

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

7/86
rex

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

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

S U J E T

Boucles De Courant Et De Vitesse D'un Moteur à Courant Continu

Proposé par :

Mr A. MAAZI

Etudié par :

M^{lle} KRECHE NADIA

Dirigé par :

Mr A. MAAZI

PROMOTION : Janvier 1986

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
NATIONALE POLYTECHNIQUE

وزارة التعليم العالي
لمدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Titre: D'ELECTROTECHNIQUE.....
Auteur: M. A. MAAZI.....
Ingénieur: KRECHE NADIA.....

مقدمة الالكتروتقني
ترجمه السيد / عبد الحميد ممني
السيد محمد بن كرام ساديس

- الموضوع : دارة تنظيم السرعة وسيار والسرعة لمحرك ذو التيار متواصل
- الملخص : الهدف من هذا العمل هو الحصول على سرعة منظمة بواسطة
دارة تنظيم السرعة ودارة التيار، وهذه الاخيرة هدفها حماية
المحرك من الارتفاع الكبير للتيار ،

Subject: " BOUCLES DE COURANT ET DE VITESSE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU "

Abstract: Le but de ce travail est la régulation de vitesse d'un moteur à courant continu par une boucle de vitesse et une boucle de courant. Cette dernière a pour fonction de protéger le moteur contre les elevations excessives du courant.

Subject: " CURRENT AND SPEED LOOPS OF D.C. MOTOR "

Abstract: The main of this work is to regulate the D.C motor speed using a speed, and current loops which protect the motor against transient high currents.

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

=====

=====

=====

=====



Je tiens à adresser mes plus vifs remerciements à monsieur Maazi.A , mon promoteur , ainsi qu'à monsieur Tahmi.R pour leurs dévouements , leur aide et les conseils précieux qu'ils m'ont apporté tout le long de ce travail .

Je tiens également à exprimer mes plus sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation .

S O M M A I R E

	<u>PAGES</u>
SOMMAIRE	1
INTRODUCTION	3
 <u>I. PREMIERE PARTIE</u>	
<u>QUELQUES ELEMENTS THEORIQUES SUR LE MOTEUR A COURANT CONTINU , LES REGULATEURS ET LES DIFFERENTS TYPES DE REGULATION</u>	4
1. <u>Le moteur à courant continu</u>	5
1.1. Les équations du moteur	6
1.2. Le réglage de la vitesse d'un moteur à courant continu	7
1.2.1. Les équations du moteur en régime statique	7
1.2.2. Le réglage par le flux	8
1.2.3. Le réglage par la tension d'induit	8
1.3. Le démarrage du moteur à courant continu ..	9
2. <u>Les régulateurs</u> ;	9
2.1. Le régulateur P	9
2.2. Le régulateur PI	10
2.3. Le régulateur PID	10
3. <u>Les différents types de régulation</u>	10
3.1. La régulation en boucles convergentes	10
3.2. La régulation en cascade	11
3.3. La régulation en boucles parallèles	12
4. <u>Conclusion</u>	13
 <u>II. DEUXIEME PARTIE</u>	
<u>LE PONT DE GRAËTZ MIXTE MONOPHASE ET LE CIRCUIT DE REGLAGE</u>	14
1. <u>Le pont de Graëtz mixte et sa commande</u>	15
1.1. Le pont mixte monophasé	15
1.2. Le comportement dynamique du pont mixte ..	15
1.3. Le générateur d'impulsions	16

2. <u>Les régulateurs</u>	18
2.1. Le régulateur de vitesse	18
2.2. Le régulateur de courant	20
2.3. Le commutateur électronique	21
2.4. L'alimentation stabilisée	22
III. <u>TROISIEME PARTIE :</u>	
<u>LES RESULTATS DES ESSAIS</u>	25
1. <u>La régulation en parallèle</u>	26
1.1. Principe et schéma général	26
1.2. La boucle de vitesse	26
1.3. La boucle de courant.....	30
1.4. Intérpration des résultats	33
2. <u>Etude de la stabilité</u>	34
2.1. La notion de transmittance	34
2.2. La stabilité du système asservi	35
2.3. La détermination des paramètres du circuit de réglage	37
2.4. Le schéma fonctionnel du moteur à courant continu	39
2.5. La stabilité par la représentation de Bode	41
CONCLUSION GENERALE ; ;	44
BIBLIOGRAPHIE	I

I N T R O D U C T I O N



Les systèmes à vitesse variables revêtent une importance capitale dans l'électronique industrielle .

En effet , ces systèmes sont actuellement les produits non seulement de l'électronique de puissance mais aussi de l'électronique de réglage et de commande .

Ces dernières ont permis de remplacer les : convertisseurs dynamiques qui sont coûteux , encombrants bruyants et qui consomment beaucoup d'énergie (ex Ward-Léonar) par des convertisseurs statiques dont les principaux avantages sont : l'économie d'énergie ; la réalisation de rendements performants ; la facilité d'automatisation ; etc...

Notre travail s'inscrit dans ce cadre global de recherche technologique et a pour objectif particulier l'étude de la boucle de courant et de vitesse d'un moteur à courant continu .

Cette étude se présente en trois parties ; la première partie est consacrée à l'étude de quelques éléments bibliographiques des moteurs à courant continu (qui sont actuellement les plus utilisés en raison de leur bonne adaptation à la vitesse variable) , des régulateurs et des différents types de régulation ; la deuxième partie est destinée à la présentation du pont de Graëtz mixte avec le circuit de réglage ; et , la troisième partie traite de l'expérimentation de la régulation de courant , de vitesse et de la stabilité du système que nous avons réalisé et des résultats obtenus .

I.- PREMIERE PARTIE :

=====

QUELQUES ELEMENTS THEORIQUES SUR LE MOTEUR

=====

A COURANT CONTINU , LES REGULATEURS ET LES

=====

DIFFERENTS TYPES DE REGULATION .

=====

1. LE MOTEUR A COURANT CONTINU :

Les machines à courant continu sont des machines réversibles ; c'est à dire qu'elles peuvent fonctionner indifféremment soit comme génératrice soit comme moteur . Le fonctionnement en moteur est le plus important des deux car actuellement on produit du courant continu par redressement .

Le moteur est destiné à fournir de l'énergie mécanique et à recevoir de l'énergie électrique .

Le moteur à courant continu est plus coûteux que le moteur à courant alternatif usuel ; son entretien est plus exigeant mais le réglage de sa vitesse présente plusieurs avantages qui les rendent irremplaçables . C'est pourquoi le moteur à courant continu est le moteur le plus utilisé dans la commande électronique .

La marche du moteur dépend de quatre paramètres :

- deux paramètres électriques fondamentaux qui sont la tension d'alimentation et le courant ;
- deux paramètres mécaniques résultant de la conversion électromécanique qui sont le couple et la vitesse .

Ces quatre grandeurs sont limitées :

- la tension d'alimentation doit être limitée en raison des contraintes d'isolation ;
- le courant d'induit ne peut dépasser sa valeur nominale que pendant des instants très bréfs afin d'éviter des échauffements destructifs des enroulements du moteur ;
- le couple ne doit pas aussi dépasser la valeur limite imposée par le moteur ;
- et , la vitesse est limitée à une valeur maximum qui dépend du moteur et de la charge .

1.1 . Les équations du moteur :

Soient : V : la tension d'alimentation de l'induit du moteur .

E : la force contre électromotrice .

I : le courant de l'induit .

R : la résistance de l'induit .

L : la self de l'induit .

Γ : le couple moteur .

Γ_r : le couple résistant .

J : l'inertie du système .

ω : la vitesse du moteur .

M : la mutuelle entre l'inducteur et l'induit .

I_e : le courant de l'inducteur .

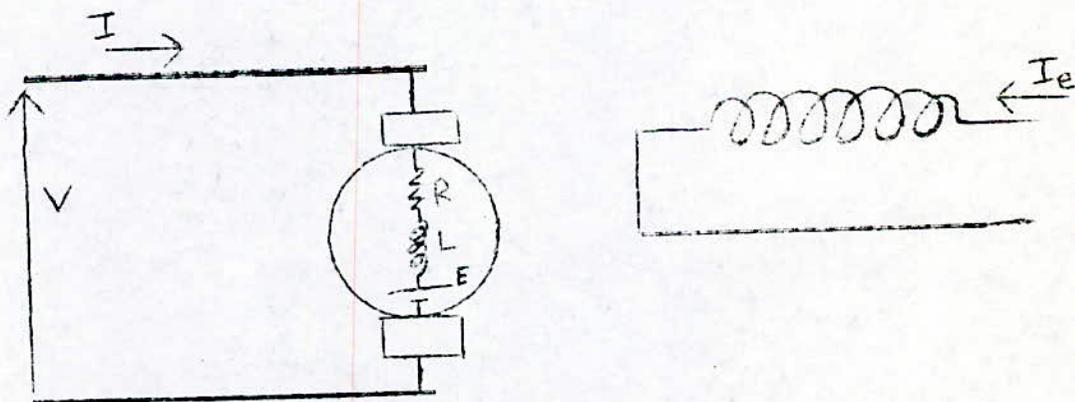
Les équations du moteur sont :

$V - E = RI + L \frac{dI}{dt}$ Equation électrique de l'induit .

$\Gamma - \Gamma_r = J \frac{d\omega}{dt}$ Equation mécanique .

$\Gamma = MI_e I$
 $E = MI_e \omega$ } Equations de conversion électromécanique .

Schéma du moteur :



[Faint, mostly illegible text at the bottom of the page, possibly bleed-through from the reverse side.]

Sur la base de ces équations et du schéma du moteur , nous constatons que le moteur est à excitation séparée ; sans réaction d'induit et , par conséquent , ses balais sont calés sur la ligne neutre . Ces équations sont linéaires dans le cas où I_e reste constant (flux constant) .

Si I_e est constant , nous pouvons poser :
 $K = MI_e$ qui est une constante .

Ainsi, les équations deviennent :

$$V - E = RI + L \frac{dI}{dt}$$

$$\Gamma - \Gamma_f = J \frac{d\Omega}{dt}$$

$$\Gamma = KI$$

$$E = K\Omega$$

R, L, J, K sont des paramètres constants et $V, E, I, \Gamma, \Gamma_f, \Omega$ des variables .

Dans la mesure où nous pouvons supposer que R, L, J, K sont des paramètres de la machine qui restent constants dans tous les régimes de fonctionnement , le moteur à courant continu alimenté à flux constant ($I_e = \text{constant}$) est un système linéaire qui pourra donc être asservi en vitesse et en courant par des régulateurs linéaires .

1.2. Le réglage de la vitesse d'un moteur à courant continu :

1.2.1. Les équations du moteur en régime statique :

En régime statique , les équations deviennent :

$$V - E = RI$$

$$\Gamma - \Gamma_f = 0$$

$$\Gamma = KI$$

$$E = K\Omega$$

Si, nous éliminons I, E et Γ de ces équations , nous obtenons:

$$\Omega = \frac{V}{K} - R \frac{\Gamma_f}{K^2}$$

Et , en remplaçant $K = MI_e$, nous obtenons :

$$\Omega = \frac{V - RI}{MI_e} = \frac{V - RI}{k\phi}$$

Ainsi, nous remarquons que la vitesse est proportionnelle à la tension d'induit et inversement proportionnelle au flux d'induction.

Pour régler la vitesse, nous pouvons donc intervenir soit sur la tension d'induit (V), soit sur le flux d'induction (Φ).

1.2.2. Le réglage par le flux :

En insérant dans le circuit inducteur un rhéostat de champ, il sera possible de réduire le flux en diminuant le courant d'excitation (I_e).

Ce mode de réglage est économique parce que la puissance dissipée dans l'inducteur est très faible par rapport à la puissance absorbée, le rendement varie très peu.

Ce réglage présente aussi deux inconvénients :

- la vitesse du moteur ne peut qu'augmenter (avec ce procédé) ;
- le moteur risquera de chauffer en raison de l'augmentation de l'intensité (I) qui a pour corollaire la diminution du flux dans le cas d'un couple résistant constant

Par conséquent, la plage de régulation par variation du courant d'excitation sera limitée parce que le courant et la vitesse ne doivent pas dépasser la valeur imposée par le moteur.

1.2.3. Le réglage par la tension d'induit :

L'excitation étant constante, la vitesse varie proportionnellement à la tension.

Ce mode de réglage permet de réduire la vitesse ; ^{il est} économique car , d'une part , aucune énergie n'est gaspillée dans les rhéostats et , d'autre part , le rendement demeure élevé à toutes les vitesses .

1.3. Le démarrage du moteur à courant continu :

La tension (U) ne peut être appliquée directement à l'induit du moteur parcequ'au démarrage , il y aurait un fort appel de courant . Le moteur étant arrêté , sa F.E.M est nulle .

Pour limiter le courant de démarrage , nous insérons dans le circuit un rhéostat de démarrage .

Le couple au démarrage a pour valeur :

$$C_{dem} = \frac{1}{2\pi} \frac{P}{\omega} n \phi I$$

Le démarrage se fait toujours à flux constant ; au fur et à mesure que le moteur prend de la vitesse , la F.E.M apparait et le courant diminue .

2. Les régulateurs :

Le régulateur est un système électronique qui a pour tâche , d'une part , de stabiliser le circuit de réglage , et d'autre part , de comparer la valeur réelle avec la valeur de consigne .

A cet effet , dans le domaine des réglages , nous utilisons des régulateurs standards du type P , PI et PID .

2.1. Le régulateur proportionnel (P) à pour intérêt de rendre les réponses du moteur plus rapides . C'est un système purement résistif mais , lors d'une variation de couple , la vitesse varie légèrement .

2.2 Le régulateur proportionnel-intégrateur (PI) possède un circuit contre-réaction formé d'un condensateur mis en série avec la résistance (R) .

Son principal intérêt est d'annuler l'erreur en régime statique et , donc , de rendre le système insensibles aux perturbations .

2.3. Le régulateur proportionnel-intégrateur-dérivateur (PID): possède un quadripôle comme circuit de contre-réaction .

Le régulateur P.I.D permet d'associer les deux actions des régulateurs cités plus haut (P et PI) .

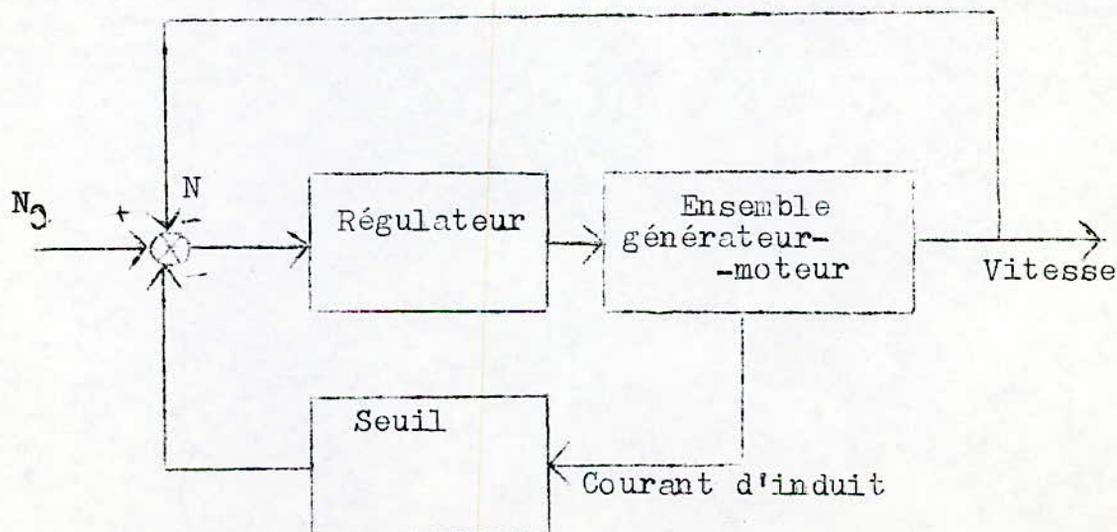
3. Les différents types de régulation :

Il existe trois concepts de systèmes d'asservissement:

- la régulation en boucles convergentes ;
- la régulation par boucles multiples ou en cascade ;
- et , la régulation en boucles parallèles .

3.1. La régulation en boucles convergentes :

Figure 1 .



Dans ce système , il n'y a qu'un seul régulateur pour deux variables . Ainsi , les réglages du régulateur **resultent** d'un compromis (voir figure 1) .

Le transfert d'un mode de fonctionnement à un autre (le passage de la régulation de vitesse à la régulation de courant) est très difficile .

Par contre , c'est une solution peu couteuse car elle n'exige qu'un petit nombre de composants afin de contrôler une variable et en limiter une autre .

3.2. La régulation par boucles multiples (ou en cascade) :

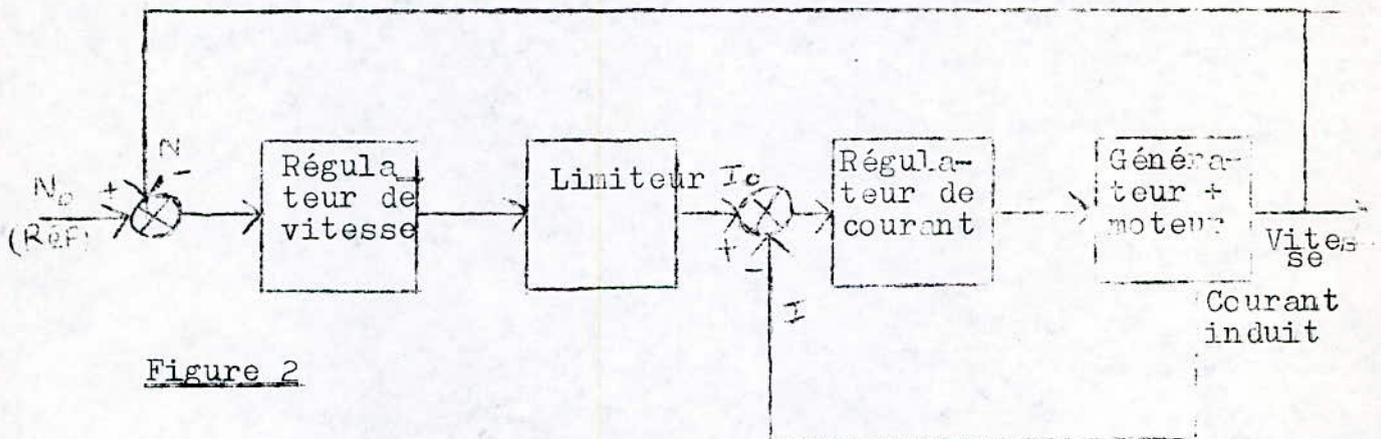


Figure 2

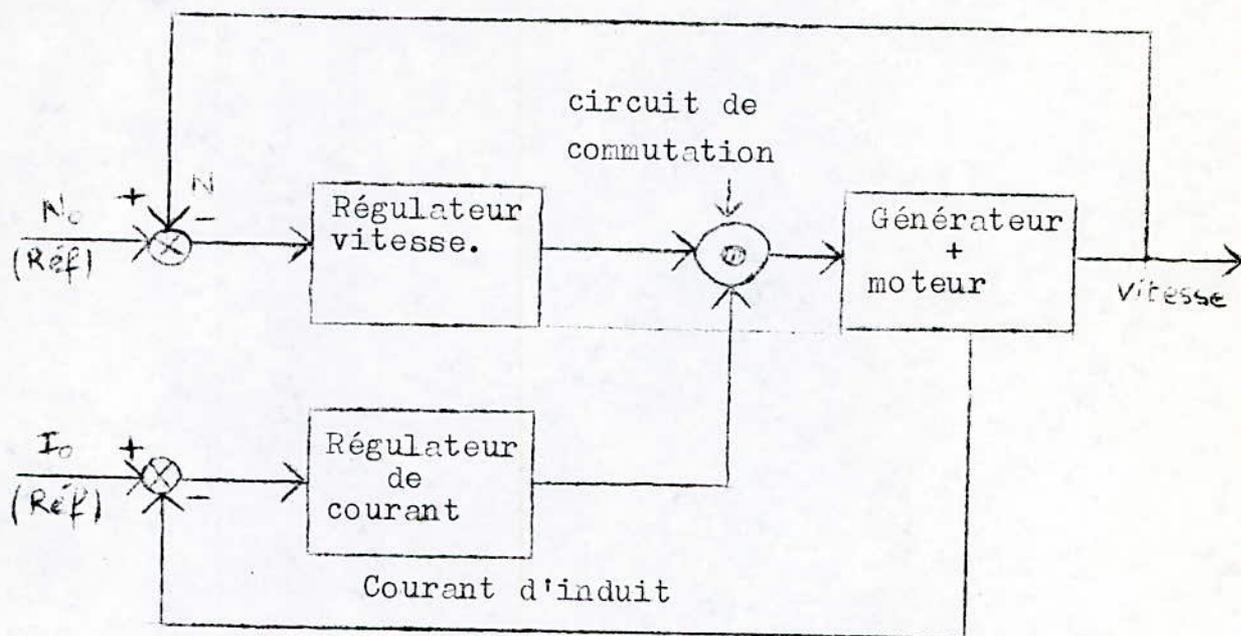
Le système de régulation en cascade comporte un régulateur pour chacune des variables contrôlées (voir figure 2) .

Sa mise en service commence par la boucle **la plus** interne et s'achève par la boucle extérieure .

Ce système permet de passer facilement et sans à coup d'un mode de fonctionnement à un autre .

Son principal inconvénient réside dans la lenteur de réponse car la séparation dynamique des boucles exige que **la** boucle extérieure soit deux fois moins rapide que la boucle **intérieure** qui la précède immédiatement .

3.3. La régulation en boucles parallèles :
Figure 3 .



Dans ce système à commutation chaque boucle est indépendante : il y a une boucle par variable et un régulateur par variable (voir figure 3) .

Tant que le courant n'atteint pas sa valeur de limitation , seul le régulateur de vitesse est en fonctionnement . Dès que le courant atteint cette valeur limite , le régulateur vitesse est hors-circuit et le régulateur courant travaille en régulateur-limiteur .

Ce changement de mode de fonctionnement se fait par le commutateur qui sélectionne sans à coup la régulation désirée,

Ainsi , l'étude , le calcul et la mise en service des régulateurs sont simples en raison de l'indépendance de chaque boucle .

La régulation en parallèle permet d'obtenir une réponse plus rapide qu'avec la régulation en cascade .

4. CONCLUSION :

Les régulateurs choisis sont du type proportionnel parce qu'ils permettent d'obtenir une réponse plus rapide (du courant et de la vitesse) que ne le permettent les régulateurs proportionnels-intégrateurs (PI) .

Le mode de régulation utilisé est une ^{réglage en} régulation en parallèle car son fonctionnement est plus facile que la régulation convergente dont le seul avantage est d'être plus économique .

Le système parallèle permet aussi d'obtenir une réponse plus rapide que la régulation en cascade parce que ses deux boucles peuvent fonctionner indépendamment l'une de l'autre .

II.- DEUXIEME PARTIE :

=====

LE PONT DE GRAETZ MIXTE MONOPHASE

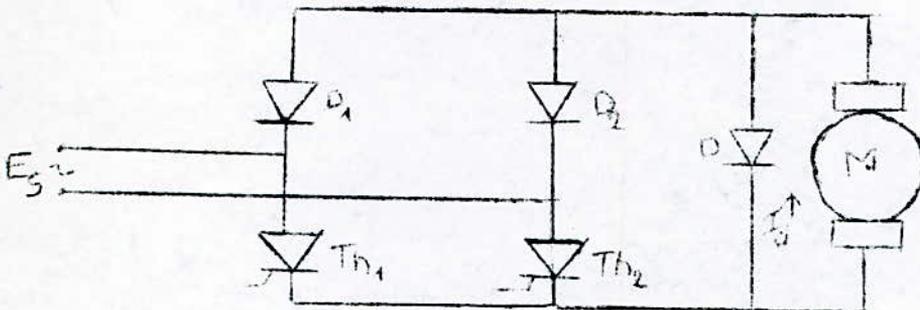
=====

ET LE CIRCUIT DE REGLAGE

=====

1. PONT DE GRAETZ MIXTE ET SA COMMANDE :

1.1. Pont de graëtz mixte monophasé :



Le moteur à excitation séparée est alimenté par un pont redresseur mixte monophasé à deux diodes et à deux thyristors (voir figure ci-dessus) .

En parallèle avec le pont mixte , la diode laisse passer le courant du moteur (par effet de roue libre) .

Ce montage ne fonctionne que dans le quadrant positif du plan U.I .

La tension moyenne redressée en fonction de l'angle de retard à l'amorçage α s'écrit :

$$E_d = \frac{\sqrt{2} E_s}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sin \omega t \, d\omega t = \frac{\sqrt{2} E_s}{\pi} \left[-\cos \omega t \right]_{\alpha}^{\pi}$$

$$E_d = E_{d0} \frac{\cos \alpha + 1}{2} \quad \text{avec} \quad E_{d0} = \frac{2\sqrt{2} E_s}{\pi}$$

1.2. Le comportement dynamique du pont mixte :

La variation de la tension de commande U_{cm} se répercute sur la tension moyenne redressée après un certain temps de retard.

Ce retard est dû au fait qu'une impulsion d'allumage se produit seulement au moment de l'interséction de la tension de commande U_{cm} avec la tension de référence U_r du dispositif de commande de gâchettes .

Dans le cas le plus favorable , le temps de retard est $\theta_r = 0$; et , dans le cas le plus défavorable , $\theta_r = \frac{T}{p}$.

Pour notre pont mixte monophasé , la possibilité d'interséction entre U_{cm} et U_r se répète deux fois pendant la durée d'une période T .

Le temps de retard maximal est $\theta_r = \frac{T}{2}$ et la valeur moyenne $\theta = \frac{1}{2} \frac{T}{2} = \frac{1}{2} \frac{1}{2f}$ où f est la fréquence du réseau .

La fonction de transfert de l'ensemble du convertisseur de courant avec le dispositif de commande de gâchettes est :

$$H(p) = \frac{G}{1 + \theta p}$$

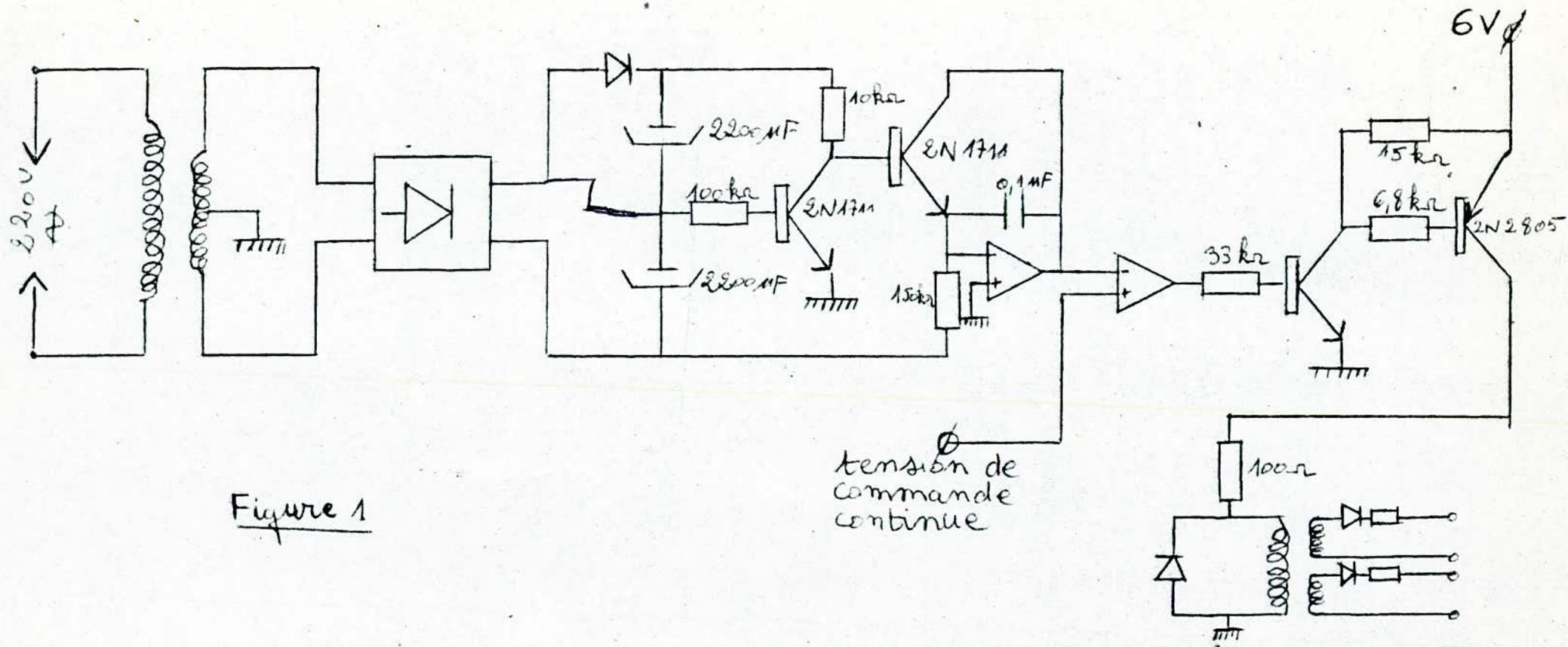
1.3. Le générateur d'impulsions :

Le signal de sortie du pont redresseur attaque le premier transistor du type 2N1711 à travers une résistance R (voir figure 1) .

Le collecteur de T_1 attaque la base d'un autre transistor du même type ; quand T_1 est bloqué T_2 sera saturé et vice-versa ; le signal obtenu sera rectangulaire .

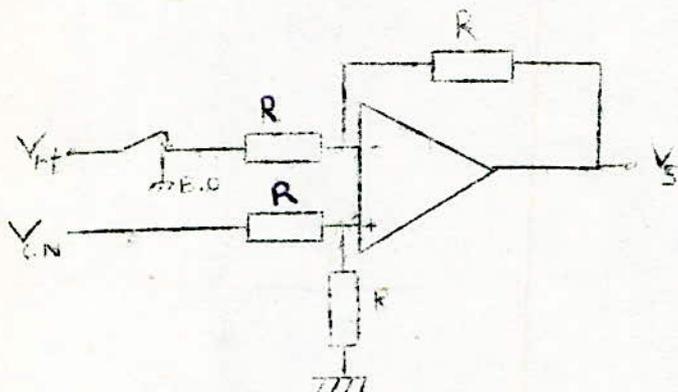
A l'aide d'un amplificateur opérationnel monté en intégrateur , le signal d'entrée est intégré ; le signal est sous forme de dents de scie ~~que~~ et comparé à une tension continue, ils procurent des impulsions .

L'amorçage des thyristors a induit l'utilisation d'une commande impulsionnelle par les transistors 2N2219, et 2N2905 et le transformateur d'impulsions à deux sorties allant vers les gâchettes des thyristors .



2. LES REGULATEURS :

2.1. Le régulateur de vitesse :



Le régulateur de vitesse est composé d'un amplificateur différentiel de gain égal à un (1) .

Si $R_1 \cong R_2$ et $R_3 \cong R_4$

nous avons :
$$V_S = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{CN} - V_{FT} \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

SI $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, c'est à dire de gain 1 ;

nous avons : $V_S = V_{CN} - V_{FT}$

Nous avons réalisé sur cet amplificateur de réglage la comparaison entre une valeur de consigne et une valeur réelle :

2.1.1. La valeur de consigne :

C'est une tension continue ajustable délivrée par un potentiomètre où le curseur est commandé manuellement .

Elle est variable entre 0 et 6 volts ; et provient d'un organe d'alimentation constitué par les éléments suivants : un transformateur alimenté au primaire à 110v et au secondaire à 12 volts , un pont redresseur et un filtrage (voir figure 2) .

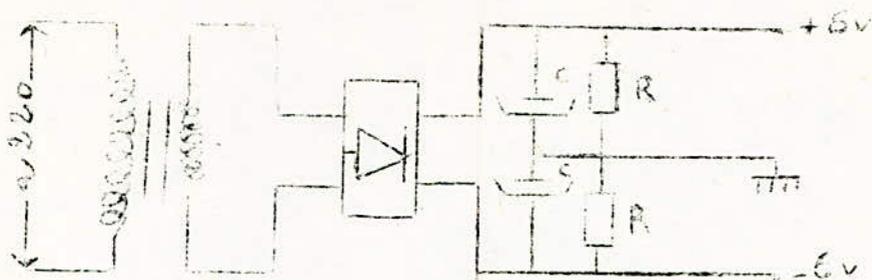


Figure 2

2.1.2. La valeur réelle :

La valeur réelle est la vitesse du moteur ; pour la mesurer , nous avons utilisé une dynamo tachymétrique à courant continu .

Cette dernière convertit la vitesse en une tension électrique proportionnelle :

$$V_s = h \omega$$

h : coefficient de conversion

ω : la vitesse

V_s : la tension de sortie

avec $h = 0,06 \text{ v / tr / mn}$.

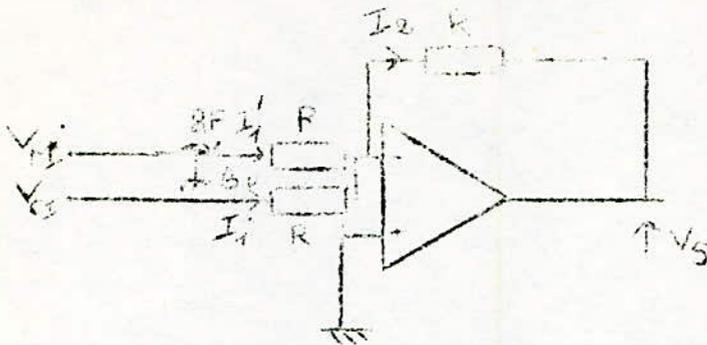
Le réglage de la tension du retour tachymétrique se fait à l'aide d'un potentiomètre dont le réglage a nécessité un essai pour stabiliser la vitesse .

La variation de $N = f (v_{rt})$ en pleine charge à $I = 24$ ampères est présenté dans le tableau ci-dessous :

$V_{rt}(v)$	1	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,6	6
$N(\text{tr/mn})$	1066	1033	1033	1016	1433	1433	1433	1433	1433	1433

Les résultats ci-dessus nous permettent de conclure que la tension du retour tachymétrique est égale à 3,5 volts, pour cette valeur la vitesse régulée est la plus stable .

2.2. Le régulateur de courant :



Le régulateur du courant est constitué d'un seul amplificateur fonctionnant en sommateur .

$$\sum I_1 = I_2 \quad \frac{V_{ref}}{R} + \frac{V_{cs}}{R} = -\frac{V_s}{R}$$
$$\text{d'où : } -V_s = V_{ref} + V_{cs}$$

Nous avons donc réalisé sur ce régulateur la somme d'une valeur de consigne et d'une valeur réelle .

2.2.1. La consigne :

La consigne courant est similaire à la consigne v vitesse mais en tension négative (- 6 v , 0 v) .

2.2.2. La valeur réelle :

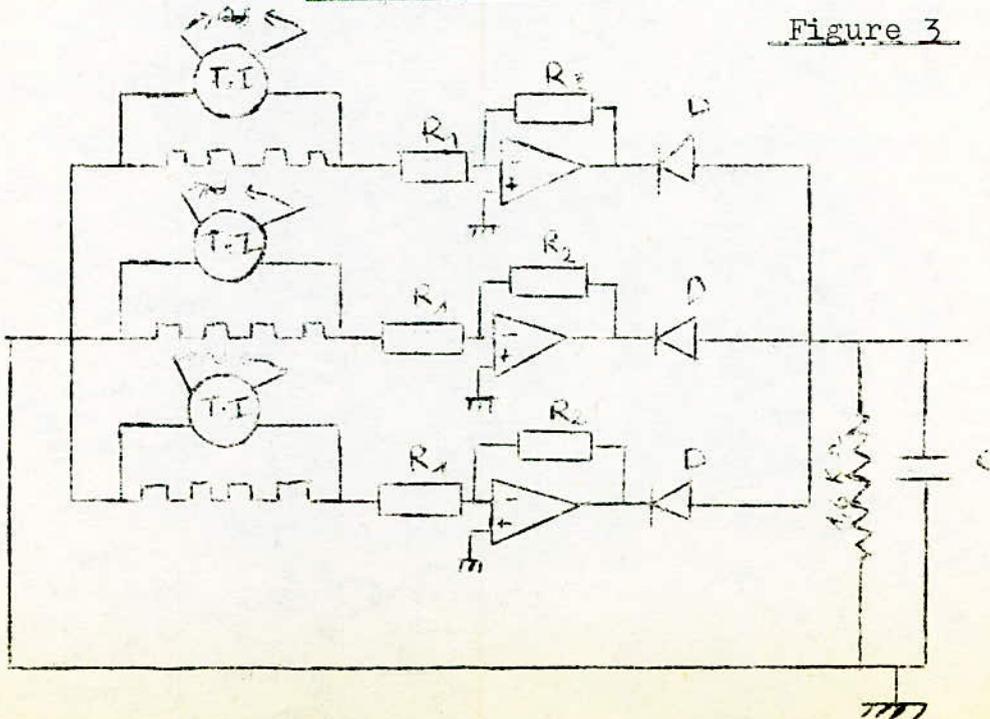


Figure 3

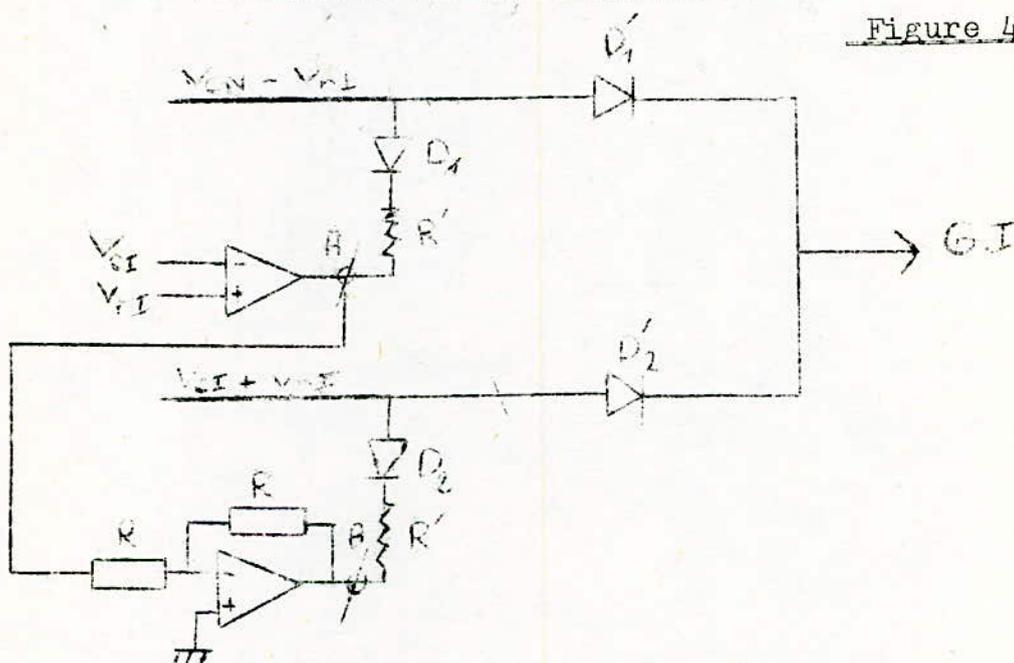
La valeur réelle est l'image du courant ; sa mesure est effectuée à l'aide de trois transformateurs d'intensités placés dans les phases d'alimentation .

Les transformateurs rendent possibles une séparation galvanique entre le circuit de commande et la partie puissance .

Les shunts de 0,1 v et 5 A ne sont utilisés que pour la conversion de l'image du courant en une tension dont l'élévation a nécessité l'utilisation de trois amplificateurs inverseurs de gain égal à 60 , suivi d'un redresseur et d'un filtrage par cellule RC (voir figure 3) .

2.3. Le commutateur électronique :

Figure 4



Le but du commutateur est de sélectionner la régulation que le système doit commander .

Le commutateur se compose de deux parties :

- le comparateur qui permet la comparaison de la tension de consigne du courant (V_{CI}) par rapport à la valeur réelle du courant (V_{rI}) ;
- l'inverseur qui a pour fonction d'inverser le signal issu du comparateur (voir figure 4) .

Le fonctionnement du commutateur est le suivant :

- Si $V_{rI} < V_{CI} \Rightarrow V_A = +15 \text{ v}$ et $V_B = -15 \text{ v}$
 \Rightarrow la diode D_1 est bloquée par contre la diode D_2 est conductrice
d'où $V_S = V_{CN} - V_{rt}$ (la tension d'attaque du générateur d'impulsions).
- Si $V_{rI} > V_{CI} \Rightarrow V_A = -15 \text{ v}$ et $V_B = +15 \text{ v}$
 \Rightarrow la diode D_1 est conductrice et la diode D_2 est bloquée
d'où $V_S = V_{CI} - V_{rI}$ (la tension d'attaque du générateur d'impulsions) .

Donc : si I dépasse le courant de consigne I_C , c'est la boucle de courant qui réagit .

Par contre , si I est inférieur au courant de consigne I_C , c'est la boucle de vitesse qui réagit .

2.4. L'alimentation stabilisée :

Dans le cas ou un montage électronique est doté de dispositifs analogiques (circuits intégrés) , il est nécessaire de prévoir pour leur fonctionnement des organes d'alimentation . L'obtention de ces organes d'alimentation se réalise par la transformation de la puissance alternative fournie par le secteur en puissance continue non régulée qui s'effectue en deux opérations distinctes : le redressement et le filtrage .

La stabilisation de la tension positive nécessite un transistor T_1 (2N3055) , une diode Zener de 15 volts et une résistance R . La tension négative s'obtient par le remplacement du transistor nPn (2N3055) par un transistor complémentaire PnP (2N7906) et, par l'inversion de la polarité de la diode Zener .

Ainsi , la réalisation de notre commande résulte de l'alimentation stabilisée (- 15 v ; + 15 v) qui assure l'alimentation des amplificateurs opérationnels $\mu A741$ (voir figure 5) .

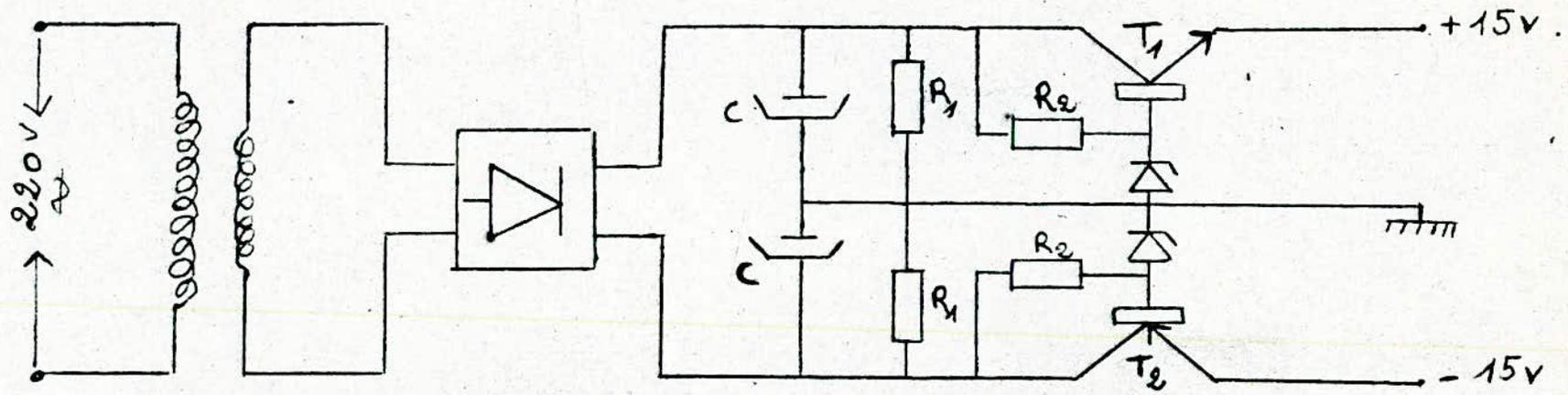
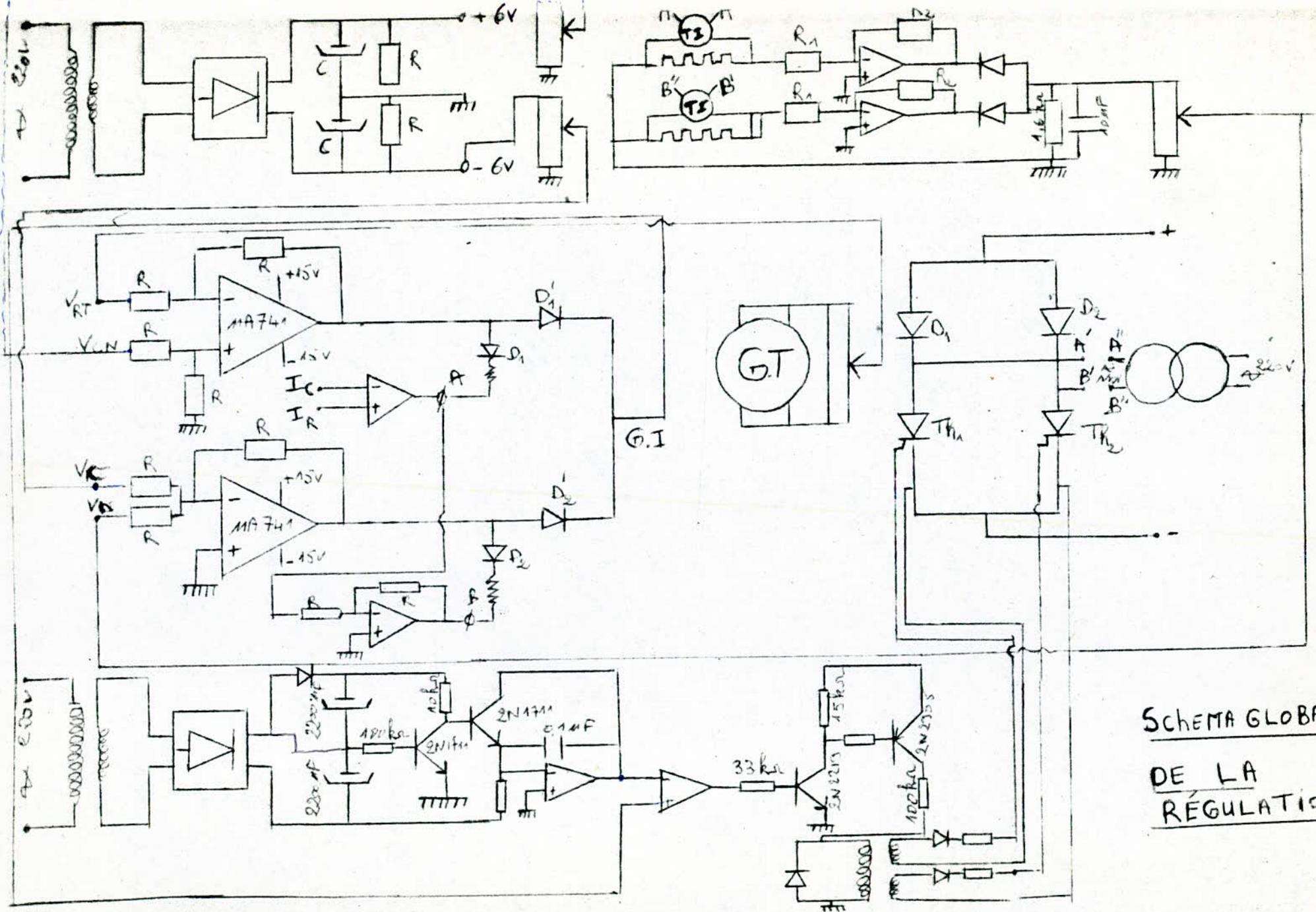


Figure 5



SCHEMA GLOBAL
DE LA
RÉGULATION

III.- TROISIEME PARTIE :

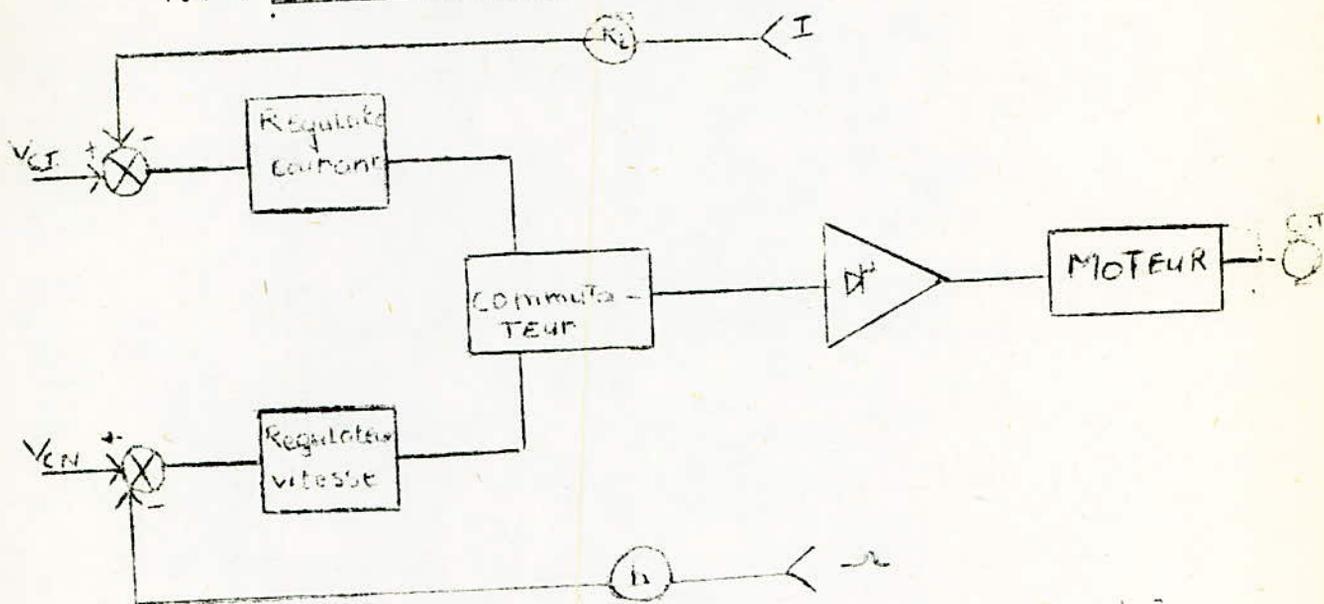
=====

LES RESULTATS DES ESSAIS .

=====

1. LA REGULATION EN PARALLELE :

1.1. Principe et schéma général :



Le principe de la régulation ci-dessus est le suivant : Le système de la régulation ci-dessus comprend deux boucles en parallèles associées toutes les deux au commutateur électronique et sont indépendantes l'une de l'autre .

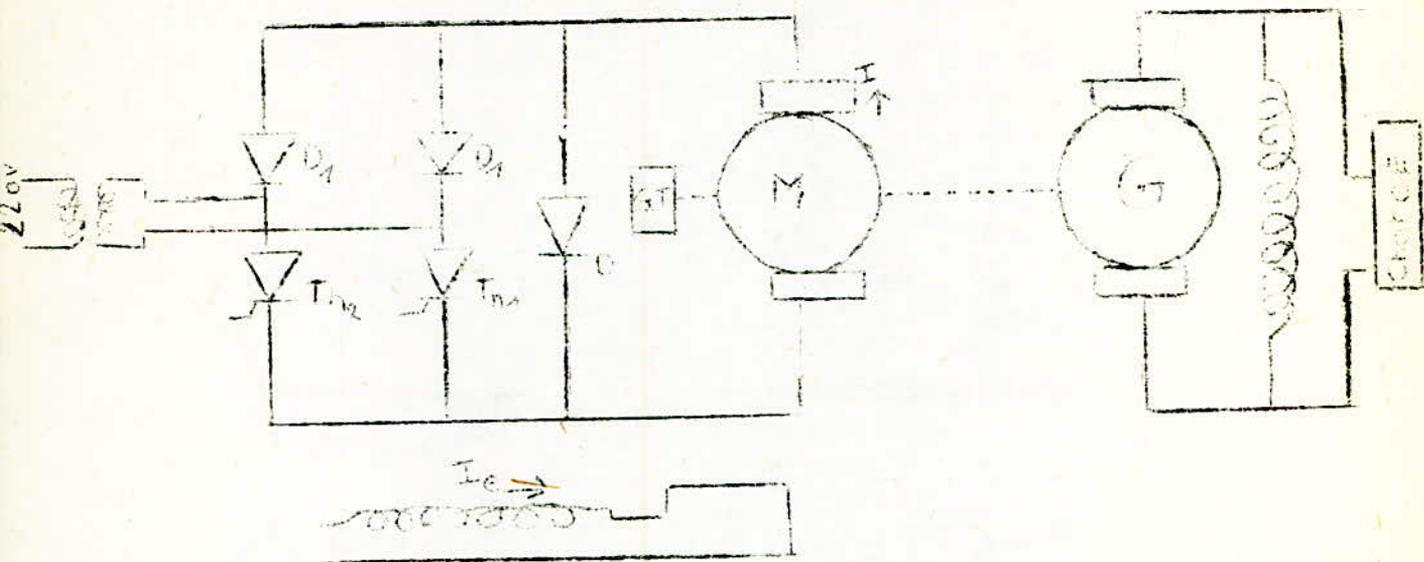
Les régulateurs du courant et de la vitesse ne peuvent jamais fonctionner en même temps car leur stabilisation ne peut s'effectuer au même instant ; quand la vitesse est en service, le courant est au repos et, vice-versa .

1.2. La boucle de vitesse :

Pour réguler la vitesse d'un moteur à excitation séparée , il faut maintenir son excitation à une valeur constante et agir sur sa tension d'induit par l'intermédiaire d'un convertisseur à thyristors .

La boucle de la vitesse a une erreur statique qui est due au choix du régulateur proportionnel . Ce dernier ne stabilise pas complètement le système .

1.2.1. La boucle ouverte de la vitesse :



En boucle ouverte , le retour de la vitesse est en circuit ouvert . La vitesse du moteur varie en fonction du courant d'induit ; elle est indépendante de la commande électronique .

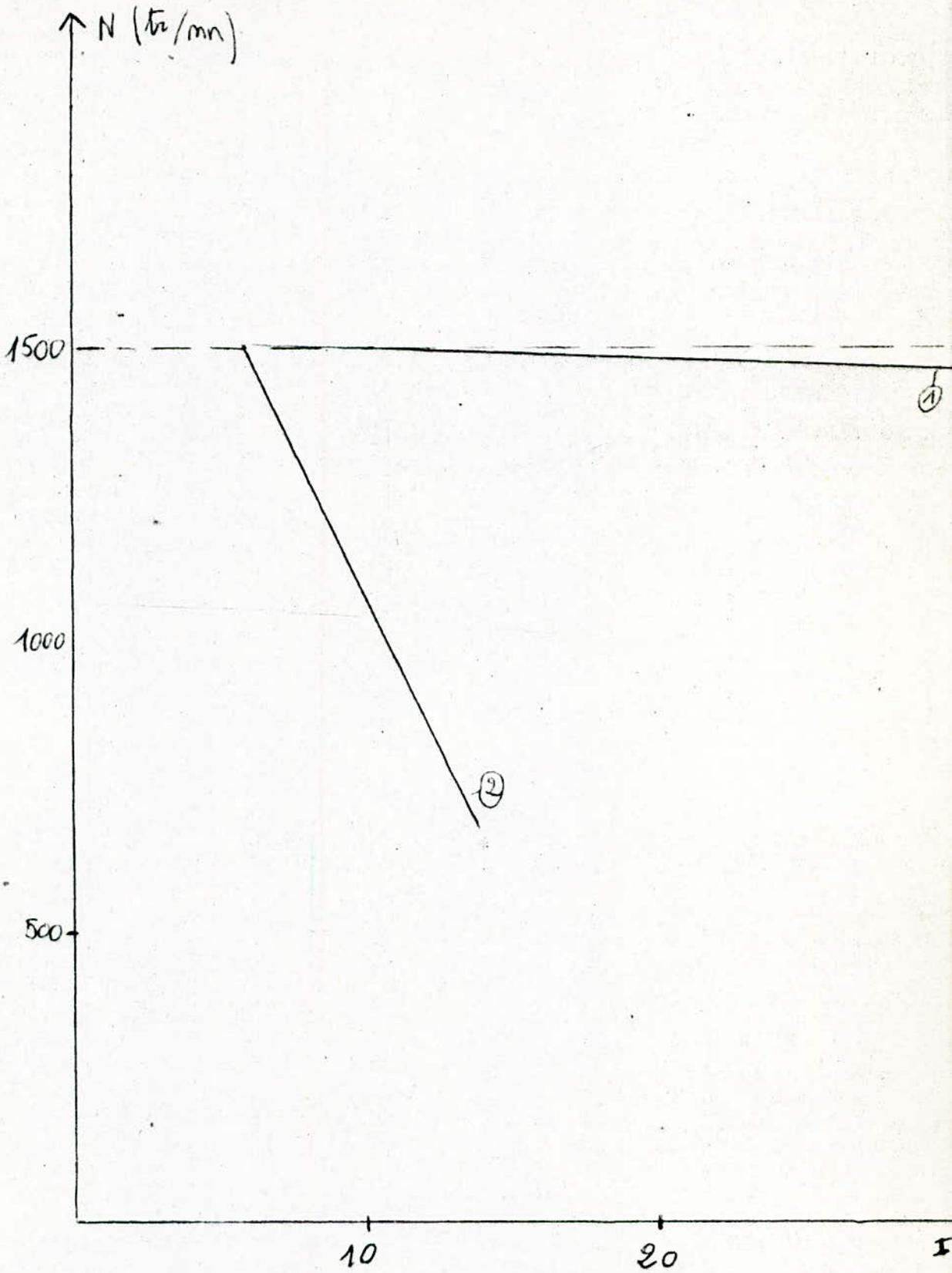
Le moteur à excitation séparée entraîne une génératrice à excitation shunt qui est une charge pour le moteur . Ce dernier est alimenté par le pont mixte .

Le relevé de la caractéristique de la vitesse (voir figure 1) se fait en chargeant la génératrice tout en maintenant l'intensité au-dessous de la valeur maximale .

La variation de la vitesse du moteur en fonction du courant d'induit est une droite décroissante qui est représentée dans le tableau ci-dessous :

$$I_e = 0,8 \text{ A .}$$

N (tr/mn)	1500	1166,6	1033	983	966	900	866
I (A)	6,25	8,5	10	10,5	11	11,5	12



- ① La caractéristique de la vitesse en boucle fermée
② La caractéristique de la vitesse en boucle ouverte.

Figure 1

1.2.2. La boucle fermée de la vitesse :

Le régulateur de vitesse sera en fonctionnement aussi longtemps que le courant n'atteint pas sa valeur de limitation .

La boucle de vitesse fonctionne lorsque V_{rI} est inférieur à V_{CI} (voir le fonctionnement du commutateur) .

Le régulateur de vitesse compare deux tensions : le retour tachymétrique et la consigne vitesse .

La tension de sortie V_S va attaquer le générateur d'impulsion qui a une tension de commande variable . Cette dernière sera comparée avec une tension de référence qui a la forme d'une dent de scie ayant une tension maximale égale à 6 volts .

L'allumage des thyristors nécessite l'application des impulsions à leurs gâchettes avec un angle de retard α .

Dans notre cas , il existe une relation linéaire entre l'angle d'allumage (α) et la tension de commande U_C (commande linéaire) .

$$\alpha = K \frac{U_C}{U_{Cm}}$$

Ainsi , nous constatons qu'au démarrage pour 0° , nous avons 0 volts (c'est la pleine tension) ; et , à l'arrêt pour 180° , nous avons 6 volts .

La courbe de la vitesse en fonction du courant en boucle fermée est tracée à la figure 1 et dont les valeurs sont représentées dans le tableau ci-dessous :

N tr/mn)	1500	1500	1466	1466	1433
I (A)	6	10,5	18	25	28

1.3. La boucle de courant :

L'ensemble convertisseur-moteur étant linéarisé , il est nécessaire de réaliser une régulation de courant ayant pour but de le limiter .

Le régulateur du courant est du type proportionnel ; il a une réponse rapide mais varie en raison des perturbations (voir chapitre deux de la première partie) de la f.é.m ; .

1.3.1. La boucle ouverte du courant :

Dans ce cas , le régulateur de courant est hors circuit par contre le régulateur de vitesse est en fonctionnement . Cet essai a déjà été conçu dans la régulation de la vitesse en boucle ouverte (voir figure 1) .

1.3.2. La boucle fermée du courant :

Le retour du courant étant supérieur à la consigne courant , c'est le régulateur de courant qui est en fonctionnement .

Lorsque nous affichons une valeur quelconque du courant et puis nous chargeons le moteur , le courant varie légèrement en fonction de la vitesse avant de se stabiliser . Cet effet est dû au choix du régulateur .

Dans ces conditions , le courant ne dépassera pas la valeur limite même si nous procédons à un court-circuit franc aux bornes de l'induit du moteur .

Cet essai a été réalisé au cours de la mise au point de notre régulation en parallèle .

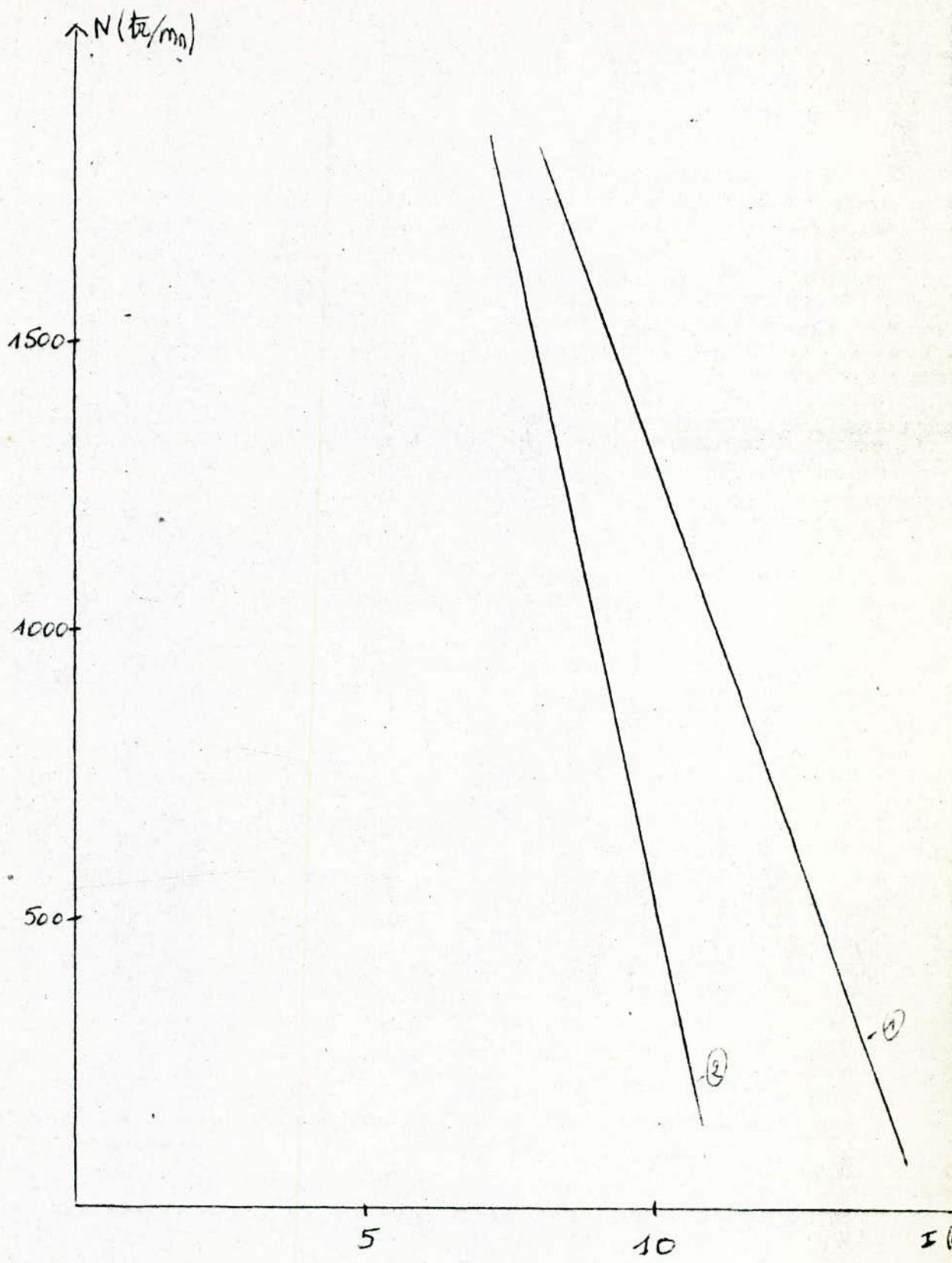
Le courant a augmenté jusqu'à la valeur limite et, par la suite , il s'est stabilisé à cette valeur .

La boucle n'ayant qu'une action proportionnelle , le courant dépend de la perturbation de la f.é.m ; ainsi , nous n'avons pas réalisé une vraie régulation de courant .

Les deux tableaux représentés ci-dessous ont des réglages de courant différents ; dans le premier , la valeur limite du courant est de 11 Ampères, alors que dans le second, elle est de 9 Ampères . Le relevé de leurs caractéristiques est tracé sur la figure 2 . Ces deux tableaux sont les suivants :

N(tr/mn)	1500	1166	1000	966	933	916	900
I (A)	6	8,5	11	11,3	11,4	11,45	11,45

N(tr/mn)	1500	1166	1000	933	900	866	850	833
I (A)	6	7,5	9	9,2	9,3	9,31	9,31	9,31



- ① la caractéristique de courant en boucle fermée ($I_{L,n} = 11A$)
- ② la caractéristique de courant en boucle fermée ($I_{L,n} = 9A$)

Figure 2

1.4. L'interprétation des résultats :

A partir des résultats obtenus , nous constatons que le choix du régulateur est très important .

Dans notre réalisation , nous avons utilisé des régulateurs du type proportionnel qui ont les réponses rapides mais , par ailleurs , le courant dépend des perturbation de la f.é.m .

Ainsi , pour obtenir une vitesse et un courant constant , la présence d'une action intégrale est indispensable dans les régulateurs de vitesse et de courant .

La régulation de courant est essentielle car elle nous permet de faire démarrer un moteur à courant continu sans rhéostat de démarrage et de le protéger contre les élévations dangereuses du courant .

La mise au point d'une régulation de courant et de vitesse plus performante et plus précise exige la réalisation d'un nombre important d'essais nécessitant beaucoup plus de temps et de moyens matériels que nous n'en avons eu dans notre travail .

2. Etude de la stabilité :

Un système linéaire est dit stable si, abandonné à lui-même à partir de conditions initiales quelconques, il revient vers son état d'équilibre.

La condition nécessaire et suffisante de stabilité est donc que tous les pôles de ses transmittances (c'est à dire toutes les racines de son équation caractéristique) aient des parties réelles négatives.

2.1. La notion de transmittance :

Soit un système linéaire dans lequel deux grandeurs x et y que nous appellerons grandeur d'entrée et grandeur de sortie.

Nous pouvons écrire la relation entre x et y sous la forme :

$$a_0 \frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_n x = b_0 \frac{d^m y}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} y}{dt^{m-1}} + \dots + b_m y$$

si nous posons $p^k = \frac{d^k}{dt^k}$

nous aurons $x (a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n) = y (b_0 p^m + \dots + b_m)$

La mise en facteur de x et y permet de définir un rapport de transmission symbolique que nous appellerons transmittance ou fonction de transfert $H(p)$:

$$H(p) = \frac{N(p)}{D(p)} = \frac{a_0 p^n + \dots + a_n}{b_0 p^m + \dots + b_m}$$

Cette définition permet de représenter graphiquement la relation de cause à effet entre x et y sous la forme du schéma fonctionnel :



Lorsque p tend vers l'infini, $H(p)$ tend vers $\frac{k}{p^k}$.
 Le nombre k est appelé classe de la transmittance ou du système.

$x(t)$ étant donné la solution, $y(t)$ est sous la forme : $y = y_0 + y_1$.

y_1 est une solution de l'équation complète et y_0 est la solution générale de l'équation sans second membre.

Si $p_k = \alpha_k + j\beta_k$ désigne les racines de l'équation caractéristique $D(p) = 0$.

y_0 s'écrit : $y_0 = \sum_{k=1}^n C_k e^{p_k t}$

Si tous les p_k sont à partie réelle négative ($\alpha_k < 0$), y_0 tend vers zéro lorsque t tend vers l'infini. On dit alors que le système de transmittance $H(p)$ est stable.

2.2. La stabilité du système asservi :

Le but du système de régulation consiste à annuler l'écart entre la grandeur d'entrée et la grandeur de sortie quelque soit l'application. Le système doit être stable pour qu'il y ait un bon fonctionnement

Il existe plusieurs critères pour étudier la stabilité d'un système : le critère de Routh, le critère de Hurwitz, le critère de Bode, etc ...

2.2.1. Le critère de Routh :

Le critère de Routh permet, par le simple examen des coefficients d'une équation algébrique, de savoir si ces racines sont ou ne sont pas à parties réelles négatives.

Soit l'équation caractéristique :

$$A_p^n + B_p^{n-1} + C_p^{n-2} + \dots = 0$$

On forme le tableau :

A	C	E
B	D	F
X_1	X_2	X_3
Y_1	Y_2	Y_3

Avec :

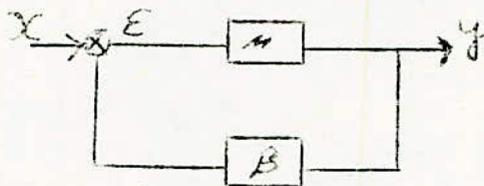
$$X_1 = \frac{BC - AD}{B} ; X_2 = \frac{BE - AF}{B}$$

$$Y_1 = \frac{X_1 D - B X_2}{X_1} ; Y_2 = \frac{X_1 F - B X_3}{X_1}$$

Pour que toutes les racines aient des parties réelles négatives,, il faut et il suffit que tous les termes de la première colonne aient le même signe .

2.2.2. Le diagramme de Bode :

Soit un système bouclé :



Sa transmittance en boucle fermée :

$$\frac{y}{x} = H(p) \frac{M}{1 + MB}$$

En général ce calcul conduit à des expressions mathématiques très compliquées . Ainsi , l'étude sera faite sur un système en boucle ouverte pour en tirer des conclusions relatives à son comportement en boucle fermée .

La présentation de Bode, qui est fréquentielle , consiste à tracer les courbes de gain et de phase d'une transmittance en fonction de la fréquence du signal d'entrée sinusoïdal .

Soit la transmittance $H(p)$:

$$G = 20 \log_{10} |H(j\omega)|$$

$$\varphi = \arg H(j\omega) = H(j\omega)$$

Ces courbes seront tracées séparément .

2.3. La détermination des paramètres du circuit de réglage :

2.3.1. Le gain des régulateurs de courant et de vitesse:

Ce calcul a été fait et expliqué au chapitre deux de la deuxième partie .

Le gain du courant et de la vitesse est donc égal à 1 ($G' = 1$) .

2.3.2. Le coefficient de conversion de la vitesse :

Nous disposons d'un moteur à courant continu dont la vitesse varie de 0 à 1800 tr/mn .

La mesure de la vitesse est faite par une dynamo tachymétrique qui délivre une tension de 60 volts pour 1000tr/mn et la tension de consigne varie de 0 à 6 volts .

$$\text{Donc : } h = \frac{V_{CN}}{\omega} = \frac{6}{104,6} = 5,7 \cdot 10^{-2} \text{ v/rd/s .}$$

1000 tr/mn \longrightarrow 104,6 rd/s .

2.3.3. Le calcul du coefficient du retour courant :

Nous a vons utilisé des transformateurs d'intensités dont l'entrée primaire est de 10 A et la sortie de 5 A qui est fermée par un shunt de 0,1 v et 5 A puis amplifiée à 6 v .

C'est à dire que :

$$\begin{array}{lcl} 10 \text{ A} & \longrightarrow & 5 \text{ A} \\ 5 \text{ A} & \longrightarrow & 0,1 \text{ v} \\ 0,1 \text{ v} & \longrightarrow & -6 \text{ v} \end{array}$$

Ce qui implique que pour 10 A nous avons - 6 v .

Donc le coefficient du retour courant : $k_i = \frac{-6}{10} = -0,6$

2.3.4. Le calcul du gain du convertisseur :

Il est égal au produit des gains partiels .

$$G = G_1 \cdot G_2 = \frac{\Delta x}{\Delta u_c} \cdot \frac{\Delta E_d}{\Delta x}$$

G_1 : c'est le gain du redresseur ;

G_2 : c'est le gain du circuit de commande .

$$G = \frac{\Delta E_d}{\Delta u_c} = \text{Cste}$$

Ainsi pour un montage mixte , nous avons :

$$G = \frac{E_{do}}{2U_{cm}} \quad \text{avec} \quad E_{do} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_S$$

$$E_S = 110 \text{ v} \quad \text{et} \quad U_{cm} = 6 \text{ v} .$$

$$G = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{110}{2 \cdot 6} = 8,2 .$$

2.3.5. Le calcul de la constante k (abordée au chapitre un de la première partie) :

Soit les caractéristiques du moteur à excitation séparée :

$$N = 1800 \text{ tr/mn} \quad \Longrightarrow \quad \omega = 188,4 \text{ rd/s}$$

$$P = 2,2 \text{ Kw}$$

Pour l'induit : $U = 110 \text{ v}$; $I = 24 \text{ A}$; $R = 0,72 \Omega$

Pour l'inducteur : $U = 110 \text{ v}$; $I_e = 0,95 \text{ A}$

Le moment d'inertie calculé est égal à $J = 0,1 \text{ kg.m}^2$

L'inductance de l'induit calculée est égale à $L = 11,7 \cdot 10^{-3} = 11,7 \text{ mH}$

Nous avons supposé que le courant d'excitation du moteur est constant avec $k = M I_e$.

Ainsi , pour une vitesse égale à la vitesse nominale du moteur 1800 tr/mn , la tension aux bornes de l'induit est de 110 v et le courant d'induit est égal à 24A ..

$$U = E + RI$$

Pour le fonctionnement nominal , nous avons :

$$E = U - RI = 110 - 0,72 \cdot 24 = 92,7 \text{ v} .$$

Ceci nous permet de calculer k :

$$E = k \omega \quad \Longrightarrow \quad k = \frac{E}{\omega} = \frac{92,7}{188,4} = 0,5 \text{ v/rd/s} .$$

2.4. Le schéma fonctionnel du moteur à courant continu :

Le moteur à courant continu alimenté à flux constant travaille en régime linéaire .

Les équations démontrées au chapitre un de la première partie peuvent être représentées par un schéma fonctionnel .

Notons que :

$V(p)$: la transformée de Laplace de la variation de la tension d'induit ;

$I(p)$: la transformée de Laplace de la variation du courant d'induit .

$$V(p) - E(p) = RI(p) + L(p) I(p) \quad (1) .$$

$$\Gamma(p) - \Gamma_r(p) = Jp\Omega(p) \quad (2) .$$

$$\Gamma(p) = KI(p) \quad (3) .$$

$$E(p) = K\Omega(p) \quad (4) .$$

$$(1) \implies I(p) = \frac{V(p) - E(p)}{R + Lp} = \frac{V(p) - E(p)}{R(1 + \frac{Lp}{R})}$$

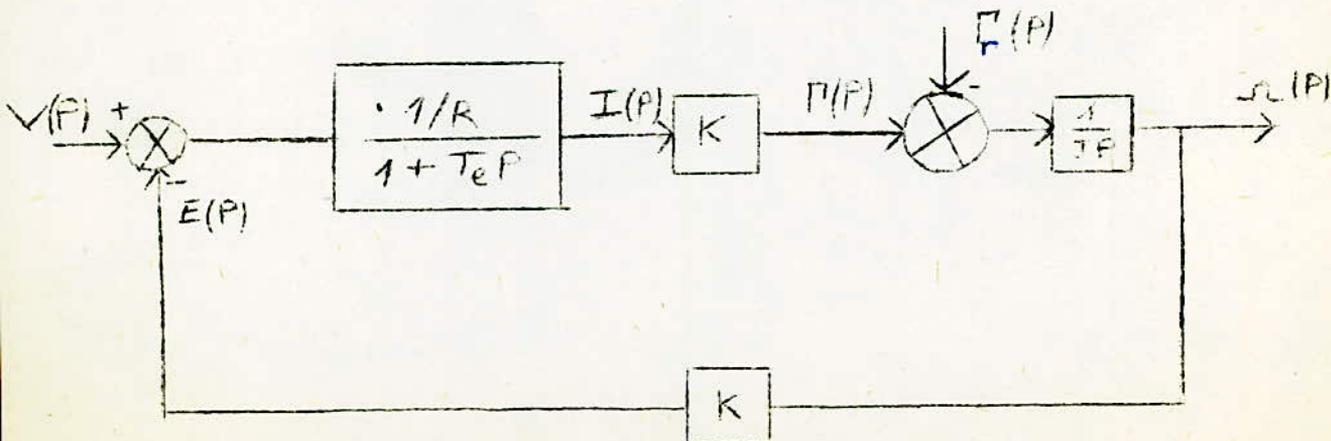
Nous posons $T_e = \frac{L}{R}$ Constante de temps électrique de l'induit .

$$\text{D'où } I(p) = \left\{ V(p) - E(p) \right\} \times \frac{1/R}{1 + T_e p} \quad (5)$$

$$(3) \implies \Gamma(p) = KI(p) \quad (6)$$

$$(2) \implies \Omega(p) = \left\{ \Gamma(p) - \Gamma_r(p) \right\} \times \frac{1}{Jp} \quad (7)$$

$$(4) \implies E(p) = K\Omega(p) \quad (8)$$



Nous pouvons déduire les deux relations suivantes :

$$\omega(p) = \frac{V(p)/k - R (1 + pT_e) \Gamma_r(p)/k^2}{1 + pT_{em} + p^2 T_e T_{em}} \quad (9)$$

$$\text{et } I(p) = \frac{VT_{em}p/R + \Gamma_r/k}{1 + pT_{em} + p^2 T_e T_{em}} \quad (10)$$

où $T_{em} = \frac{RJ}{k}$ Constante de temps électromécanique du moteur .

La vitesse et le courant sont donc des grandeurs dont les réponses sont du second ordre .

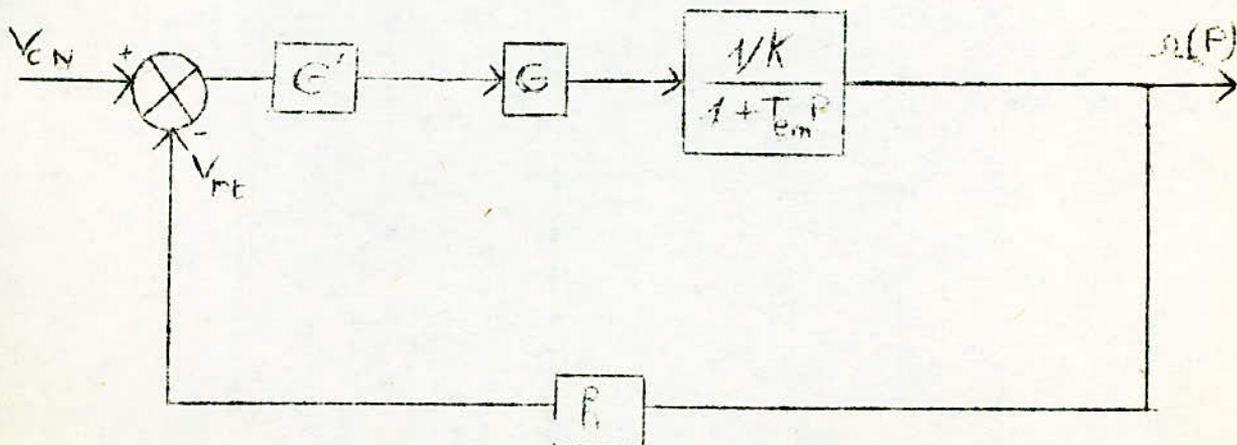
Pour l'ensemble des moteurs $T_e \ll T_{em}$.

Dans ces conditions , une bonne approximation du dénominateur de (9) et (10) est (:

$$(1 + pT_{em}) (1 + pT_e) \approx 1 + pT_{em} + p^2 T_e T_{em} .$$

2.5. La stabilité par la représentation de Bode :

.. Le schéma fonctionnel de la boucle vitesse .



$$F.T.B.F = \frac{G G'}{K (1 + T_{em} P + G G' \cdot 1/K \cdot H)}$$

$$F.T.B.O = \frac{\tilde{r}(P)}{V_{cN}} = \frac{G' G \cdot 1/K \cdot h}{1 + T_{em} P}$$

$$G(P) = \frac{\tilde{r}(P)}{V_{cN} \frac{R_J}{K}} = \frac{8,3 \cdot 5,7 \cdot 10^{-2} / 0,5}{1 + T_{em} P} = \frac{1}{1 + T_{em} P}$$

$$T_{em} = \frac{R_J}{K} = 0,3 \text{ s}$$

La fréquence de coupure est $\omega_1 = 3,5 \text{ rd/s}$

$$G = 20 \log_{10} |G(j\omega)|$$

$$G = 20 \log_{10} \left| \frac{1}{1 + 0,3j\omega} \right|$$

$$\varphi = \arg G(j\omega) = \arg \left(\frac{1}{1 + 0,3j\omega} \right)$$

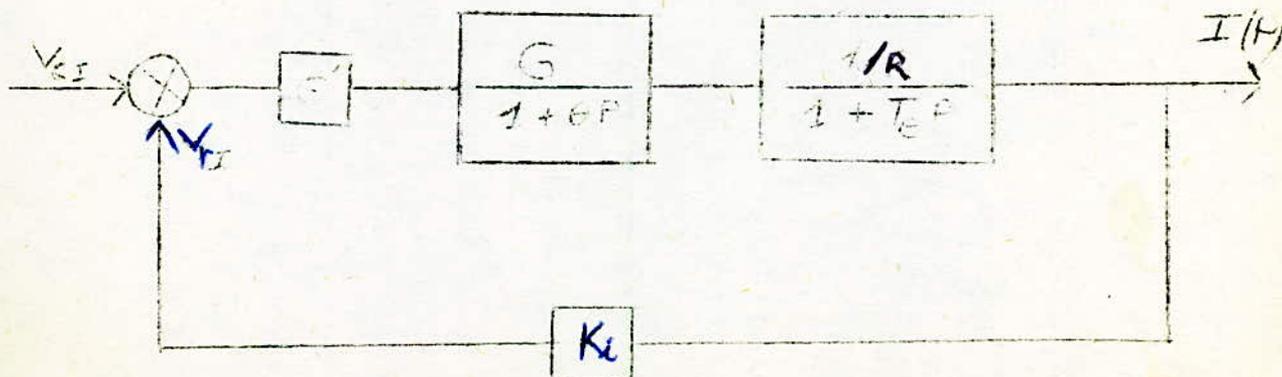
Pour la représentation voir la figure 3

Marge de gain $\Delta \varphi_g = 17,5 \text{ dB}$

Marge de phase $\Delta \varphi_m = 48,6^\circ$

- Schéma fonctionnel de la boucle courant :

Dans la régulation de courant, la constante de temps est très petite et nous oblige à tenir compte de la réponse transitoire. Par contre, les constantes de temps très petites de la régulation de vitesse, peuvent être négligées.



$$F.T.B.F = \frac{I(P)}{V_{CI}} = \frac{G'G \cdot 1/R}{(1 + \theta P)(1 + T_e P) + \frac{GG'}{R} K_i}$$

$$F.T.B.O = \frac{I(P)}{V_{CI}} = \frac{GG' \cdot 1/R \cdot K_i}{(1 + \theta P)(1 + T_e P)}$$

$$\theta = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{f} = 5 \text{ms}$$

$$T_e = 16,25 \text{ ms}$$

$$G(P) = \frac{7}{(1 + 5 \cdot 10^{-3} P)(1 + 16 \cdot 10^{-3} P)}$$

Les fréquences de coupure sont :

$$\omega_{1/2} = 61,5 \text{ rd/s} \quad \omega_{1/2} = 200 \text{ rd/s}$$

$$G = 20 \log_{10} G(j\omega)$$

$$G = 20 \log_{10} \left| \frac{7}{(1 + 5 \cdot 10^{-3} j\omega)(1 + 16 \cdot 10^{-3} j\omega)} \right|$$

$$\varphi = \arg G(j\omega) = \arg \left(\frac{7}{(1 + 5 \cdot 10^{-3} j\omega)(1 + 16 \cdot 10^{-3} j\omega)} \right)$$

Pour la représentation se reporter à la figure 4 .

$$\text{Marge de gain : } \Delta G_m = 43 \text{ dB}$$

$$\text{Marge de phase : } \Delta \varphi_m = 105^\circ$$

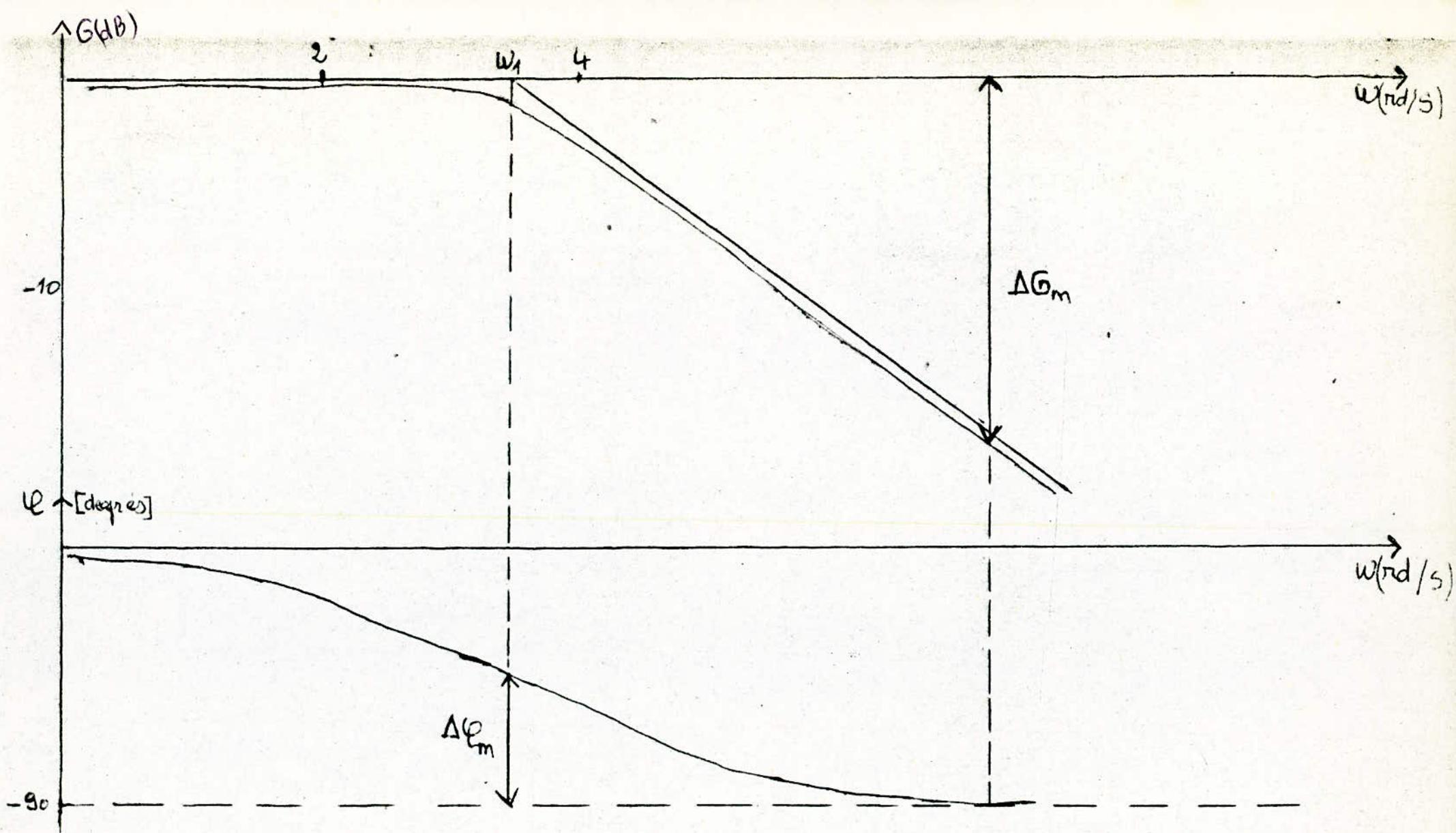


Figure 3

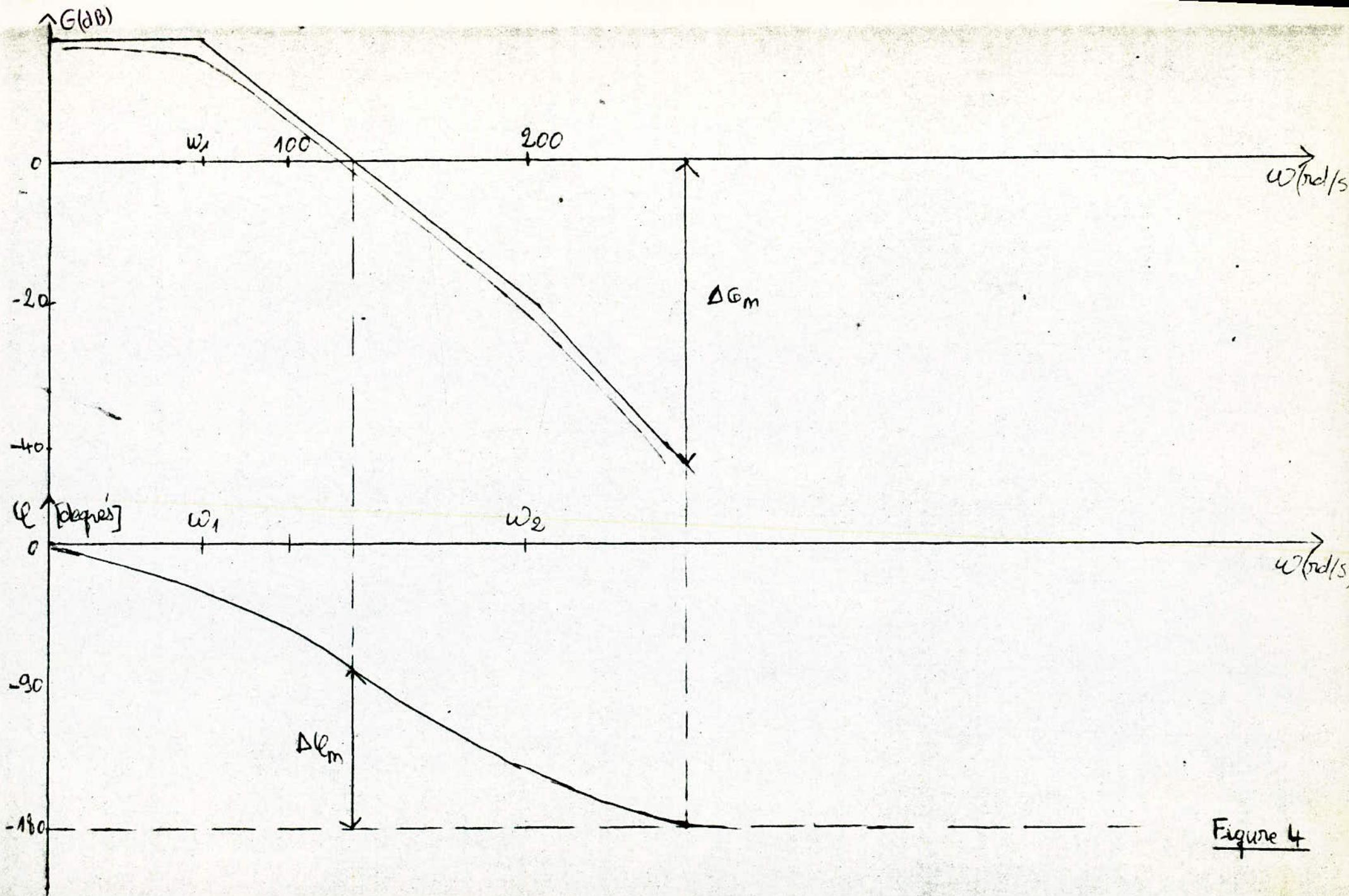


Figure 4

CONCLUSION G E N E R A L E

=====
Ce travail , nous a permis de réaliser une régulation de vitesse avec une boucle de courant . L'objectif de cette dernière est de protéger le moteur à courant continu contre les élévations excessives du courant .

Cette réalisation nous a permis de cerner les difficultés relatives à l'utilisation des systèmes asservis dans le cas particulier du moteur à courant continu .

Ces difficultés résident principalement dans le choix des régulateurs et la mise au point des différents éléments de la régulation .

A cet effet , notre réalisation aurait pu être plus performantes et plus précise si nous avions eu beaucoup plus de temps et de moyens matériels .

En ce sens ce travail pourrait aussi bien être amélioré dans le cadre d'un projet de fin d'étude d'ingénierat que dans celui de la poursuite d'études en post-graduation .

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

=====

- 1./ B.Benzekka et H.Chaoui sous la direction d'A.Maazi :
" Asservissement de vitesse d'un moteur à courant continu alimenté par le groupe Ward-Léonard ", E.N.P , projet de fin d'études , Alger , Juin 1985 .
- 2./ H.Bühler : " ELECTRONIQUE DE REGLAGE ET DE COMMANDE " , Ed , Dunod , 1979 .
- 3./ R.Chauprade : " ELECTRONIQUE DE PUISSANCE . 1.- Commande des moteur à courant continu " , Ed Eyrolles , Paris , 1981 .
- 4./ J.J.Di Stefano , A.R.Stubberud , I.J.Williams : "Système asservis , tome 2 " , Ed Française, série SCHAUM , 1983 .
- 5./ F.Milsant : " Machines à courant continu , tome 2 " , Ed Erolles , Paris , 1981 .
- 6./ J.Mornand : " Schémas d'électronique " , Ed Dunod , PARIS , 1979 .
- 7./ P.Naslin : " Technologie et calcul pratique des systèmes asservis " , Ed Dunod , Paris 1968 .
- 8./ G.Segulier et F.Notelet : " Electrotechnique industrielle " , Entreprise moderne d'édition , Paris , 1982
- 9./ P.Therme : " Régulation de vitesse d'un moteur à courant continu" , conférence INPL , Nancy , 1983 .