

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT المكننة DEPARTEMENT ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

BIBLIOTHEQUE

INGENIORAT D'ETAT

SUJET

ASSERVISSEMENT DE VITESSE D'UN
MOTEUR A COURANT CONTINU
ALIMENTÉ PAR LE GROUPE
WARD-LEONARD

Proposé par :

Monsieur MAAZI

Etudié par :

B. BENZEKKA

H. CHAOUI

Dirigé par :

Monsieur MAAZI

PROMOTION :

JUIN 1985



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا



اللَّهُمَّ ارْزُقْنَا حُسْنَ التَّوَكُّلِ عَلَيْكَ

اللَّهُمَّ إِنِّي أَسْأَلُكَ عِلْمًا نَافِعًا

إِنَّكَ سَمِيعُ الدُّعَاءِ.

DEPARTEMENT ELECTROTECHNIQUE

INGENIORAT D'ETAT

ASSERVISSEMENT DE VITESSE D'UN
MOTEUR A COURANT CONTINU
ALIMENTÉ PAR LE GROUPE
WARD-LEONARD

Monsieur MAAZI

B. BENZEKKA

Monsieur MAAZI

H. CHAOUI

JUIN 1985

DEDICACE

Je dédie ce modeste ouvrage :

A mes fidèles et honorables parents que je chérissais
de tout mon cœur, à qui j'éprouve de l'affection
et de la tendresse.

A mes frères et sœurs et surtout "YASSINE"

A toute ma famille et à toute la famille de
BELKAHLA qui m'a soutenu et aidé à poursuivre
mes études.

A tout ceux qui croient en un dieu unique.

-CHADUI-HAFID

- A tous ceux qui suivent le droit chemin et qui
croient en un dieu seul et à mohamed son envoyé
et en le jugement dernier.

- A mes parents qui ont beaucoup sacrifié pour
me voir arriver à ce but.

- A tous ceux qui me sont chers ;

Je dédie ce modeste travail .

-Benzekka . Brahim-

REMERCIEMENTS

Nous reitèrons nos remerciements à monsieur MAAZI notre promoteur pour ses conseils et son suivi constant qu'il nous a prodigué tout le long de notre travail.

Nos remerciements vont aussi à monsieur HAMICI et monsieur MAHMOUDI qui nous ont aidé dans notre travail.

Que tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à notre formation trouveront ici l'expression de notre profonde gratitude.

- TABLE DES MATIÈRES -

* Introduction	1
* CH:1 - Généralités	
1.1: Le but de notre thème	3
1.2: Rappel sur les machines à courant continu	3
1.3: Caractéristiques du moteur à courant continu	4
1.4: Les différents modes de réglage de vitesse	5
1.4.1: Réglage de la vitesse par variation du flux	6
1.4.2: Réglage de la vitesse par variation de la tension d'alimentation (Description du groupe Ward - Léonard)	6
* CH:2 - Essais en boucle ouverte	
2.1: Identification des machines	9
2.2: Relevé de la caractéristique de vitesse	12
2.3: Interprétation des résultats et conclusion	14
* CH:3 - Etude en boucle fermée	
3.1: Elements de puissance	17
3.1.1: Diodes	17
3.1.2: Thyristors	18
3.2: Elements de commande	19
3.2.1: Transistors	19
3.2.2: Amplificateur opérationnel	21
3.2.2.1: Blocage	22
3.2.2.2: Amplificateur différentiel	23

3.3: Choix du système de commande	24
3.3.1: Principe	24
3.3.2: Alimentation stabilisée	26
3.3.3: Générateur d'impulsion	27
3.3.4: Schéma global du système de commande	29
3.4: Etude de la caractéristique de vitesse en boucle fermée	31
3.5: interprétation des résultats et conclusion	34
3.6: Suppression du Groupe Ward-Léonard et Commande directe du moteur	37
3.6.1: Etude de la caractéristique de vitesse	38
3.6.2: interprétation des résultats et conclusion	40
* CH.4: Etude de la stabilité	
4.1: Notions de transmittance	43
4.2: Rappel sur les systèmes bouclés	44
4.3: Etude harmonique des systèmes	44
4.3.1: Diagramme de Bode	45
4.4: Détermination des différents paramètres du groupe	46
4.5: Détermination du schéma fonctionnel de la machine	48
4.5.1: Equations en boucle ouverte	48
4.5.2: Equations en boucle fermée	49
4.6: Etude de la fonction de transfert	51
4.6.1: Etude de la stabilité - critère de Routh	52
4.6.2: Etude de la stabilité - Bode	53
4.5: correction et conclusion	56

— INTRODUCTION —

L'électronique industrielle peut être subdivisée en deux domaines distincts : l'électronique de puissance et l'électronique de réglage et de commande.

Les applications de l'électronique furent longtemps limitées à la technique des hautes fréquences (émetteurs, récepteurs; etc....), ce n'est qu'à partir de 1950 environ que l'électronique fit son apparition dans le domaine de réglage et de commande des différentes machines électriques.

Pendant ces premières années, les possibilités d'applications étaient limitées par le manque de fiabilité des éléments électroniques disponibles; cette fiabilité était insuffisante pour répondre aux exigences requises par les nouvelles applications dans le domaine industriel.

Grâce à la découverte des semi-conducteurs (transistors; thyristors; etc...); éléments répondant parfaitement aux exigences industrielles (haute fiabilité; dimensions réduites, sensibilités aux vibrations mécaniques); l'électronique industrielle fit des progrès incroyables.

À partir de 1960 environ; les semi-conducteurs furent introduits dans le domaine de l'électronique industrielle

et permirent de réaliser des dispositifs de plus en plus complexes, destinés à l'automatisation des processus industriels.

De plus la miniaturisation des éléments sous forme de circuits intégrés, introduits dans le domaine de l'électronique industrielle à partir de 1970; permet de réduire l'encombrement et le coût de ces dispositifs, tout en augmentant leur fiabilité et en réduisant la consommation d'énergie.

À l'aide de ces circuits intégrés; on a pu augmenter la perfection et la complexité de réglage et de commande. La machine à courant continu fût vite utilisée à la maîtrise de cette nouvelle conception, due à sa simplicité et son utilité dans le domaine industriel.

Certes les principes de la commande électronique des moteurs à courant continu sont depuis longtemps connus, mais l'industrialisation à grande échelle est due aux progrès extraordinaires, accomplis dans la dernière décennie dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et des circuits intégrés.

— CHAPITRE 1. —

— GENERALITES —

1.1: LE BUT DE NOTRE THÈME :

Dans l'industrie moderne, on trouve un grand nombre de machines fonctionnant à vitesse variable, notamment les machines outils, les laminoirs et les ponts roulants.

Ainsi que les machines qui exigent une vitesse constante, c'est à dire que la vitesse varie faiblement avec la charge, comme c'est le cas de notre étude.

Notre thème de recherche est la commande automatique d'un moteur d'entraînement à courant continu dont la vitesse susceptible d'un réglage étendu doit être constante comme le cas des machines à papier et les colandres.

1.2: RAPPEL SUR LES MACHINES A COURANT CONTINU:

De nombreuses machines électriques utilisent soit la force électromagnétique, soit la force électromotrice inducte; l'une et l'autre sont proportionnelles au champ d'induction qui contribue à les produire. Et comme seules les substances ferromagnétiques permettent d'obtenir de grande induction, on

s'explique l'usage du fer, de la fonte et des aciers au silicium dans la construction de ces machines. En utilisant l'action d'un champ d'induction magnétique sur un courant mobile, la machine à courant continu permet d'obtenir de l'énergie mécanique quand on lui fournit de l'énergie électrique sous forme de courant continu et on l'appelle "MOTEUR".

En utilisant la force électromotrice induite par déplacement relatif d'un conducteur et d'un champ d'induction, la machine à courant continu transforme de l'énergie mécanique qu'on lui fournit en énergie électrique sous forme de courant continu; et on l'appelle alors "GÉNÉRATRICE" ou "DYNAMO".

1.3: CARACTÉRISTIQUES DU MOTEUR A COURANT CONTINU :

Le moteur à courant continu possède une plage très étendue de réglage de vitesse, conservant dans toute cette plage un rendement élevé; et pouvant avoir des caractéristiques mécaniques répondant à des conditions intéressantes.

Le moteur à courant continu étant doué de ces avantages, il trouve de nombreuses applications dans l'industrie.

1.4.1: RÉGLAGE DE LA VITESSE PAR VARIATION DU FLUX:

D'après la relation (1), et en négligeant la chute ohmique dans l'induit ($R_a \cdot I$), la vitesse sous tension constante est sensiblement inversement proportionnelle au flux $N \approx \frac{U}{k\phi}$.

Pour assurer le réglage par variation du flux il suffit donc de mettre un rhéostat de champ en série avec le circuit inducteur de la machine. Le procédé est économique car la puissance absorbée par l'enroulement d'excitation n'est jamais qu'une faible partie de la puissance totale. Mais on retiendra que le réglage de la vitesse par l'excitation permet seulement de l'augmenter.

1.4.2: RÉGLAGE DE LA VITESSE PAR VARIATION DE LA TENSION D'ALIMENTATION

Si l'on admet que le flux utile est invariable, alors la vitesse sera proportionnelle à la tension d'alimentation.

Au cas où la tension aux bornes de l'induit peut être réglée progressivement de la valeur nulle à la valeur maximale, on peut assurer non seulement un réglage progressif économique de la vitesse du moteur, mais aussi sa mise en marche sans

rhéostat de démarrage, le système le plus connu de ce genre est le groupe "WARD-LEONARD"

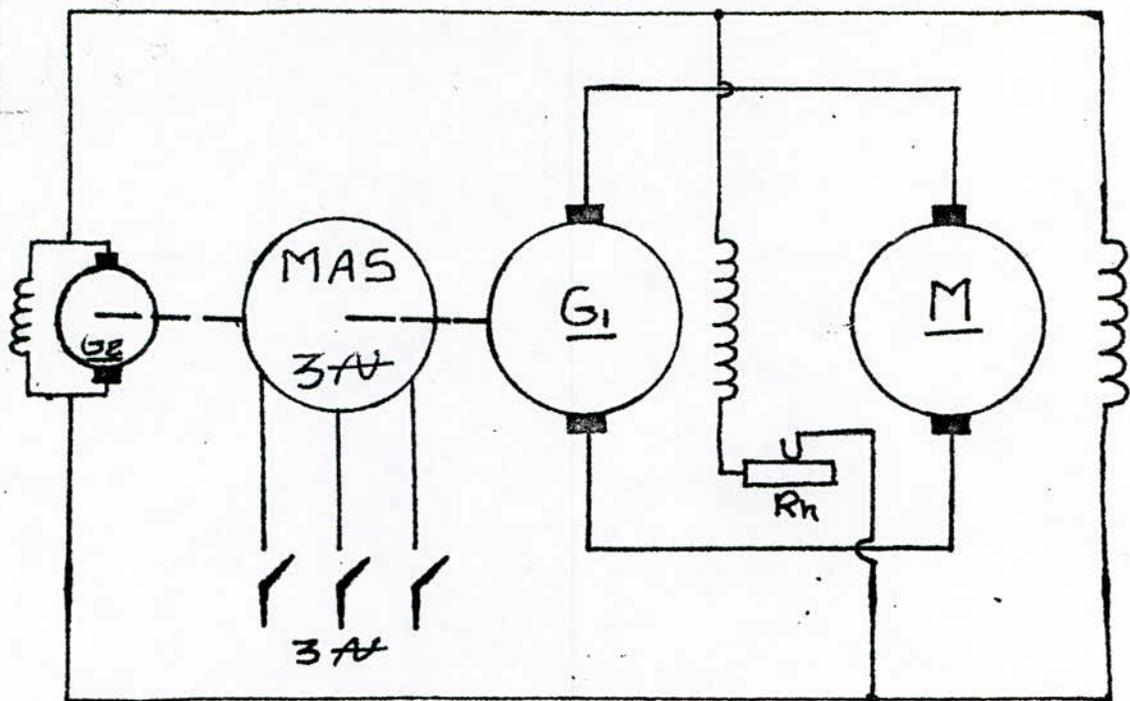
-DESCRIPTION DU GROUPE WARD LEONARD:

Le moteur de travail (M), dont l'excitation est maintenue constante et égale à sa valeur maximale pour assurer le plus grand couple possible, son induit est alimenté par un groupe convertisseur.

Ce groupe comprend une Génératrice (G_1) d'courant continu qu'entraîne un moteur (M_1) quelconque, mais généralement électrique, par exemple asynchrone alimenté par un système de courants triphasés.

Sur l'arbre du Groupe convertisseur est également calé une Génératrice à excitation shunt (G_2) destinée à fournir leur courant d'excitation à la Génératrice (G_1) et au moteur de travail (M), cette tension d'excitation reste constante pour le moteur (M), mais on peut la faire varier pour (G_1) en agissant sur le rhéostat de champ (R_k) qui est en série avec le circuit inducteur.

Le moteur (M) est ainsi alimenté à tension variable de manière continue, pour augmenter sa vitesse



— GROUPE WARD LEONARD —

il suffit d'augmenter l'excitation de (G_1) en ^{le courant} déplaçant du rhéostat dans le sens convenable. Le fonctionnement est très simple et la gamme de vitesse qu'on peut obtenir est très large, mais le procédé a l'inconvénient de nécessiter trois machines principales et une dynamo accessoire; le prix de l'installation est élevé et le rendement est médiocre.

_ CHAPÎTRE 2. _

ESSAIS EN BOUCLE OUVERTE

2.1: IDENTIFICATION DES MACHINES :

Le Groupe Ward-Léonard comprend :

a) un moteur asynchrone, dont la plaque signalétique porte ses caractéristiques.

b) une génératrice à courant continu.

c) un moteur à courant continu.

MOTEUR - ASYN	GENERATRICE	MOTEUR
$P_N : 6 \text{ ch}$	$P_N : 3,5 \text{ kW}$	$P_N = 8,8 \text{ kW}$
3 phases	inducteur : 110V	inducteur : 110V
50 HZ	inducteur : 1,8 A	inducteur : 0,95 A
220/380 . V	induit : 110 V	induit : 110V
16. Amperes	induit : 32 A	induit : 24 A
$N_n : 1460 \text{ tr/mn}$	$R_{ex} = 39 \Omega$	$R_{ex} = 129 \Omega$
$\cos \varphi = 0,84$	$R_a = 0,77 \Omega$	$R_a = 0,72 \Omega.$
9,2 Amperes	$N_n = 1500 \text{ tr/mn}$	$N_n = 1800 \text{ tr/mn}$
$\eta = 0,86$	$J_G = 0,03 \text{ Kg.m}^2$	$J_m = 0,1 \text{ Kg.m}^2$

1/ une Génératrice tachymétrique placée en bout d'arbre du moteur de travail (M), laquelle délivre une tension (V_T) proportionnelle à la vitesse du moteur (M).

Le relevé de la tension (V_T) en fonction de la vitesse du moteur (M), nous donne la correspondance suivante :

N [tr/mn]	1800	1500	1400	1300	1200	1100	1000	900	800	700	600	500	400	300	200
V_T [V]	142,8	94	88	82	76	71	65	58	52	45	40	34	28	20	14
$\frac{V_{osc}}{V_T}$	1,2	1,2	1,2	1,1	1	1	0,9	0,8	0,7	0,65	0,6	0,55	0,4	0,3	0,2

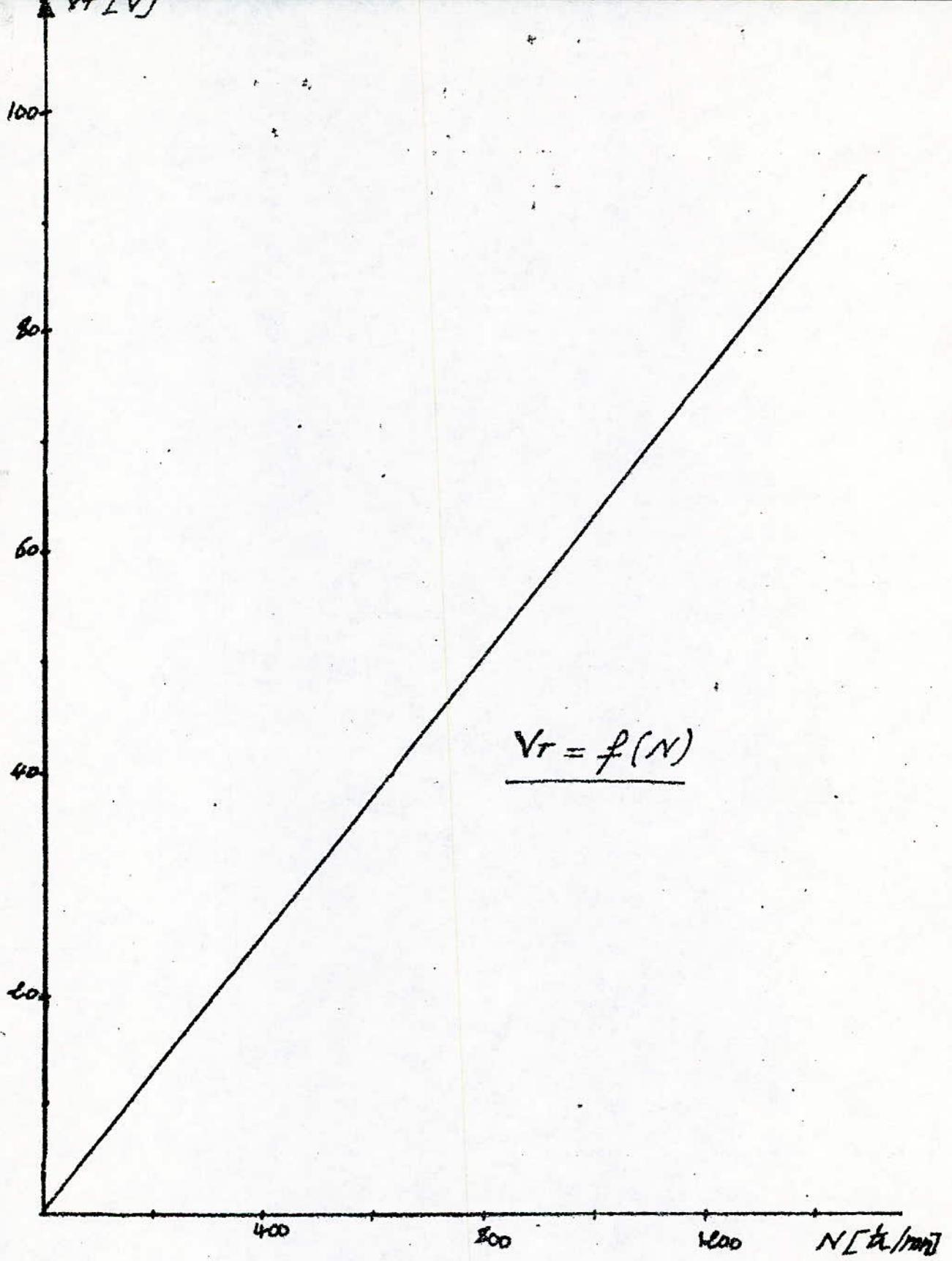
La caractéristique $N = f(V_T)$ étant linéaire (voir tracé), le rapport est donc constant, pour $N = 1500$ tr/mn on a $V_T = 94$ V

$$\text{donc } k = \frac{1500}{94} = 15,95 \text{ tr/mn.V}$$

$$k = 15,95 \text{ tr/mn.V}$$

on voit que l'oscillation de la tension délivrée par la Génératrice tachymétrique est relativement faible, pour la vitesse 1800 tr/mn, l'oscillation est maximale $V_{oscmax} = 1,2$ V, ceci correspond d'une plage de variation de la vitesse maximale

$$\Delta N_{max} = 15,95 \cdot 1,2 = 19 \text{ tr/mn}$$



2-2: RELEVÉ DE LA CARACTÉRISTIQUE DE VITESSE :

En montant une génératrice sur l'arbre du moteur de travail (M) à courant continu et en chargeant cette génératrice, on peut relever la caractéristique de vitesse $N = f(I)$ du moteur.

Les essais faits ont donné les résultats suivants :

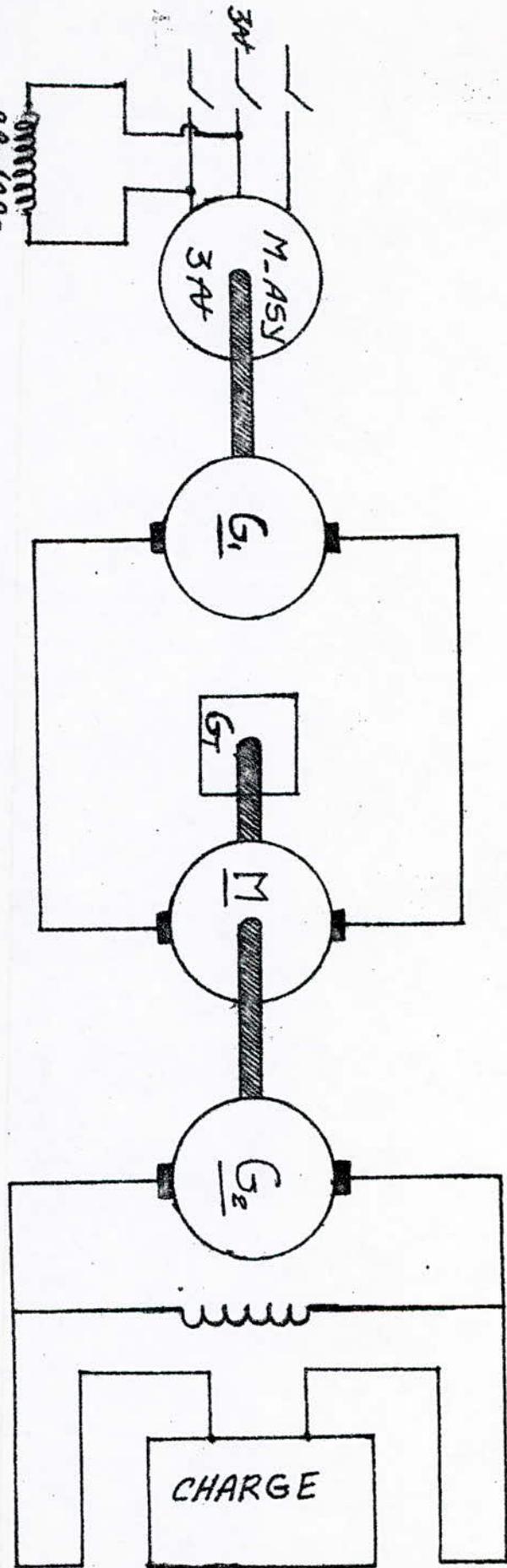
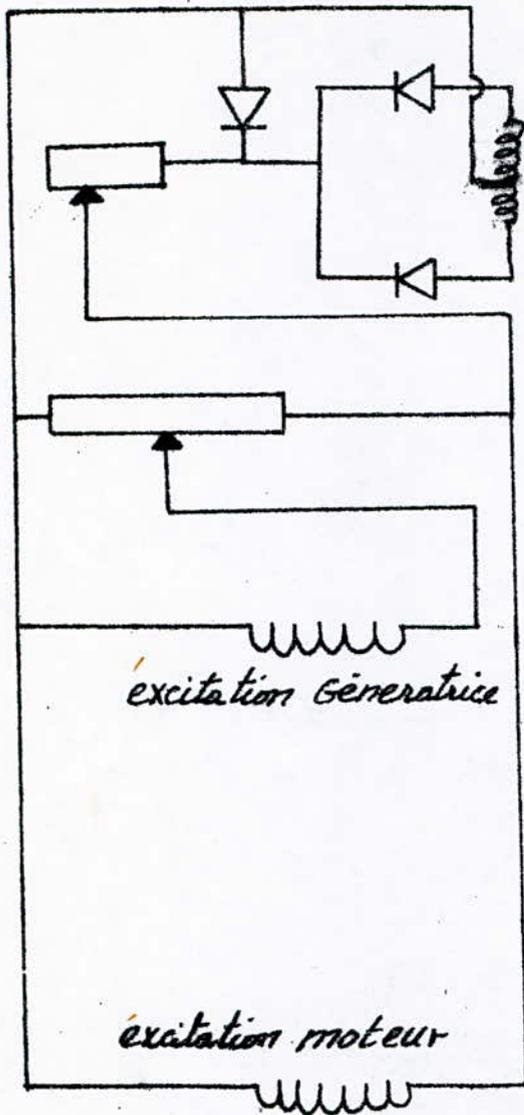
$I_G = 0,17 A$						
$N [tr/mn]$	500	470	440	400	370	360
$I [A]$	2,5	4,25	6,5	10	12	12,6
$\Delta N [tr/mn]$	0	30	60	100	130	140

$$\Delta N_{max} = 140 \text{ tr/mn.}$$

$$\Delta N_{max} (\%) = 28\%$$

$I_G = 0,38 A$						
$N [tr/mn]$	1000	980	950	920	840	740
$I [A]$	3	4,5	6,75	9,5	14,5	20,25
$\Delta N [tr/mn]$	0	20	50	80	160	260

$$\Delta N_{max} = 260 \text{ tr/mn} \Rightarrow \Delta N_{max} = 26\%$$



$$J_G = 0,68 A$$

$N [tr/min]$	1500	1460	1420	1310	1200	1150
$I [A]$	3,2	5,75	9	15,25	22	25
$\Delta N [tr/min]$	0	40	80	190	300	350

$$\Delta N_{max} = 350 \text{ tr/min} \Rightarrow \Delta N_{max} = 24 \%$$

$$J_G = 1,2 A$$

$N [tr/min]$	1800	1750	1700	1670	1600	1490
$I [A]$	3,5	6,25	10,25	12	17,25	26
$\Delta N [tr/min]$	0	50	100	130	200	310

$$\Delta N_{max} = 310 \text{ tr/min} \Rightarrow \Delta N_{max} = 17,2 \%$$

23: INTERPRETATION DES RESULTATS:

on voit que l'allure de la vitesse en fonction de la charge est une droite descendante, ce résultat peut être vérifié théoriquement par les équations liant la vitesse du moteur à la charge.

En effet, l'induit et l'inducteur d'une machine à courant continu à excitation indépendante

sont alimentés par deux sources de tensions différentes, donc le courant d'excitation est indépendant de la charge du moteur.

Si l'on néglige la réaction magnétique d'induit qui ne cause en charge qu'une légère diminution du flux utile, la machine étant compensée, on peut donc admettre que le flux inducteur par pôle est constant.

Soit I le courant absorbé par l'induit du moteur.
soit i le courant absorbé par l'inducteur du moteur.
et désignant par R_a et R_i les résistances correspondantes de l'induit et l'inducteur.

$$i = \frac{U_{\text{exc}}}{R_i} \quad i = c_{\text{te}}, \text{ ceci veut dire que le flux } \phi \text{ est constant.}$$

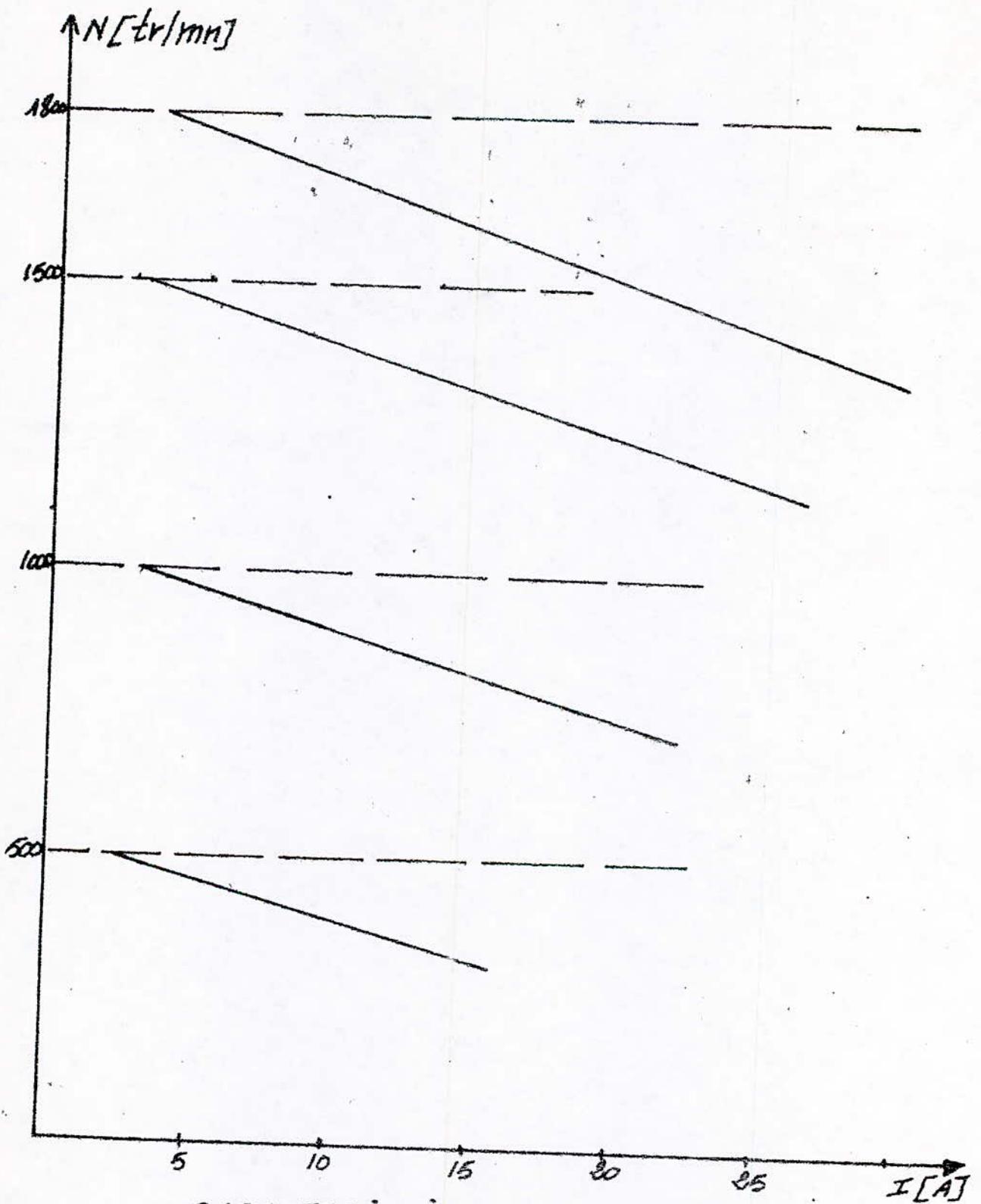
La vitesse est donnée par la relation

$$N = \frac{U - R_a I}{k \phi}, \text{ posons } \bar{A} = 1/k\phi$$

donc $N = \bar{A}(U - R_a I)$, on voit que pour $U = c_{\text{te}}$; la vitesse est une fonction linéaire décroissante de I .

CONCLUSION:

La caractéristique de vitesse en boucle ouverte est une droite descendante, telle que la chute de vitesse maximale entre la marche à vide et le fonctionnement en pleine charge est de $-\Delta N_{\text{max}} = 2.8\%$



CARACTERISTIQUE DE VITESSE
EN BOUCLE OUVERTE

— CHAPITRE 3. —

ETUDE EN BOUCLE FERMÉE :

3.1: ELEMENTS DE PUISSANCE :

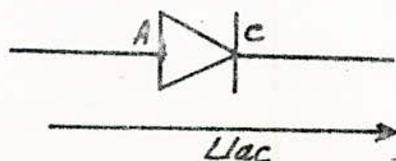
A la base de l'électronique de puissance se trouvent les éléments de puissance, qui peuvent être subdivisés en éléments redresseurs non contrôlables (Diodes) et en éléments redresseurs contrôlables (thyristors, triacs).

Les éléments de puissance, associés à des dispositifs auxiliaires appropriés (Commande de gachettes; radiateurs de dissipation, circuits RC de protection), permettent la réalisation d'équipement de puissance tels que les redresseurs, convertisseurs de courant.

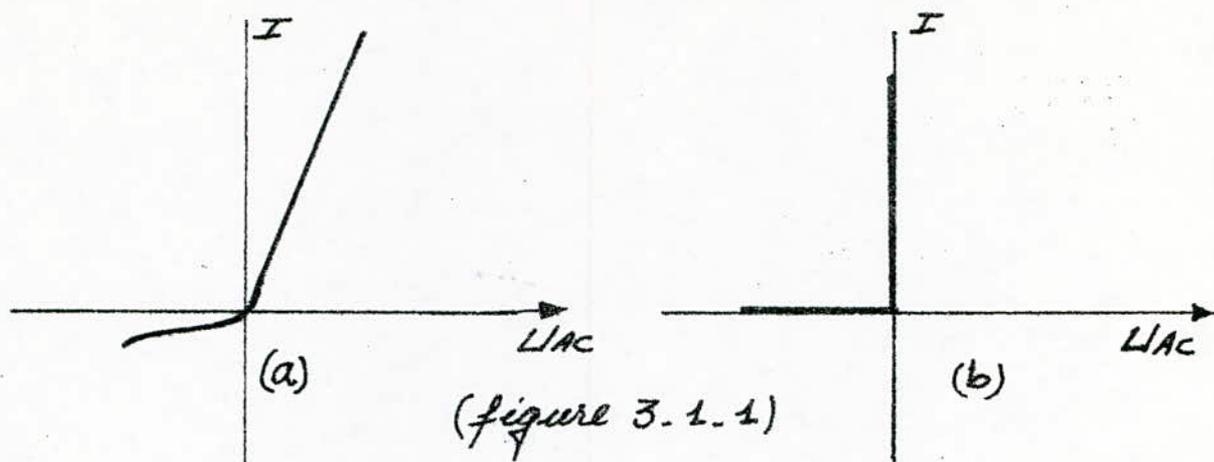
3.1.1: DIODES :

La diode est un élément redresseur non contrôlable, elle conduit le courant dans le sens anode cathode, tandis qu'elle bloque dans le sens cathode anode.

Avec une caractéristique idéale on peut supposer que la chute de tension entre anode et cathode dans le sens de conduction est nulle.



(symbole de la diode)



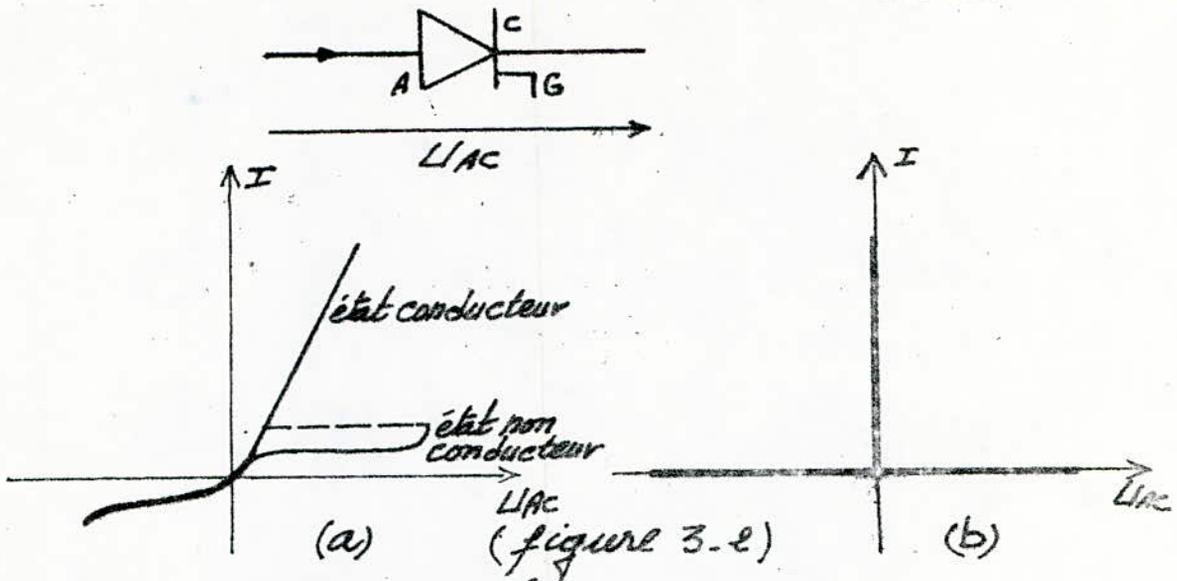
- (a) : caractéristique réelle.
 (b) caractéristique idéale.

3.1.2 : THYRISTORS :

Le thyristor est un élément redresseur contrôlable le plus répandu, il conduit le courant dans le sens anode-cathode seulement si l'on a appliqué une impulsion d'allumage à la gâchette (G) quand la tension directe est inférieure à la tension de retournement.

La direction cathode-anode est toujours bloquante. L'allumage du thyristor s'effectue à l'aide d'une impulsion positive entre gâchette et cathode à condition que la tension anode-cathode soit positive.

L'extinction du courant est réalisée dès le passage par zéro de ce dernier, à condition que la tension entre anode et cathode soit négative immédiatement après le blocage du thyristor et ceci pour un certain laps de temps petit.



(a) : caractéristique réelle.

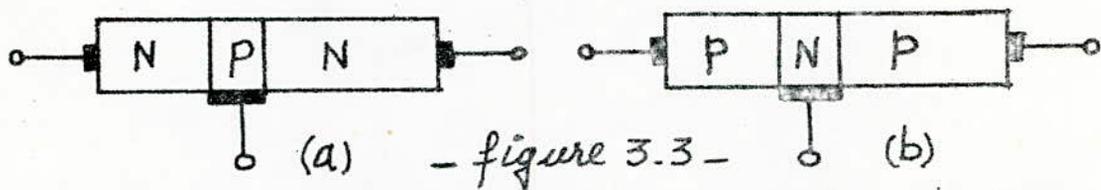
(b) caractéristique idéale.

3.2 : ELEMENTS DE COMMANDE :

3.2.1 : TRANSISTOR :

On peut doper un semi-conducteur pour obtenir un cristal NPN ou un cristal PNP, on obtient alors un transistor à jonction.

Les régions N possèdent surtout des électrons libres et les régions P des trous, c'est pourquoi le transistor à jonction s'appelle un transistor bipolaire.



La figure-3.3-(a) représente un cristal NPN, l'émetteur est fortement dopé, son rôle est d'émettre des

électrons dans la base; la base est légèrement dopée et très mince, elle transmet au collecteur la plupart des électrons venant de l'émetteur.

Le collecteur recueille les électrons qui lui viennent de la base d'où son nom, c'est la plus grande des trois régions dopées, et aussi celle qui doit évacuer la plus grande quantité de chaleur.

La figure 3.3. (b) représente l'autre possibilité, le transistor PNP, il est le complément du transistor NPN, c'est à dire que les signes des courants et des tensions du transistor PNP sont opposés à ceux du transistor NPN.

Par définition :

$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$: rapport entre le courant du collecteur et celui de l'émetteur.

$\beta = \frac{I_C}{I_B}$ rapport entre le courant du collecteur et celui de la base.

β : s'appelle gain en courant continu.

On peut tirer une relation entre α et β :

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Notons en fin qu'il existe deux types de transistors utilisés actuellement; le transistor à jonction et le transistor à effet de champ.

3.2.2: AMPLIFICATEURS OPÉRATIONNELS:

Un très grand nombre des circuits intégrés sont des amplificateurs opérationnels.

Un amplificateur opérationnel est un amplificateur à courant continu à gain élevé.

En branchant des résistances extérieures à l'amplificateur opérationnel, on peut ajuster le gain en tension à volonté.

Le premier amplificateur opérationnel à vu le jour en 1965, c'était le fameux "FAIRCHILD $\mu A 709$ ", d'autres semblables l'on suivi: le MC 1709, LM 709 et les SN709.

Ceux-ci représentent les amplificateurs de première génération et ils fonctionnent tous de la même façon, ils ont une impédance d'entrée élevée et une impédance de sortie faible et un gain élevé, c'est là leur avantage.

Néanmoins cette famille d'amplificateurs opérationnels présente des inconvénients qui incluent le blocage à un certain niveau de tension, le manque de protection contre les courts-circuits.

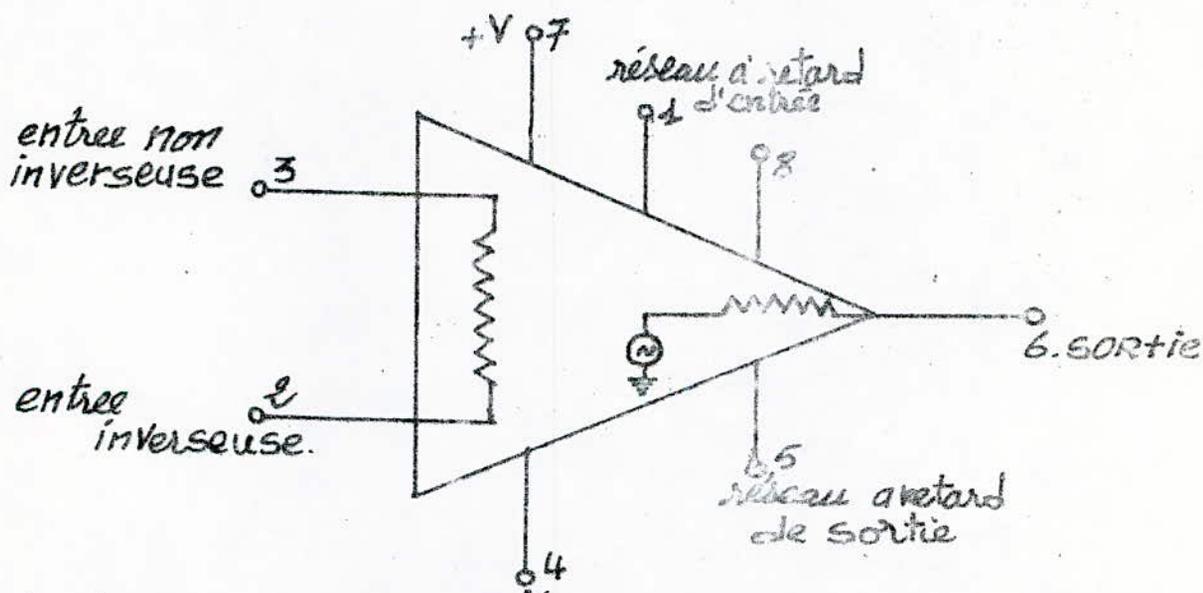
L'amélioration de la technologie des circuits intégrés a mis en jour l'amplificateur "741", caractéristiques des amplificateurs de la seconde génération.

IL ne connaît pas le problème de blocage, il est protégé contre le court-circuit et il possède des réseaux d retard intégrés.

Les autres améliorations du "741" sont: sa très haute impédance d'entrée, un gain en tension plus grand et une impédance de sortie plus faible (environ 7500).

Le 741 est devenu un des amplificateurs opérationnels les plus utilisés par ce qu'il n'est pas cher et qu'il est facile à utiliser.

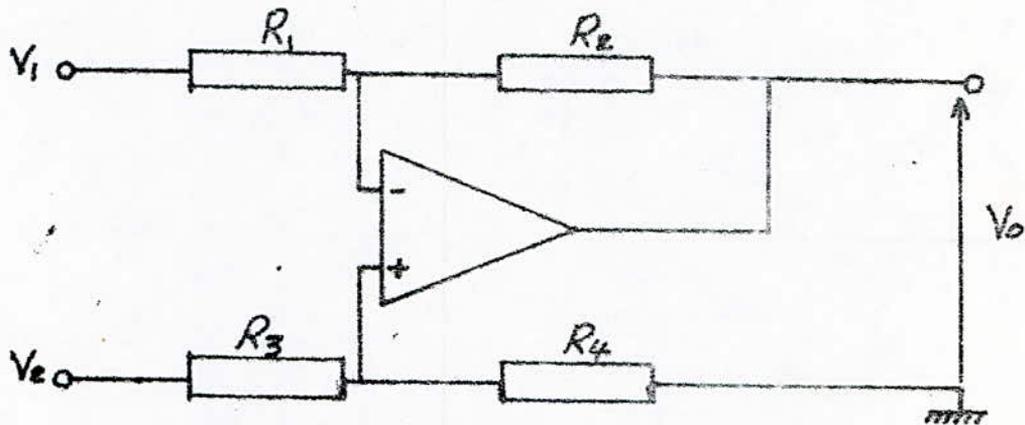
3.2.2.1: BROCHAGE -



Les bornes 4 et 7 servent pour les tensions d'alimentation. Les broches 1 et 5 sont prévues pour y brancher des réseaux d retard extérieurs (pour les amplificateurs de première Génération); le 741 possède un condensateur intégré métal-oxyde qui fait partie d'un

réseau à retard qui diminue le gain en tension.
 Les broches 2 et 3 sont respectivement les entrées inverseuse et non inverseuse, la broche 6 est la sortie.

32.22: AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL:



- figure 3.4 -

Le circuit de la figure 3.4 - représente un amplificateur opérationnel branché en amplificateur différentiel.

Le gain de l'entrée inverseuse est: $\frac{V_0'}{V_1} = -\frac{R_2}{R_1}$

Le gain de l'entrée non inverseuse est:

$$\frac{V_0''}{V_2} = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)$$

donc $V_0 = V_0' + V_0''$

$$V_0 = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1$$

Cas particuliers

Si $R_3 = R_1$ et $R_2 = R_4$ alors,

$$V_0 = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1)$$

* Si $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ alors $V_0 = V_2 - V_1$

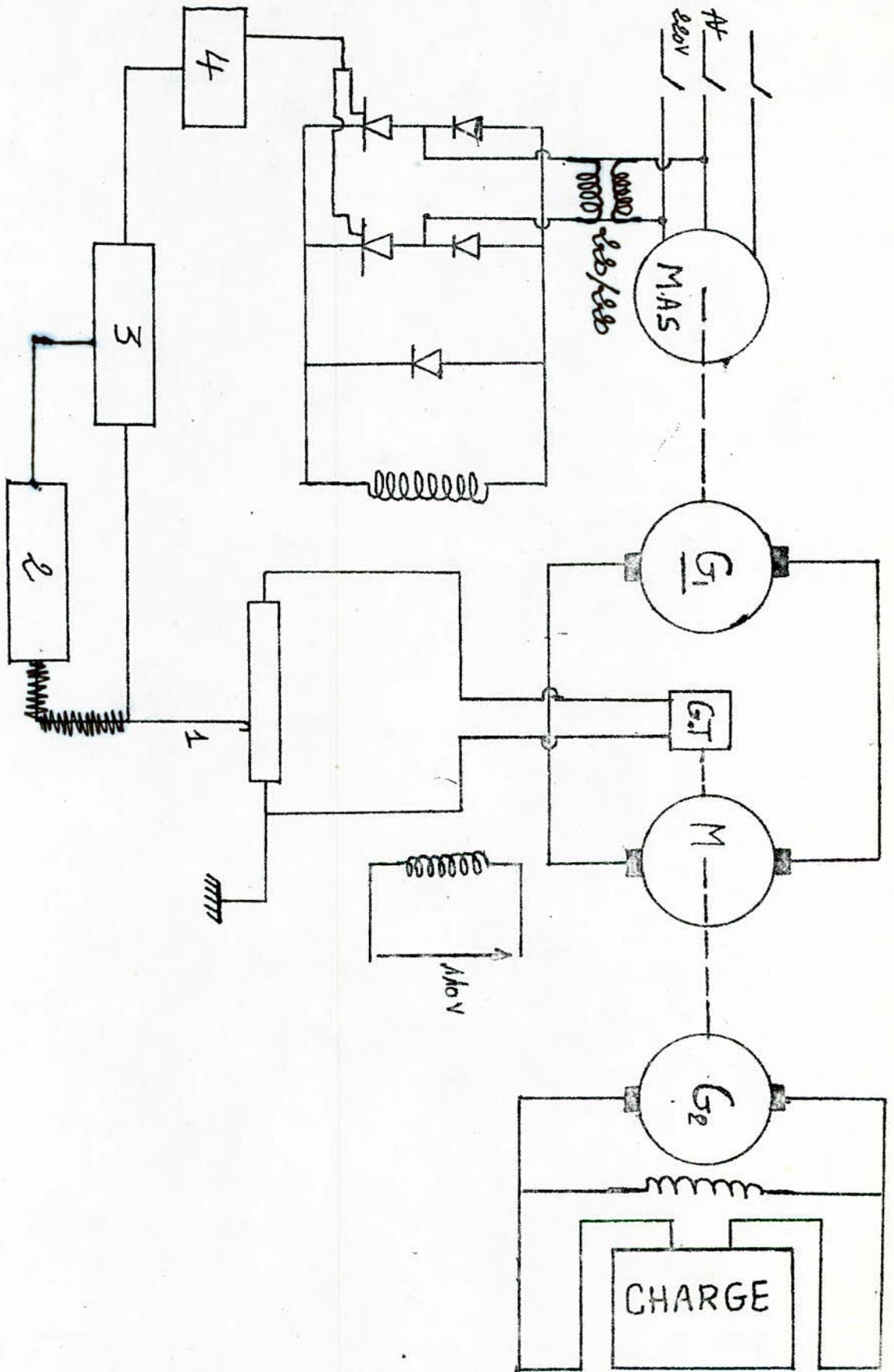
3.3: CHOIX DU SYSTEME DE COMMANDE :

3.3.1: PRINCIPE :

L'excitation s'opère à partir du réseau 50 Hz, par l'intermédiaire des thyristors et des diodes branchés en pont diphase commandé.

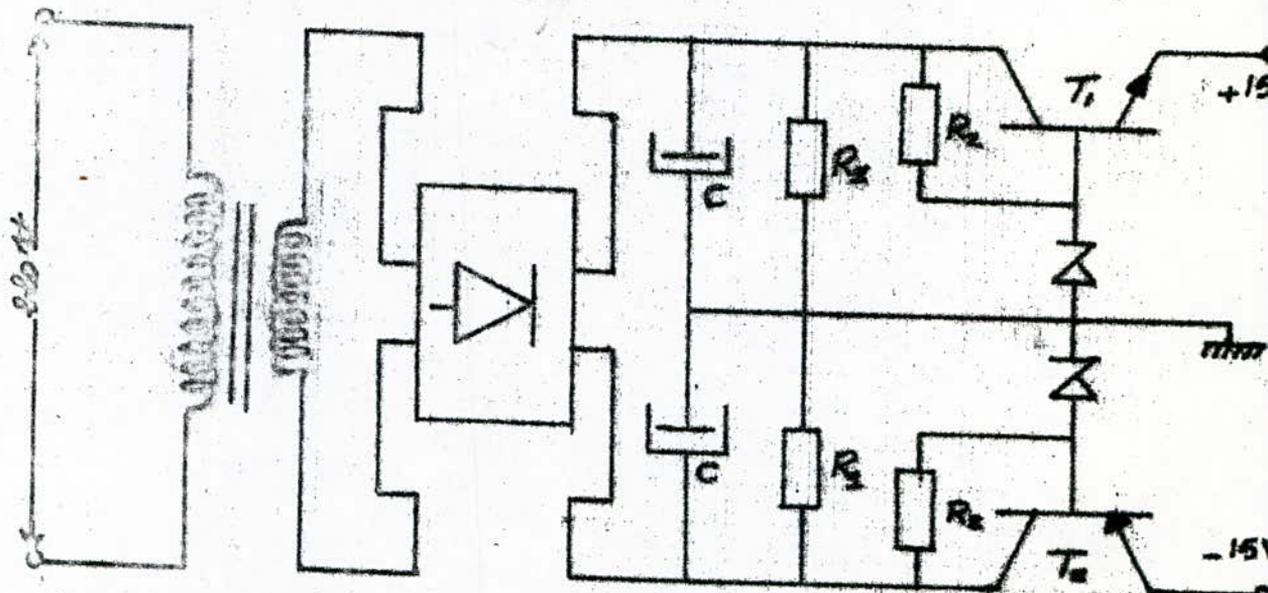
Le schéma de commande du système est représenté sur la figure 3-5.

- ① prélèvement de l'image de la vitesse donnée par la Génératrice tachymétrique.
- ② dispositif donnant une tension de référence.
- ③ Comparateur
- ④ dispositif de commande des thyristors.



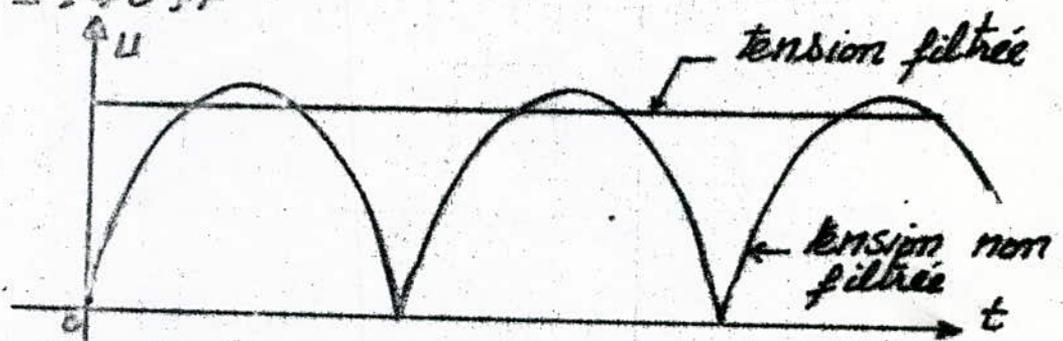
3.3.2: ALIMENTATION STABILISÉE :

L'alimentation stabilisée sert essentiellement pour alimenter les amplificateurs opérationnels



Le secondaire du transformateur abaisseur donne une tension alternative de 24 Veff.

Le redresseur (pont de Graetz biphasé) nous donne une tension positive non filtrée, le filtrage est assuré par les deux circuits RC avec $R_2 = 15 \text{ k}\Omega$ et $C = 740 \mu\text{F}$



Le point entre les deux capacités désigne la masse. Pour obtenir la tension 15V, on utilise un transistor

transistor NPN (2N3055), et une diode Zener qui limite la tension entre la base du transistor et la masse à 15V.

si on néglige la tension entre la base et l'émetteur (V_{BE}); la tension de sortie prise entre la masse et l'émetteur reste constante et égale à 15V.

Pour la partie négative, on utilise un transistor PNP (2N7906), la sortie prise entre la masse et l'émetteur est égale à -15V.

3.3.3: GÉNÉRATEUR D'IMPULSION :

Le redresseur nous délivre une tension positive ondulée, pour une tension inférieure à 0,7V, le 1^{er} transistor (2N1711) conduit et amplifie le signal d'entrée, pendant ce temps le 2^{ème} transistor (2N1711) est bloqué et la capacité de 0,1 μ F se charge. Pour une tension supérieure à 0,7V la diode (D_1) est conductrice et le rôle des deux transistors s'inverse; le 1^{er} transistor se bloque, le second conduit et il court-circuite la capacité (voir figure 3.6.)

Les impulsions obtenues sont amplifiées par les transistors (2N2219) et (2N2905), et le transformateur d'impulsions, à deux sorties, permet soit l'utilisation en série ou en parallèle des impulsions.

3.3.4. SCHÉMA GLOBAL DU SYSTÈME DE COMMANDE :

Pour fermer la boucle, plusieurs montages ont été réalisés.

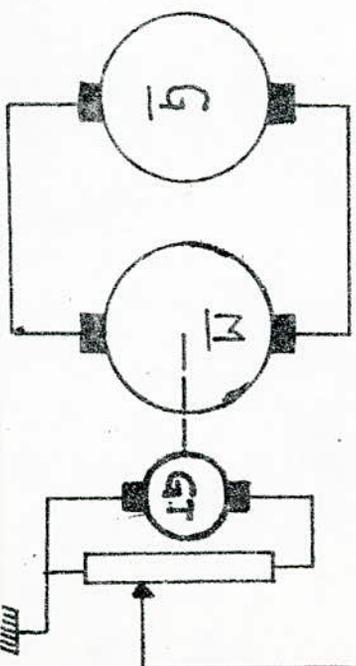
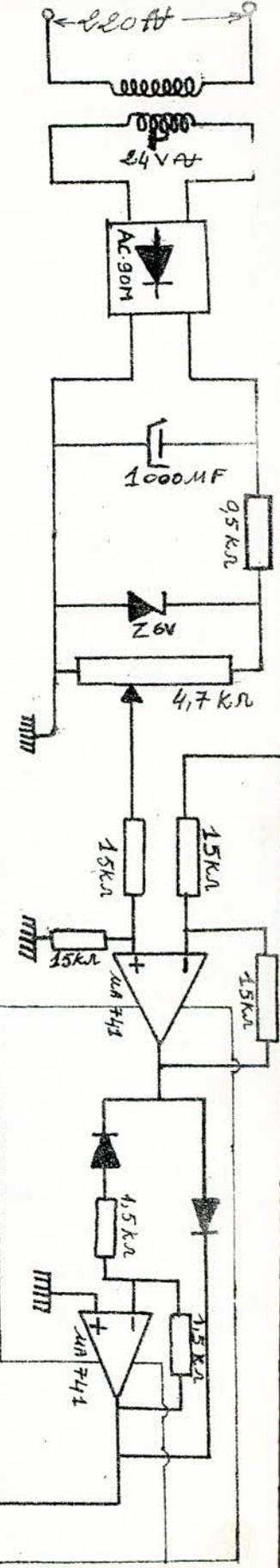
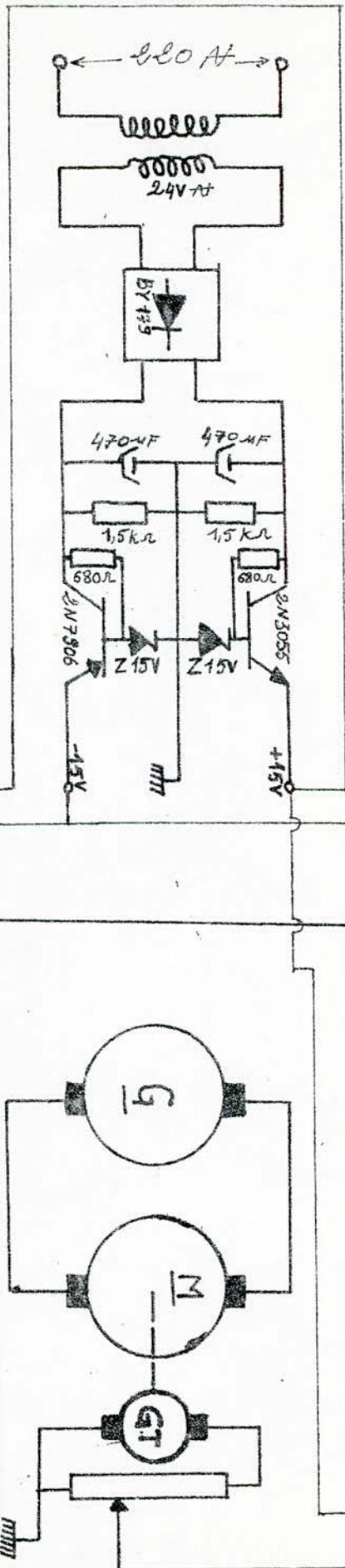
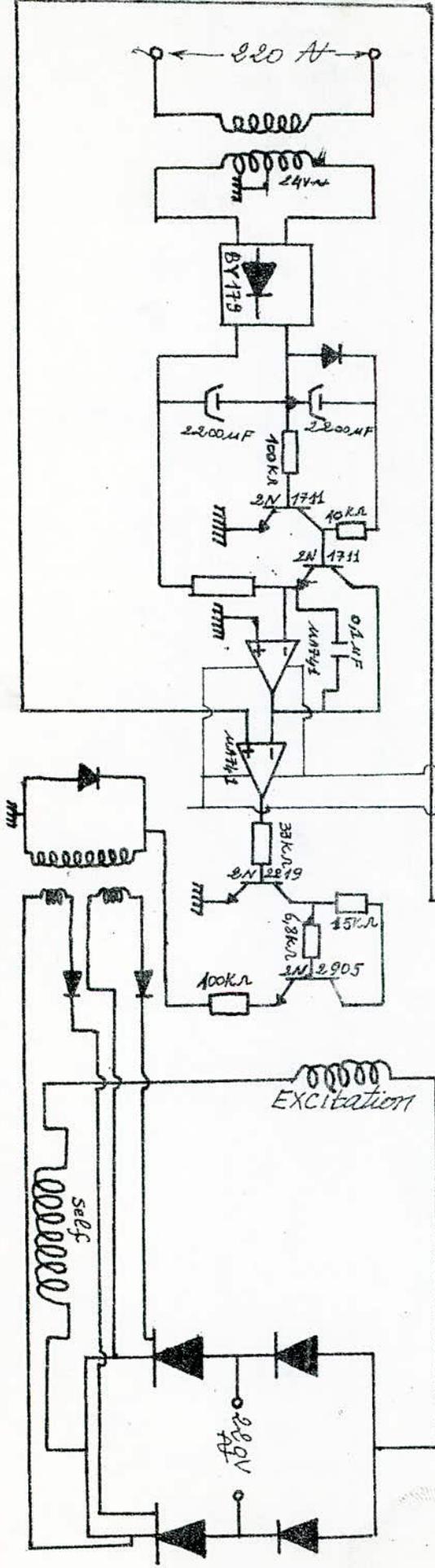
L'idée principale est d'avoir à la sortie du système choisi une tension positive égale à

$$V_s = V_f - V_t.$$

V_f : la tension de référence qui varie de 0 à 6V.

V_t : tension prise du retour tachymétrique désignant la vitesse (cette tension est prise égale à 6V pour la vitesse maximale souhaitée qui est de 1800 tr/mn.

Le schéma global du système de commande choisi est représenté sur la figure 3.7.



Excitation

Selc

220V

34: ETUDE DE LA CARACTERISTIQUE DE VITESSE EN BOUCLE FERMEE:-

En bout d'arbre du moteur de travail, on monte une Génératrice tachymétrique qui délivre une tension proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur $V_T = \delta' \omega$ avec $\delta' = 0,06 \text{ V/tr/mm}$.

Cette tension est comparée à la tension pilote recueillie aux bornes du potentiomètre (P).

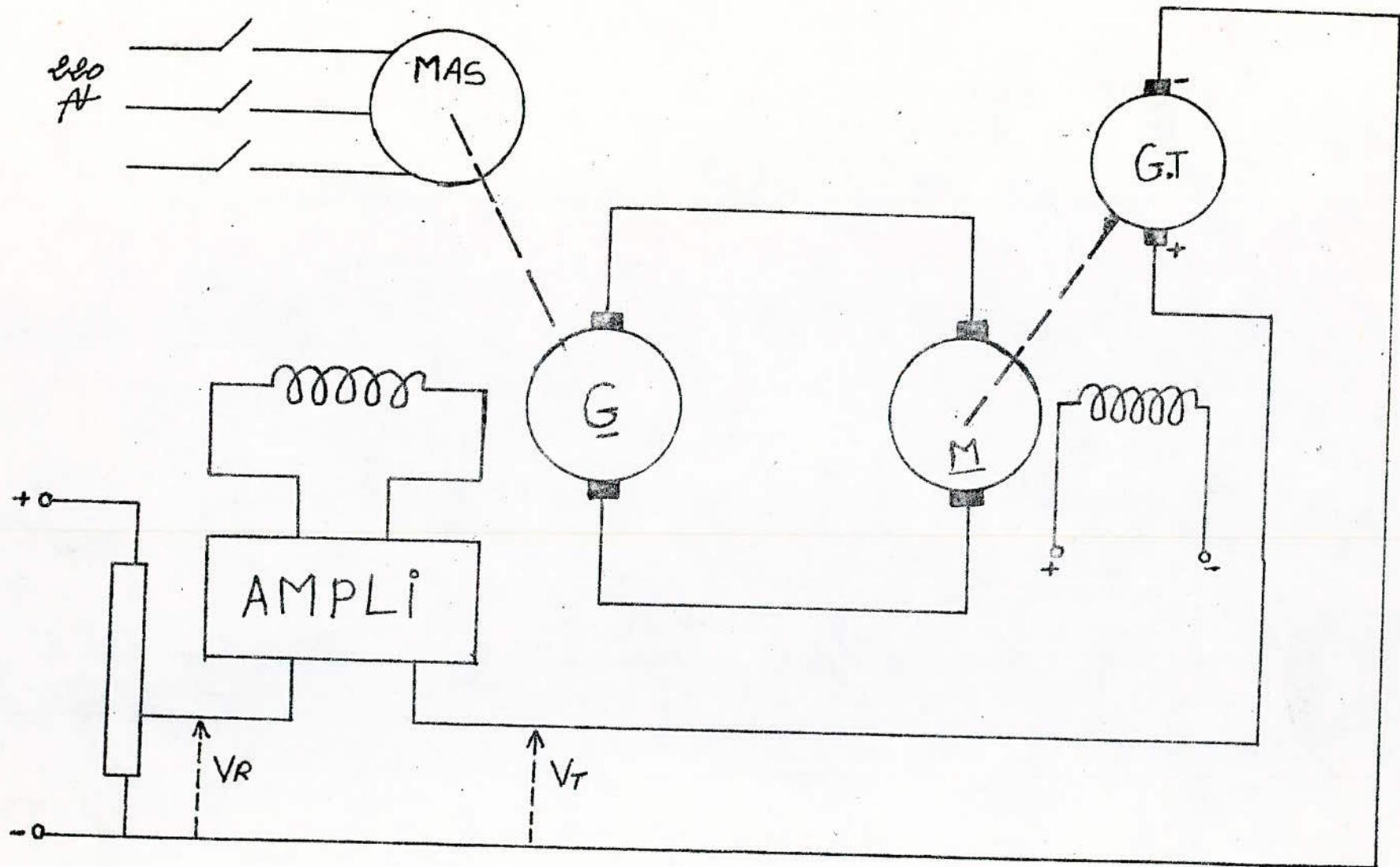
La différence entre les deux tensions $\Delta V = V_R - V_T$, après passage par l'amplificateur est appliquée à l'enroulement d'excitation de la Génératrice.

Une diminution éventuelle de la vitesse du moteur fait baisser la tension délivrée par la Génératrice tachymétrique, et par suite la différence ΔV augmente, la tension aux bornes du Génératrice et aux bornes du moteur augmente, ceci a pour effet un accroissement de la force électromotrice de la Génératrice qui compense la chute de vitesse du moteur.

Le degré de compensation est fonction du gain de l'amplificateur.

$$U_{ex} = (V_R - V_T) k_1 \quad \text{avec } k_1 = 18,3$$

k_1 : coefficient d'amplification (gain d'amplification).



et $E_g = U_{ex} k_2$, telle que E_g la tension s'élivree par la Génératrice aux bornes du moteur de travail.

k_2 : le gain de la Génératrice

et $E_g = R_a I + k \omega$ (moteur à excitation indépendante)

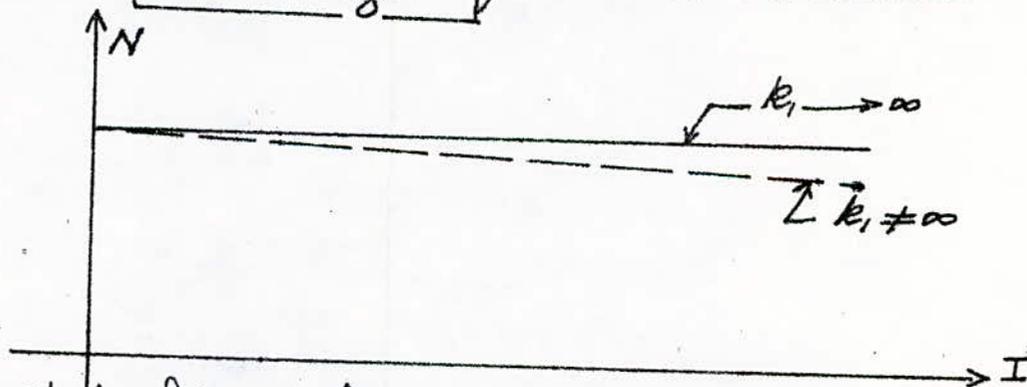
Comme l'excitation est constante donc $k = cte$.

d'après les équations précédentes on tire :

$$\omega = \frac{U_p}{\delta \left[1 + \frac{k}{k_1 \delta} \right]} - \frac{R_a I}{k_1 k_2 \delta \left[1 - \frac{k}{k_1 \delta} \right]}$$

Alors on remarque que si le gain de l'amplificateur augmente, la caractéristique de vitesse du moteur devient plus rigide, à la limite si k_1 tend vers l'infini

on aura : $\omega = \frac{U_p}{\delta}$ qui est une constante



Les résultats obtenus lors des essais, en prenant plusieurs points, sont les suivants :

$J_G = 0,15 A$				
$N [tr/mm]$	500	500	490	490
$I (A)$	3,5	5	11	15
$\Delta N [tr/mm]$	0	0	10	10

$$\Delta N_{max} = 10 \text{ tr/mm} \Rightarrow \Delta N_{max} = 2\%$$

$$\bar{J}_G = 0,34 A$$

$N [\text{tr/mm}]$	1000	1000	1000	990	990	985	976
$I (A)$	2,5	6	8,5	12	17	23	26
$\Delta N [\text{tr/mm}]$	0	0	0	10	10	15	24

$$\Delta N_{max} = 24 \text{ tr/mm} \Rightarrow \Delta N_{max} = 2,4\%$$

$$\bar{J}_G = 0,66 A$$

$N [\text{tr/mm}]$	1500	1500	1490	1485	1470
$I (A)$	3,7	7	10	15	25
$\Delta N [\text{tr/mm}]$	0	0	10	15	30

$$\Delta N_{max} = 30 \text{ tr/mm} \Rightarrow \Delta N_{max} = 2\%$$

$$\bar{J}_G = 1 A$$

$N [\text{tr/mm}]$	1800	1800	1790	1790	1780
$I (A)$	3,5	6,5	12,5	19	25
$\Delta N [\text{tr/mm}]$	0	0	10	10	20

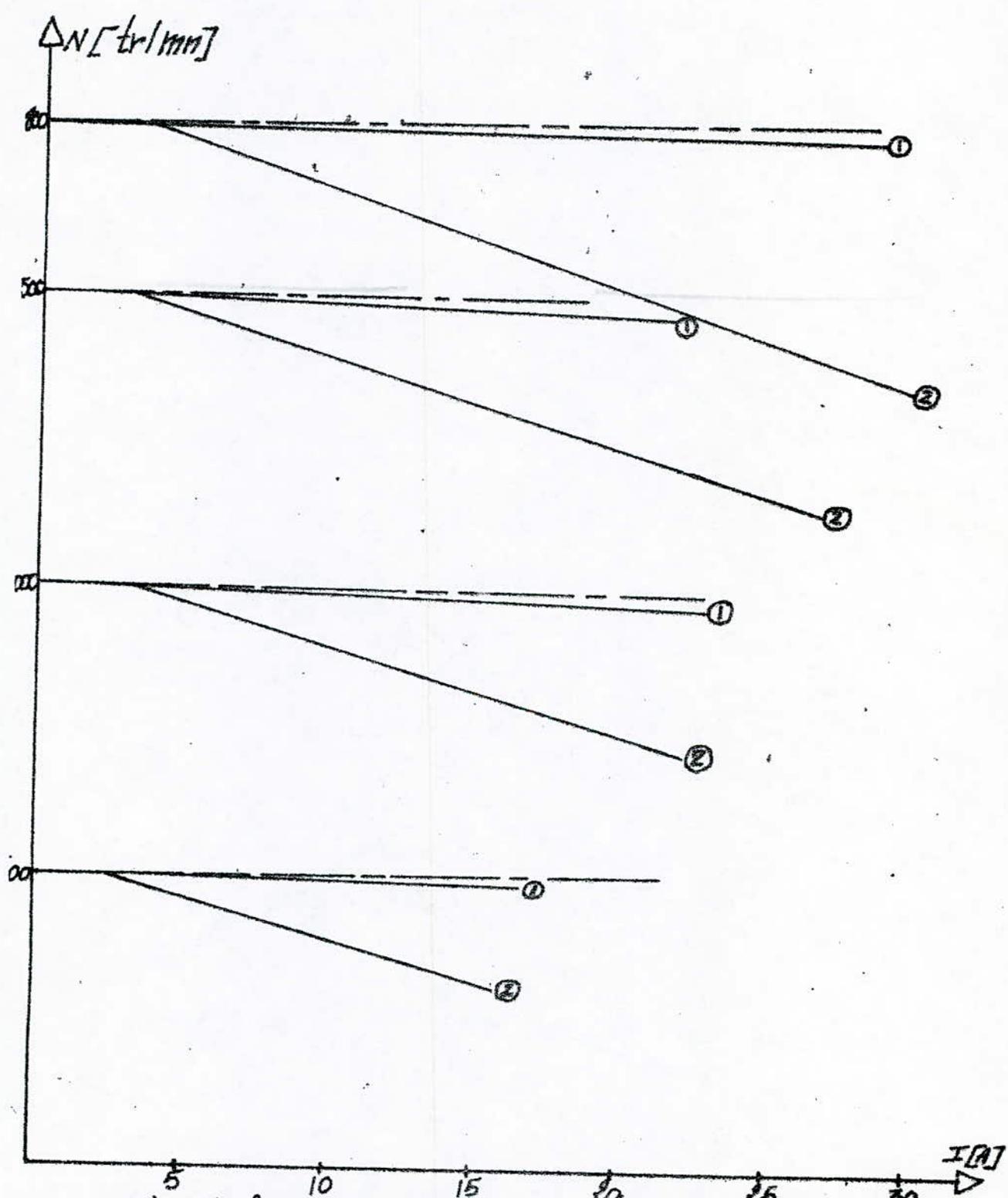
$$\Delta N_{max} = 20 \text{ tr/mm} \Rightarrow \Delta N_{max} = 1,1\%$$

3.5: INTERPRÉTATION DES RESULTATS ET CONCLUSION :

D'après les résultats obtenus, on remarque que la caractéristique de vitesse en boucle fermée n'est

n'est pas idéale (c'est à dire, elle n'est pas tout à fait constante), mais on a une faible chute de vitesse (2,4%) et $\Delta N_{max} = 30 \text{ tr/mm}$, qui peut être négligeable dans la plus part des cas.

Cette baisse de vitesse est due essentiellement au temps de réponse du système qui est important. Mais on peut dire que le système de commande réalisé peut bien être utilisé dans l'industrie dont l'erreur admise ne doit pas dépasser généralement les 5%.



① : représente les caractéristiques de vitesse en boucle fermée.
 ② : représente les caractéristiques de vitesse en boucle ouverte.

3.6: SUPPRESSION DU GROUPE WARD LEONARD ET COMMANDE DIRECTE DU MOTEUR:

Vue la grande intensité absorbée par le moteur à courant continu lors du démarrage, qui risquerait de le déteriorer, alors le démarrage des moteurs à courant continu ne doit pas se faire en appliquant directement la tension aux bornes de l'induit, on a trois possibilités pratiques pour réduire ce courant au démarrage.

a/ Si on dispose d'une tension continue réglable, le démarrage sera facile en démarrant à tension réduite puis la faire croître progressivement.

b/ EN utilisant le rhéostat de démarrage qu'on insère en série avec le circuit d'induit, les résistances seront ensuite successivement court-circuitées manuellement.

c/ EN utilisant des variateurs de tension, soit des composantes électronique, soit des convertisseurs tournants (Ward-Léonard).

Le réglage de la vitesse de ces moteurs demeure cependant difficile quand on dispose d'une tension continue fixe, c'est pourquoi on est amené à les alimenter par des variateurs de tension qui actuellement sont des dispositifs électroniques à thyristors

ou à transistor suivant la puissance du moteur. Vu la nécessité de trois machines principales que présente le Groupe "Ward - Leonard", qui a plusieurs inconvénients et surtout son prix qui est élevé et son faible rendement, on a essayé de faire la commande directe du moteur avec les convertisseurs électroniques à thyristors en supprimant le groupe "Ward - Leonard". L'excitation étant maintenue constante et égale à sa valeur maximale pour assurer le plus grand couple possible, son induit est alimenté par les convertisseurs électroniques.

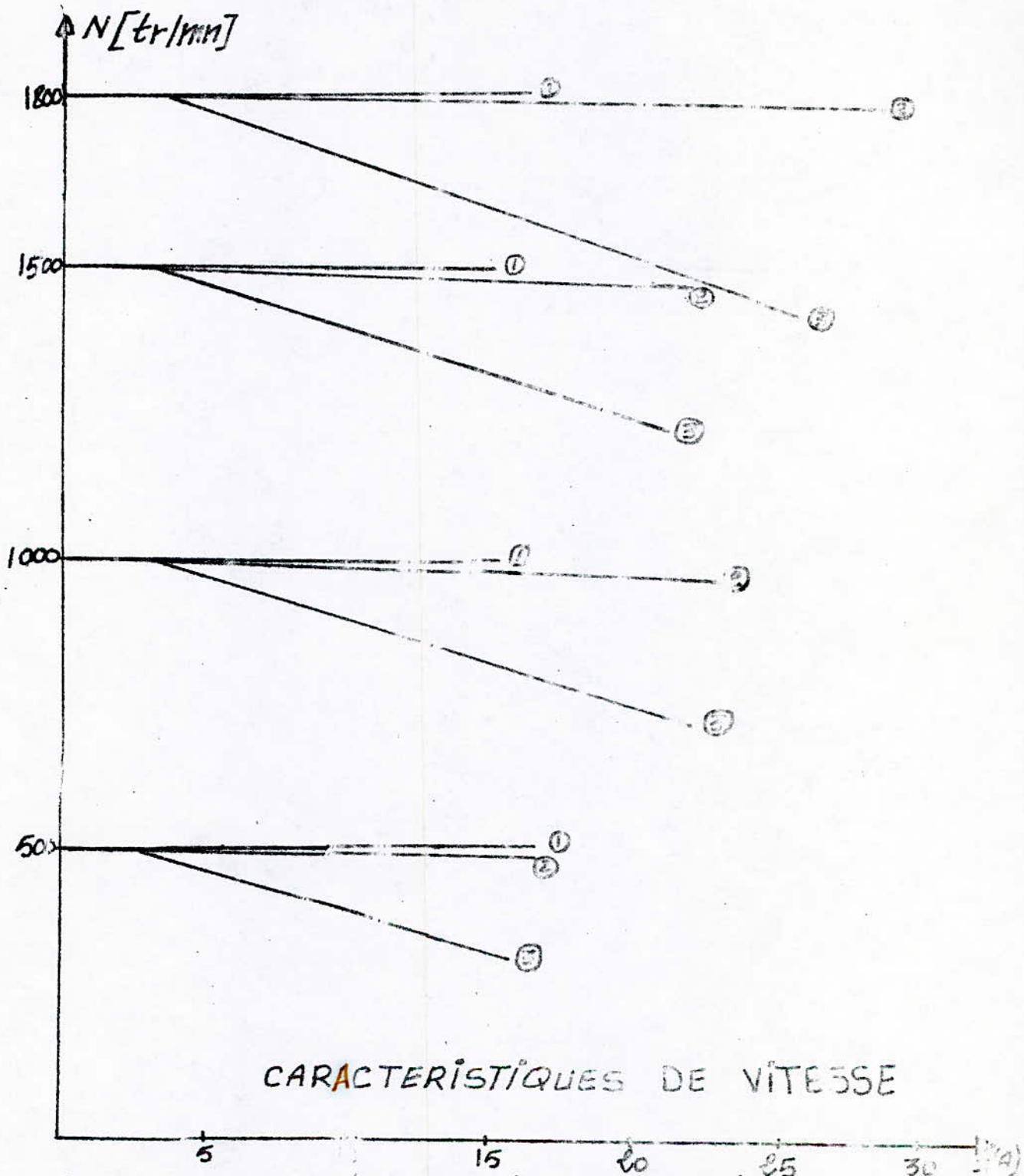
on a essayé de retracer les mêmes caractéristiques de vitesse pour pouvoir faire la comparaison

3.6.1: ETUDE DE LA CARACTERISTIQUE DE VITESSE:

Les essais en boucle fermée sur la commande directe du moteur ont donné les résultats suivants :

N [tr/mm]	500	500	500
I (A)	2	5	9

N [tr/mm]	1000	1000	1000	1000
I (A)	3,5	6	8	11,5



CARACTERISTIQUES DE VITESSE

① Commande directe du moteur en boucle fermée.

② Commande par "Ward Leonard" en boucle fermée.

③ Caractéristique de vitesse en boucle ouverte.

$N[\text{tr}/\text{mm}]$	1500	1500	1500	1500	1500
$I[A]$	3,5	5	7	9	11

$N[\text{tr}/\text{mm}]$	1800	1800	1800	1800	1800
$I[A]$	3	5,5	7	9	12

3.6.2 : INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET CONCLUSION

Les résultats obtenus en boucle ouverte pour la commande directe du moteur et la commande par le Groupe "Ward Léonard" sont presque les mêmes, mais la caractéristique de vitesse en boucle fermée lors de la commande directe du moteur est parfaitement constante, c'est à dire que la vitesse ne varie pas avec la charge, par contre la caractéristique en boucle fermée donnée par le groupe "Ward - Léonard" n'est pas parfaitement constante (vue précédemment).

En faisant une comparaison entre les deux modes de commande (commande directe du moteur et commande par Ward - Léonard), on remarque que la caractéristique de vitesse du moteur lors de la commande directe est meilleure que celle donnée par le groupe "Ward - Léonard".

et ceci est dû essentiellement au fait que le convertisseur électronique est plus sensible aux perturbations que celui de la commande par groupe "Ward Léonard" et n'oubliant pas la suppression de deux moments d'inertie, celui de la machine d'entraînement (Asynchrone) et celui de la Générateur qui augmentent le temps de réponse du système.

CONCLUSION :

Le groupe "Ward-Léonard" présente plusieurs avantages :

a/ Il est d'une extrême souplesse de vitesse, il permet la variation de vitesse avec faible chute, pour un réglage donné entre la marche à vide et la marche en pleine charge (réglage de vitesse précis).

b/ Le démarrage du moteur est très progressif sans pertes d'énergie dans le rhéostat de démarrage et sans appel brusque d'énergie sur le réseau (suppression du rhéostat de démarrage).

c/ L'appareillage est économique car tous les réglages se font sur des circuits de faibles puissances.

Il permet le freinage récupérateur, en effet quand on sous-excite la Génératrice (G), sa force électromotrice devient inférieure à celle du moteur de travail (M), dès lors (G) devient moteur et (M) Générateur et en même temps le moteur asynchrone d'entraînement tournant à l'hypermagnétisme devient Générateur.

Mais n'oubliant pas que le groupe "Ward-Léonard" présente aussi des inconvénients et surtout la nécessité de trois machines principales, son prix élevé, son faible rendement et aussi la caractéristique de vitesse n'est pas tout à fait constante (la chute de vitesse est presque négligeable - $\Delta N_{max} = 2,4\%$ - dans la plus part des cas).

Par contre la commande directe du moteur présente les mêmes avantages que précédemment avec le groupe "Ward-Léonard" et en plus l'encombrement est réduit, le rendement est meilleur (elle nécessite qu'une seule machine), et surtout la caractéristique de vitesse qui est une constante.

Alors on peut dire que le système de commande réalisé donne les meilleurs résultats pour la commande directe du moteur.

_ CHAPITRE 4 _

_ ETUDE DE LA STABILITÉ _

4.1: NOTIONS DE TRANSMITTANCE :

Etant donné un système linéaire à une grandeur d'entrée x et une grandeur de sortie y , on peut écrire la relation entre x et y sous la forme,

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

si on pose $p = \frac{d}{dt}$, nous obtenons :

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

Cette fonction équivalente à l'équation différentielle initiale s'appelle fonction de transfert ou transmittance du système, on la désigne par $H(p) = \frac{N(p)}{D(p)}$.

Lorsque p tend vers l'infini, $H(p)$ tend vers $\frac{k}{p^\alpha}$, avec α classe de la transmittance du système $x(t)$ étant donné, la solution y est de la forme

$$y = y_0 + y_1$$

y_0 : solution générale de l'équation sans second membre

y_1 : solution de l'équation complète.

y_1 peut se mettre sous la forme $y_1 = \sum_{k=1}^m C_k e^{p_k t}$

avec $p_k = \alpha_k + j \beta_k$

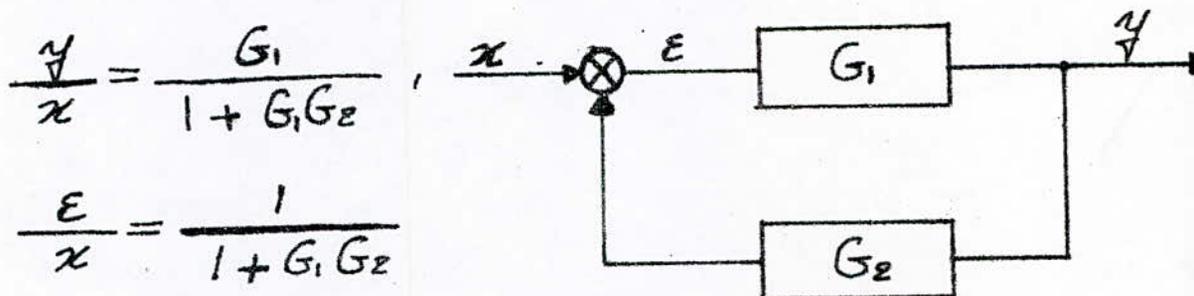
p_k : désigne les racines de l'équation caractéristique

$$D(p) = 0$$

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.

4.2: RAPPEL SUR LES SYSTEMES BOUCLÉS:

En pratique, la majorité des systèmes peuvent se ramener à une structure équivalente à celle représentée sur la figure suivante:



4.3: ETUDE HARMONIQUE DES SYSTEMES:

Un système, quelle que soit l'excitation qui lui est appliquée, doit être étudié en régime sinusoïdal, en prenant la fréquence comme paramètre variable.

Cette étude permet de définir la stabilité du système et sa réponse à une excitation quelconque.

Le système de premier ordre est de la forme:

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

Le système de 2^{ème} ordre est de la forme:

$$H(p) = \frac{1}{1 + 2\zeta\tau p + \tau^2 p^2}$$

4.3.1: DIAGRAMME DE BODE :

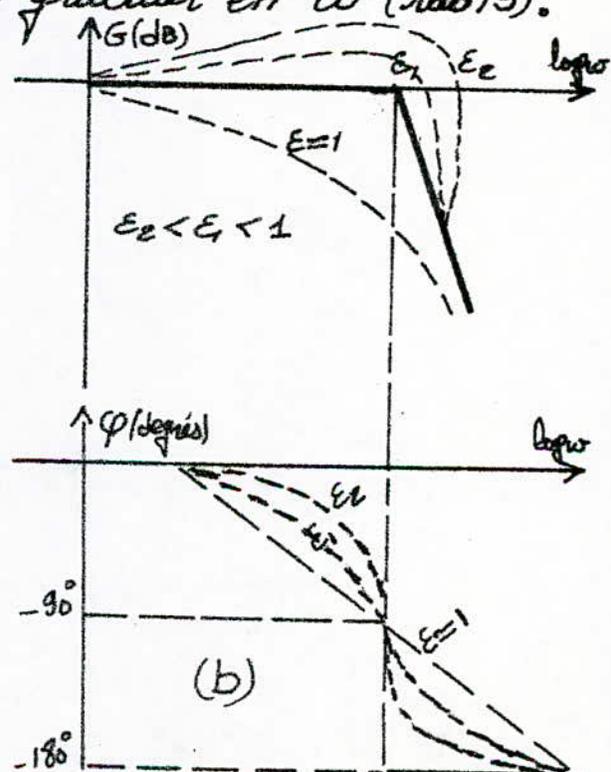
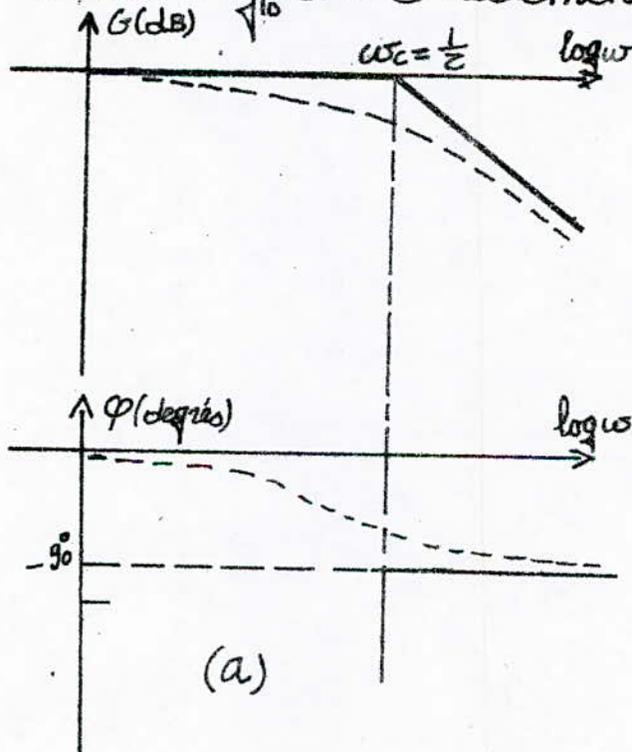
En Générale, l'étude en boucle fermée conduit à des expressions mathématiques très compliquées et difficilement exploitables.

On préfère alors étudier le système en boucle ouverte et en tirer des conclusions quand à son comportement en boucle fermée, pour cela on utilise la représentation de bode, c'est une représentation fréquentielle qui consiste à tracer les courbes de gain et de phase d'une transmittance en fonction de la fréquence du signal d'entrée.

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

$$\varphi = \text{Arg } H(j\omega).$$

L'axe $\log \omega$ est directement gradué en ω (rad/s).



(a) représente les courbes de gain et de phase d'un système du 1^{er} ordre.

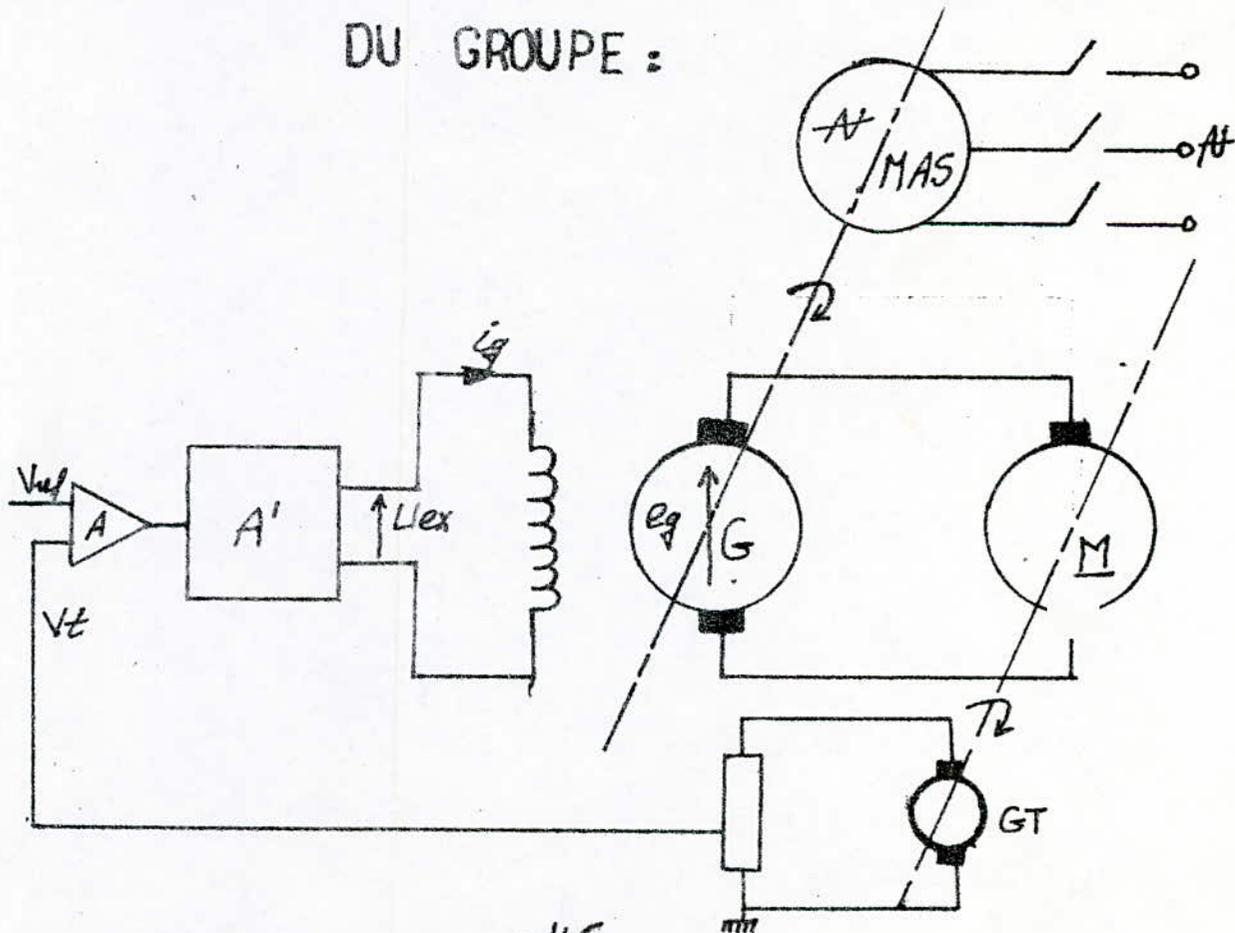
(b) représente les courbes de gain et de phase d'un système du e^{ème} ordre.

Si $\varepsilon > 1$, $H(p)$ se décompose en un produit de deux transmittances du 1^{er} ordre.

$H(p) = \left(\frac{1}{1 + \tau_1 p} \right) \times \left(\frac{1}{1 + \tau_2 p} \right)$, $-\frac{1}{\tau_1}$ et $-\frac{1}{\tau_2}$ désignent alors les racines réelles du dénominateur.

Le tracé asymptotique s'obtient en faisant la somme des ordonnées logarithmiques G et des phases φ relatives aux deux systèmes du 1^{er} ordre.

4.4 = DETERMINATION DES DIFFERENTS PARAMETRES DU GROUPE :



La tension V_T est proportionnelle à la vitesse :

$$V_T = k_t \omega \quad \text{avec } k = 3,2 \cdot 10^{-2} \text{ V/rad/s}$$

Le gain de l'amplificateur opérationnel $A = 1$ (on a à la sortie de l'amplificateur différentiel une tension égale à $V_{raf} - V_T$)

* Calcul du gain A' :

Pour une tension de 6V (tension de commande), on a une tension $U_{ex} = 110 \text{ V}$,

$$\text{donc } A' = \frac{110}{6} = 18,3$$

L'excitation du moteur est constante (excitation séparée), donc la force contre électromotrice du moteur est proportionnelle à la vitesse $e_m = k_m \omega$

Pour une vitesse égale à la vitesse nominale, la tension aux bornes de l'induit du moteur est 110V et le courant d'induit est égal à 32A

$$U_m = e_m + R_m I, \text{ pour le fonctionnement nominal on a : } e_m = 110 - 0,72 \cdot 32 = 87 \text{ V}$$

Ceci nous permet de calculer k_m . ($N = 1800 \text{ tr/min}$)

$$k_m = 0,46 \text{ V/rad/s}$$

La Génératrice tourne à une vitesse constante, elle est à excitation indépendante, donc on peut admettre que la F.E.M aux bornes de celle-ci est proportionnelle au courant d'excitation (la réaction magnétique

L'induit est compensée dans la machine utilisée).

$E_g = K_g i_g$, pour le fonctionnement on a :

$$U = 110 \text{ V et } I = 32 \text{ A, } E_g = U + R_a I$$

$$\text{Donc } E_g = 110 + 0,77 \cdot 32 = 135 \text{ V et } i_{gN} = 1,8 \text{ A}$$

$$K_g = 75 \text{ V/A}$$

Les constantes de temps mesurées pour les deux machines permettent de calculer les selfs de l'induit et l'inducteur des deux machines ($\tau = L/R$).

* pour le moteur on a :

$$\text{- l'induit : } \tau_m = 16,3 \text{ ms} \longrightarrow L_m = 11,7 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

$$\text{- l'inducteur : } \tau'_m = 0,295 \text{ s} \longrightarrow L'_m = 2,38 \text{ H}$$

* pour la Génératrice on a :

$$\text{- l'induit : } \tau_m = 28,4 \text{ ms} \longrightarrow L_g = 21,8 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

$$\text{- l'inducteur : } \tau'_m = 0,134 \text{ s} \longrightarrow L'_g = 2,12 \cdot 10^{-2} \text{ H}$$

Les moments d'inertie calculés sont :

$$J_m = 0,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_g = 3 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

4.5- DETERMINATION DU SCHEMA FONCTIONNEL DE LA MACHINE

4.5.1: EQUATIONS EN BOUCLE OUVERTE :

$$U_{\text{ex}} = R_{\text{ex}} i_g + l_g \frac{di_g}{dt}$$

$$e_g = e_m + R_t I + L_t \frac{dI}{dt}$$

e_g : F.e.m de la Génératrice.

e_m : f.c.e.m du moteur.

U_{ex} : la tension d'excitation de la génératrice.

$$R_t = R_{am} + R_{ag} = 1,49 \Omega$$

$$L_t = L_m + L_g = 33,5 \cdot 10^{-3} H$$

C_m : couple moteur

$$e_m = K_m \cdot \omega$$

$$C_m = C_u + J \frac{d\omega}{dt} -$$

$$C_m = K_m \cdot I \quad (\text{car } C_m = \frac{E \cdot I}{\omega} \text{ et } \omega = \frac{E}{K_m})$$

4.5.2: ÉQUATIONS EN BOUCLE FERMÉE ET

DIAGRAMME FONCTIONNEL:

On envisage des variations assez faibles de vitesse ω et de C_u (couple utile) autour du point de fonctionnement, pour que l'on puisse considérer le système comme linéaire, notons $V_r(p)$ la transformée de Laplace de $(+V_r(t) - V_{r0})$ avec V_{r0} désigne la tension de référence pour le point de fonctionnement désiré, de même pour $C_u(p)$, $\omega(p)$ et $V_t(p)$

Les équations du système asservi autour du point de fonctionnement (soit par exemple le point nominal) deviennent:

$$U_{ex} = A(V_r - V_t)$$

$$U_{ex} = (R_{ex} + L_g p) I_g$$

$$E_g = E_m + (R_t + L_t p) I$$

$$E_m = K_m \cdot \omega$$

$$C_m = C_u + J.P.\omega$$

$$C_m = K_m \cdot I$$

$$V_T = K_t \cdot \omega$$

$$E_g = K_g \cdot I_g$$

d'où, on tire de ces équations les valeurs de I_g , I et ω

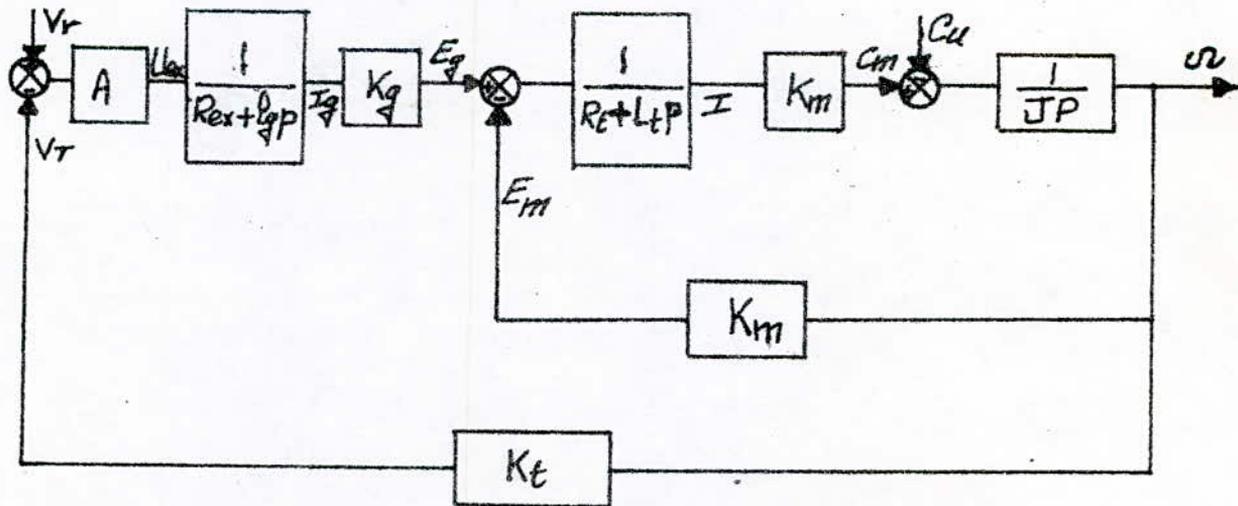
$$I_g = \frac{L_{ex}}{R_{ex} + L_g p}$$

$$I = \frac{E_g - E_m}{R_t + L_t p}$$

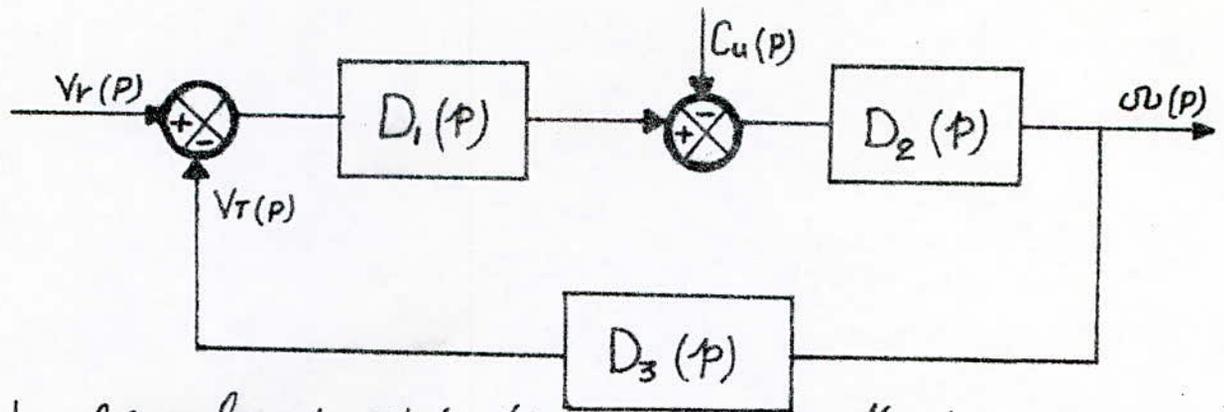
$$\omega = \frac{C_m - C_u}{J.P}$$

IL apparait donc directement le schéma fonctionnel global du système en boucle fermée suite à une faible variation ou perturbation.

Le schéma doit avoir comme entrée $V_r - V_T$ et comme sortie la vitesse $\omega(p)$.



ce schéma fonctionnel peut se mettre sous la forme réduite suivante.



Les formules de réduction nous permettent de donner l'expression de $D_1(p)$, $D_2(p)$ et $D_3(p)$.

$$D_1(p) = \frac{A K_g \cdot K_m}{(R_{ex} + L_g \cdot p)(R_t + L_t \cdot p)} = \frac{3415 \cdot A}{(39 + 2,28p)(1,49 + 33,5 \cdot 10^{-3}p)}$$

$$D_1(p) = \frac{0,59 A}{(1 + 0,058p)(1 + 0,0228p)}$$

$$D_2(p) = \frac{R_t + L_t p}{K_m^2 + J R_t p + J L_t p^2} = \frac{7(1 + 0,0228p)}{(1 + 0,7p + 0,016p^2)}$$

$$D_2 = \frac{7(1 + 0,0228p)}{(1 + 0,7p + 0,016p^2)}$$

$$D_3 = K_t = 3,8 \cdot 10^{-2} \text{ V/(rad/s)}$$

4.6: ETUDE DE LA FONCTION DE TRANSFERT:

La fonction de transfert en boucle ouverte est:

$$G(p) = D_1(p) \cdot D_2(p) \cdot D_3(p) = \frac{4,13 A \cdot K_t}{(1 + 0,058p)(1 + 0,7p + 0,016p^2)}$$

$$G_1 = \frac{K}{(1 + 0,058p)(1 + 0,7p + 0,016p^2)}$$

$$K = 4,13 A \cdot K_t$$

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$H(p) = \frac{K}{(1 + 0,058p)(1 + 0,7p + 0,016p^2) + K.Kt}$$

$$H(p) = \frac{K}{1 + 3,2 \cdot 10^{-2} K + 1,2p + 0,056p^2 + 8,9 \cdot 10^{-4} p^3}$$

4.6.1 - ETUDE DE LA STABILITÉ EN UTILISANT LE CRITÈRE DE ROUTH :

On étudie la stabilité du système en fonction de A, en utilisant le critère de Routh :

$8,9 \cdot 10^{-4}$	-----	$1,2$	3
$0,056$	-----	$1 + 3,2 \cdot 10^{-2} K$	2
$\alpha = 1,2 - \frac{8,9 \cdot 10^{-4} (1 + 3,2 \cdot 10^{-2} K)}{0,056}$	-----	0	1
$1 + 3,2 \cdot 10^{-2} K$	-----	0	0

Pour que le système soit stable, il faut que tous les termes de la 1^{ère} colonne soient positifs.

$$\alpha > 0 \rightarrow 1,2 - \frac{8,9 \cdot 10^{-4} (1 + 3,2 \cdot 10^{-2} K)}{0,056} > 0$$

$$\Rightarrow K < 2368 \text{ avec } K \text{ positif}$$

$$\text{or } K = 4,13 A \Rightarrow \boxed{A < 573}$$

donc le système est stable pour un gain A inférieur à 573, ceci convient bien, car dans notre cas $A = 18,3$

4.6.2 ETUDE DE LA STABILITÉ PAR REPRÉSENTATION DE BODE :

Cette méthode consiste à étudier le système en boucle ouverte et en tirer des conclusions en boucle fermée.

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

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

Si A désigne le point où $\varphi = -\pi$, l'accroissement ΔG_m qui amène ce point au point critique est appelé marge de gain.

Si B est le point tel que $G = 1$ ($\log_{10} G = 0$), l'accroissement $\Delta \varphi_m$ qui amène ce point au point critique est appelé marge de phase.

Pour avoir la stabilité il faut que $\Delta G_m \geq 10 \text{ dB}$ et $\Delta \varphi_m \geq 45^\circ$.

prenons $A = 18,3$ donc $K = 18,3 \cdot 4,13 = 75,57$

$$G(p) = \frac{75,57}{(1 + 0,058p)(1 + 0,7p + 0,016p^2)}$$

Le polynôme du 2^{ème} degré peut être mis sous forme de produit de deux polynômes de 1^{er} degré

$$\begin{aligned} 1 + 0,7p + 0,016p^2 &= 0,016(p + 1,48)(p + 42,26) \\ &= (1 + 0,675p)(1 + 0,023p) \end{aligned}$$

$$G(p) = \frac{75,57}{(1 + 0,058p)(1 + 0,675p)(1 + 0,023p)}$$

les fréquences de coupure sont :

$$\omega_1 = 1,48 \text{ rad/s}, \omega_2 = 17,24 \text{ rad/s}$$

$$\omega_3 = 43,5 \text{ rad/s}$$

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

$$G = 20 \log_{10} \left| \frac{75,57}{(1 + 0,052j\omega)(1 + 0,675j\omega)(1 + 0,023j\omega)} \right|$$

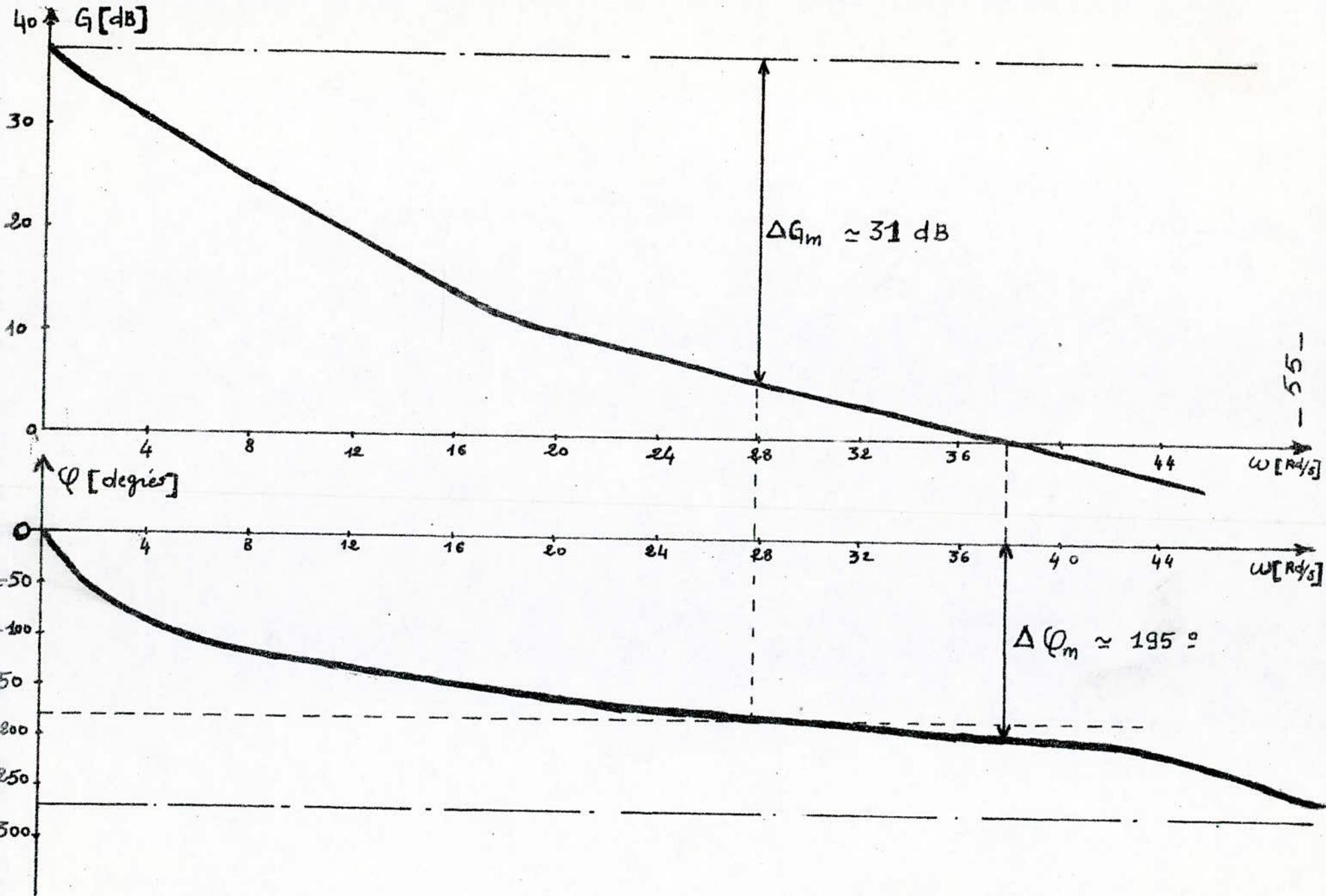
$$\varphi = \arg G(j\omega)$$

pour la représentation (voir figure 4.4).

on en tire les conclusions suivantes :

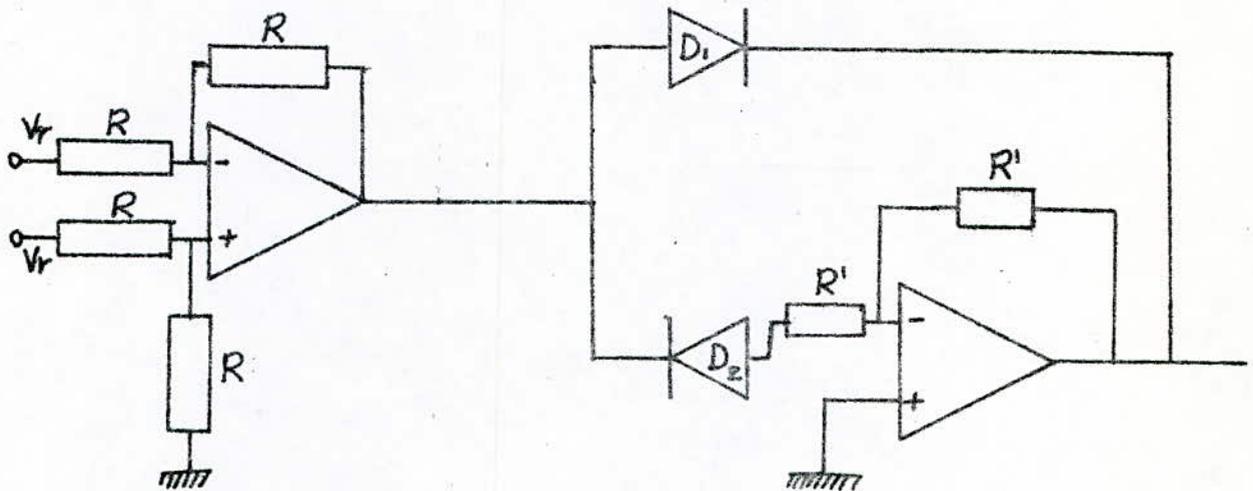
$$\text{marge de gain. } \Delta G_m = 31 \text{ dB}$$

$$\text{marge de phase } \Delta \varphi_m = 195^\circ$$



5. CORRECTION ET CONCLUSION :

les petites oscillations autour d'un point de fonctionnement, ont été diminuées par l'intégration du circuit correcteur à la sortie de l'amplificateur opérationnel



l'ondulation positive passe par D_1 directement à la sortie du correcteur, tandis que l'ondulation négative est contrainte à s'inverser en passant par la diode D_2 et l'inverseur et devient positive.

Néanmoins, les petites oscillations n'ont pas été totalement supprimées, ceci pourra être, à notre avis, le fait de la grande inertie du moteur et des autres machines tournantes.

Le fait de la grande inertie du système explique bien le temps de réponse très grand par rapport aux constantes de temps électriques.

On remarque aussi l'influence de la tension d'alimentation de l'excitation, qui n'est pas tout à fait continue (tension redressée), ceci engendre des oscillations qui se repercutent sur le comportement de tout le système.

En fin, la régulation de vitesse d'un moteur à courant continu est meilleure en utilisant l'alimentation directe de l'induit du moteur par les thyristors, car les oscillations sont pratiquement éliminées. Cependant, la commande des machines à courant continu peut être améliorée et le développement de l'électronique de puissance assure cette évolution :

- * Développement des transistors et des amplificateurs opérationnels de puissance qui pourraient remplacer les thyristors.
- * Développement des asservissements digitaux qui permettent de traiter les systèmes complexes en technique numérique depuis la régulation des processus jusqu'à la commande des thyristors.

BIBLIOGRAPHIE

- * Commande électronique des moteurs à courant continu — ROBERT CHAUPRADE
éditions Eyrolles. 1975.
- * Principe d'électronique
MALVINO — 1979
- * Electronique de puissance
H. BÜHLER
DUNOD 2^{ème} édition 1981
- * Problème d'automatique
J. P. ELLDY
DUNOD — 1981
- * Système asservis — série schaum.
- * Electrotechnique à l'usage des ingénieurs
DUNOD 10^{ème} édition