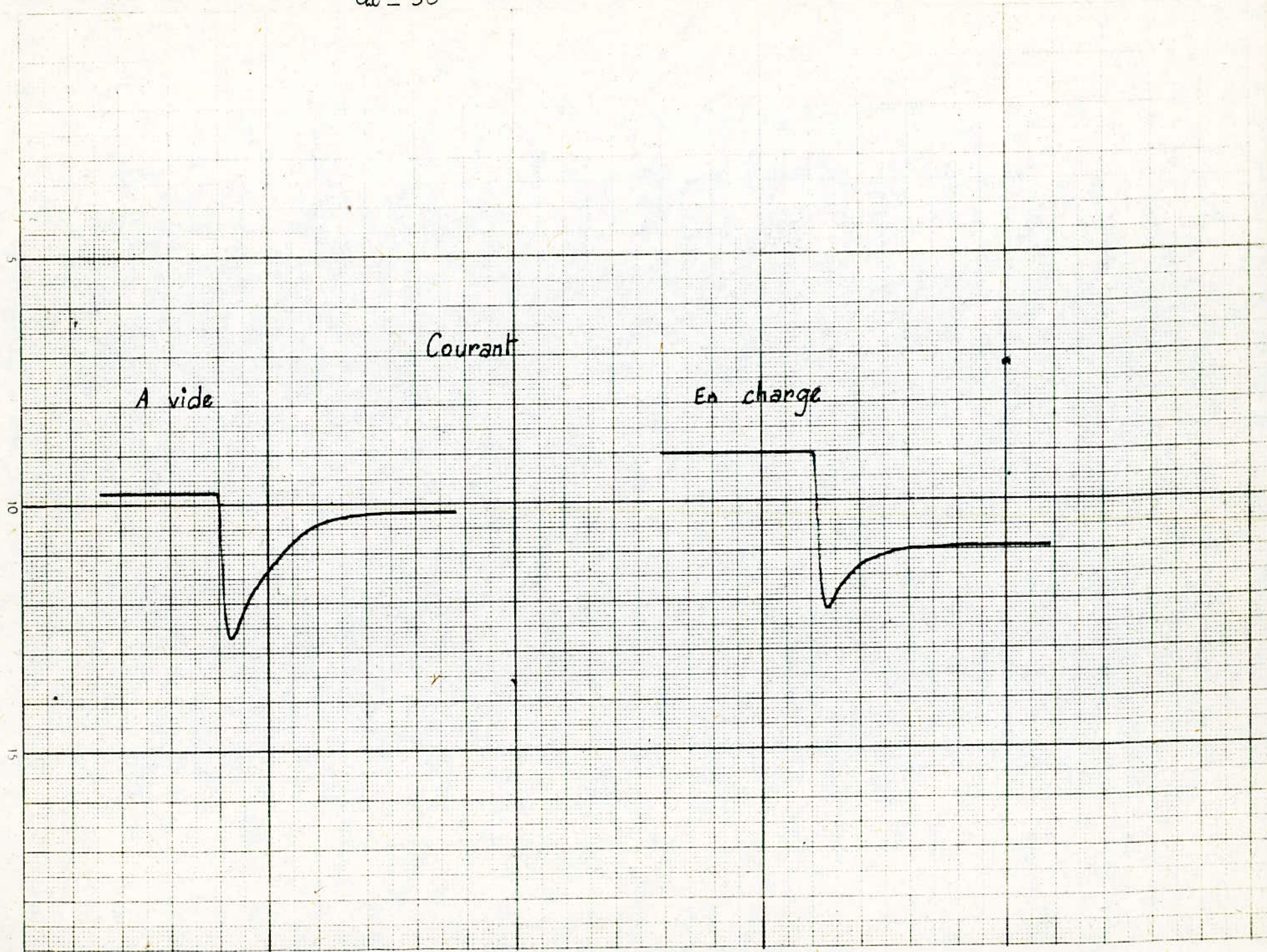
III.3. Etude de l'inversion du courant et de la vitesse du moteur:

Les relevés sont faits lors de l'inversion rapide du sens de rotation du moteur.

		$\theta_a^\circ$	30	45	60	
A V I D E	AVANT L'INVERSION	Courant $I_{in}$ (A)	4,2	3,4	2,7	
		Vitesse $N_{in}$ (tr/min)	1933,72	1400,28	866,84	
	LORS DE L'INVERSION	Courant criste (A)	54	42	30	
	TPS D'ANN- ULATION	Courant (A)	0,25	0,2	0,18	
		Vitesse (s)	4,8	3,4	2,15	
	TPS D'INVERSION	Courant (A)	3	2,6	2	
		Vitesse (s)	3,2	2,7	2,5	
	E N C H A R G E	AVANT L'INVERSION	Courant $I_{in}$ (A)	19,6	18,4	14
			Vitesse $N_{in}$ (tr/min)	1400,28	500,1	350,07
		LORS DE L'INVERSION	Courant criste (A)	44	31	22
TPS D'ANN- ULATION		Courant (A)	1	0,9	0,8	
		Vitesse (s)	3,2	1,6	0,8	
TPS D'INVERSION		Courant (A)	2,9	1	0,7	
		Vitesse (s)	2,6	1,5	0,9	

$$\alpha_a = 30^\circ$$

- 39 -

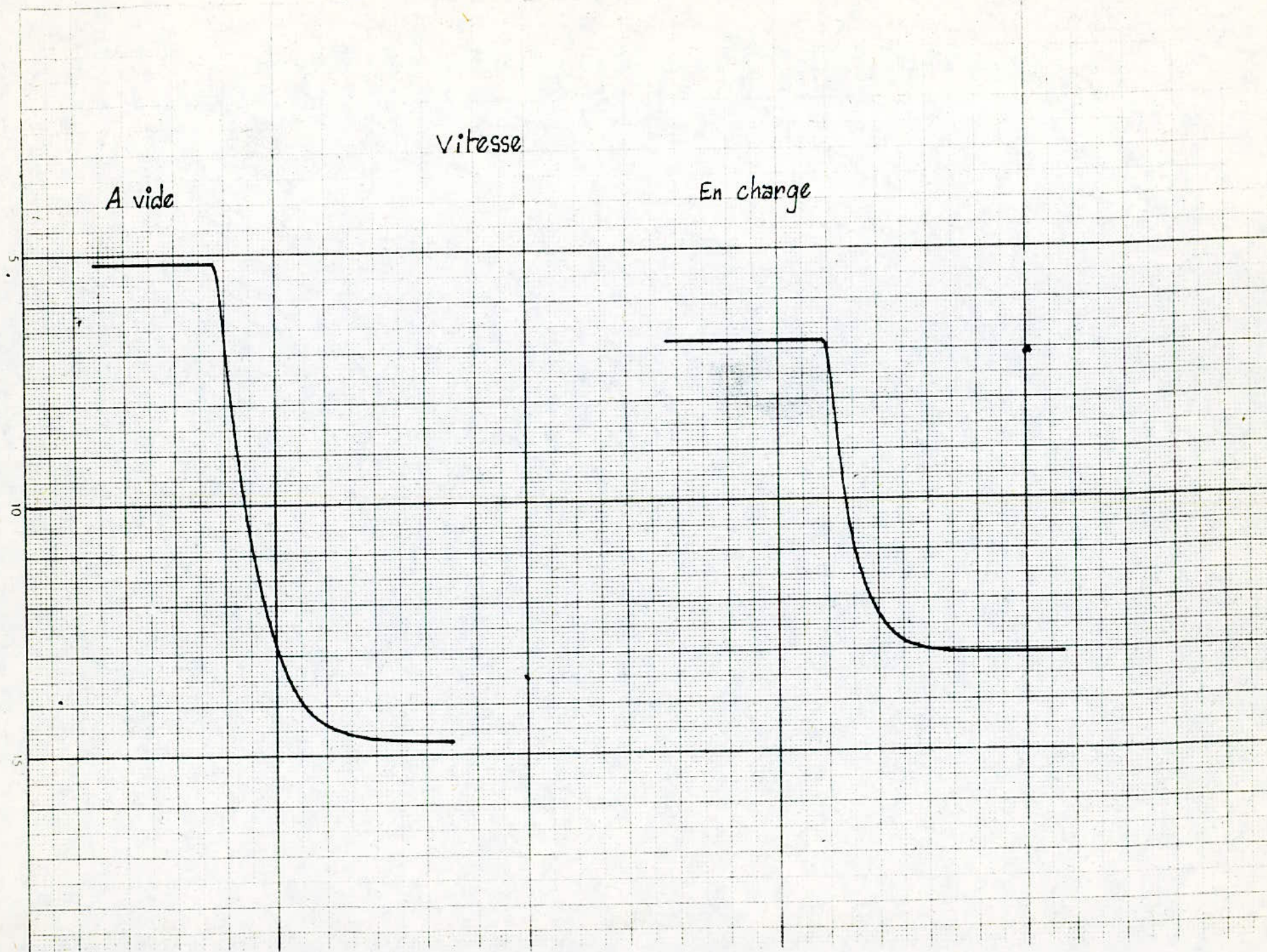


$$\theta_a = 30^\circ$$

Vitesse

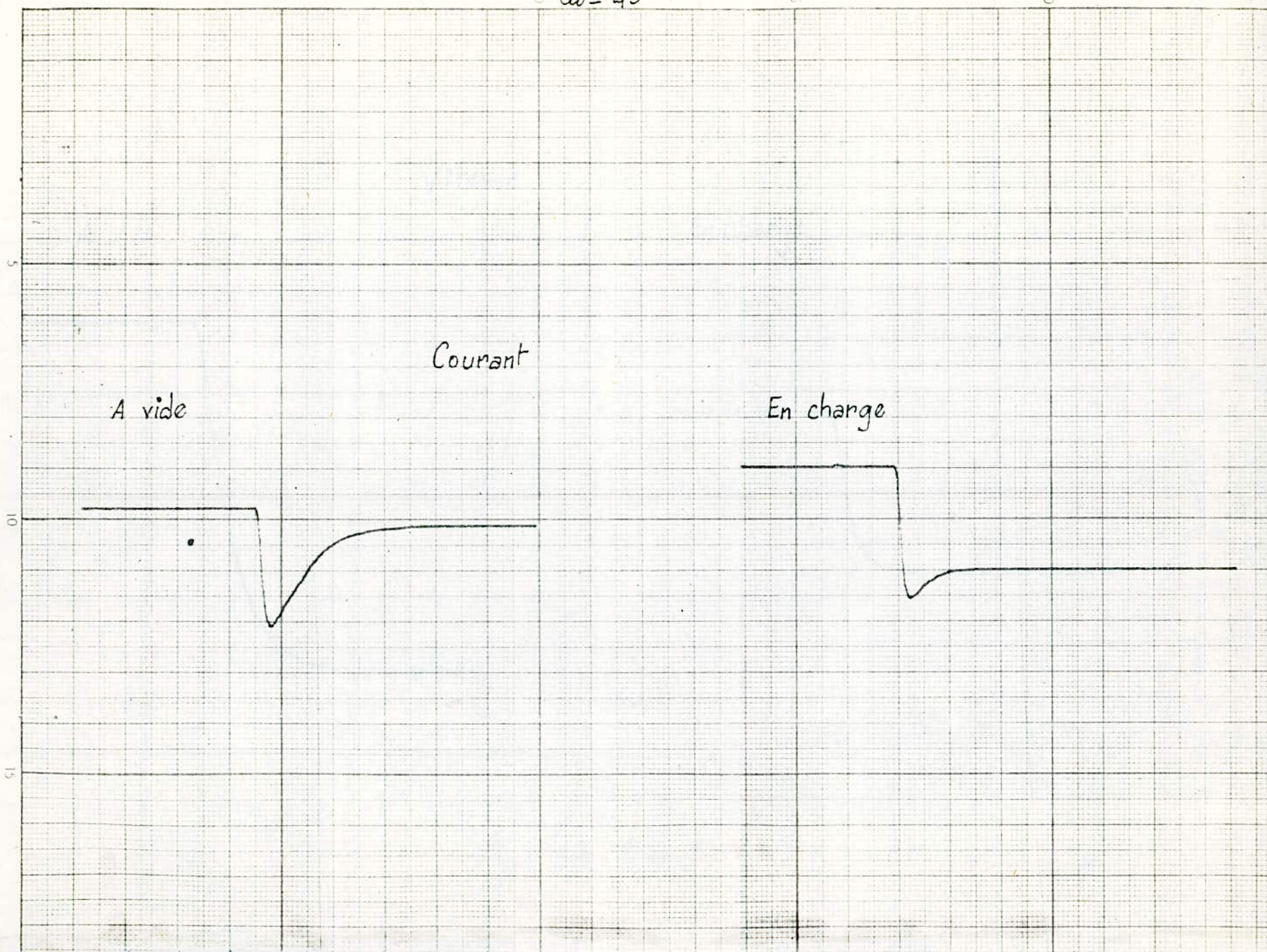
A vide

En charge



$\theta_{av} = 45^\circ$

- 41 -



Courant

A vide

En charge



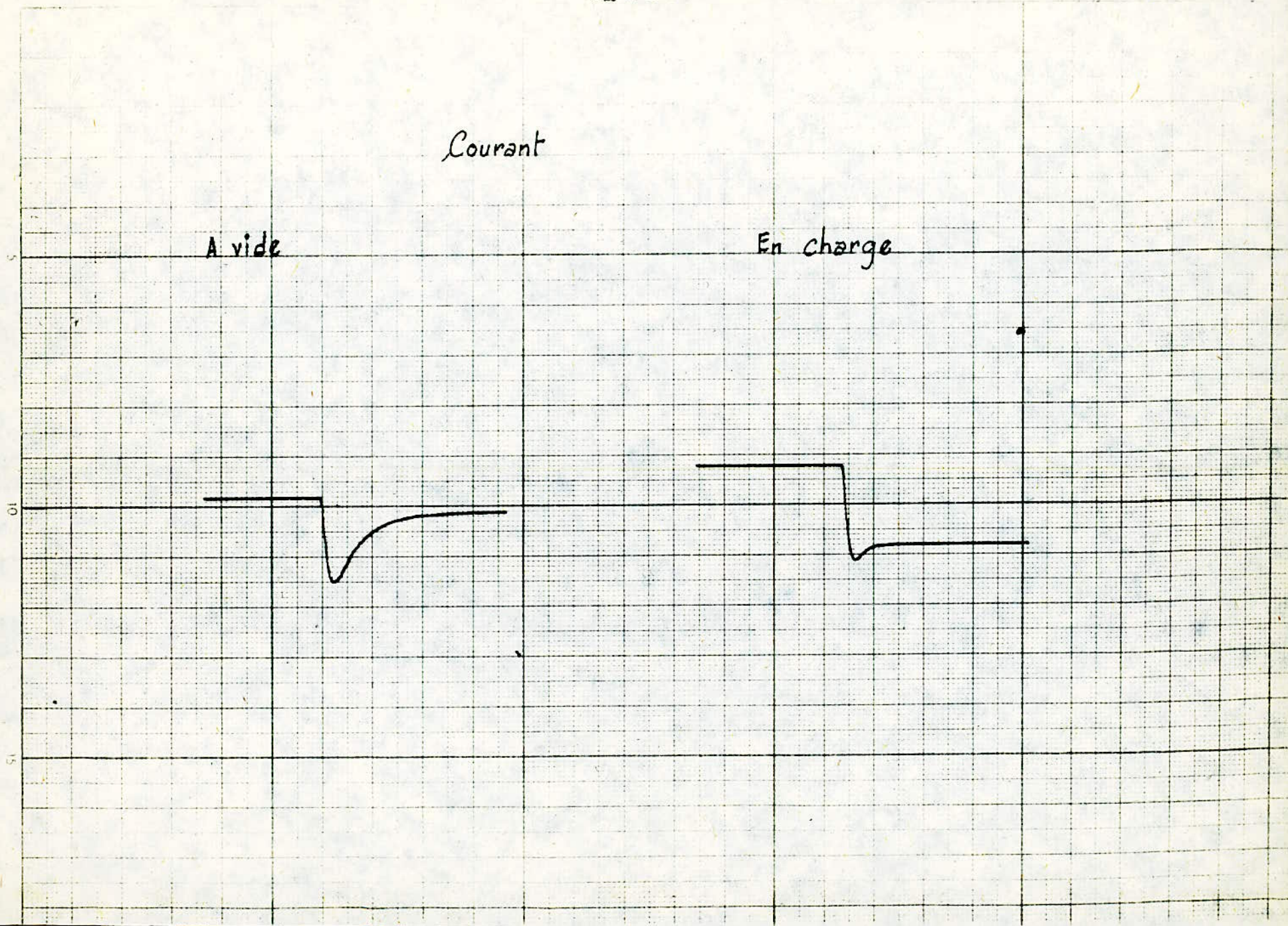
$\theta_a = 60^\circ$

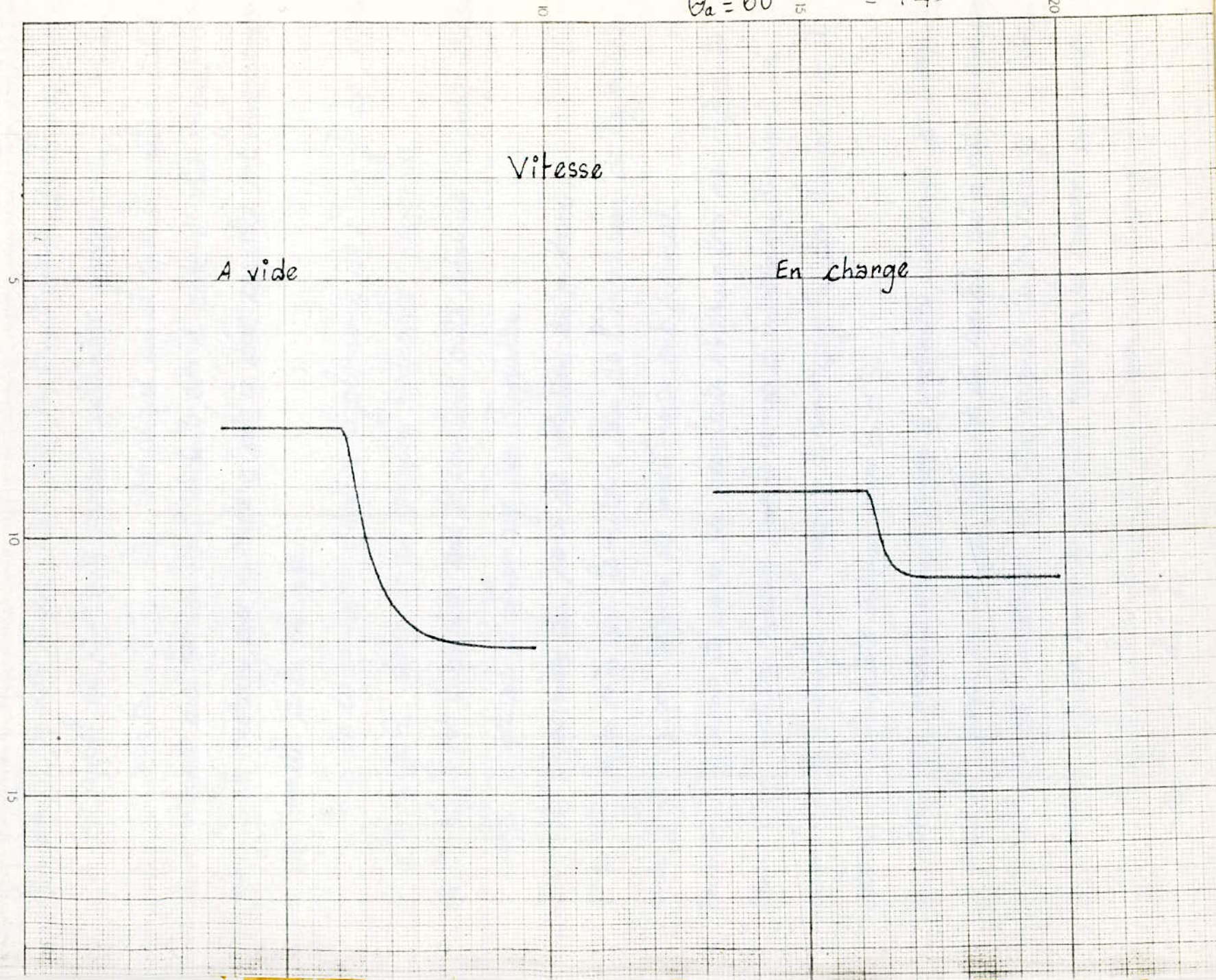
-43-

Courant

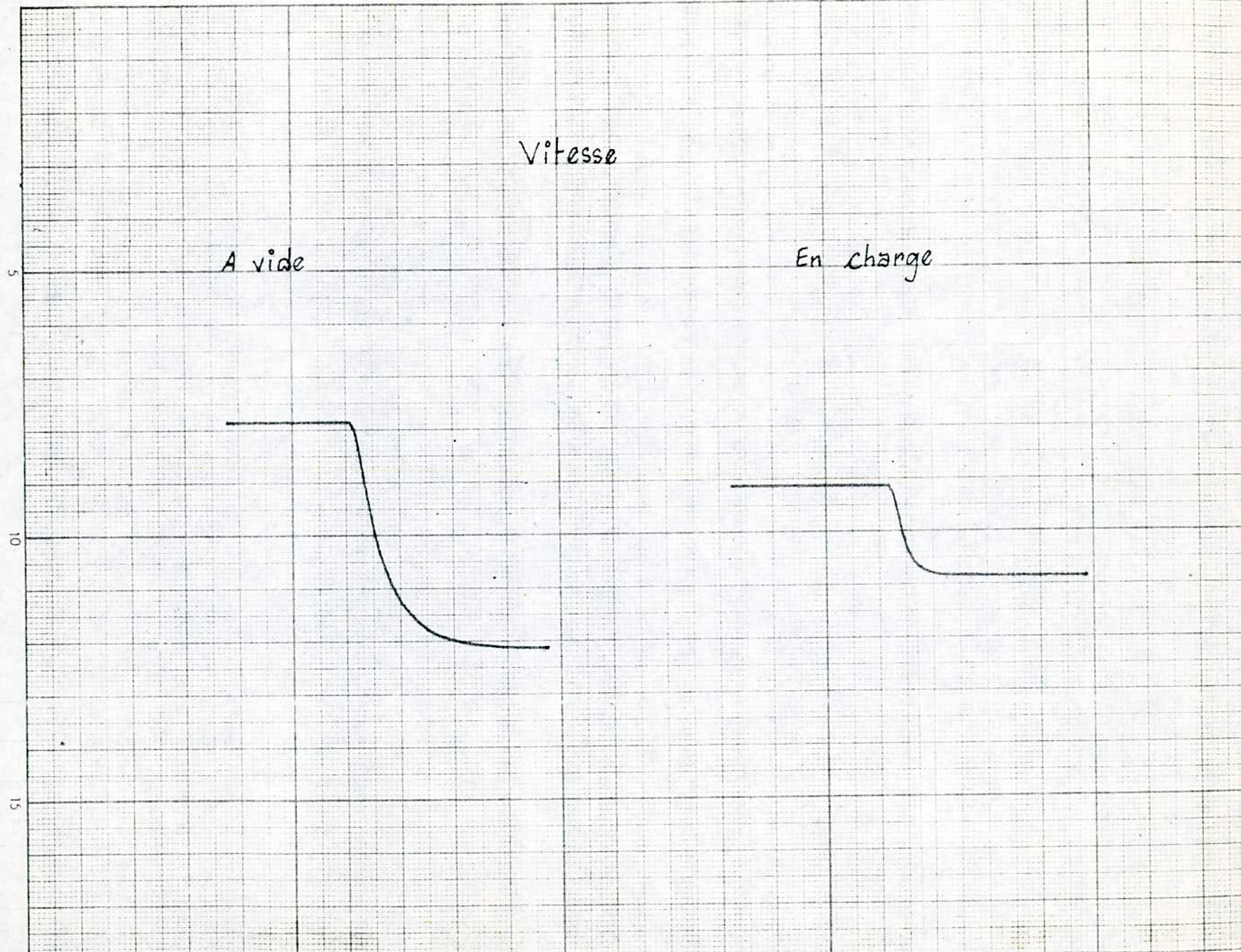
A vide

En charge





$\theta_a = 60^\circ$  - 44 -



Vitesse

A vide

En charge

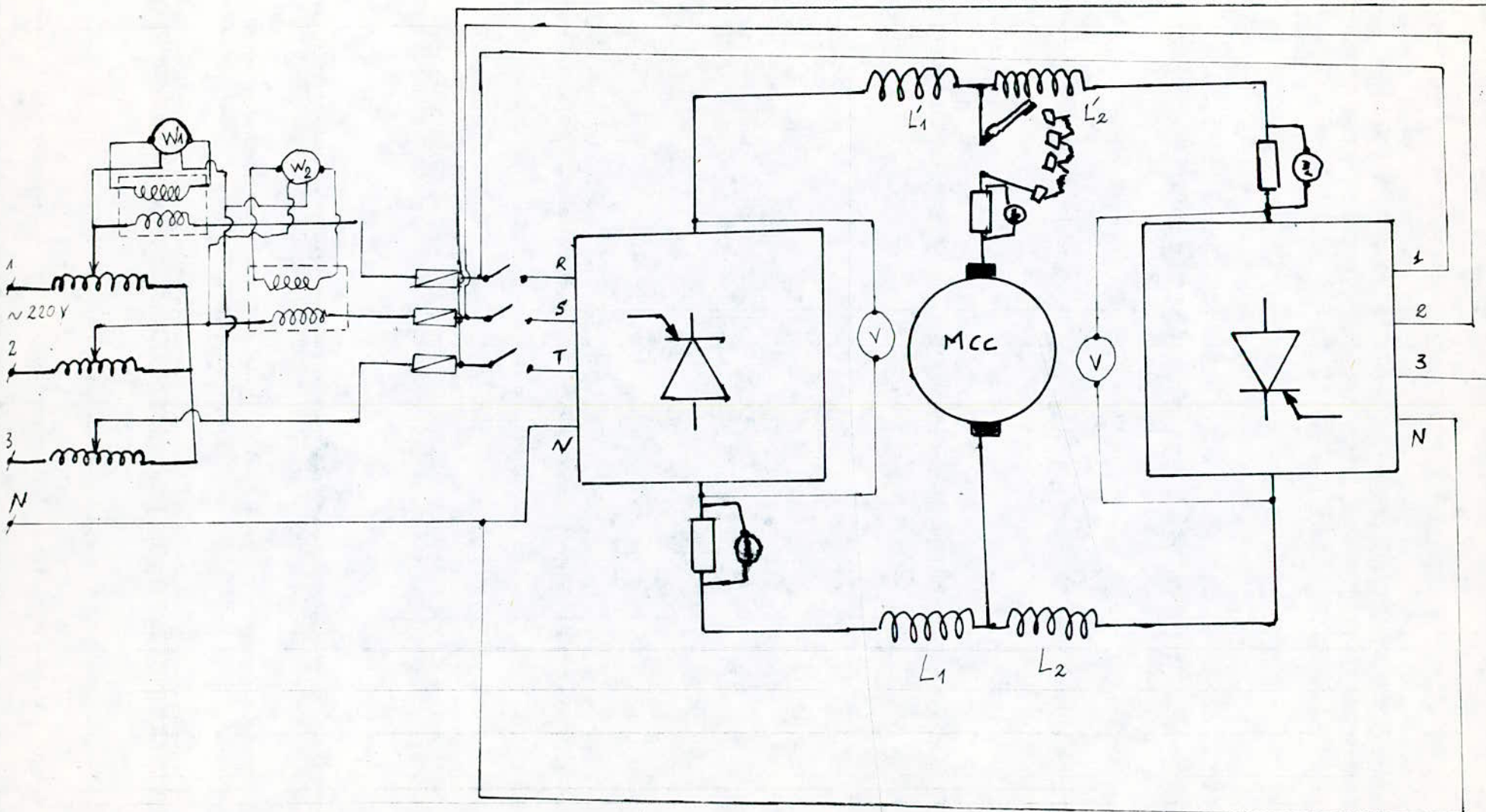
La surintensité qui se produit lors de l'inversion de la vitesse, provoque l'inversion de la f.c.e.m du moteur. Au moment de l'inversion, la f.c.e.m s'ajoute à la tension appliquée aux bornes du moteur, en donnant un courant plus ou moins important selon qu'on est à vide ou en charge car l'augmentation de la charge entraîne une diminution de la vitesse, donc de la f.c.e.m du moteur.

Les courants initiaux (avant l'inversion) aux bornes du moteur, diminuent au fur et à mesure que  $\alpha$  augmente.

Par ailleurs, on remarque que la vitesse du moteur diminue de l'essai à vide à l'essai en charge et atteint sa plus faible valeur pour  $\alpha = 60^\circ$ , car, lorsque le courant de charge  $I_a$  augmente, la chute de tension augmente également par suite de quoi la vitesse du moteur diminue.

La vitesse du moteur dépend de la tension qui lui est appliquée, donc de l'angle d'amorçage  $\alpha$ . Ainsi lorsque l'angle  $\alpha$  augmente, la tension appliquée diminue, ce qui entraîne une diminution de la vitesse.

Il découle de ce qui précède que le temps d'inversion de la vitesse, va diminuer lorsqu'on augmente l'angle  $\alpha$ , ce qui est le cas. On voit aussi que le temps d'inversion est plus grand à l'essai à vide qu'à l'essai en charge. Ce qui fait que le moteur met beaucoup plus de temps pour retrouver son régime de fonctionnement stable lorsqu'il est à vide que lorsqu'il est en charge. En ce qui concerne le temps d'annulation du courant ou de la vitesse, on constate qu'il diminue avec l'augmentation, de l'angle  $\alpha$ , ainsi que de la charge.



III-4. Essais et relevés des caractéristiques (à  $\theta_a$  constant):  $U_2(I_2)$ ,  $P(I_2)$ ,  $\cos\phi(I_2)$ ,  $Q(I_2)$ :  
- Relevés des caractéristiques  $U_2(I_2)$  à  $\theta_a$  constant:

\*  $\theta_a = 30^\circ$

$U_2 (V)$	119	112	108	106	104	101	100	99
$I_2 (A)$	4	8,3	11,6	13,8	15,3	17,4	18,8	19,6

\*  $\theta_a = 45^\circ$

$U_2 (V)$	88	84	81	79	77	75	74
$I_2 (A)$	3,6	6,8	8,8	10,3	12,2	13,8	14,4

\*  $\theta_a = 60^\circ$

$U_2 (V)$	44,5	41	39,5	38,5	38	37,5	37
$I_2 (A)$	2,5	5,2	6,4	7,0	7,6	8,0	8,5

\*  $\theta_a = 75^\circ$

$U_2 (V)$	14,4	14,2	13,8	13	12,8	12,7
$I_2 (A)$	2	2,2	3	4,2	4,5	4,8

\*  $\theta_a = 90^\circ$

$U_2 (V)$	2,9
$I_2 (A)$	0,3

Relevés des caractéristiques  $U_r(I_r)$  à  $\theta_a = \text{const.}$

\*  $\theta_a = 105^\circ$

$U_{r_2}(V)$	-15	-14,5	-14	-13,8	-13,5
$I_{r_2}(A)$	-2,2	-2,6	-2,8	-3,15	-3,3

\*  $\theta_a = 120^\circ$

$U_{r_2}(V)$	-58	-54	-52	-49,5	-49	-48,5
$I_{r_2}(A)$	-3,55	-6,4	-7,8	-8,7	-9,3	-9,8

\*  $\theta_a = 135^\circ$

$U_{r_2}(V)$	-89	-85	-80	-78	-76	-75	-74,5
$I_{r_2}(A)$	-3,8	-6,8	-10,5	-12,4	-13,6	-14,4	-14,7

\*  $\theta_a = 150^\circ$

$U_{r_2}(V)$	-122	-115	-110	-107	-106	-104	-103	-102	-101,8
$I_{r_2}(A)$	-3,85	-8,4	-11,8	-14,2	-15,8	-16,8	-17,8	-18	-19

- Relevés des caractéristiques  $P(I_p)$  à  $\alpha$  constant:

\*  $\theta_a = 30^\circ$

$P(w)$	472,5	995	1342,5	1577,5	1742,5	1948,75	2072,5	2137,5
$I_r(A)$	4	8,3	11,6	13,8	15,3	17,4	18,8	19,6

\*  $\theta_a = 45^\circ$

$P(w)$	317,5	597,5	775	897,5	1032,5	1150	1198,75
$I_2(A)$	3,6	6,8	8,8	10,3	12,2	13,8	14,4

\*  $\theta_a = 60^\circ$

$P(w)$	150	286	307,5	342,5	357,5	377,5	392,5
$I_2(A)$	2,5	5,2	6,4	7,0	7,6	8,0	8,5

\*  $\theta_a = 75^\circ$

$P(w)$	47	48,75	50,00	53,75	60,00	66,25
$I_2(A)$	2	2,2	3	4,2	4,5	4,8



- Relevés des caractéristiques  $P_M(I_p)$  à  $\theta_a$  constant:

\*  $\theta_a = 30^\circ$

$P_M(W)$	444,6	694,2	841,5	897,6	902,8	873,6	837,2	750,5
$I_r(A)$	4	8,3	11,6	13,8	15,3	17,4	18,8	19,6

\*  $\theta_a = 45^\circ$

$P_M(W)$	210	365,4	432	460,8	444,6	416	387,6
$I_r(A)$	3,6	6,8	8,8	10,3	12,2	13,8	14,4

\*  $\theta_a = 60^\circ$

$P_M(W)$	78,1	119,25	123,97	121,6	120,75	115,2	108
$I_r(A)$	2,5	5,2	6,4	7,0	7,6	8,0	8,5

\*  $\theta_a = 75^\circ$

$P_M(W)$	10,24	9,9	9,8	9,0	8,24	8,19
$I_r(A)$	2	2,2	3	4,2	4,5	4,8

- Relevés des caractéristiques  $Q(I_p)$  à  $\theta_a$  constant:

\*  $\theta_a = 30^\circ$

Q(var)	436,83	873,65	1180,73	1379,68	1526,73	1710,54	1820,83	1881,38
$I_r(A)$	4	8,3	11,6	13,8	15,3	17,4	18,8	19,6

\*  $\theta_a = 45^\circ$

Q(var)	618,48	999,08	1254,25	1431,58	1630,53	1816,5	1883,54
$I_2(A)$	3,6	6,8	8,8	10,3	12,2	13,8	14,4

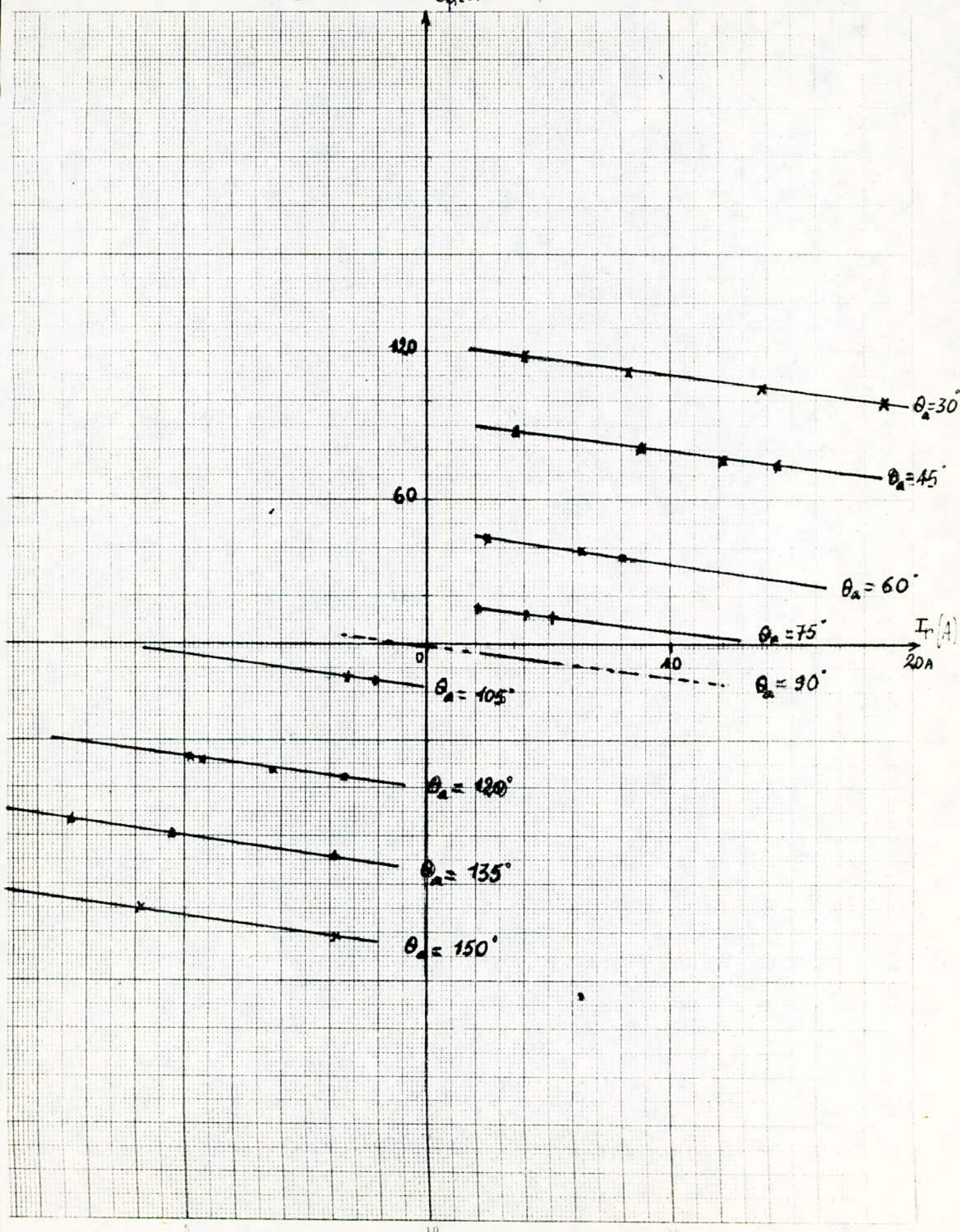
\*  $\theta_a = 60^\circ$

Q(var)	605,5	889,22	1068,28	1180,73	1241,28	1293,18	1353,73
$I_2(A)$	2,5	5,2	6,4	7,0	7,6	8,0	8,5

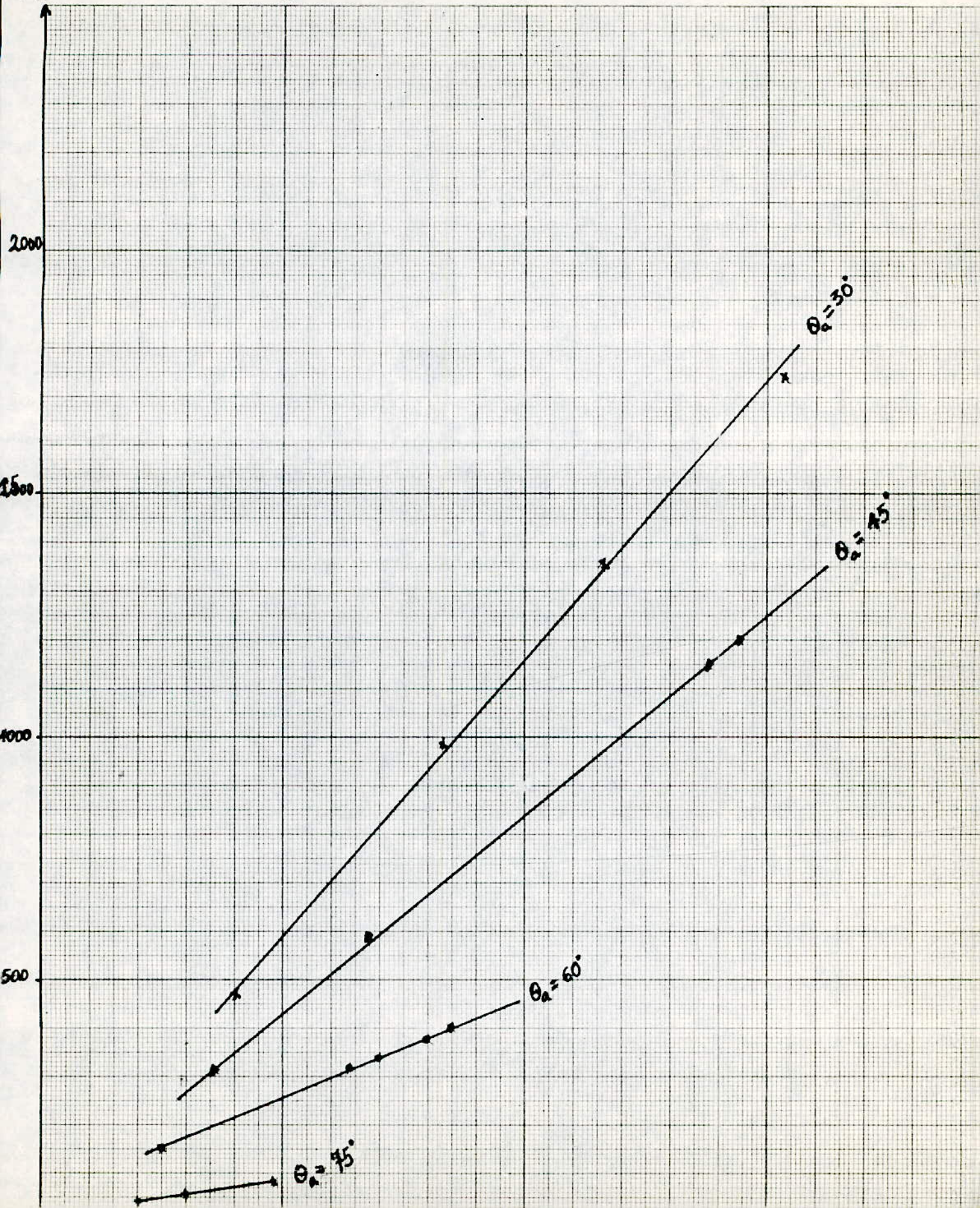
\*  $\theta_a = 75^\circ$

Q(var)	392,71	413,04	422,12	447,63	458,45	469,26
$I_2(A)$	2	2,2	3	4,2	4,5	4,8

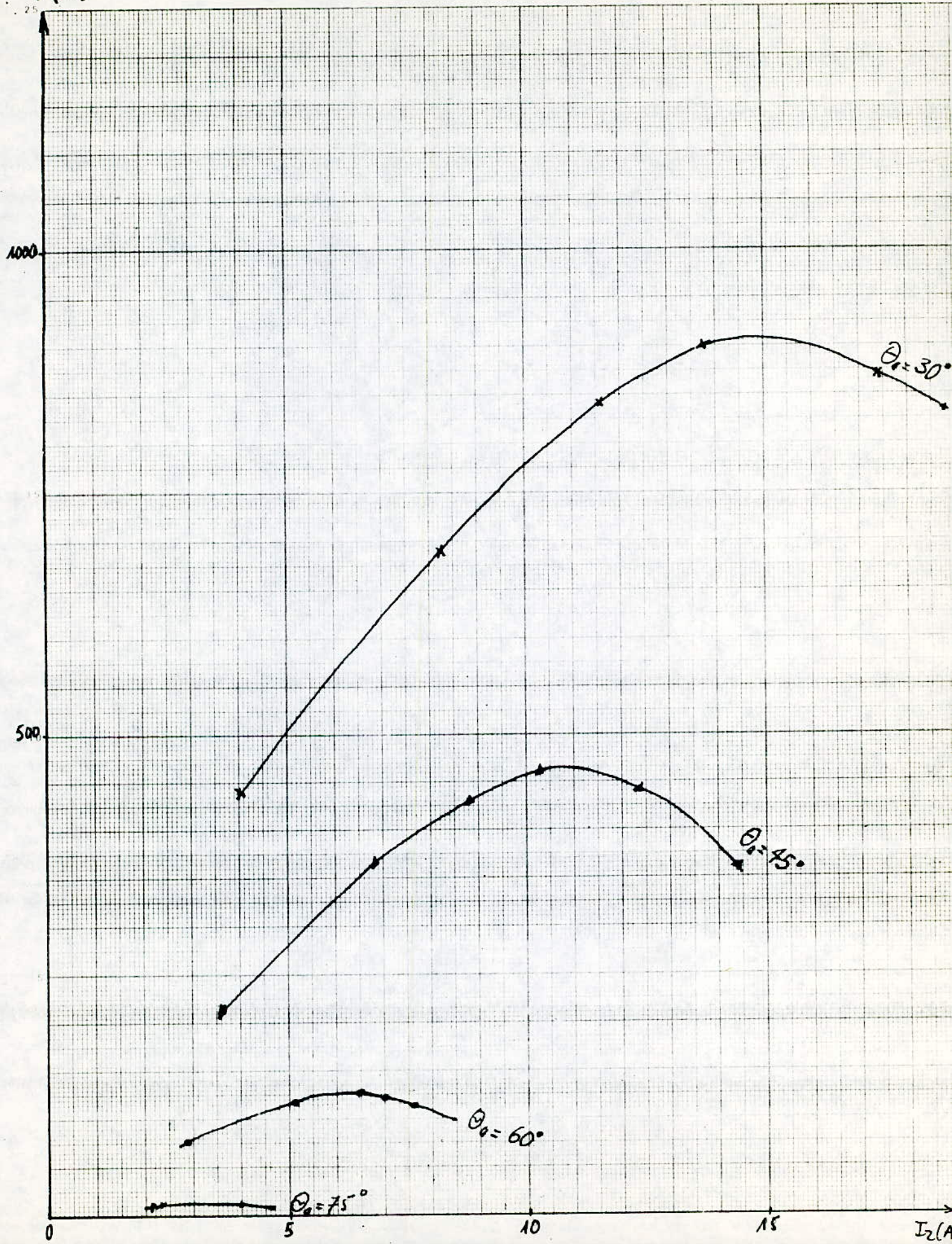
$u_p(v)$

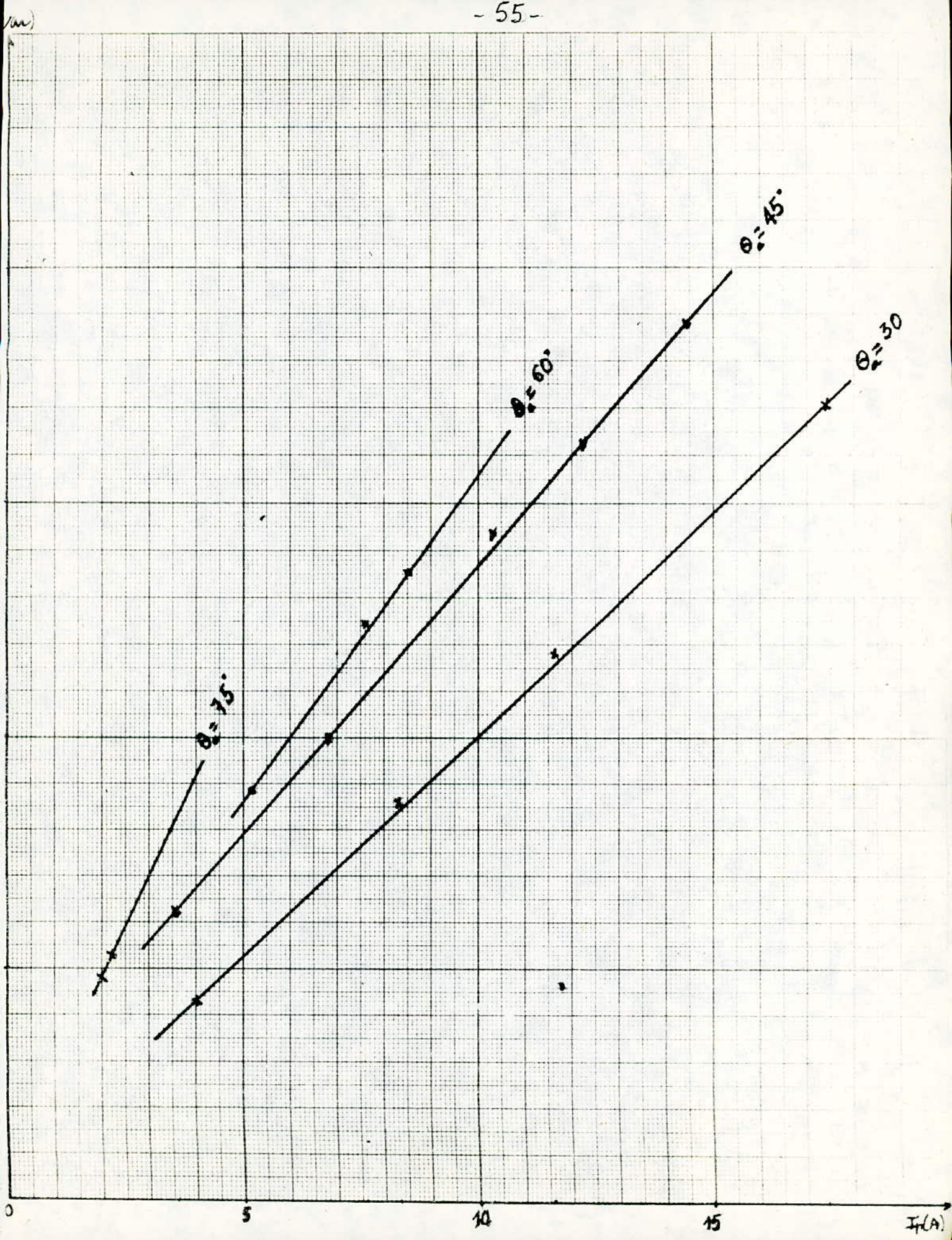


$P(\omega)$



P(w)





- Interprétation des caractéristiques  $U_p(I_p)$  à  $\alpha$  constant:

Les caractéristiques  $U_p(I_p)$  sont des droites parallèles de faible pente, ceci est due au fait que pour un courant  $I_p$  donné, la tension redressée moyenne  $U_p$  subit une chute de tension constante, indépendante de l'angle de retard d'allumage  $\alpha$ , et qui est donnée par:

$$\Delta U = \Delta U_k + \Delta U_r + \Delta U_b$$

Par conséquent, les chutes de tension présentes dans la chaîne de conversion modifient la tension redressée moyenne en charge dont l'équation devient:

$$U_p = U_p \cos \alpha - (\Delta U_k + \Delta U_r + \Delta U_b)$$

De ce fait, pour un angle  $\alpha$  donné, la tension redressée moyenne diminue lorsqu'on augmente la charge.

De même, pour un courant  $I_p$  donné, la tension redressée moyenne diminue avec l'augmentation de l'angle de retard d'allumage  $\alpha$ .

- Interprétation des courbes  $P(I_r)$  à  $\alpha$  constant :

Les caractéristiques donnant le transit de l'énergie active  $P$  entre le réseau alternatif et le montage étudié, en fonction du courant redressé  $I_r$  à angle de retard d'allumage  $\alpha$  constant, sont des droites. Par conséquent la puissance active  $P$  fournie lorsque la machine à courant continu fonctionne en moteur, est proportionnelle au courant redressé  $I_r$ . On constate aussi que pour un courant  $I_r$  donné, la puissance active prélevée sur le réseau, diminue lorsque l'angle d'amorçage des thyristors augmente, cette puissance est maximale pour  $\alpha = 30^\circ$  (dans notre cas). Ceci concorde bien avec la relation donnant la puissance active  $P = U_f I_r \cos \alpha$ . Par ailleurs, la puissance active absorbée par le moteur à courant continu, à  $\alpha$  constant, augmente avec le courant redressé  $I_r$  et atteint un maximum pour une certaine valeur du courant puis au delà de cette valeur la puissance absorbée par le moteur diminue.

D'autre part, la valeur du courant pour lequel la puissance absorbée par le moteur est maximum, diminue lorsque l'angle  $\alpha$  augmente. La différence de puissance active  $P$  fournie par le réseau alternatif et celle absorbée par le moteur est due essentiellement aux résistances des selfs de limitation du courant de circulation placées dans le circuit du courant d'induit du moteur à courant continu.



Cependant si on essaye de diminuer la valeur des selfs, ceci entraînerait par conséquent la diminution de l'écart de puissance active fournie par le réseau alternatif et celle recueillie au niveau du moteur, mais dans ce cas la conduction peut devenir discontinue aux faibles débits.

- Interprétation des courbes  $Q(I_p)$  à  $\theta_a$  constant:

Les caractéristiques  $Q(I_p)$  à  $\theta_a$  constant sont aussi des droites, ceci signifie que la puissance réactive fournie par le réseau alternatif au convertisseur est proportionnelle au courant redressé  $I_p$ .

Pour un courant  $I_p$  donné, la puissance réactive prélevée sur le réseau augmente rapidement avec l'angle de retard d'allumage  $\theta_a$  pour atteindre le maximum pour  $\theta_a = 75^\circ$ . Cette puissance réactive est minimale pour  $\theta_a = 30^\circ$  et  $\theta_a = 150^\circ$  du fait que:  $Q = U_p I_p \sin \theta_a$

L'amorçage retardé des thyristors crée un décalage du courant sur la tension, c'est à dire que la phase du courant absorbé sur le réseau vis à vis de la tension de ligne varie.

En fonctionnement redresseur ( $30^\circ \leq \theta_a < 90^\circ$ ) lorsque l'angle d'amorçage  $\theta_a$  est grand, le facteur de puissance sera mauvais.

III5- Comparaison des résultats obtenues, avec un seul pont de Graetz fonctionnant en redresseur et ceux du convertisseur réversible :  
 Les caractéristiques  $U_p(I_p)$ ,  $P(I_p)$ ,  $Q(I_p)$  à  $\alpha$  constant relevées lors des essais avec un seul pont de Graetz fonctionnant en redresseur et celles relevées lors des essais avec deux ponts constituant le convertisseur réversible diffèrent du fait de l'existence dans le dernier montage de selfs assez importantes ainsi que de deux courants de circulation qu'on ne retrouve pas dans le premier montage.  
 Les résistances des selfs de limitation du courant de circulation peuvent introduire des chutes de tension notables. De plus le courant de circulation qui se superpose au courant redressé  $I_p$  dans le pont normalement conducteur produit des pertes supplémentaires.  
 Ce courant de circulation doit assurer la continuité de la conduction des thyristors même si  $I_p$  est nul ou faible, donc lorsque  $I_p$  change de signe. Par contre pour l'essai avec un seul pont les caractéristiques  $U_p(I_p)$  présenteront les effets de la conduction discontinue aux faibles débits.

### Conclusion:

Pour obtenir un comportement dynamique rapide lors du changement du sens de rotation du moteur à courant continu avec inversion de la tension et du sens de circulation de l'énergie active (transfert d'énergie active entre le réseau et la machine à courant continu), l'emploi d'un convertisseur de courant bidirectionnel ou convertisseur réversible alternatif-continu s'impose.

Dans notre cas, on a utilisé, un montage dit à circulation de courant, de deux ponts de Graëtz montés en tête-bêche. L'avantage de ce montage réside outre la simplicité relative des circuits de contrôle, dans une minimisation des problèmes posés par la conduction discontinue. Ceci est vrai spécialement si les angles d'allumage des thyristors des deux ponts sont déphasés suivant la méthode exposée ultérieurement, c'est à dire  $\alpha_1 = 180^\circ - \alpha_2$ .

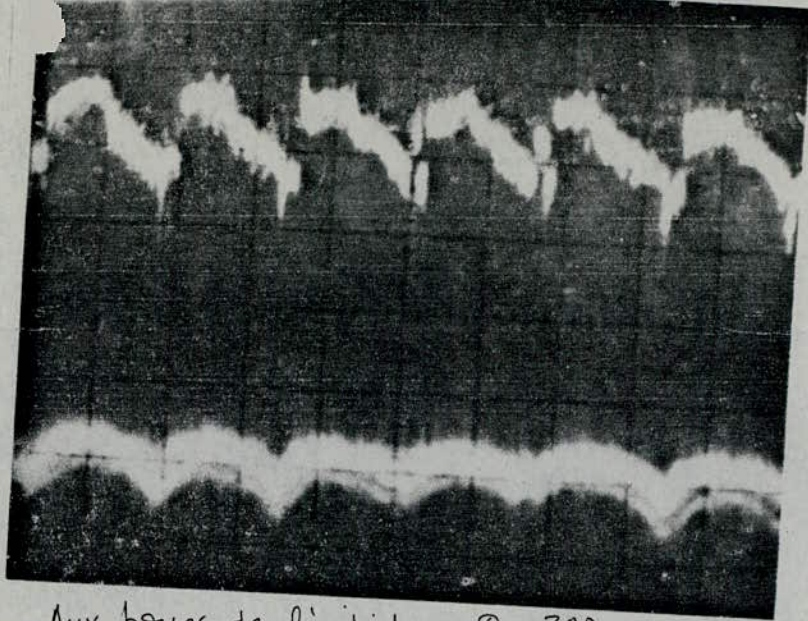
Par contre, en plus de l'encombrement important des selfs de limitation, l'existence d'un courant de circulation se traduit par une surcharge non négligeable des thyristors et du transformateur d'alimentation.

De même le courant réactif résultant de ce montage diminue de façon considérable le facteur de puissance de l'installation.

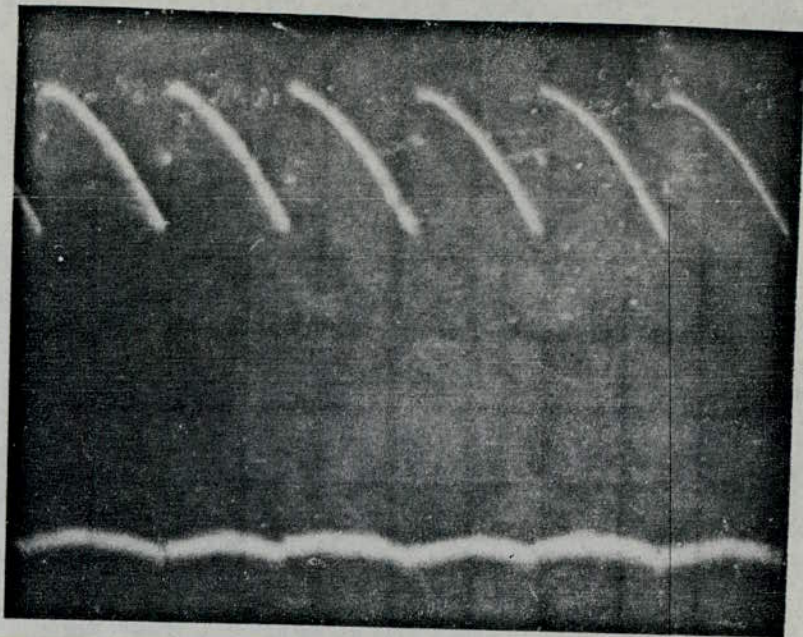
# Bibliographie

1. H. Bühler : Electronique de puissance ( Edition, Dunod, 1981. )
2. G. Séguier : L'électronique de puissance ( Edition, Dunod, Paris, 1979 )
3. F. Milsant : Cours d'électronique - IV. ( Edition - Eyrolles - Paris - 1981. )
4. R. Chauprade : Commande électronique des moteurs à courant continu ( Edition - Eyrolles - Paris - 1981. )
5. H. Bühler : Electronique de réglage et de commande ( Edition - Dunod - 1979 ).
6. M. Mounic : Electronique - Redressement - 2<sup>eme</sup> partie. ( Edition - Foucher - 1969. )

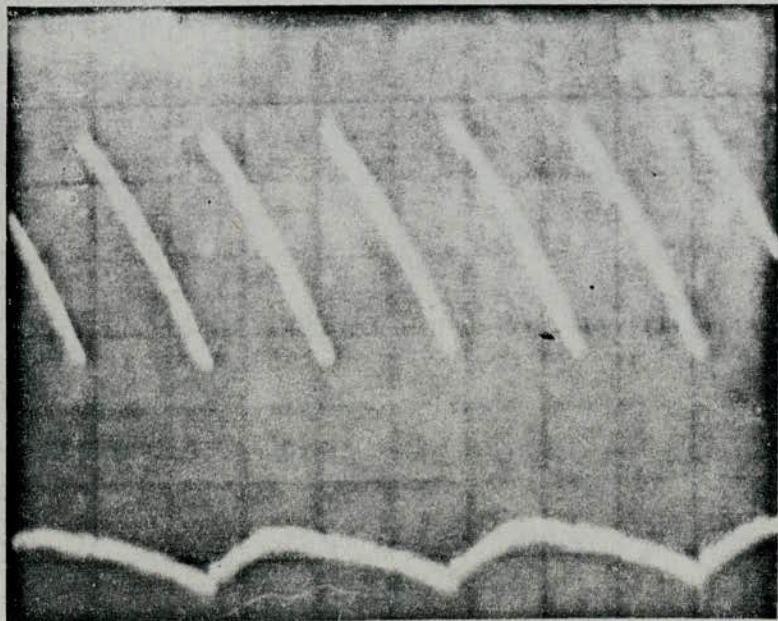
ANNEXE



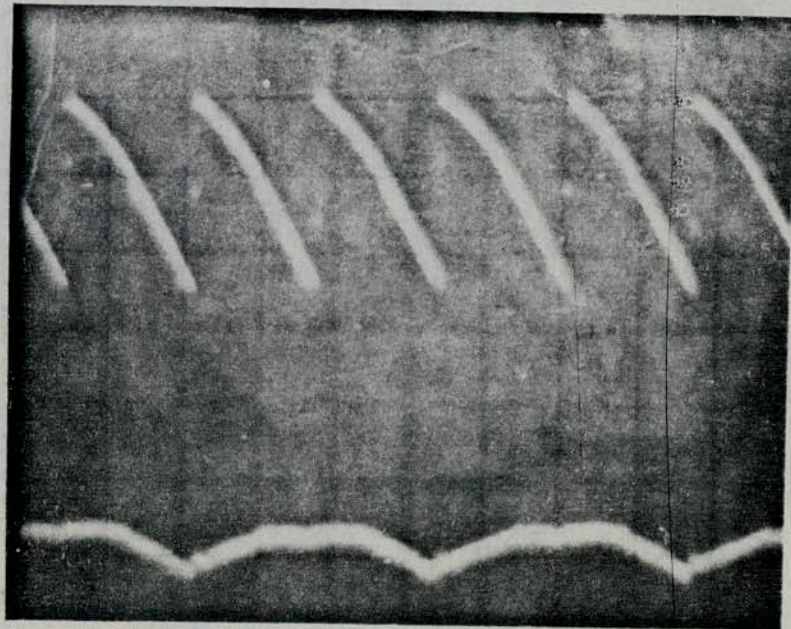
Aux bornes de l'induct  $\theta_a = 30^\circ$



$\theta_a = 30^\circ$

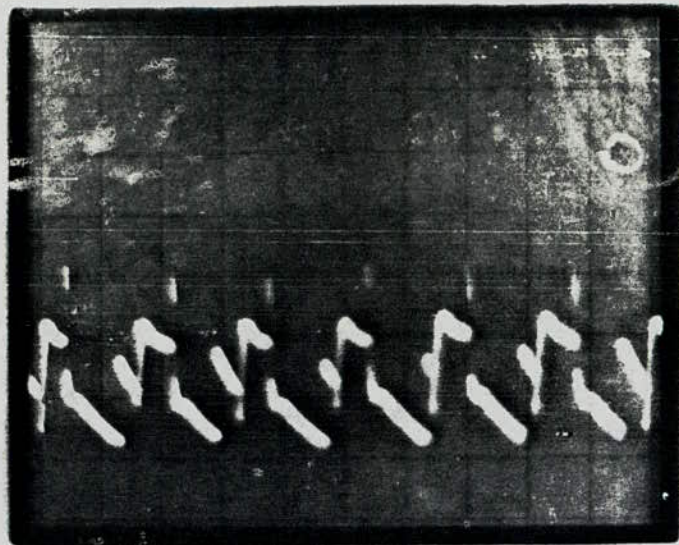


$\theta_a = 60^\circ$

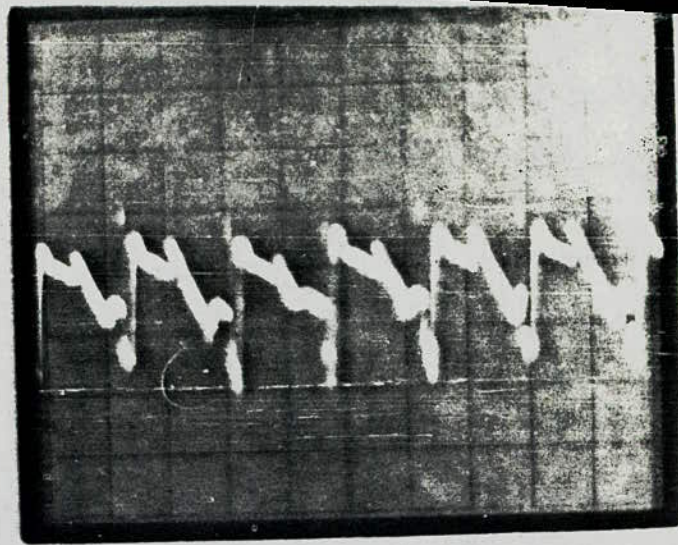


$\theta_a = 45^\circ$

Tensions ET Courants Redressés

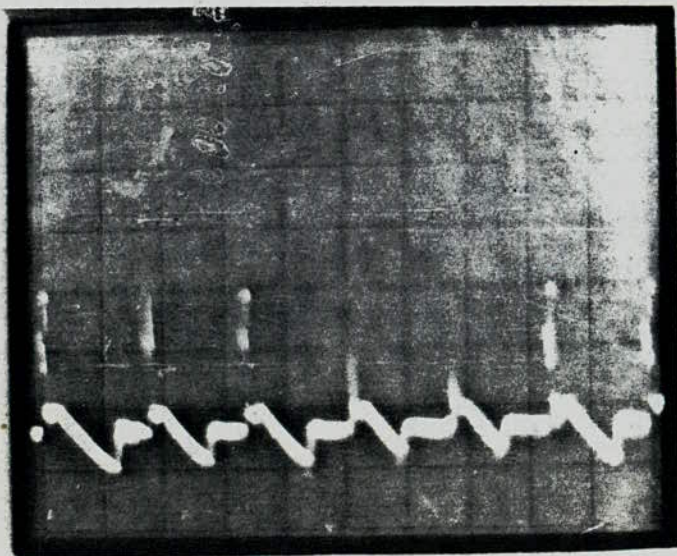


$\theta_a = 135^\circ$

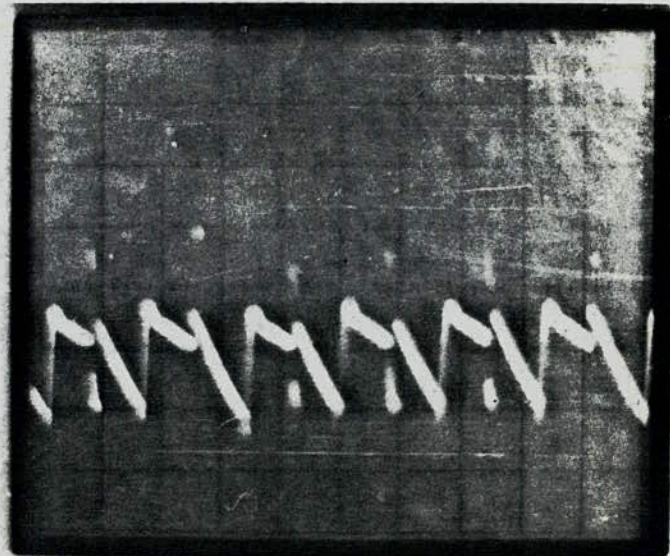


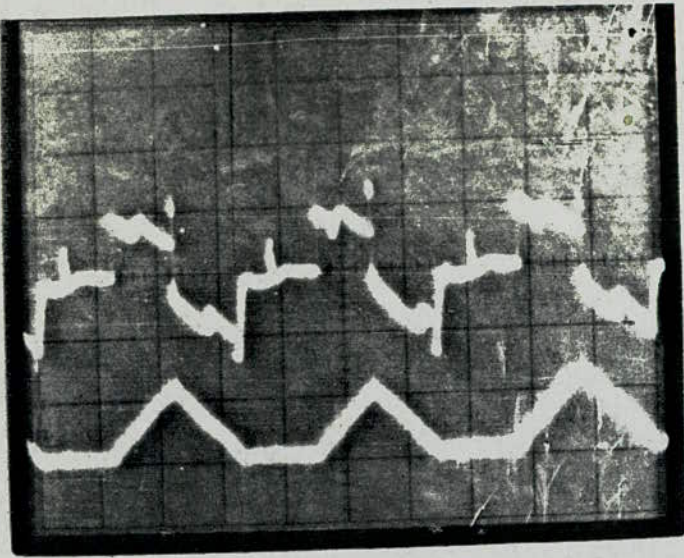
$\theta_a = 105^\circ$

$\theta_a = 150^\circ$

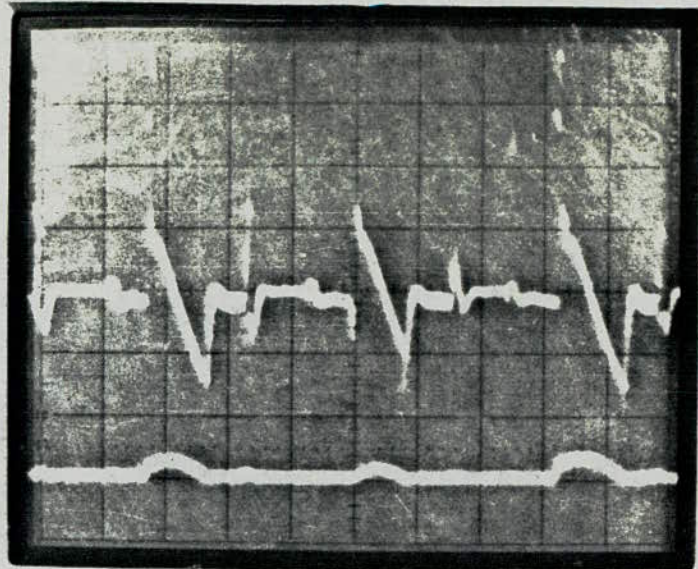


$\theta_a = 120^\circ$



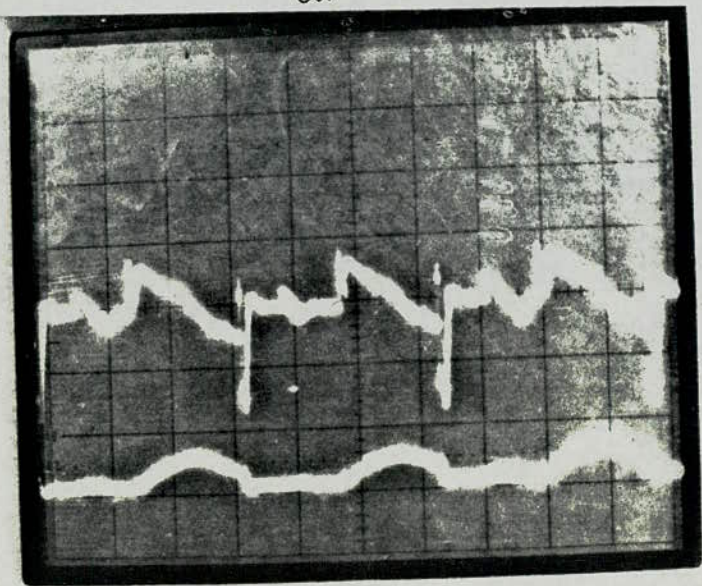


$\theta_a = 45^\circ$

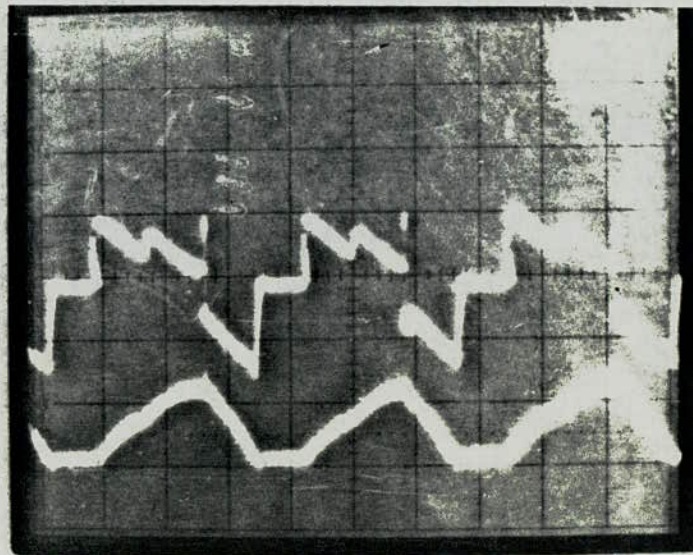


$\theta_a = 30^\circ$

$\theta_a = 75^\circ$



$\theta_a = 60^\circ$





Matériau: ... GENIE ELECTRIQUE  
Auteurs: ... A. MAAZI ET B. TAHMI  
Ingénieur: ... KHE. MIRI. Menour ET BOUARDOURA. Abdelhak.

مادة ...  
موجه  
تلميذ مهندس

- الموضوع: التحكم الإنعكاسي لآلة تيار كهربائي مستمر بمرور تيار متواصل.
- الملخص: يتناول عملنا التطبيقي والنظري في المقارنة بين التحكم في الحركة الإنعكاسية لآلة تيار كهربائي مستمر بمرور تيار متواصل، والتحكم غير الإنعكاسي لحركة نفس الحركة الكهربائية.

Objet: Commande Reversible D'une Machine à Courant continu "à la Courant de circulation"

Résumé: Notre travail consiste en une étude Comparative de la commande non réversible D'une machine à courant continu et la commande réversible "à circulation de courant" de cette machine.

Subject: The Control of DC machine...inversal...with...Circulation...Current.....

Abstract: The purpose of this study is to compare concepts of the control of DC machine, inversal and reversal with circulation current.

