

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : **ELECTROTECHNIQUE**

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

**Simulation des Differentes Methodes
de Regulation de Vitesse d'un
Moteur a Courant Continu**

Proposé par :

Mr. H. CHEKIREB

Etudié par :

Med. Fouad. BENKHORIS
TOUFIK. REKIOUA

Dirigé par :

Mr H. CHEKIREB

PROMOTION :

JUIN 1986



REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier vivement notre promoteur Monsieur: H.CHEKIREB qui a accepté de diriger ce travail et lui exprimer notre profonde gratitude pour l'aide constant, le dévouement et les conseils éclairés qu'il nous a prodigué.

Nous adressons également nos plus vifs remerciements à tous les professeurs qui ont contribué à notre formation.

Que les membres de jury veuillent bien trouver ici nos respectueux remerciements.

DEDICACES

A MON PERE

A MA MERE

A MES FRERES ET SOEUR

A TOUS MES PROFESSEURS ET MES AMIS INTIMES

A TOUS LES CROYANTS EN DIEU

JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL

BENKHORIS MOHAMED FOUAD

A MON PERE ET MA MERE

A MES DEUX FRERES ET MES DEUX SOEURS

A MA FAMILLE ET A TOUS AMIS INTIMES

JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL

REKIOUA TOUFIK

NOTATIONS

SYMBOLE	DESIGNATION
E	f.c.e.m du moteur
Eg	fem de la génératrice
FBF(P)	fonction de transfert en boucle fermée de courant
FBO(P)	fonction de transfert en boucle ouverte de courant
GBF(P)	fonction de transfert en boucle fermée de la vitesse
GBO(P)	fonction de transfert en boucle ouverte de la vitesse
Gcm(P)	fonction de transfert du convertisseur de courant
GRI(P)	fonction de transfert du régulateur de courant
GRN(P)	fonction de transfert du régulateur de vitesse
H	le pas de calcul
i	courant d'induit du moteur
In	courant nominal
Ir	grandeur relative du courant
J	moment d'inertie des parties tournantes
Jn	courant d'excitation nominal
Kcm	gain du convertisseur de courant
Kf	coefficient de frottement
Kg	constante de la f.e.m de la génératrice
Km	constante de la f.c.e.m du moteur
La	inductance de l'induit du moteur
Lt	inductance de l'induit du moteur plus celle du convertisseur
Mm	couple moteur
Mr	couple résistant
Nn	vitesse nominale
Nr	vitesse relative

P	opérateur laplacien
Po	pertes à vide
Ra	resistance de l'induit du moteur
R	résistance du rhéostat plus celle de l'induit du moteur
Rh	résistance du rhéostat de démarrage
Rg	résistance de l'induit de la génératrice
Rc	résistance de l'induit de la génératrice plus celle de la charge
Rt	résistance de l'induit du moteur plus celle du convertisseur du courant
S	l'énergie
t	le temps
Tcm	constante de temps du convertisseur
Te	constante de temps électrique
Tem	constante de temps électromécanique
Tii	constante de temps d'intégration du régulateur de courant
Tiv	constante de temps d'intégration du régulateur de vitesse
Tni	constante de temps proportionnelle du régulateur de courant
Tnv	constante de temps proportionnelle du régulateur de vitesse
U	tension d'alimentation
Un	tension nominale
Ur	tension relative

W vitesse
wn pulsation propre
y(t) réponse indicielle
z coefficient d'amortissement

SOMMAIRE

INTRODUCTION

CHAPITRE I ETUDE DU DEMARRAGE RHEOSTATIQUE

1.1 SPECIFICATION DU MOTEUR-----	3
1.2 MISE EN EQUATION DU PROBLEME-----	4
1.3 PROGRAMME DE SIMULATION-----	5
1.4 CALCUL DU RHEOSTAT DE DEMARRAGE-----	{3

CHAPITRE II

ETUDE LA REGULATION EN CASCADE ET EN PARALLELE

2.1 ETUDE DE LA REGULATION EN CASCADE-----	13
2.1.1 COURANT ET VITESSE EN REGIME LIBRE-----	14
2.1.2 DIAGRAMME FONCTIONNEL DE LA REGULATION EN CASCADE-----	15
2.1.3 CALCUL DU REGULATEUR DE COURANT-----	17
2.1.4 REPOSE INDICIELLE DE LA BOUCLE COURANT-----	19
2.1.5 CALCUL DU REGULATEUR DE VITESSE-----	21
2.1.6 REPOSE INDICIELLE DE LA BOUCLE VITESSE-----	24
2.1.7 INFLUENCE D'UNE PERTURBATION DE COUPLE SUR LE COURANT ET LA VITESSE-----	25
2.1.8 LIMITATION DU GRADIENT DE COURANT-----	32
2.1.9 SIMULATION DE LA REGULATION EN REGIME DE GRANDES VBARIATIONS (DEMARRAGE DU MOTEUR)-----	34
2.2 REGULATION DU COURANT ET DE LA VITESSE PAR BOUCLES PARALLELES-----	44
2.2.1 INTRODUCTION-----	44
2.2.2 DIAGRAMME FONCTIONNEL DE LA REGULATION EN PARALLELE-----	44
2.2.3 CALCUL DU REGULATEUR DE COURANT -----	44

2.2.4 CALCUL DU REGULATEUR DE VITESSE-----	45
2.2.5 REPONSES INDICIELLES DES BOUCLES COURANT ET VITESSE	45
2.2.6 SIMULATION DE LA REGULATION PAR BOUCLES PARLLELES--	45
CHAPITRE III	
SIMULATION ANALOGIQUE	
3.1 INTRODUCTION-----	51
3.2 SCHEMA DIRECTEUR DU MOTEUR-----	51
3.3 SCHEMA DE CABLAGE DU MOTEUR -----	52
3.4 SCHEMA DE CABLAGE DU CONVERTISSEUR DE COURANT-----	54
3.5 SCHEMA DE CABLAGE DU REGULATEUR DE COURANT-----	54
3.6 SCHEMA DE CABLAGE DU REGULATEUR DE VITESSE-----	55
3.7 SIMULATION DE LA REGULATION DU COURANT	
ET DE LA VITESSE-----	55
CONCLUSION- - - - -	59
ANNEXE	
BIBLIOGRAPHIE	

INTRODUCTION

Le développement de l'électronique de puissance à entraîné, de grands progrès dans l'industrialisation des variateurs de vitesse électronique, qui constituent un domaine particulièrement important dans les applications industrielles.

L'industrie, au sens large du terme, et les transports utilisent de plus en plus des systèmes à vitesse continuellement variable, doués de souplesse et de précision. Bien sur les variateurs électroniques sont de loin les plus appréciés, et ceci est dû aux progrès de l'automatisation qui permet d'asservir la vitesse des moteurs à divers points de fonctionnement.

Les moteurs à courant continu présentent toutes les qualités pour fonctionner à vitesse variable, à condition de régler la tension d'alimentation d'induit.

Dans la régulation de la vitesse des moteurs à courant continu plusieurs grandeurs sont à asservir :

_la variable principale, celle qui doit être asservie en dernier lieu.

_les variables secondaires, celles qui doivent être limitées afin de pas nuire au bon fonctionnement du moteur.

Notre étude est la simulation numérique des différentes méthodes de commandes de vitesse d'un moteur à courant continu, ce qui nous permet de tester plusieurs configurations

Dans le premier chapitre, nous donnons les hypothèses de travail

ainsi que la simulation numérique du démarrage rhéostatique du moteur en régime libre.

Dans le second chapitre, nous introduisons deux méthodes de régulation de vitesse: la régulation en cascade multibouclée et en parallèle dont nous calculons les régulateurs. nous équipons ces régulations d'une limitation de courant et d'une fixation de son gradient nous observons leurs effets sur le comportement du courant.

Le troisième chapitre se donne pour but la vérification des résultats de la régulation en cascade sur simulateur analogique.

CHAPITRE: I

ETUDE DU DEMARRAGE RHEROSTATIQUE

1.1: SPECIFICATION DU MOTEUR:

Le moteur est chargé par une génératrice, en excitation indépendante, maintenue constante. La génératrice débite sur un groupe de résistances de charge, le couple résistant sur l'arbre du moteur est donc proportionnel à la vitesse de rotation cependant à chaque niveau de charge correspond un coefficient de forttement K_f .

Le moteur porte sur la plaque signalitique, les indications suivantes:

Type d'excitation: Séparée
 Vitesse nominale: 1800 tr/mn
 Inducteur: tension $U_n=110V$ courant $J_n=0.9A$
 Induit: tension $U_n=110V$ courant $I_n=24A$

Les mesures effectuées sur le moteur ont donné les résultats suivants:

_ Résistance de l'induit: $R_a=0.26 \text{ ohms}$
 _ L'inductance de l'induit: $L_a=9.2 \text{ mH}$
 _ Constante de la f.c.e.m du moteur à excitation constante
 $K_m=0.6 \text{ V.s/rd}$
 _ Pertes à vide à la vitesse nominale: $P_0=360.75 \text{ W}$
 _ Moment d'inertie des parties tournantes: $J=0.081 \text{ Kg.m}^2$
 _ Coefficient du frottement: $K_f=0.01 \text{ m.N/rd.s}$

Les mesures effectuées sur la génératrice ont donné les résultats suivants:

_Résistance de l'induit: $R_g=1.6 \text{ ohms}$

_Constante de la f.e.m : $K_g=0.64 \text{ V.s/rd}$

Les mesures effectuées, sur le rhéostat de démarrage ont donné:

$R_{h1}=1/4 \Omega$, $R_{h2}=0.75 \Omega$, $R_{h3}=0.35 \Omega$, $R_{h4}=0.26 \Omega$ et $R_{h5}=0.14 \text{ ohms}$

La résistance à la charge nominale est $R_c=4.28 \text{ ohms}$

1.2: MISE EN EQUATION:

Le moteur est régi par les équations suivantes:

_Equation électrique du moteur:

$$U=E+R \cdot i+L_a \cdot di/dt \quad 1_1$$

_Equation mécanique:

$$M_m-M_r=J \cdot dW/dt \quad 1_2$$

_Equation de conversion électromécanique:

$$M_m=K_m \cdot i \quad 1_3$$

$$E=K_m \cdot W \quad 1_4$$

Ces équations supposent que le moteur est bien compensé, et que la réaction d'induit est négligeable.

Au niveau de la génératrice on a:

$$U_g=E_g-R_g I_g - R_{ch} \cdot I_g$$

$$\text{d'ou : } I_g=K_g \cdot W/R_c \quad \text{tq: } E_g=K_g \cdot W$$

$$R_c=R_{ch}+R_g$$

Le couple électromagnétique est donné par:

$$M_{em}=K_g \cdot i_g=K_g^2 \cdot W/R_c$$

d'ou le couple résistant $M_r=(K_f+K_g^2/R_c) \cdot W$

En posant $K_r=K_f+K_g^2/R_c$, on obtient les deux équations suivantes:

$$di/dt=U/L-R \cdot i/L-K_m \cdot W/L \quad 1_5$$

$$dW/dt=K_m \cdot i/J-K_r \cdot W/J \quad 1_6$$

1.3: PROGRAMME DE SIMULATION

Pour la résolution du système d'équations différentielles linéaires, par la méthode de RUNGE KUTTA du 4^o ordre est le suivant:

Notre système est de la forme:

$$dy_1/dt = f_1(t, y_1, y_2)$$

$$dy_2/dt = f_2(t, y_1, y_2)$$

Avec $y_1 = i(t)$ et $y_2 = v(t)$

d'où le système d'équation suivant:

$$f_1(t, y_1, y_2) = U/La - R.y_1/La - Km.y_2/La$$

$$f_2(t, y_1, y_2) = Km.y_1/La - Km.y_2/La$$

L'algorithme de la solution du système d'équations différentielles linéaires, on utilise la méthode numérique de RUNGE KUTTA du quatrième ordre est le suivant :

$$y_{1i+1} = y_{1i} + (k_{11} + 2.k_{12} + 2.k_{31} + k_{14})/6$$

$$y_{2i+1} = y_{2i} + (k_{21} + 2.k_{22} + 2.k_{23} + k_{24})/6$$

$$H = t/n : \text{le pas de calcul}$$

avec:

$$k_{11} = H.f_1(t_i, y_{1i}, y_{2i})$$

$$k_{21} = H.f_2(t_i, y_{1i}, y_{2i})$$

$$k_{12} = H.f_1(t_i + H/2, y_{1i} + k_{11}/2, y_{2i} + k_{21}/2)$$

$$k_{22} = H.f_2(t_i + H/2, y_{1i} + k_{11}/2, y_{2i} + k_{21}/2)$$

$$k_{13} = H.f_1(t_i + H/2, y_{1i} + k_{12}/2, y_{2i} + k_{22}/2)$$

$$k_{23} = H.f_2(t_i + H/2, y_{1i} + k_{12}/2, y_{2i} + k_{22}/2)$$

$$k_{14} = H.f_1(t_i + H/2, y_{1i} + k_{13}, y_{2i} + k_{23})$$

$$k_{24} = H.f_2(t_i + H/2, y_{1i} + k_{13}, y_{2i} + k_{23})$$

Nous donnons l'organigramme (Fig:1.1) et le programme voir

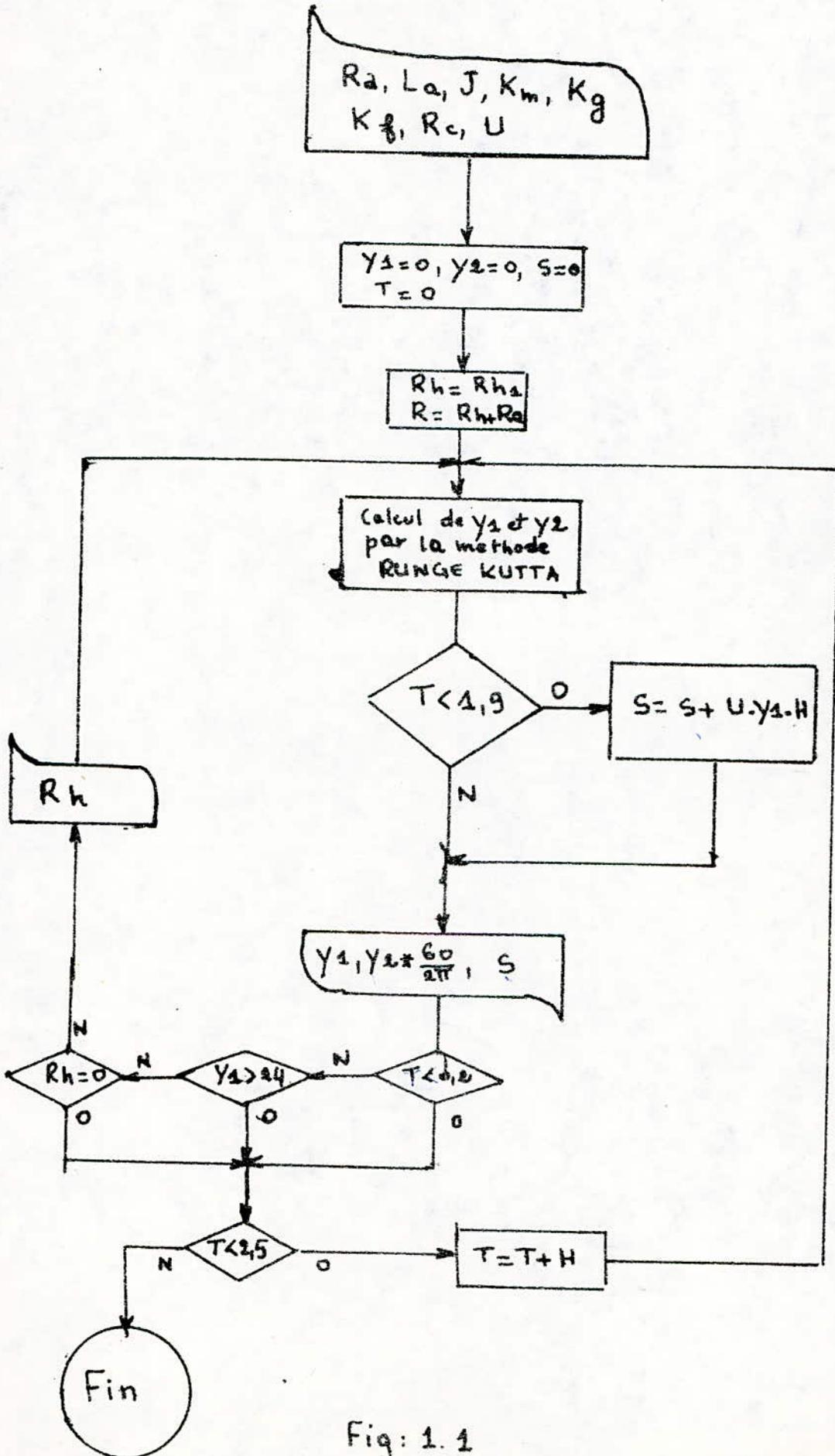


Fig: 1.1

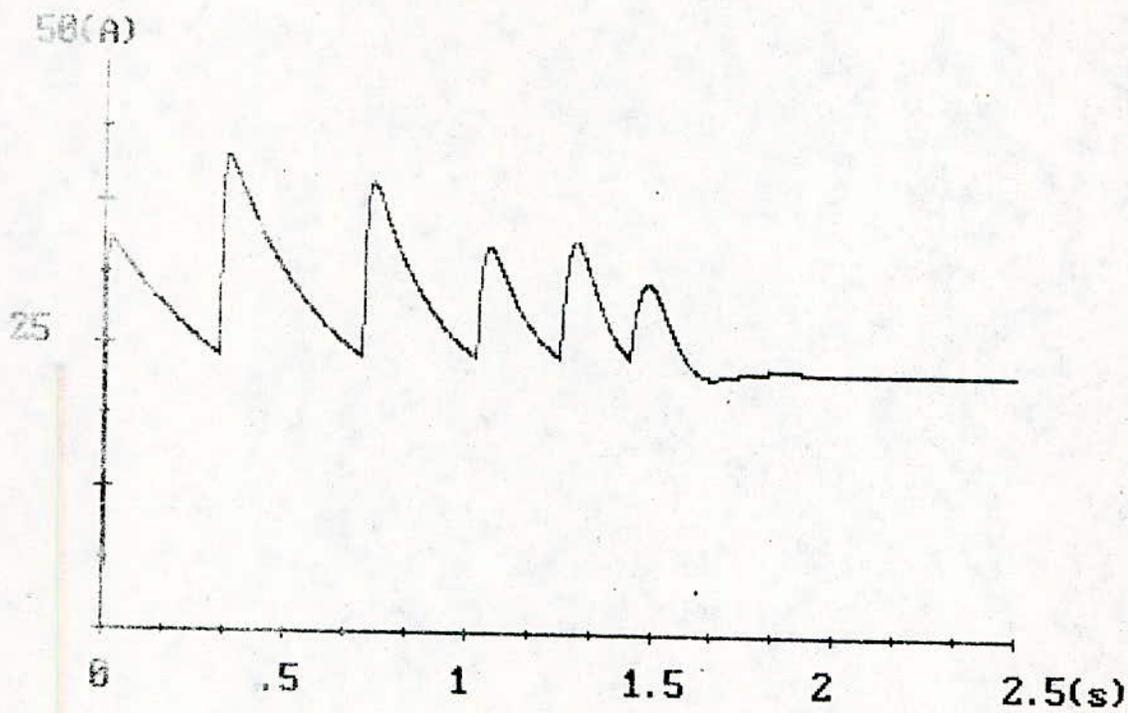


Fig:4.2 courbe du courant $I(t)$ au démarrage

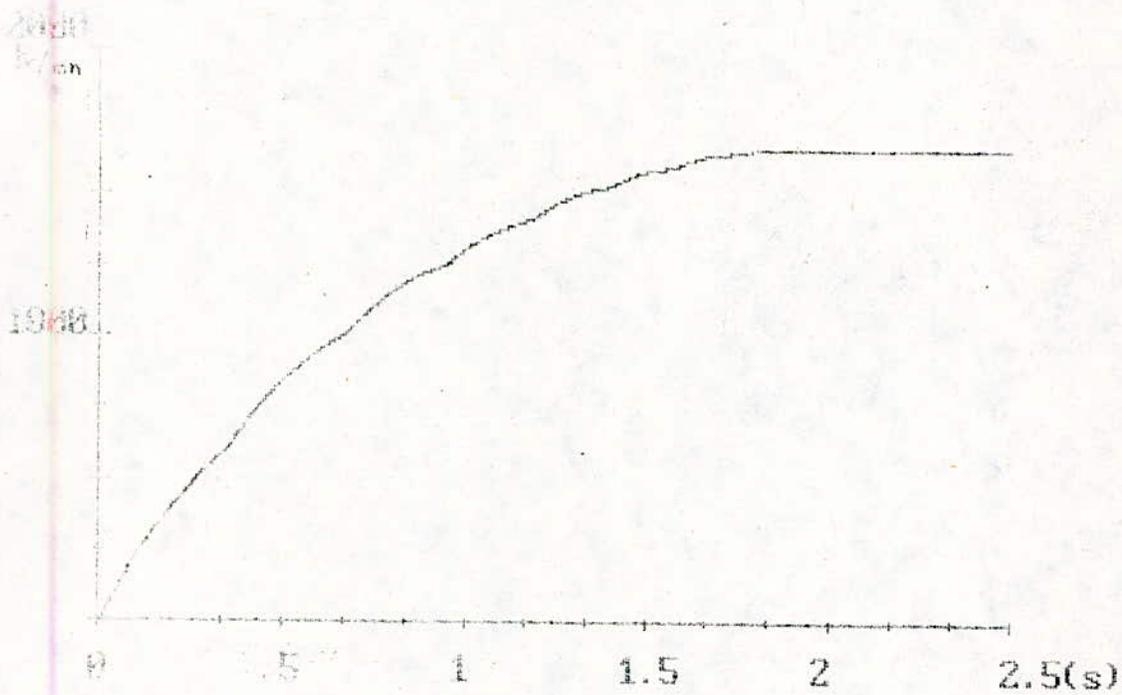


Fig:4.3 vitesse n (tr/min) au démarrage

(annexe:1), qui nous permettent de calculer les variations du courant et de la vitesse lors du démarrage rhéostatique .

A chaque fois que, que le courant arrive à sa valeur nominale, on élimine une résistance du rhéostat et ainsi de suite jusqu'au court-circuit total du rhéostat.

Pour le calcul d'énergie nécessaire au moteur pour qu'il arrive au point de fonctionnement, on utilise l'intégration par la méthode des rectangles:

$$S = \sum_{k=1}^n U \cdot i(k.H) \cdot H$$

On constate qu'au moment où on élimine les résistances du rhéostat de démarrage , les pointes du courant ne sont pas toujours dans plage admissible ($I_n, 1.5I_n$) . Par exemple, la première pointe est de $1.4I_n$, par contre la deuxième est de $1.7I_n$.

Le temps mis par le moteur pour atteindre son régime permanent est de 1.9 s.

1.4: CALCUL DU RHEOSTAT DE DEMARRAGE

De la lois de variation du courant en fonction du temps (Fig:1.2) on constate que le rhéostat de démarrage utilisé n'est pas adapté au moteur, car normalement lors démarrage le courant doit varier entre deux limites:

$$I_{max} = 1.5I_n \text{ et } I_{min} = I_n$$

Pour le calcul du rhéostat , on utilise la caractéristique de vitesse $W(i)$, (Fig:1.4) du moteur.

L'équation du moteur en régime permanent est:

$$U = E + R \cdot i \quad 1_7$$

d'où:

$$W = (U - R \cdot i) / K_m \quad 1_8$$

A flux constant et tension d'alimentation constante, maintenant i constant, la caractéristique $N(Rh)$ est une droite (Fig:1.4):
à $i = I_{max}$, la caractéristique $N(Rh)$ est représentée par le segment AA1.

à $i = I_{min}$, la caractéristique $N(Rh)$ est représentée par le segment BB1.

De la construction graphique, on déduit que le rhéostat de démarrage se compose de 7 résistances en séries dont les valeurs sont:

$$Rh1 = 1.05, Rh2 = 0.65, Rh3 = 0.4, Rh4 = 0.3, Rh5 = 0.17, Rh6 = 0.13 \text{ et } Rh7 = 0.05 \Omega$$

L'exploitation du programme (annexe 1), pour ce type de rhéostat nous a permis de tracer la courbe du courant fig:1.5.

L'adaptation du rhéostat de démarrage, nous a permis d'éliminer les pointes de courant supérieur à $1.5 I_n$.

La fig:1.5 représente en fonction du temps la variation du courant lors du démarrage par un rhéostat adapté de 7 sections. Donc l'augmentation du nombre de sections, a permis de maintenir le courant de démarrage dans la plage admissible, mais nécessite un appareillage coûteux.

Le temps mis par le moteur pour atteindre son régime permanent

est le même $t = 1.9s$.

$$Rh1 = 1.05, Rh2 = 0.65, Rh3 = 0.4, Rh4 = 0.3, Rh5 = 0.17, Rh6 = 0.13 \text{ et } Rh7 = 0.05$$

L'exploitation du programme annexe 1, pour ce type de rhéostat nous a permis de tracer la courbe du courant fig:1.5.

L'adaptation du rhéostat de démarrage, nous a permis d'éliminer

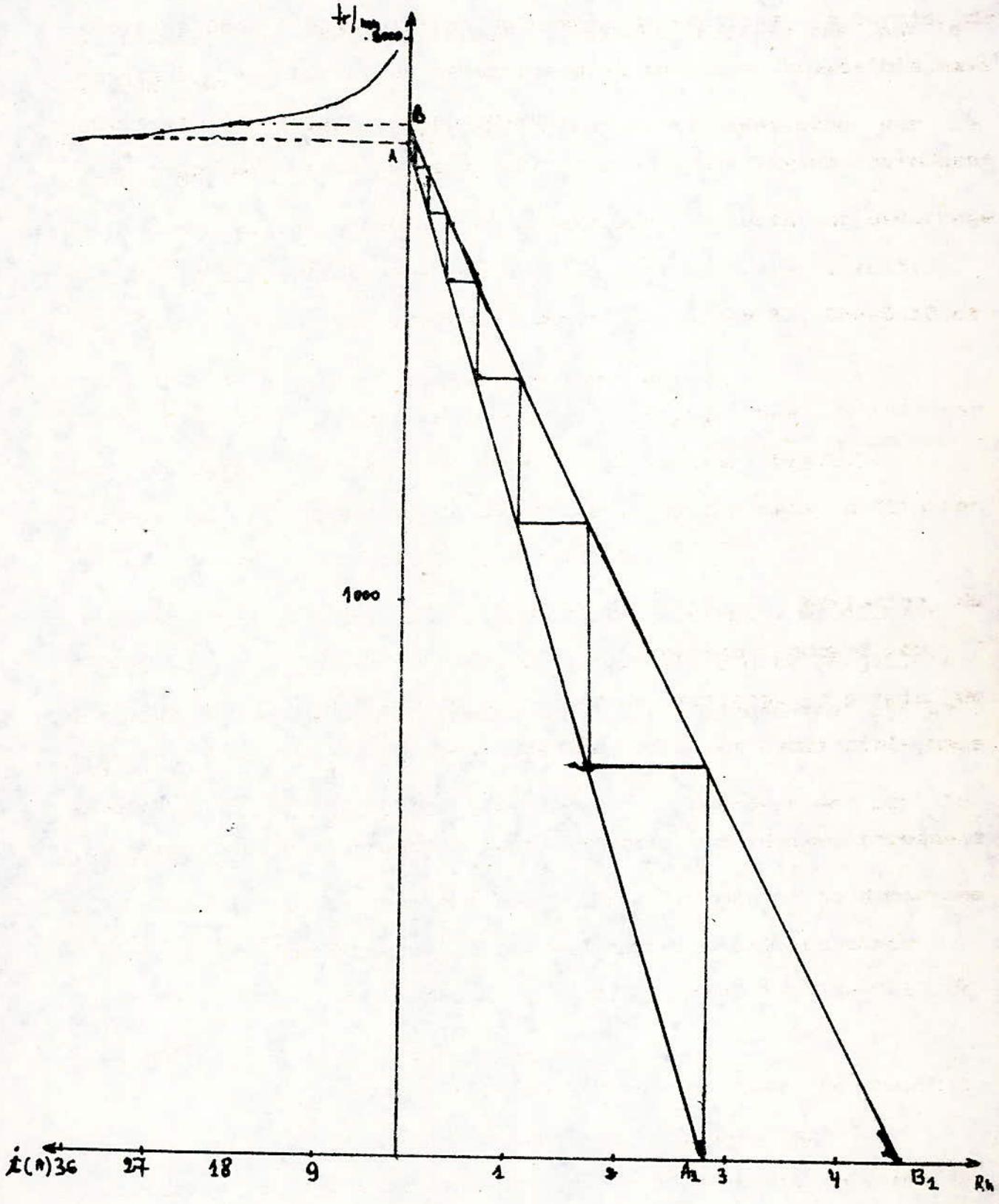


Fig : 1.4

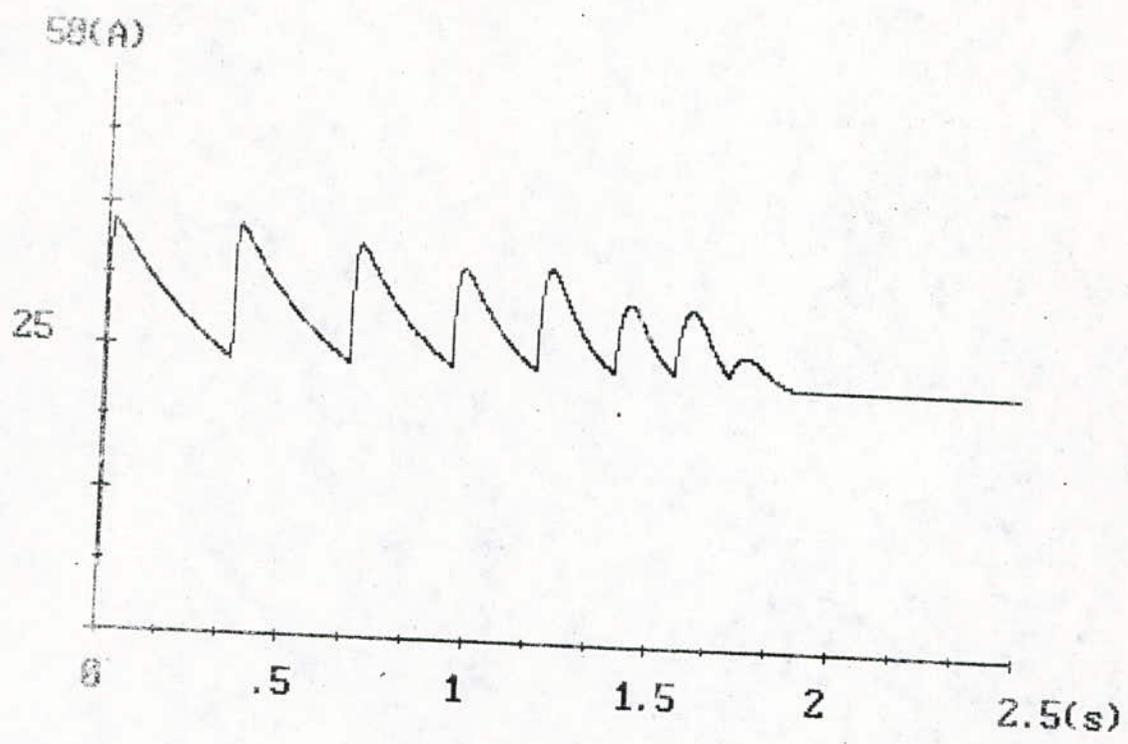


Fig: 1.5 courant au démarrage avec le rhéostat adapté

L'énergie consommée par le moteur pour atteindre son régime permanent est : $S=5866.61 \text{ kJ}$

CHAPITRE II

ETUDE DE LA REGULATION EN CASCADE ET EN PARALLELE

2.1:ETUDE DE LA REGULATION EN CASCADE

Le rôle essentiel d'un système de régulation est d'obliger la ou les grandeurs asservies à conserver des valeurs aussi proches que possible de celle que l'on considère comme idéales. Ces valeurs idéales ou théoriques sont à leurs tours des fonctions des grandeurs d'entrées du système:((référence)) et ((perturbation)).

Il y'a essentiellement trois concepts des systèmes d'asservissement en usage aujourd'hui:

- _la régulation en boucles convergentes.
- la régulation en boucles multiples,linéaires ou en cascade
- _la régulation à boucle en parallèle ou à commutation en

Ces trois types de régulations permettent de contrôler la variable principale et de limiter les variables secondaires.

Dans cette première partie on s'intéresse à la régulation en boucles multiples en cascade dont le système de régulation comporte un régulateur individuel pour chacune des variables contrôlées ,dans notre cas la variable asservie principale c'est le courant d'induit.

Le système de régulation en cascade a certains avantages:

- _la présence d'un régulateur séparé pour chacune des variables contrôlées, chaque boucle peut être ajustée à l'optimum .

- on ajuste successivement les caractéristiques (statiques et dynamiques) des différents boucles en partant de la plus interne

jusqu'à la boucle externe.

-on passe aisement et sans à-coup d'un mode fonctionnement à un autre.

-l'étude, le calcul et la mise en route sont simples et suivent une méthode directe.

2.1.1: COURANT ET VITESSE EN REGIME LIBRE

Nous avons vu au chapitre précédent que le moteur est régi par deux équations la première électrique, la seconde mécanique :

$$U = R_t \cdot i + L_t \cdot \frac{di}{dt} + K_m \cdot W \quad 2_1$$

$$K_m \cdot i = M_r + J \cdot \frac{dW}{dt} \quad 2_2$$

La transformée de Laplace appliquée au système donne:

$$U(P) = (R_t + L_t \cdot P) \cdot i(P) + K_m \cdot W(P)$$

$$M_r(P) = K_m \cdot i(P) - J \cdot P \cdot W(P)$$

En résolvant le système d'équations on aboutit au résultat suivant:

$$i(P) = \frac{(T_{em} \cdot P / R_t) \cdot U(P) + M_r(P) / K_m}{(T_e \cdot T_{em} \cdot P^2 + T_{em} \cdot P + 1)} \quad 2_3$$

$$W(P) = \frac{(U(P) / K_m) - R_t (1 + P \cdot T_e) \cdot M_r(P) / K_m}{(T_e \cdot T_{em} \cdot P^2 + T_{em} \cdot P + 1)} \quad 2_4$$

avec:

$$T_e = L_t / R_t = 16 \text{ ms} \quad \text{: constante de temps électrique}$$

$$T_{em} = R_t \cdot J / K_m = 170 \text{ ms} \quad \text{: constante de temps électromécanique}$$

La vitesse et le courant sont donc des grandeurs dont les réponses à une variation de tension et du couple résistant est du deuxième ordre généralement $T_{em} \gg T_e$

Dans ce cas une bonne approximation du dénominateur nous donne:

$$1 + T_{em}.P + T_e.T_{em}.P^2 = (1 + P.T_{em}).(1 + P.T_e) \quad 2-5$$

a) REPONSE A UNE PERTURBATION DE LA TENSION

Si l'on suppose que le couple résistant M_r reste constant lors d'une variation de la tension d'alimentation, cela se traduit par l'équation $M_r(P)=0$

$$i(P) = (T_{em}.P / R_t).U(P) / ((1 + T_e.P).(1 + T_{em}.P)) \quad 2-6$$

$$W(P) = (U(P) / K_m) / ((1 + T_e.P).(1 + T_{em}.P)) \quad 2-7$$

La réponse de la vitesse et du courant à un échelon de tension a l'allure indiquée sur la figure: 2.1

Le courant après un certain régime transitoire revient à sa valeur initiale, donc le courant n'est pas sensible à la variation de tension, par contre la vitesse est sensible à la variation de la tension.

b) REPONSE A UNE PERTURBATION DU COUPLE RESISTANT

Dans ce deuxième cas on suppose que la tension d'alimentation est constante ce qui se traduit par $U(P)=0$

$$i(P) = (M_r(P) / K_m) / ((1 + T_e.P).(1 + T_{em}.P)) \quad 2-8$$

$$W(P) = -(R_t.M_r(P) / K_m) / ((1 + T_e.P).(1 + T_{em}.P)) \quad 2-9$$

La réponse de la vitesse et du courant à un échelon de couple résistant a l'allure indiquée sur la figure: 2.2

En maintenant la tension constante et en faisant varier le couple résistant, on constate que la vitesse et le courant sont sensibles à cette variation, on a une chute de la vitesse et un accroissement du courant.

2.1.2: DIAGRAMME FONCTIONNEL DE LA REGULATION EN CASCADE

Le schéma bloc de la régulation en cascade comprend les

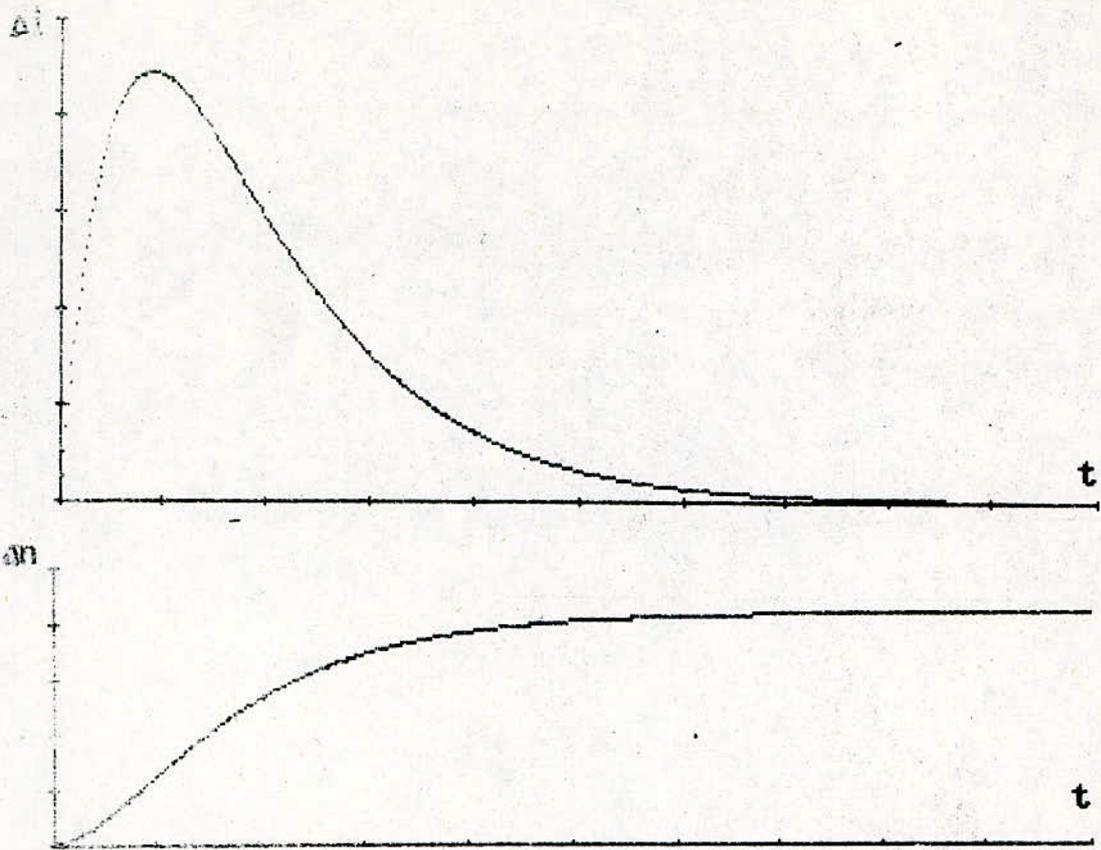


Fig:2.1 Réponse du courant et de la vitesse à un échelon de tension.

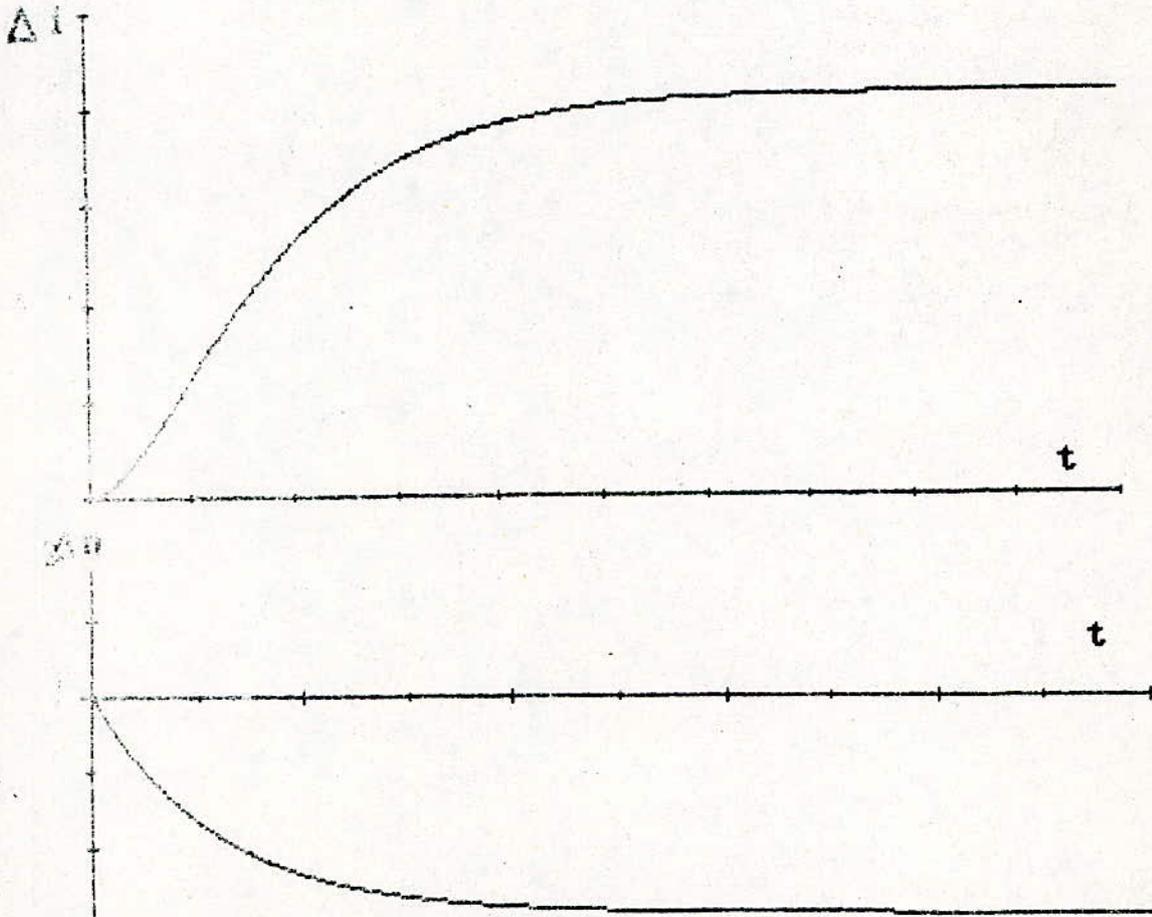


Fig: 2.2 Réponse du courant et de la vitesse à un échelon de courant.

diagrammes blocs: du moteur , le convertisseur de courant, le régulateur de courant et le régulateur de vitesse figure:2.3

Le convertisseur de courant est représenté par une fonction de transfert de premier ordre de constante de temps T_{cm} et de gain K_{cm} :

$$G_{cm}(P) = K_{cm} / (1 + T_{cm}.P) \quad 2-10$$

La constante de temps T_{cm} représente le retard mis par le convertisseur afin de fournir la tension à sa sortie .

Le convertisseur est supposé être un redresseur en pont triphasé dont la valeur moyenne du retard est de l'ordre de 2 ms ($T_{cm} = 2ms$). Généralement la constante de temps électrique du moteur industrielle est très faible par rapport à sa constante de temps électromécanique. Ainsi on simplifie le système , en éliminant la boucle de retour de la f.c.e.m du moteur (figure:2.4).

2.1.3 CALCUL DU REGULATEUR DE COURANT

La fonction de transfert de la boucle ouverte de courant est:

$$FBO(P) = GRI(P).G_{cm}(P) / (R.(1 + T_e.P)) \quad 2-11$$

ou $GRI(P)$: la fonction de transfert du régulateur de courant.

$G_{cm}(P)$: la fonction de transfert du convertisseur de courant.

Le système à régler avec l'organe de commande a une seule constante de temps dominante T_e et une petite constante de temps T_{cm} , dans ce cas il faut faire appel à un régulateur de type "PI" dont la fonction de transfert est de la forme:

$$GRI(P) = (1 + T_{ni}.P) / (T_{ii}.P) \quad 2-12$$

La constante de temps dominante est à compenser au moyen de T_{ni} , ainsi on réduit l'ordre de la fonction de transfert du circuit de réglage ouvert. Pour un ajustement optimale du

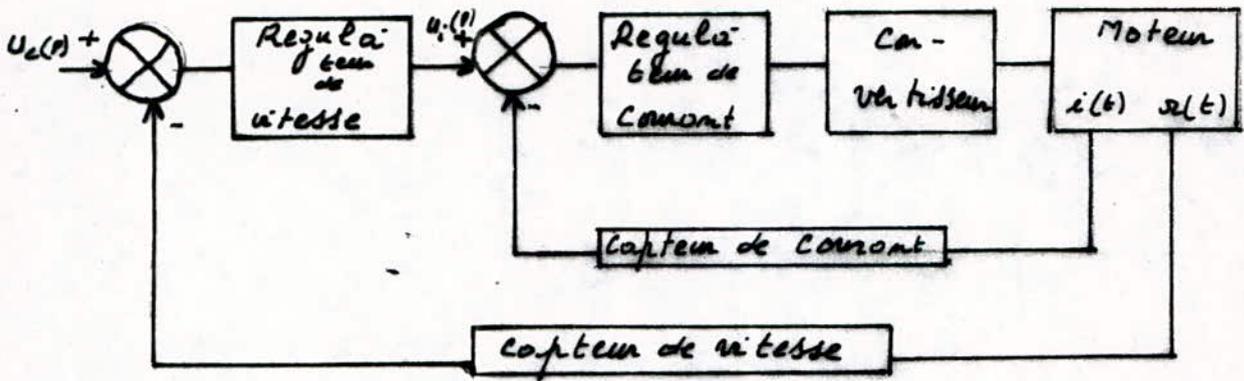


Fig 2.3 : Schéma bloc de la régulation en cascade

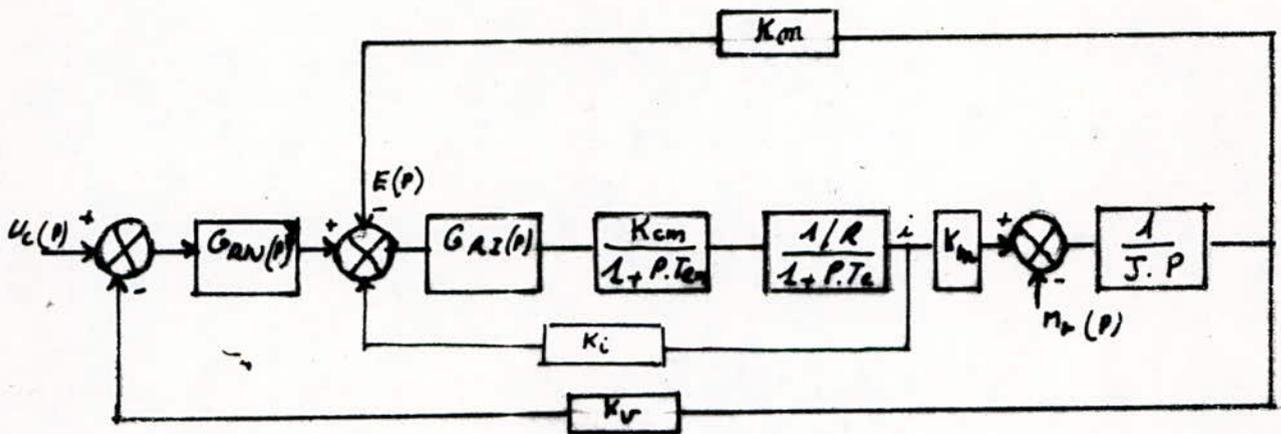


Fig 2.4 : Diagramme fonctionnel de la régulation en cascade

régulateur ,la constante de temps d'intégration T_{ii} doit être choisie suivant la relation suivante:

$$T_{ii} = 2.K_{cm}.T_{cm}/R_t = .056 \text{ s}$$

$$T_{ni} = .016 \text{ s}$$

Avec un ajustement optimale du régulateur ,la fonction transfert du circuit de réglage ouvert prend la forme:

$$FBO(P) = 1/(2.T_{cm}.P.(1+T_{cm}.P)) \quad 2-13$$

Afin de justifier notre choix de régulateur nous représentons la réponse harmonique .

Le module et la phase de la réponse harmonique sont indiqués schématiquement sur la figure: 2.5

De cette figure on déduit les grandeurs suivantes :

ω_1 : pulsation d'inversion $\omega_1 = 250 \text{ rd/s}$

ω_2 : pulsation de coupure $\omega_2 = 500 \text{ rd/s}$

marge de phase = 60°

marge de gain = 6.7 décade

De la réponse harmonique on constate que le passage du module par 1 a une pente de -1 donc le système est stable .

2.1.4 REPONSE INDICIELLE DE LA BOUCLE COURANT

La réponse indicielle du circuit de réglage ferme est donnée par la réponse du signal de sortie à un saut unité de la valeur de consigne.

La fonction de transfert de la boucle fermée de courant est:

$$F_{BF}(P) = FBO(P)/(1+FBO(P)) \quad 2-14$$

La réponse indicielle découle de la transformée inverse de Laplace.

$$y(t) = L^{-1} (F_{BF}(P)/P)$$

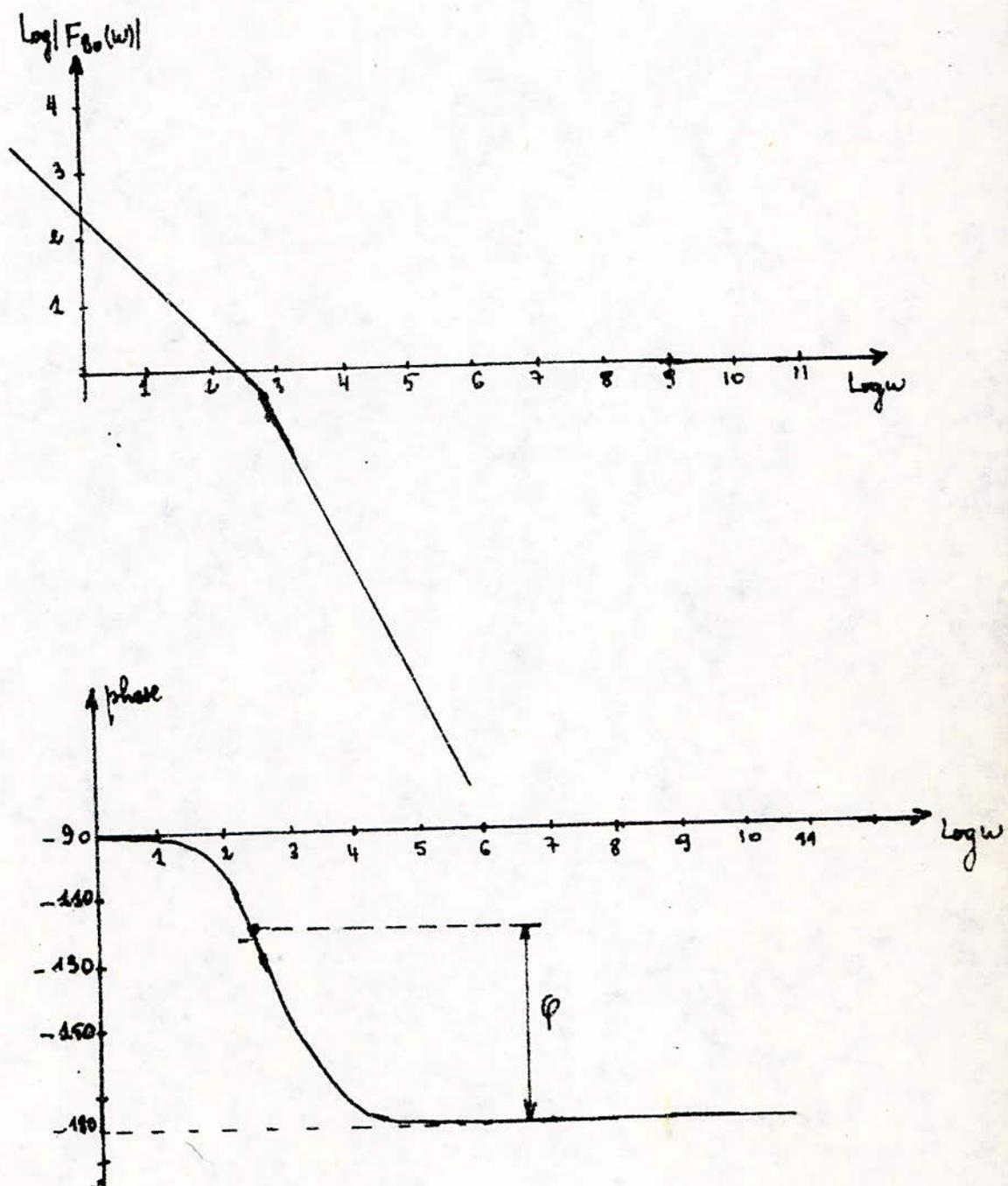


Fig: 2.5 Module et phase de la réponse harmonique de la boucle courant

La solution de cette équation, est:

$$y(t) = (1/2.T_{cm}) \cdot (1/\omega_n - 1/(\omega_n \cdot \omega_d)) \cdot \exp(-z \cdot \omega_n \cdot t) \cdot \sin(\omega_d \cdot t + \phi)$$

avec:

$$\omega_n = \sqrt{1/(2.T_{cm}.T_{cm})} ; z = .707$$

$$\omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1-z^2} ; \phi = \arccos z$$

Pour la représentation de la réponse indicielle on a élaboré un programme dont l'organigramme est représenté à la figure: 2.6.

La réponse indicielle (fig: 2.7) est caractérisée par deux grandeurs qui sont le dépassement maximum et le temps de montée. Le dépassement maximum est par définition la différence entre la valeur maximale et l'unité.

Le temps de montée correspond au temps au bout duquel la valeur finale (l'unité) est atteinte pour la première fois .

$$\text{Temps de montée} = 9.4 \text{ ms}$$

$$\text{Dépassement maximum} = 4.32 \%$$

2.1.5 CALCUL DU REGULATEUR DE VITESSE

Dans les paragraphes précédents on a montré que la fonction de transfert de la boucle courant fermée est:

$$FBF(P) = 1/(2.T_{cm}.P.(1+T_{cm}.P))$$

On constate que le circuit de réglage auxiliaire fermé intervient avec avec la fonction de transfert qui s'ajoute à la fonction de transfert $K_m/(J.P)$ du système à régler.

Afin de simplifier les calculs on néglige le terme $2.T_{cm}.T_{cm}$ dans la fonction de transfert $FBF(P)$ ce qui revient à réduire l'ordre de la fonction de transfert $FBF(P)$ à 1.

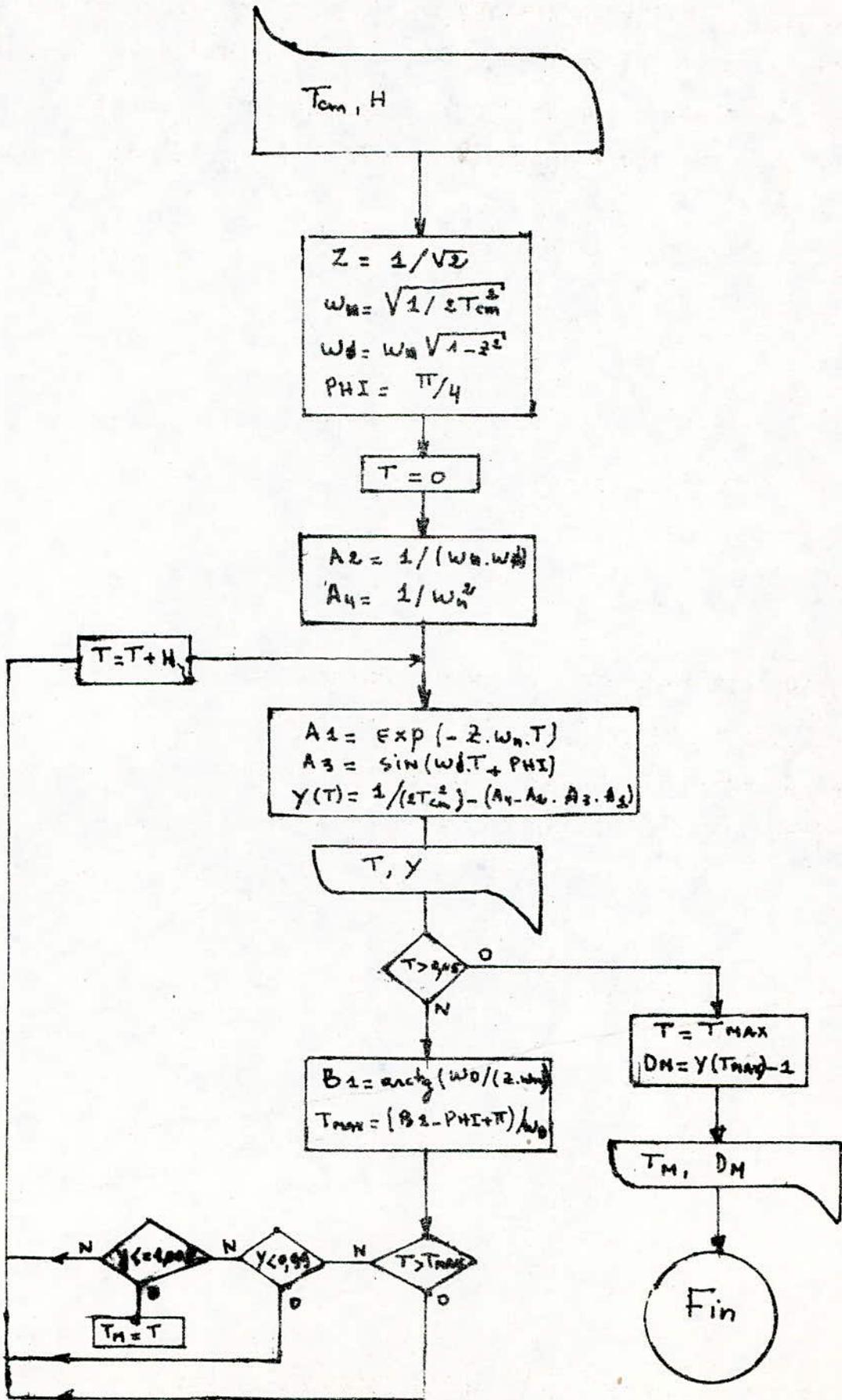


Fig: 2.6

Le nouveau système à régler est un système avec un comportement intégrale dont la fonction de transfert résultante s'écrit sous la forme:

$$GBO(P) = \frac{K_m \cdot GRN(P)}{J \cdot P \cdot (1 + 2 \cdot T_{cm} \cdot P)} \quad 2-16$$

ou $GRN(P)$ est la fonction de transfert du régulateur de vitesse.

On pose :

$$T = J/K_m \quad ; \quad T_p = 2 \cdot T_{cm}$$

$$GBO(P) = \frac{GRN(P)}{(T \cdot P \cdot (1 + 2 \cdot T_{cm} \cdot P))} \quad 2-17$$

Le régulateur de vitesse à utiliser est un régulateur de type PI dont la fonction de transfert s'écrit sous la forme :

$$GRN(P) = \frac{1 + T_{nv} \cdot P}{P \cdot T_{iv}} \quad 2-18$$

Dans ce cas la constante de temps T_{nv} ne doit pas compenser T_p du faite que cette dernière est une petite constante de temps.

Afin d'assurer un réglage rapide de la grandeur de sortie lors d'une variation de la grandeur perturbatrice il faut choisir la constante de temps $T_{nv} = 4 \cdot T_p$

Pour le choix de la constante de temps d'intégration T_{iv} on trace l'allure générale de la réponse harmonique $GBO(P)$.

Afin que le passage du module de $GBO(P)$ ait lieu avec une pente de -1 , il faut que :

$$1/T_p > \omega_1 > 1/T_{nv} \quad 2-19$$

Pour avoir un amortissement optimal il faut choisir T_{nv} et T_{iv} telqu'ils vérifient la relation suivante :

$$T_{nv}/T_{iv} = T/(2 \cdot T_p)$$

En tenant compte de toutes ses considérations la fonction de

transfert en boucle ouverte de la vitesse est :

$$GBO(P) = (1 + T_{nv}.P) / (2.T_{iv}.T_p.P.(1 + T_p.P)) \quad 2-20$$

Les constantes du régulateur sont :

$$T_{nv} = 16 \text{ ms} ; T_{iv} = .948 \text{ ms}$$

2.1.6 REPONSE INDICIELLE DE LA BOUCLE VITESSE

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$GBF(P) = GBO(P) / (1 + GBO(P)) \quad 2-21$$

La réponse indicielle est donnée par la relation :

$$y(t) = L^{-1} (GBF(P)/P)$$

En développant les calculs on obtient :

$$GBF(P) = (1 + 4.T_p.P) / E(P) \quad 2-22$$

$$\text{ou: } E(P) = 1 + 4.T_p.P + 8.T_p.P^2 + 8.T_p.P^3$$

La réponse indicielle s'écrit sous la forme :

$$y(t) = L^{-1} ((1 + 4.T_p.P) / (P.E(P)))$$

Le programme de la représentation de la réponse indicielle renferme un sous programme de la résolution de l'équation $E(P) = 0$. Pour résoudre l'équation $E(P) = 0$ on utilise la méthode numérique de NEWTON dont l'organigramme est représenté en fig: 2.8. Une fois qu'on trouve la racine P_1 de $E(P)$; $y(t)$ peut se mettre sous la

forme :

$$y(t) = L^{-1} ((1 + 4.T_p.P) / (P.(P - P_1).(A_1.P^2 + B_1.P + C_1)))$$

$$\text{Avec: } A_1 = 8.T_p ; B_1 = 8.T_p + P_1.A_1 ; C_1 = -1/P_1 ; T_1 = C_1$$

Le calcul de la transformée inverse de LAPLACE donne :

$$y(t) = 1 + y_2 + y_3 \quad 2-23$$

$$y_2 = N_1.y_1.exp(-z.w_n.t) / (D_1.D_2)$$

$$y_3 = N_2 \cdot \exp(-t/T_1) / D_1$$

$$y_1 = \sin(\omega_n \cdot D_2 \cdot t - \psi)$$

$$N_1 = \frac{1 - 2 \cdot T_1 \cdot z \cdot \omega_n + (T_1 \cdot \omega_n)^2}{2}$$

$$N_2 = 4 \cdot T_p \cdot \omega_n \cdot (T_1 - 4 \cdot T_p)$$

$$D_1 = \frac{1 - 8 \cdot T_p \cdot z \cdot \omega_n + (4 \cdot T_p \cdot \omega_n)^2}{2}$$

$$D_2 = (1 - z \cdot z)^{1/2}$$

$$\psi = \pi/2 - \text{Arctg}(T_1 \cdot \omega_n \cdot D_2 / (1 - T_1 \cdot z \cdot \omega_n)) - \text{Arctg}(D_2 / (-z))$$

L'organigramme de la réponse indicielle est donné à la fig: 2.9
De la réponse indicielle figure: 2.10 on déduit les résultats suivants :

$$\text{Dépassement maximum} = 4.7\%$$

$$\text{Temps de montée} = 19.5 \text{ ms}$$

On constate que le dépassement maximum est nettement plus élevé que celui du courant et ceci est évident car la boucle courant qui est la boucle interne est beaucoup plus rapide que la boucle vitesse c'est à dire la boucle externe .

2.1.7 INFLUENCE D'UNE PERTURBATION DU COUPLE SUR LE COURANT ET VITESSE

La grandeur perturbatrice est bien sur le couple résistant.

En se référant au schéma fonctionnel on déduit :

$$((\text{Réf } W(P) - W(P)) \cdot (\text{GRN}(P) \cdot K_m / (1 + T_p \cdot P) - M_r(P))) / J \cdot P = W(P)$$

On suppose qu'on a pas une variation de la valeur de référence c'est à dire $\text{Réf } W(P) = 0$ on obtient :

$$W(P) / M_r(P) = -1 / (J \cdot P \cdot (1 + \text{GRN}(P) \cdot K_m / (J \cdot P \cdot (1 + T_p \cdot P)))) \quad 2-24$$

Sachant que :

$$\text{GBO}(P) = \text{GRN}(P) \cdot K_m / (J \cdot P \cdot (1 + 2 \cdot T_{cm} \cdot P))$$

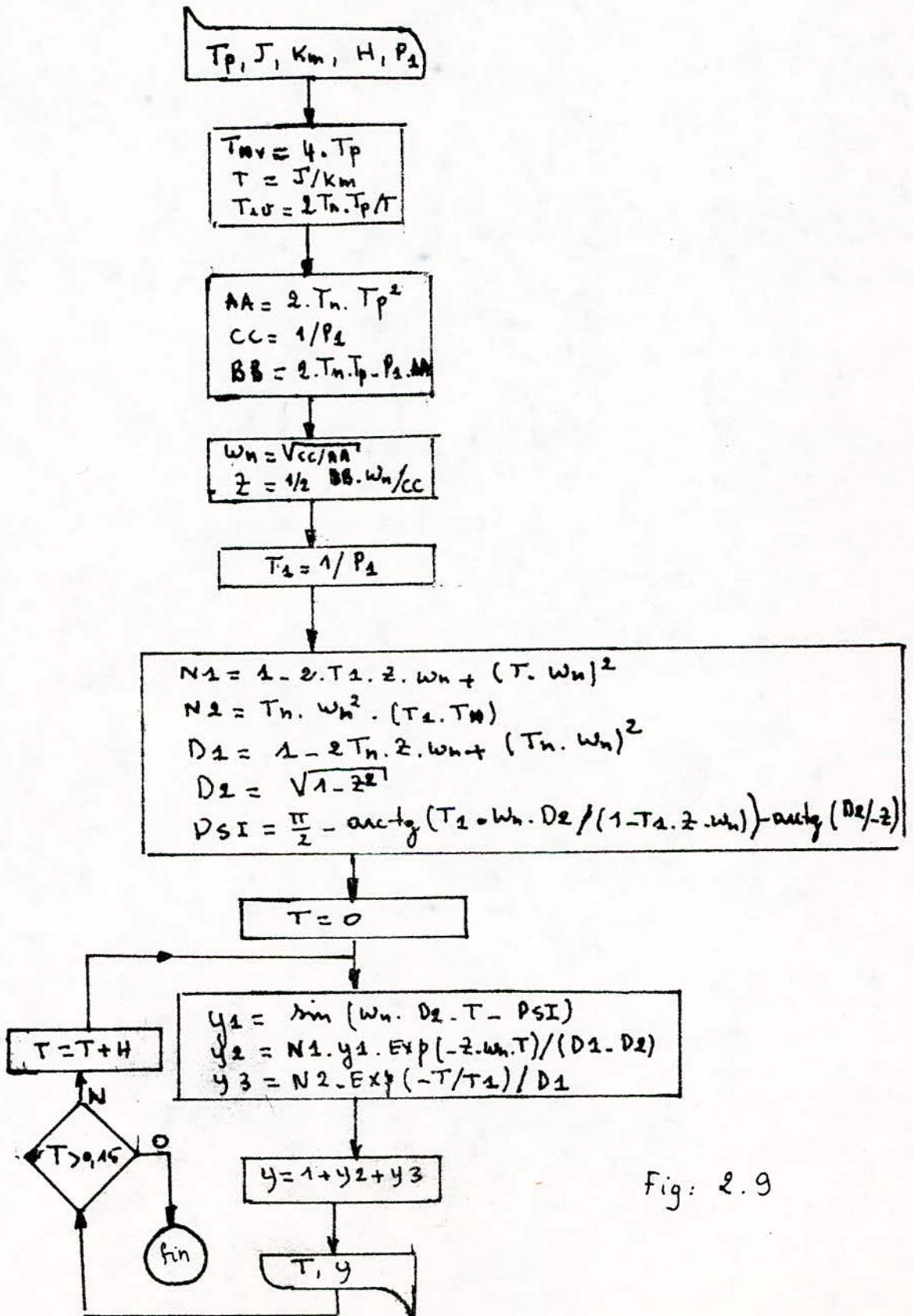


Fig: 2.9

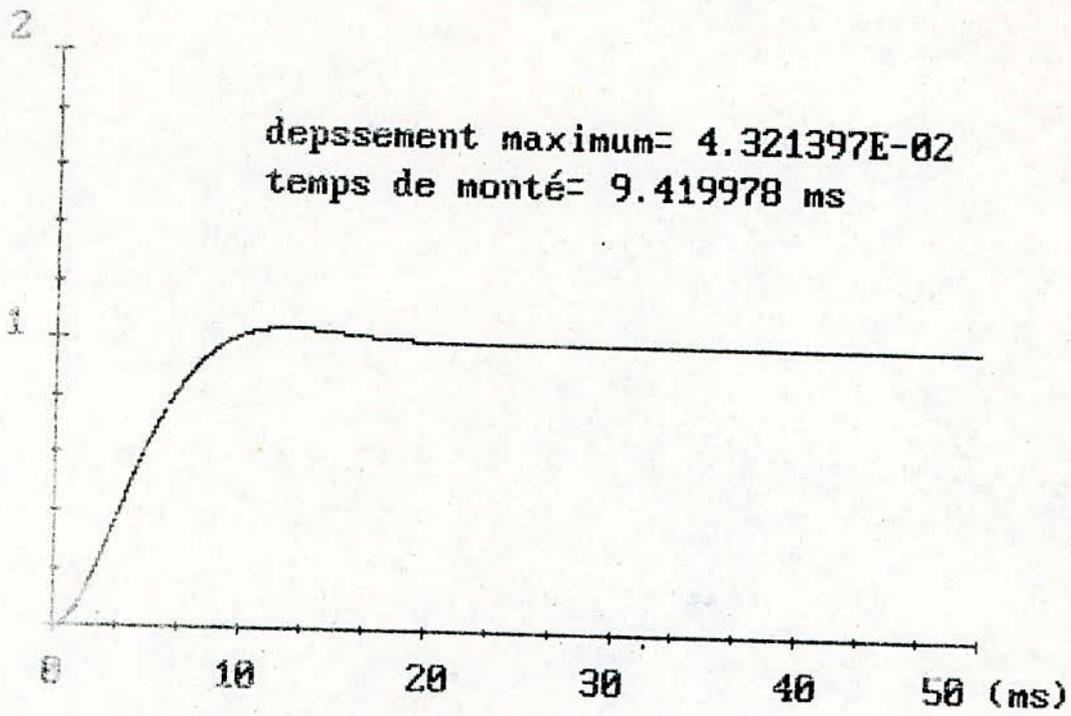


Fig:2.7 ***REPONSE INDICIELLE DU COURANT***

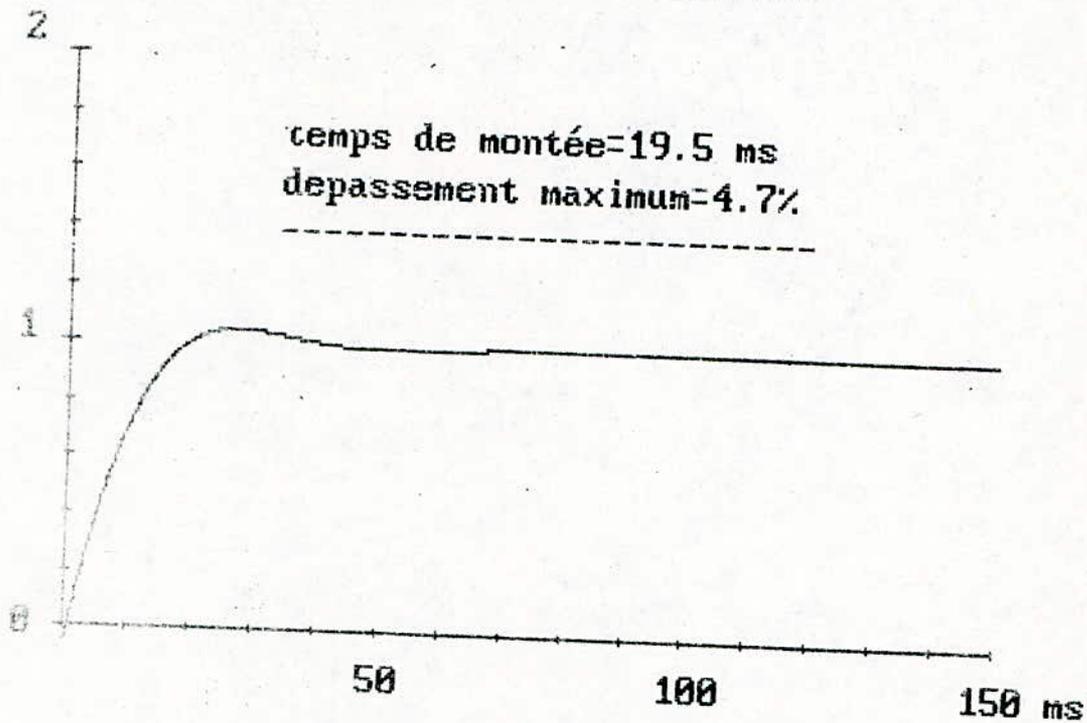


Fig:2.10 Réponse Indicielle De la Vitesse

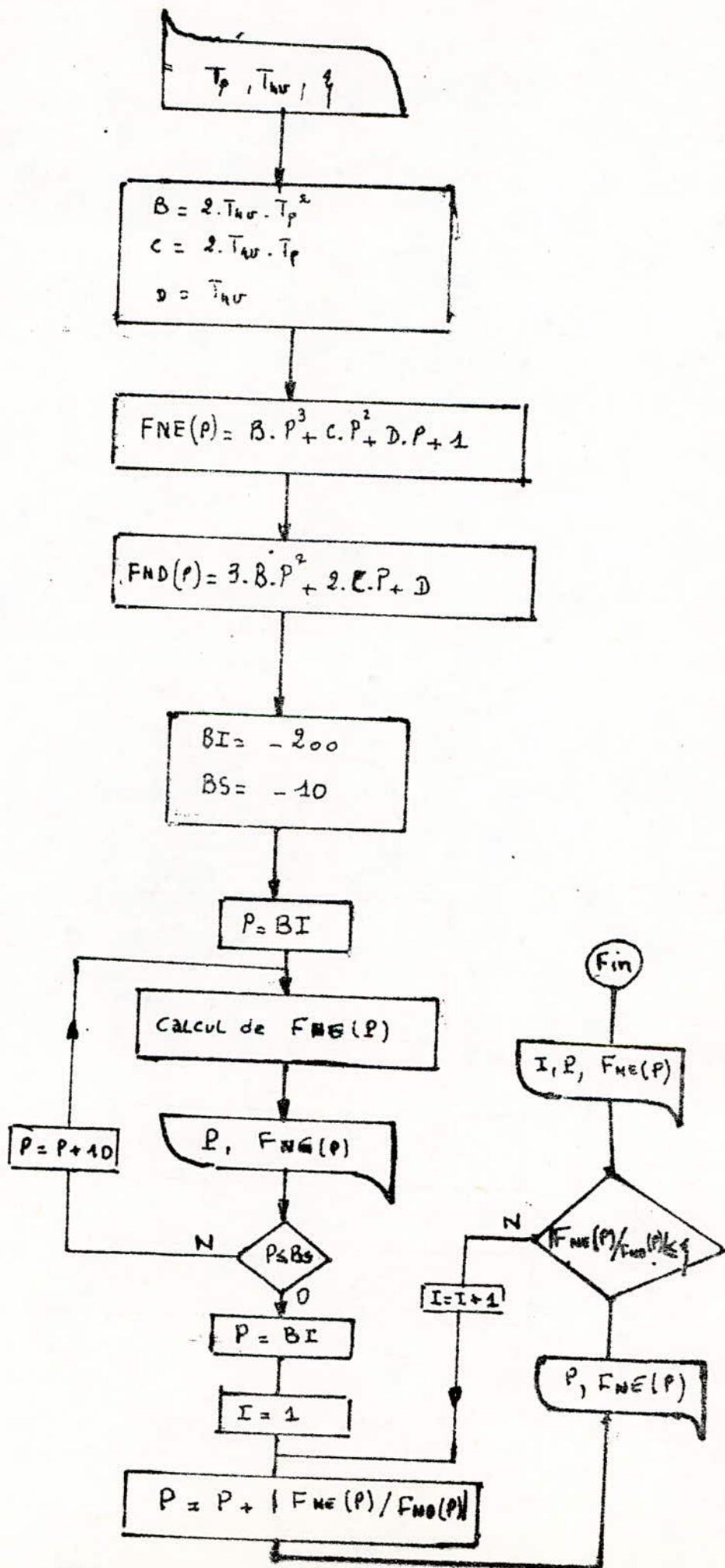


Fig: 3.8

En développant les calculs on obtient:

$$W(P)/Mr(P) = -2.Tnv.Tp.P.(1+Tp.P)/(2.Tnv.Tp.P^2 + 2.Tnv.Tp.P + Tnv.P+1)$$

On pose :

$$F(P) = 2.Tnv.Tp.P^2 + 2.Tnv.Tp.P + Tnv.P+1$$

On résoud l'équation $F(P)=0$ de la même manière que $E(P)=0$ en utilisant la méthode numérique de NEWTON

Soit $P1$ une racine de $F(P)=0$. La variation de la vitesse à une perturbation de couple s'écrit :

$$DW(P) = -8.Tp^2.(1+Tp.P)/((P+P1).(A2.P^2 + B2.P + C2)) \quad 2-25$$

Avec:

$$A2 = 32.Tp^4 ; C2 = 1/P1 ; B2 = (4.Tp - C2)/P1$$

La transformée inverse de la LAPLACE donne:

$$DW(t) = DD.(y1.y2.y3) \quad 2-26$$

ou:

$$y1 = wn.exp(-z.wn.t)/D2$$

$$y2 = (N1/D1)^{1/2} . \sin(wn.D2.t + \psi)$$

$$y3 = (T1 - Tp).wn^2 . exp(-t/T1)/D1$$

$$D1 = 1 - 2.T1.z.wn + (T1.wn)^2$$

$$D2 = (1 - z.z)^{1/2}$$

$$N1 = 1 - 2.Tp.z.wn + (Tp.wn)^2$$

$$D3 = 1 - Tp.z.wn$$

$$D4 = 1 - T1.z.wn$$

$$N2 = Tp.wn.D2$$

$$N3 = T1.wn.D2$$

$$\psi = \text{Arctg}(N2/D3) - \text{Arctg}(N3/D4)$$

$$wn = (C2/A2)^{1/2} ; z = B2.wn/(2.C2)$$

L'organigramme de la fig:2.1 explique la méthode de calcul .

La figure 2.12 nous montre l'évolution de la variation de la

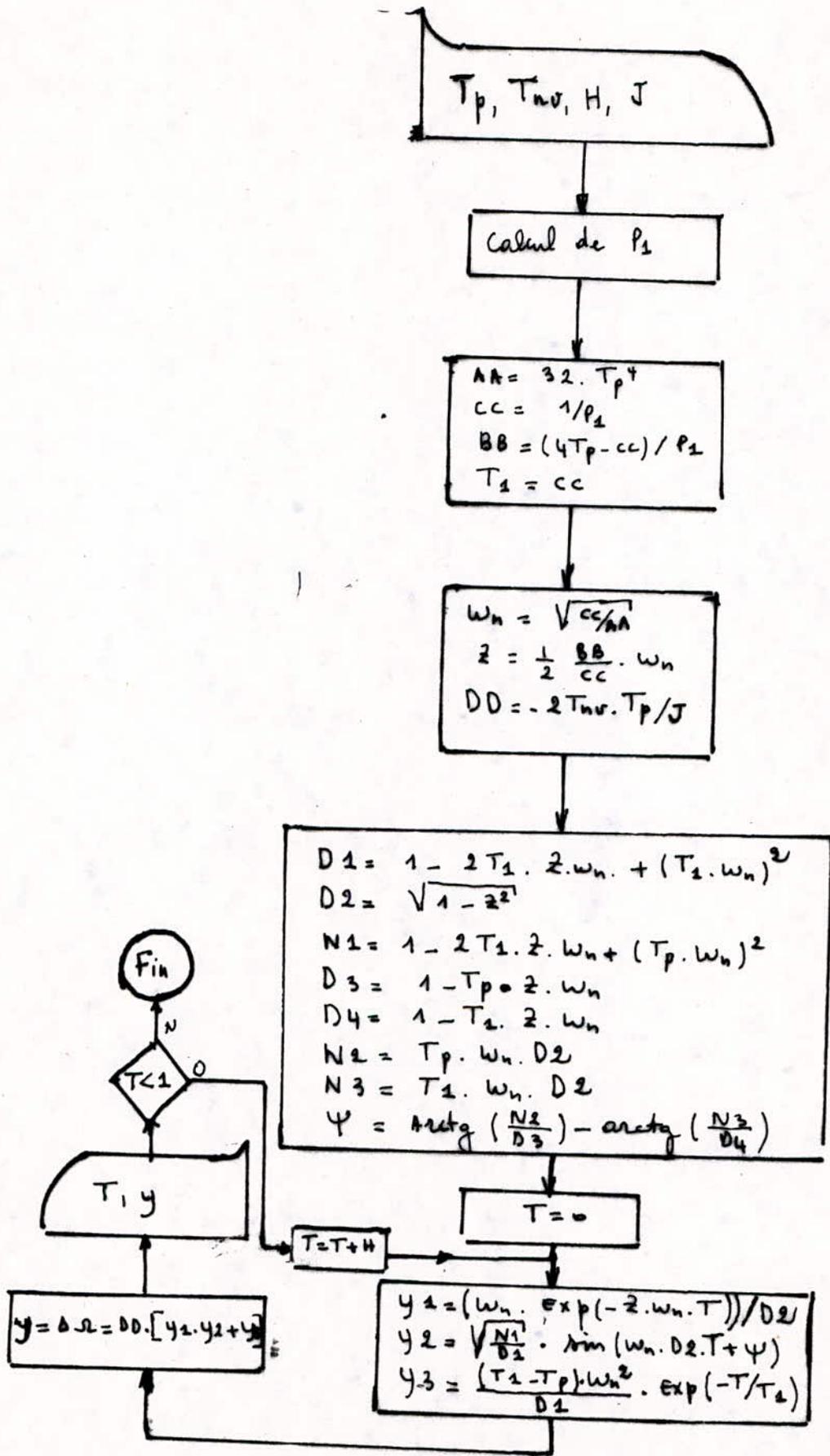


Fig: 2.11A

vitesse $DW(P)$ lors d'une variation d'un échelon de couple. La vitesse chute en un temps très court puis oscille autour de valeur initiale, et enfin au bout de .08 s revient à sa valeur initiale. La vitesse n'est pas sensible à une variation du couple

b) INFLUENCE DU COUPLE RESISTANT SUR LE COURANT

En se référant une deuxième fois au schéma fonctionnel on déduit:

$$I(P) = \frac{(U(P) - I(P) - E(P))}{2.Tcm.P.(1 + Tcm.P)}$$

On suppose que $U(P) = 0$

Et en tenant compte que:

$$E(P) = K_m.W(P)$$

L'expression du courant en fonction du couple est:

$$I(P) = \frac{K_1.P^2}{8.(T_p.P)^3 + 8.(T_p.P)^2 + 4.T_p.P + 1} . M_r(P) \quad 2-27$$

Avec : $K_1 = 16.Tcm.Km.T_p.T_p/J$

Lors d'une variation d'un échelon de couple, la variation du courant est:

$$DI(P) = \frac{K_1.P}{8.(T_p.P)^3 + 8.(T_p.P)^2 + 4.T_p.P + 1} \quad 2-28$$

On a la relation :

$$\lim_{P \rightarrow 0} P.DI(P) = \lim_{t \rightarrow \infty} DI(t)$$

En développant le calcul des limites on trouve:

$$\lim_{P \rightarrow 0} P.DI(P) = 0$$

d'où:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} DI(t) = 0$$

Lors d'une variation d'un échelon du couple résistant la vitesse

et le courant après un régime transitoire très court reviennent à leurs valeurs initiales: $DI(t)=0$, $DW(t)=0$

2.1.8 LIMITATION DU GRADIENT DE COURANT

La limitation du courant du moteur revient à limiter la tension de consigne à la sortie du régulateur de vitesse qui aussi la tension de consigne de la boucle courant.

Un gradient relevé de courant peut provoquer des étincelles sur les lames du collecteur .

Pour fixer le gradient à une valeur admissible ,on place entre le régulateur de vitesse et la référence de courant un limiteur de pente ,ainsi on limite la rapidité de la variation de référence et celle du courant .

Généralement on choisit :

$$\frac{dI}{dt} = 20 \text{ à } 50 \% I_n / s$$

On prend $\frac{dI}{dt} = 50\% I_n / s = 12 \text{ A/s}$

Le limiteur de courant est représenté par une fonction non linéaire (figure: 2.13).

En limitant le gradient de courant on a:

$$\begin{aligned} \text{si } 1/12 > t & \quad U_s(P) = 12/P^2 \\ \text{si } t \geq 1/12 & \quad U_s(P) = 1/P \end{aligned}$$

ou $U_s(P)$ la tension à la sortie du limiteur

La tension de limitation est fixée à U_n

Ainsi on a deux réponses de courant suivant que la tension à la sortie du limiteur est inférieure ou supérieure à U_l (tension de limitation)

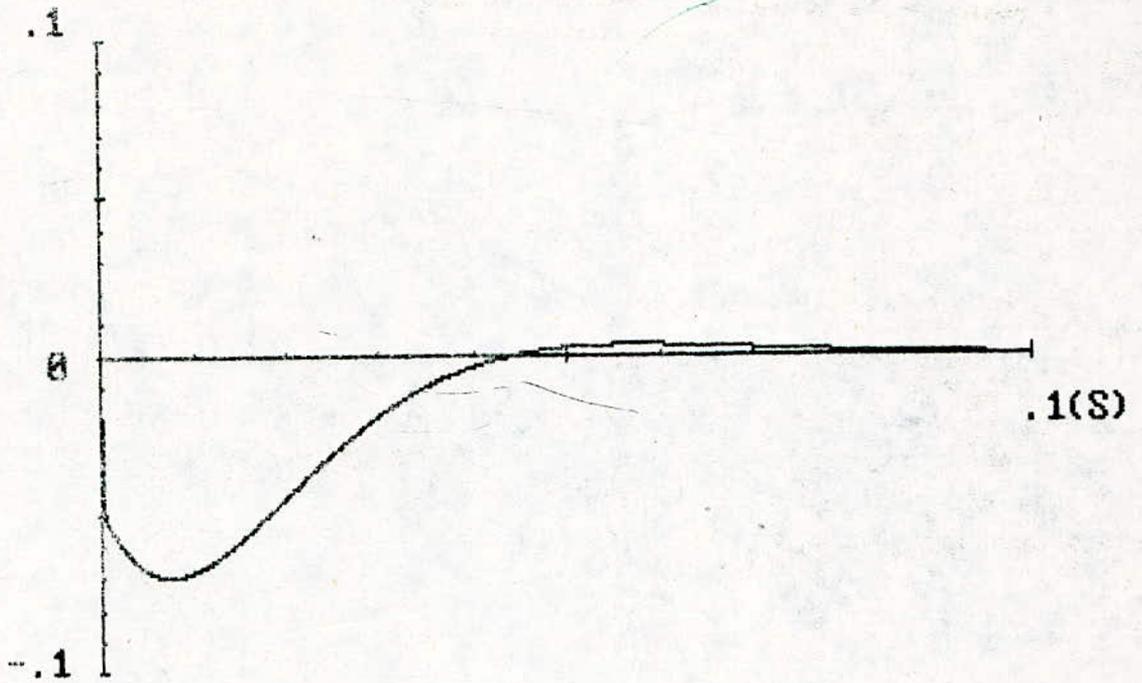


Fig: 2.12 Réponse de la vitesse à un échelon de couple.

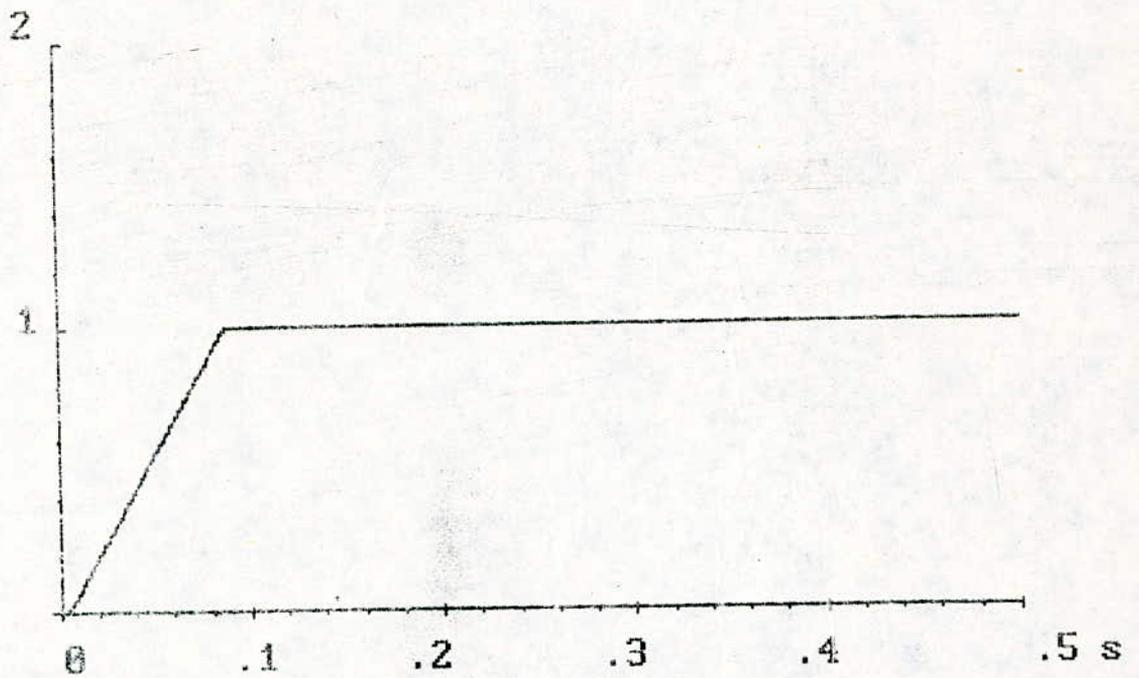


Fig: 2.15 limitation du gradient de courant

L'organigramme de la figure:2.14 donne la méthode de calcul de $I(t)$ lors d'une variation d'un échelon de la valeur de référence. La figure:2.15 nous montre bien que le courant croît suivant le gradient imposé par la régulation. Ainsi les surtensions au niveau des lames du collecteur sont éliminées.

2.1.9 SIMULATION DE LA REGULATION EN REGIME DES GRANDS VARIATIONS (DEMARRAGE DU MOTEUR)

Dans ce cas général on ajoute un deuxième limiteur qui fixe la consigne de courant.

La limitation du courant revient à fixer le couple dynamique qui s'exerce sur l'arbre du moteur au moment des accélérations et des décélérations.

Afin de mettre en évidence l'effet du limiteur de courant on a fait l'étude des deux cas, le premier sans limitation du gradient de courant, le deuxième cas avec limitation du gradient de courant.

2.1.9.1 SIMULATION SANS LIMITATION DU GRADIENT DE COURANT

Le schéma fonctionnel est représenté par la figure:2.4. Le bloc de régulation peut se mettre sous la forme indiquée sur la figure:2.16 De la même façon le bloc de régulation de courant peut se mettre sous la forme indiquée sur la figure:2.17

a) CALCUL DES COEFFICIENTS $K_{pi}, K_{pv}, K_{ii}, K_{iv}$

La fonction de transfert du régulateur de vitesse est donnée par la relation :

$$GRN(P) = \frac{1 + P \cdot T_{nv}}{T_{iv} \cdot P} + \frac{K_{iv}}{P} + K_{pv}$$

d'où: $K_{pv} = T_{nv} / T_{iv}$; $K_{iv} = 1 / T_{iv}$ 2-29

Un raisonnement analogue pour le régulateur de courant nous

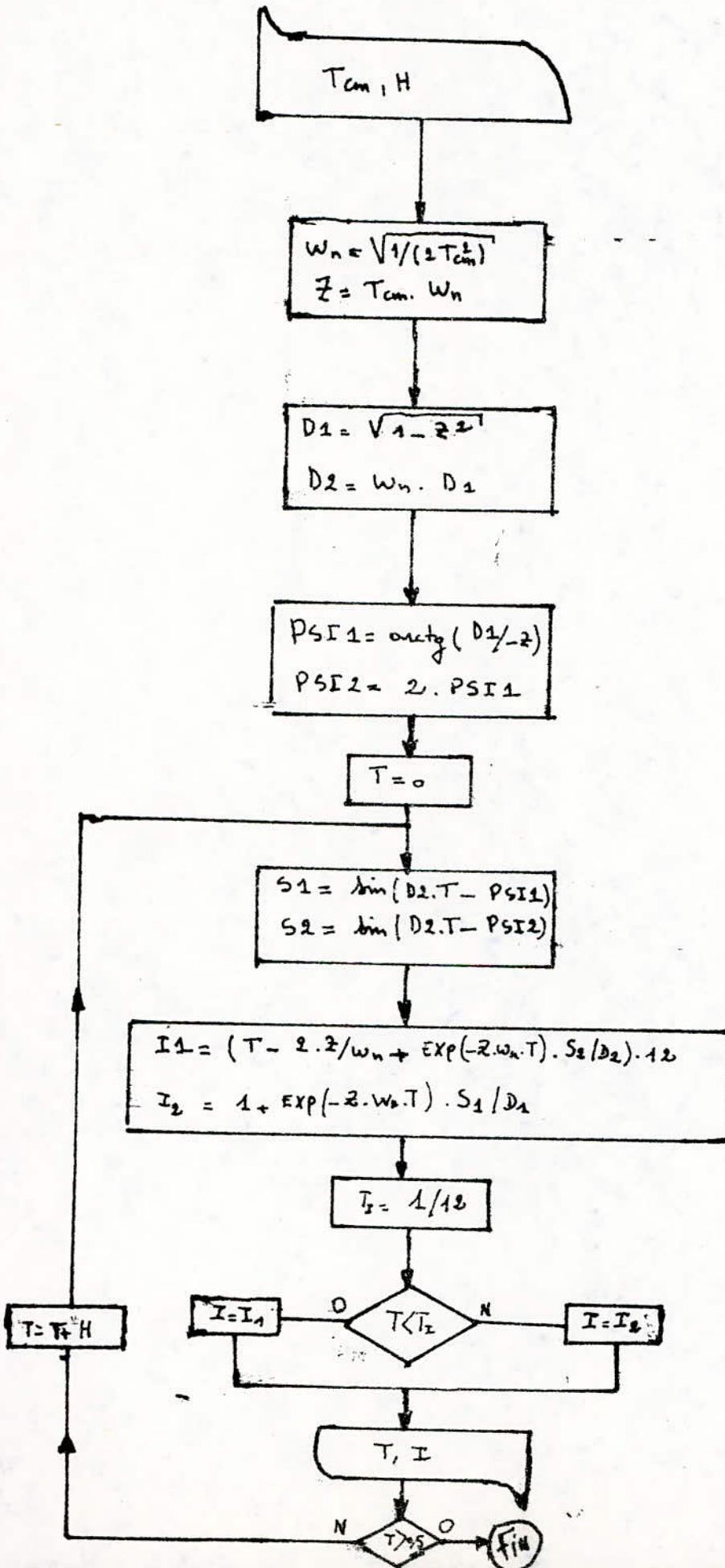


Fig : 2.14

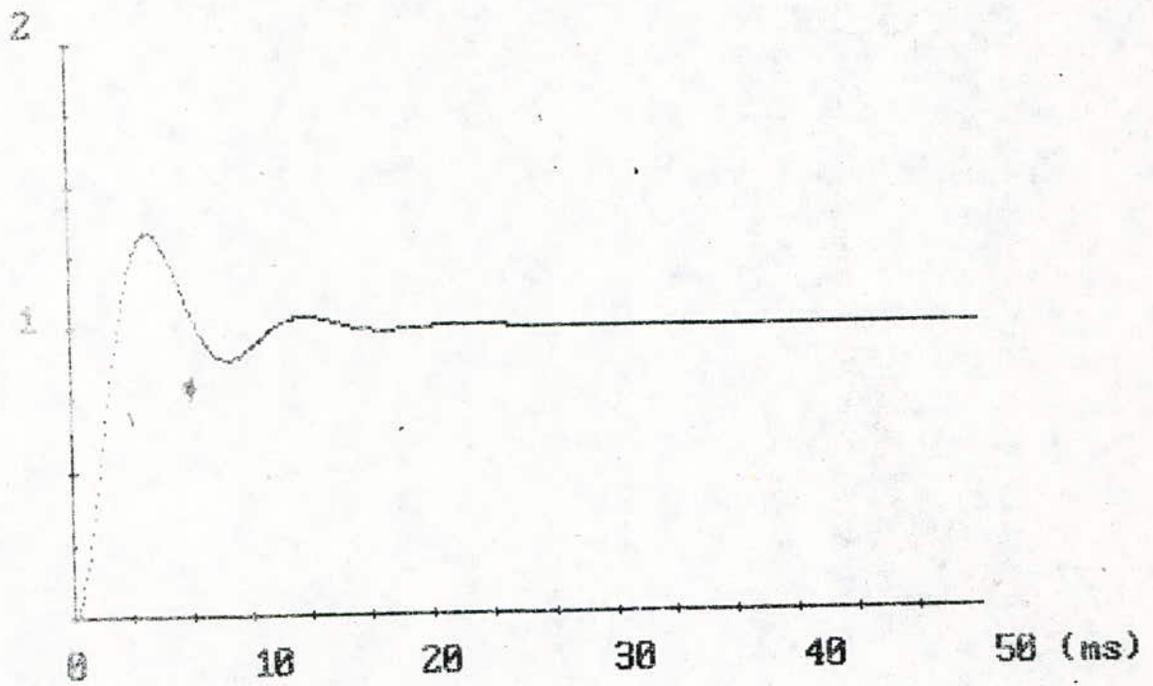


Fig. 2.17 Courant sans la limitation de son gradient (régulation en cascade)

donne:

$$K_{pi} = T_{ni} / T_{ii} ; \quad K_{ii} = 1 / T_{ii} \quad 2-30$$

b) CALCUL DES SIGNAUX

En introduisant ses deux dernières transformations le schéma fonctionnel devient comme le montre la figure:2.18

Dans ce schéma fonctionnel on a huit signaux dépendant l'un de l'autre .

S1: valeur de référence de la vitesse

S2: signal à la sortie du comparateur de vitesse

S3: signal à la sortie du régulateur de vitesse

S4: signal à la sortie du limiteur

S6: signal à la sortie du comparateur de courant

S7: signal à la sortie du régulateur de courant

S8: signal à la sortie du convertisseur

Le calculs des signaux donne :

$$S2 = S1 - Y(2)$$

$$S3 = K_{pv} \cdot S2 + K_{iv} \cdot \int_0^t S2 \cdot dt$$

$$S_n(n.H) = S_v((n-1).H) + S2$$

$$\int_0^t S2 \cdot dt = H \cdot S_v$$

$$U1 = 1$$

si $U1 > S3 \rightarrow S4 = S3$

si $S3 >= U1 \rightarrow S4 = U1$

$$S6 = S4 - Y(1)$$

$$S7 = K_{pi} \cdot S6 + K_{ii} \cdot \int_0^t S6 \cdot dt$$

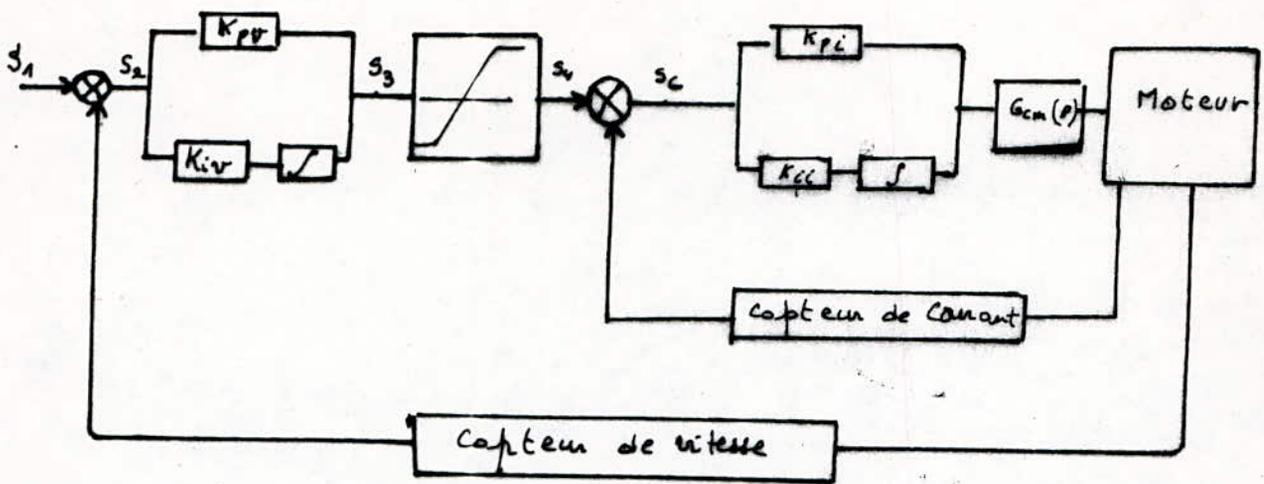


Fig 2.18 schéma fonctionnel de la simulation

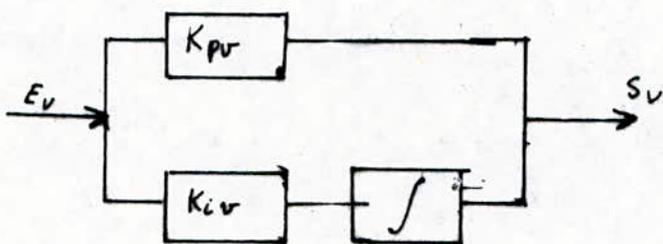


Fig 2.16 schéma du régulateur de vitesse

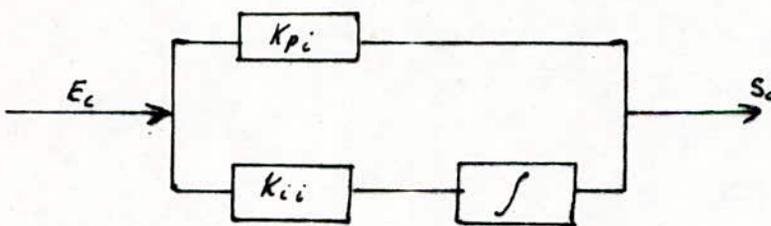


Fig 2.17 schéma du régulateur de courant

$$\int_0^t S6 . dt = H . Sc$$

avec : $Sc(n.H) = Sc((n-1).H) + S6$

Le calcul du signal S8 à la sortie du convertisseur se fait par la méthode numérique de RUNGE KUTTA au deuxième ordre

$$(1 + Tcm . P) . S8 = Kcm . S7$$

La solution de cette équation différentielle est :

$$S8(n.H) = S8((n-1).H) + (Q1 + Q2) / 2$$

Avec : $Q1 = H . F(t, S8)$

$$Q2 = H . F(t+H, S8+Q1)$$

$$F(t, S8) = (Kcm . S7 - S8) / Tcm$$

Le signal S8 représente la tension qui sera injectée directement dans l'induit du moteur .

Le calcul de Y(1) (courant) et Y(2) (vitesse) se fait par la méthode numérique de RUNGE KUTTA, cette méthode a été déjà utilisée et élaborée au premier chapitre ,seulement pour beaucoup de facilité on introduit les grandeurs relatives .En utilisant ces dernières ,on prend comme valeur de référence les valeurs nominales.

On vu précédament que le moteur est lié par deux équations Une électrique l'autre mécanique :

$$U = Rt . i + Lt . di/dt + Km . W$$

$$Km . i = Kr . W + J . dW/dt$$

on a : $Ur = U/UN ; ir = i/In ; Wr = W/Wn$

En introduisant ses grandeurs relatives ,le système d'équations différentiels devient :

$$dir/dt = C - Rt . ir / Lt - A . Wr$$



$$dWr/dt = D.ir + B.Wr$$

Avec : $C = U_r . U_n / (L_t . I_n) ; B = -K_r / J$

$$A = K_m . W_n / (I_n . L_t) ; D = K_m . I_n / (J . W_n)$$

2.1.9.2 SIMULATION AVEC LIMITATION DU GRADIENT DE COURANT

Pour limiter la valeur du gradient de courant on utilise un intégrateur de montée dont le schéma bloc est donné par la figure:

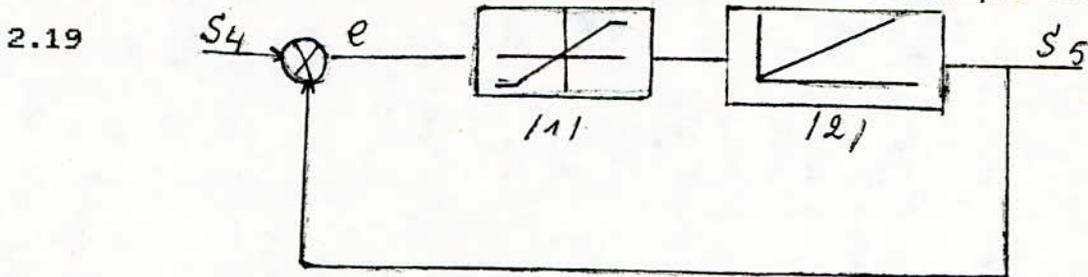


Fig 2.19 : schéma bloc de l'intégrateur de montée

La différence entre le signal S4 et S5 est appliquée à l'entrée du limiteur /1/ possédant une amplification très élevée ($G=100$)

L'intégrateur /2/ est en série avec le limiteur /1/

Le gradient de est fixé à 12 A/s

$$e = S4 - S5$$

$$e_l = \text{tension de limitation } e_l = 1/G$$

$$\text{si } e \geq e_l \longrightarrow S_e = 1$$

$$\text{si } e_l > e \longrightarrow S_e = G \cdot e$$

$$S5 = K_i \int_0^t S_e \cdot dt = K_i \cdot S_e(n.H)$$

$$S_e(n.H) = S_e((n-1).H) + S_e$$

L'organigramme de simulation avec limitation du gradient est donné par la figure: 2.20

La figure: 2.21 donne la variation du courant au démarrage sans limitation du gradient de courant, on constate que le gradient de courant est élevé, et qu'on a un dépassement de courant, le

courant oscille autour de sa valeur finale puis se stabilise .

La figure:2.22 donne la variation du courant avec limitation du gradient ,on voit que le gradient est limité à $12A/s$ et on'a pas de dépassement .

La variation de la vitesse figure:2.23 est très lente et ceci est évident car la boucle vitesse (boucle externe) est moins rapide que la boucle courant (boucle interne).

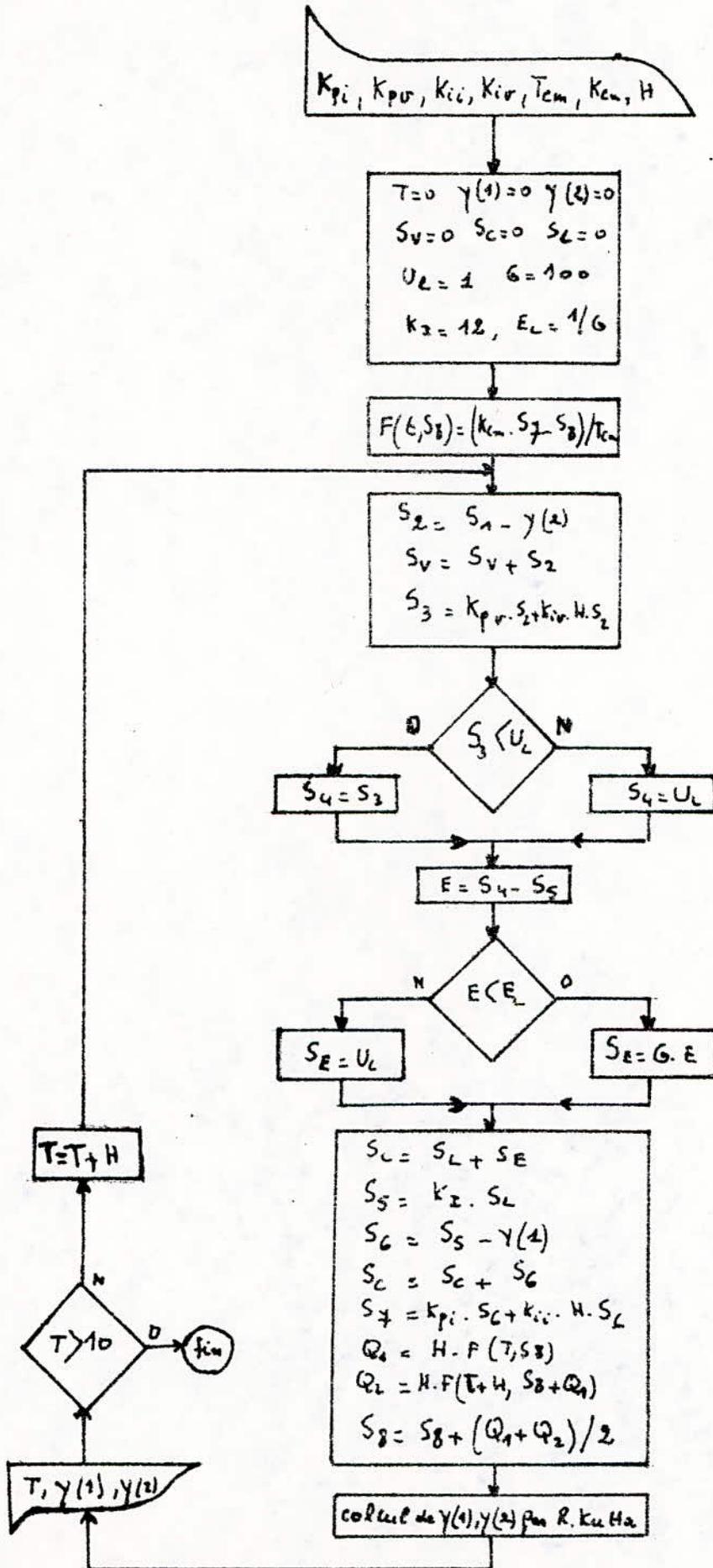


Fig: 2.20

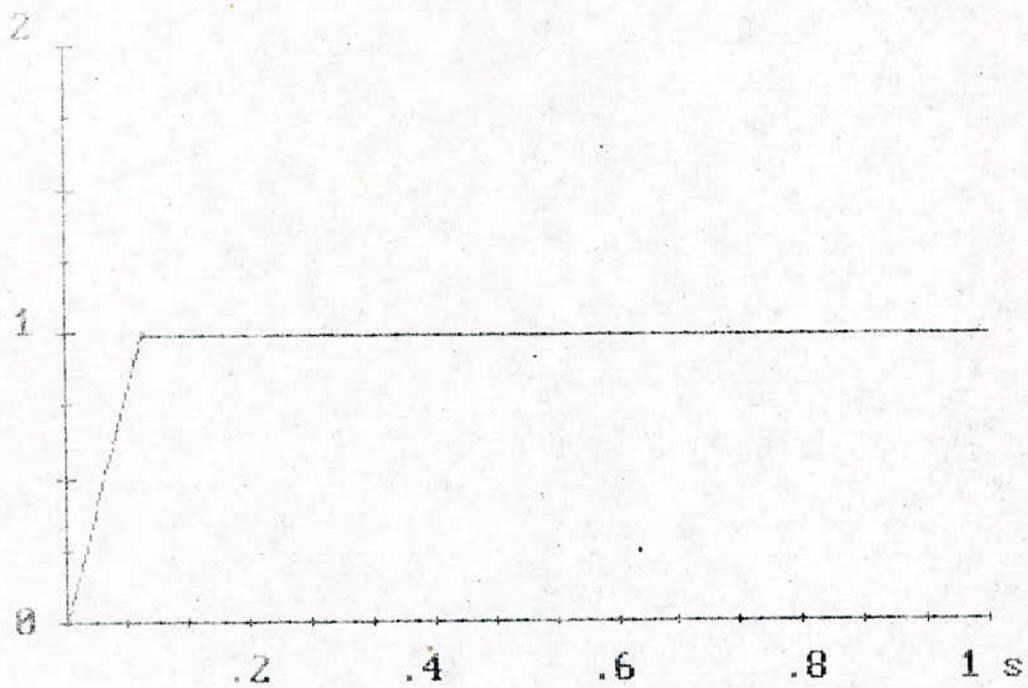


Fig. 2.22 courant au démarrage
avec limitation du gradient du courant

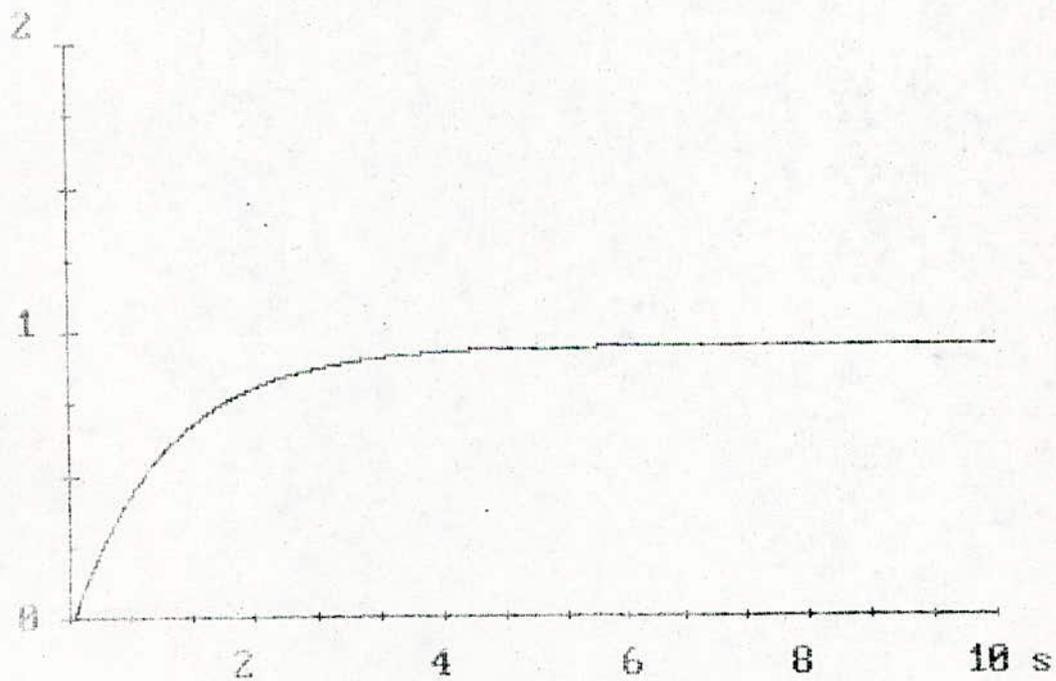


Fig. 2.23 vitesse au démarrage

2.2:REGULATION DU COURANT ET DE VITESSE PAR BOUCLES PARALLELES:

2.2.1:INTRODUCTION:

De la même façon que dans le système de régulation en cascade, le système de régulation en boucles parallèles utilise un régulateur séparé par variable sous contrôle. Par contre les sorties des régulateurs des variables asservies sont connectés grâce à un commutateur électronique dont le rôle est, de sélectionner la tension de commande la plus faible, cette opération doit être faite sans à coups.

Les principales caractéristiques de la régulation en boucles parallèles sont:

_Chaque variable sous contrôle correspond à un régulateur séparé, donc chaque boucle peut être réglé à l'optimum.

_On peut régler les caractéristiques dynamiques et statiques d'une régulation parallèle indépendamment les une des autres.

_On peut prévoir le transfert sans à coup d'un mode de régulation à un autre.

L'étude, le calcul et la mise en service des régulateurs sont simples du fait de l'indépendance de chacun par rapport à l'autre.

2.2.2:DIAGRAMME FONCTIONNEL DE LA REGULATION EN PARALLELE:

Le schéma de principe de la régulation en parallèle est représenté sur la figure:2.24

2.2.3:CALCUL DU REGULATEUR DU COURANT:

L'équation électrique du moteur:

$$U=E+R_t.i+L_t.di/dt$$

La f.c.e.m E , du moteur intervient comme une grandeur

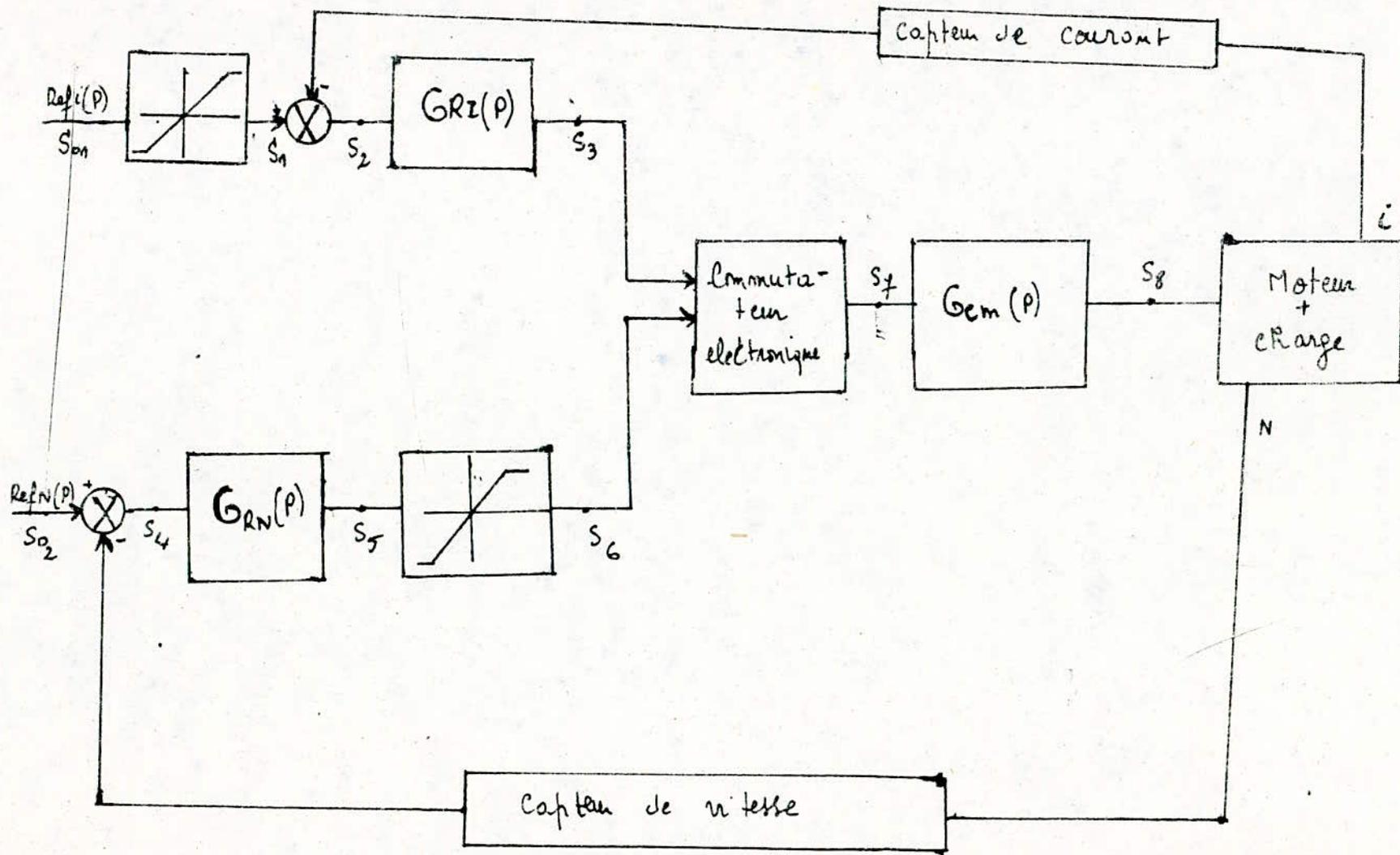


Fig: 2.24 Schéma fonctionnel de la régulation en parallèle
(avec limitateur du gradient de courant)

perturbatrice. On suppose que $E(P)=0$, en passant aux transformées de Laplace on :

$$U(P) = R_t \cdot i(P) + L_t \cdot P \cdot i(P)$$

d'où :

$$i(P) = (1/R_t) / (1 + T_e \cdot P) \quad \text{avec } T_e = L_t / R_t$$

En tenant compte de la fonction de transfert du convertisseur, la fonction de transfert du courant est :

$$\frac{i(P)}{U(P)} = \frac{K_{cm}/R_t}{(1 + T_e \cdot P)(1 + T_{cm} \cdot P)}$$

Notre choix, est orienté vers l'utilisation d'un régulateur P.I, dont la fonction de transfert s'écrit de la forme suivante :

$$GRI(P) = \frac{1 + P \cdot T_{ni}}{P \cdot T_{ii}}$$

La constante du temps dominante T_e , est compensée à l'aide de T_{ni} et pour un ajustement optimal, la constante de temps d'intégration T_{ii} , doit être choisie tel que :

$$T_{ii} = 2(K_{cm}/R_t) \cdot T_{cm} = 0.056 \text{ s}$$

$$T_{ni} = T_e = 0.016 \text{ s}$$

2.2.3: CALCUL DU REGULATEUR DE VITESSE:

Dans la première partie, on a montré que $W(p)$ s'écrit de la forme :

$$W(P) = \frac{1/K_{cm}}{1 + T_{em} \cdot P + T_e \cdot T_{em} \cdot P^2} U(P) - \frac{R_e(1 + T_e \cdot P)/K_m}{1 + T_e \cdot P + T_e \cdot T_{em} \cdot P^2} M_r(P)$$

On suppose qu'on a pas une variation du couple résistant, c'est à dire $M_r(P)=0$ et en tenant compte du convertisseur de courant on aura :

$$\frac{W(P)}{U(P)} = \frac{1/K_m \cdot K_{cm}}{(1+P.T_{em})(1+P.T_e)(1+P.T_{cm})}$$

avec $T_{em} > T_e \gg T_{cm}$

Notre choix est orienté, vers l'utilisation d'un régulateur du type P.I.D dont la fonction de transfert s'écrit sous la forme :

$$GRN(P) = \frac{(1+P.T_{nv})(1+P.T_{vv})}{P.T_{iv}}$$

Pour une adaptation optimale du régulateur on choisit :

$$T_{nv} = T_{em} = 0.17 \text{ s}$$

$$T_{vv} = T_e = 0.016 \text{ s}$$

$$T_{iv} = 2(K_{cm}/K_m) \cdot T_{cm} = 0.073 \text{ s}$$

2.2.4: REPONSES INDICIELLES DES BOUCLES VITESSE ET COURANT:

Les fonctions de transferts en boucles parallèles sont identiques à la fonction de transfert du courant en boucle ouverte en cascade. Par conséquent les réponses indicielles de vitesse et de courant sont similaires à la réponse indicielle représentée sur la figure: 2.7

2.2.5: SIMULATION DE LA REGULATION EN BOUCLES PARALLELES:

Le schéma fonctionnel figure: 2.24, de la régulation en boucles parallèle est constitué des blocs suivants:

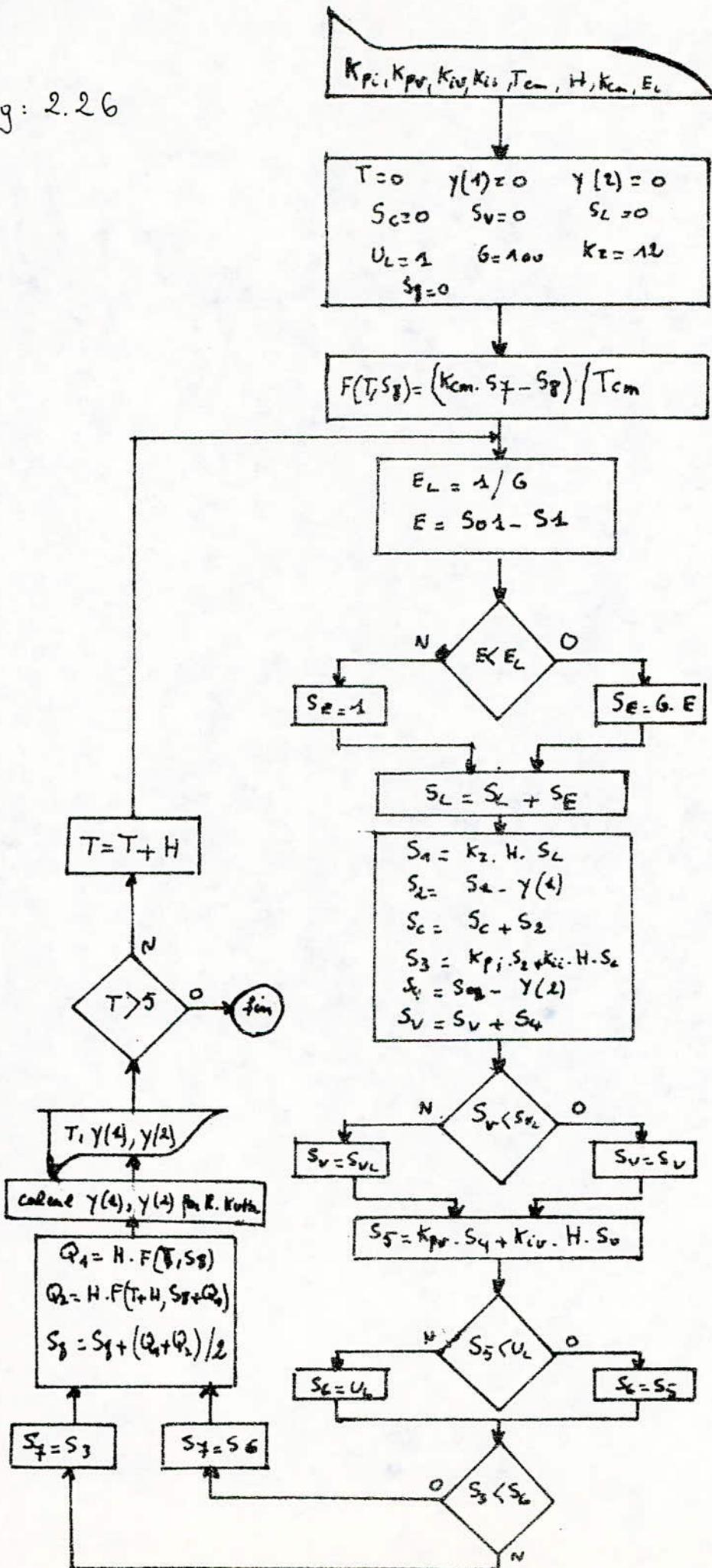
Un limiteur du gradient de courant, un limiteur de courant, un régulateur de courant et de vitesse, un convertisseur de courant le groupe moteur -génératrice et en plus un commutateur électronique.

la figure:2.25 donne la variation du courant sans limitation de son gradient.

L'organigramme représenté sur la figure :2.26, traite la simulation avec limiteur du gradient de courant. L'exploitation de cet organigramme par le programme (annexe 3), permet d'avoir les réponses du moteur en courant figure :2.27 et en vitesse figure:2.28 pour une consigne qui correspond à la vitesse nominale.

On voit bien que le gradient de courant est limité et que la réponse de la vitesse est plus rapide que celle trouver dans le cas de régulation en cascade.

Fig: 2.26



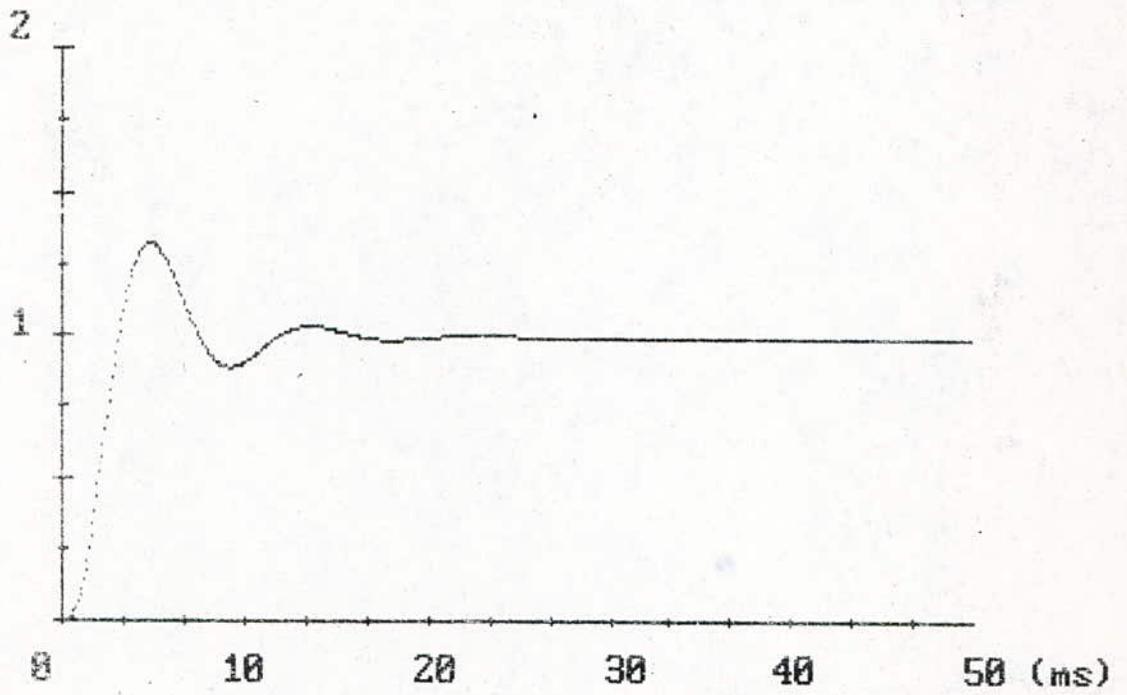


Fig: 2.25 Courant sans limitation de son gradient (régulation en parallèles)

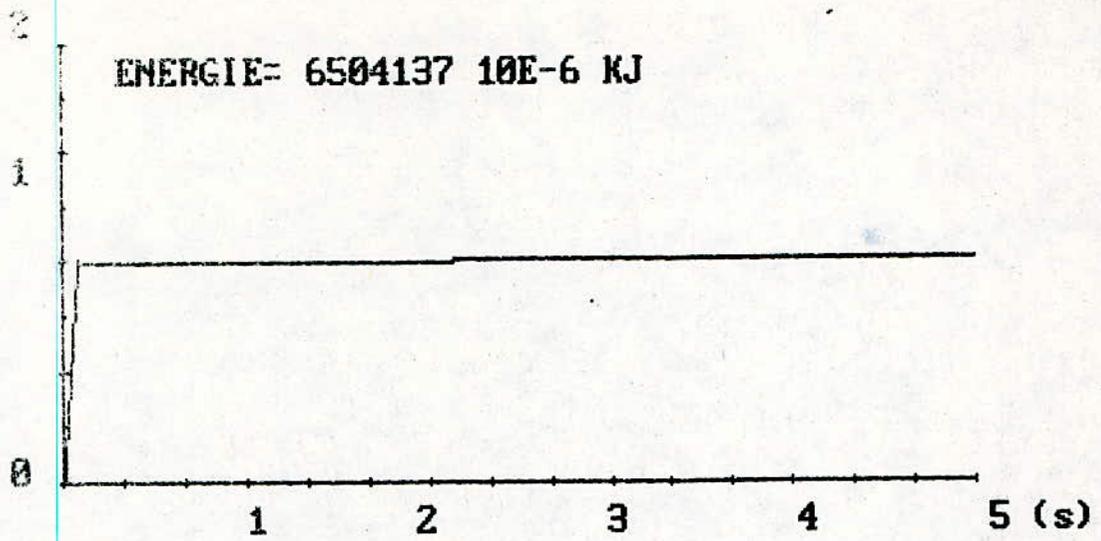


Fig: 2.27 Courant avec limitation de son gradient

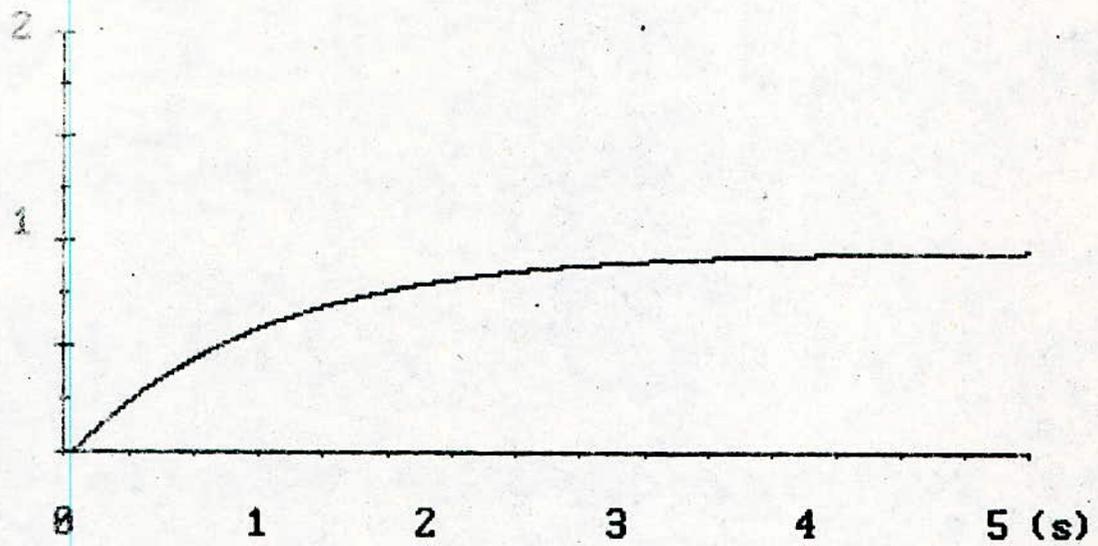


Fig: 2.28 vitesse à la charge nominale
(régulation en parallèle)

CHAPITRE III
SIMULATION ANALOGIQUE

3.1 INTRODUCTION

Le but de ce chapitre est de vérifier les résultats de la régulation en cascade sur un calculateur analogique.

Ce dernier a pour rôle essentiel de rapprocher le système étudié, régulation de vitesse d'un moteur à courant continu, à un système physique réel et en simulant rapidement et à peu de frais à la fois.

3.2 SCHEMA DIRECTEUR DU MOTEUR

Comme on a vu précédemment le moteur est lié par deux équations une électrique, l'autre mécanique.

En utilisant les grandeurs relatives on a le système suivant:

$$dI_r = \frac{U_n \cdot U_r}{L_t \cdot I_n} - \frac{R_t}{L_t} \cdot I_r - \frac{K_m \cdot 2 \cdot \pi \cdot N_n}{L_t \cdot 60 \cdot I_n}$$

$$dN_r = \frac{60 \cdot K_m \cdot I_n}{2 \cdot \pi \cdot J \cdot N_n} \cdot I_r - \frac{K_r}{J} \cdot N_r$$

On pose:

$$A = U_n / (L_t \cdot I_n) = 498.18$$

$$B = -R_t / L_t = -28.26$$

$$C = -K_m \cdot 2 \cdot \pi \cdot N_n / (L_t \cdot 60 \cdot I_n) = -512.216$$

$$D = 60 \cdot K_m \cdot I_n / (2 \cdot \pi \cdot J \cdot N_n) = .943$$

$$E = -K_r / J = -.975$$

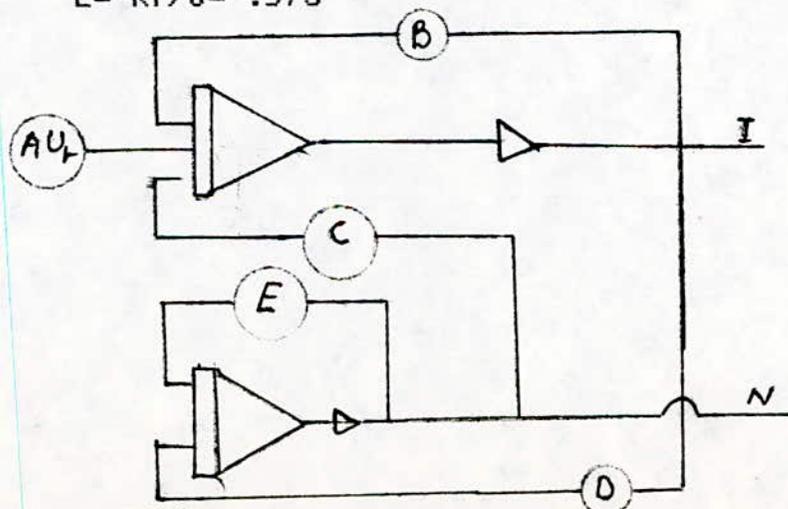


Fig:3.1 schéma directeur du moteur

LE schéma directeur est donné par la figure 3.1, il comprend deux blocs intégrateur un de la vitesse l'autre de courant.

3.2 SCHEMA DE CABLAGE DU MOTEUR

Avant de faire le schéma de câblage (figure: 3.2) il faut au préalable fixer les échelles .

Le principe de la mise en échelle est de faire correspondre à une grandeur physique ,vitesse ou courant, une tension disponible à la sortie d'un élément du calculateur.

Echelle de courant: $m_i = 10 / (20 \cdot I_n) = .5 \text{ V}/I_n$

Echelle de vitesse: $m_n = 10 / (2 \cdot N_n) = 5 \text{ V}/N_n$

Echelle de tension: $m_u = 10 \text{ V}/U_n$

En tenant compte de ses considérations le schéma directeur est donné par la figure ci dessus:

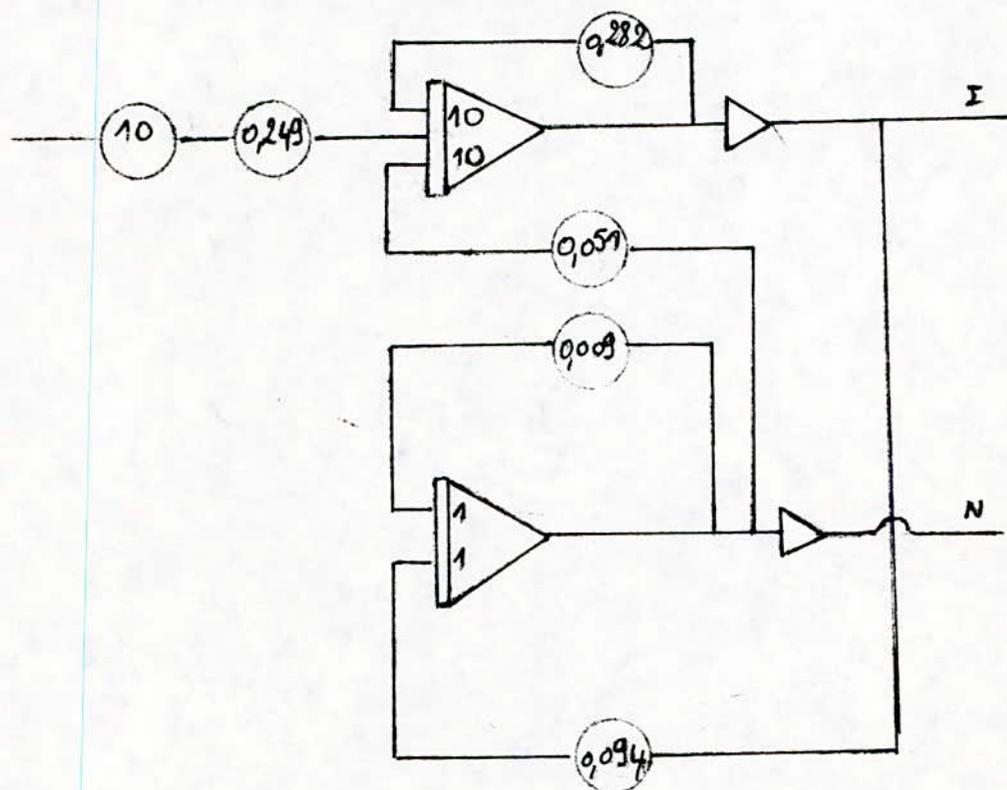


Fig 3.2 SCHEMA DE CABLAGE DU MOTEUR

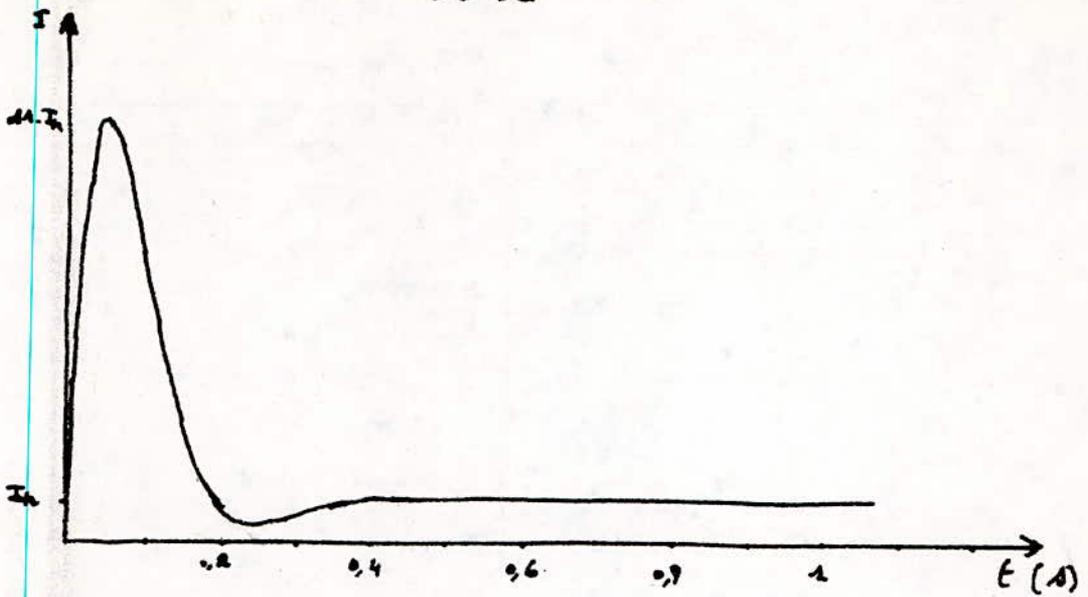


Fig: 3.3 courant au démarrage en régime libre

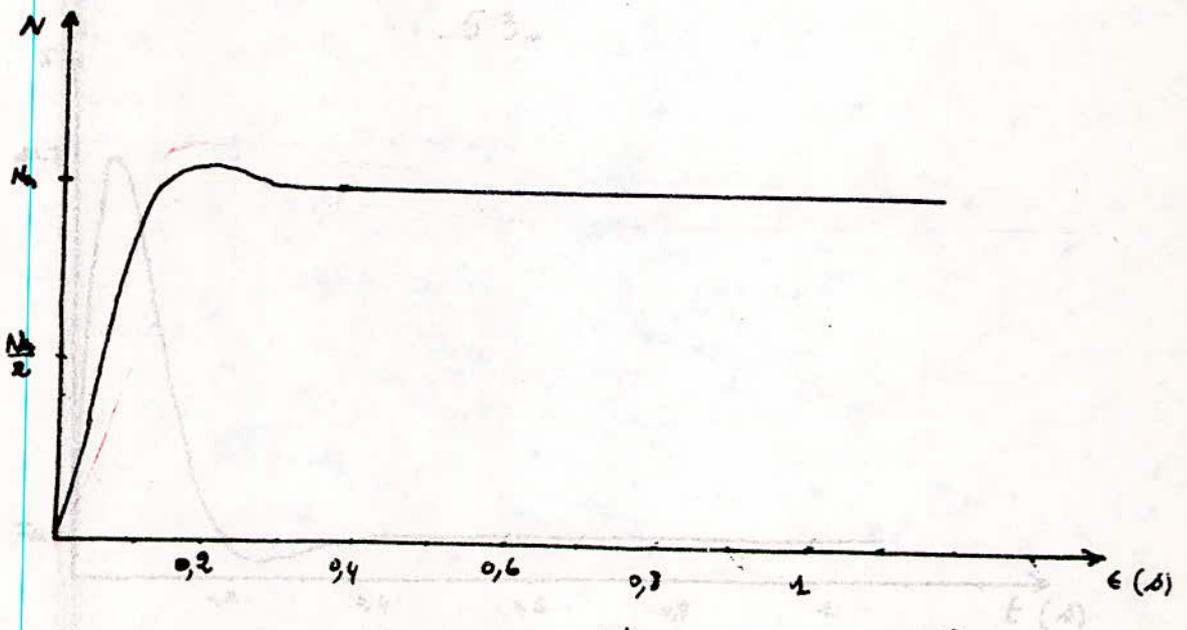


Fig: 3.4 vitesse au démarrage en régime libre

Les figures :3.3 et 3.4 représentent les variations du courant et de la vitesse au démarrage du moteur sans utilisation d'un rhéostat de démarrage et sans régulation. On déduit que le pique de courant est de l'ordre de 11In ce qui peut détruire le moteur malgré que le temps est très court .

Le courant et la vitesse atteignent le régime nominale au bout de 3.5 s

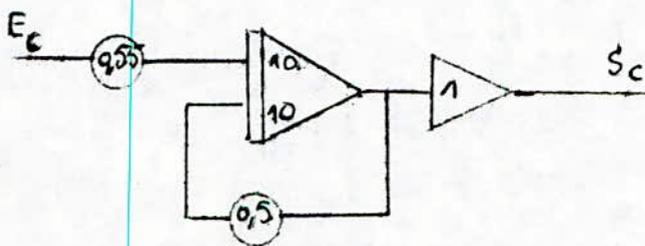
3.4 SCHEMA DE CABLAGE DU CONVERTISSEUR DE COURANT

La fonction de transfert du convertisseur est :

$$G_{cm}(P) = \frac{K_{cm}}{1+T_{cm}.P} = \frac{11}{1+.002.P} = \frac{11/.002}{1/.002+P}$$

$$G_{cm}(P) = \frac{5500}{500+P}$$

En désignant par E_c, S_c respectivement l'entrée et la sortie du convertisseur le schéma de câblage est représenté ci dessus :



3.5 SCHEMA DE CABLAGE DU REGULATEUR DE COURANT

La fonction de transfert du régulateur de courant est :

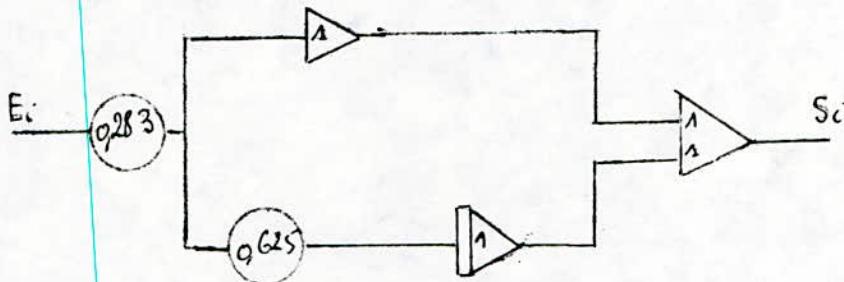
$$G_{RI}(P) = \frac{1+T_{ni}.P}{T_{ii}.P} = \frac{1+.016.P}{.0564.P}$$

Cette dernière peut se mettre sous la forme :

$$G_{RI}(P) = .283 .(62.5/P+1)$$

On désigne par E_i et S_i respectivement l'entrée et la sortie du

régulateur de courant le schéma de câblage est donné par la figure ci dessus:



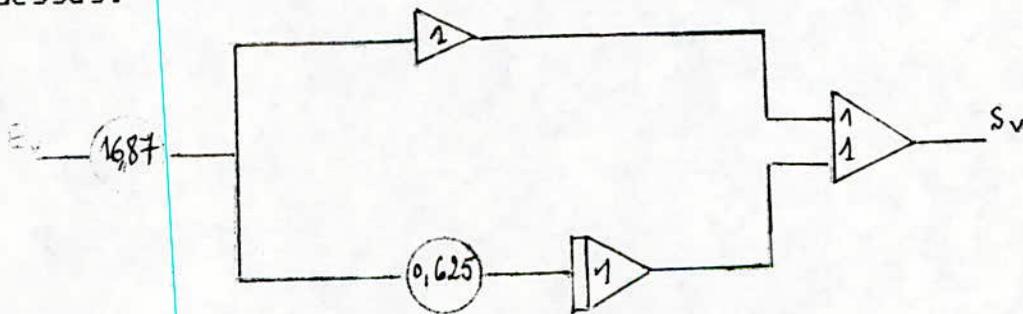
3.6 SCHEMA DE CABLAGE DU REGULATEUR DE VITESSE

le régulateur de vitesse a pour fonction de transfert:

$$GRN(P) = \frac{1 + T_{nv}.P}{T_{iv}.P} = \frac{1 + 0.016.P}{0.000094.P}$$

$$GRN(P) = 16.87.(62.5/P + 1)$$

On designe par E_v, S_v l'entrée et la sortie du régulateur de vitesse. Le schéma de câblage est représenté par la figure cidessus:



3.7 SIMULATION DE LA REGULATION DE COURANT ET DE LA VITESSE

En prenant comme valeur de consigne respectivement du courant et de la vitesse .1 V le schéma de câblage est par la figure :3.5 DE la courbe représentative de la lois de variation de courant (figure:3.6)on constate que le courant est régulé avec un très faible dépassement ,li atteint sa valeur de consigne après .75 s
REMARQUE:lors du relevé de la variation de la vitesse(figure 3.7)

on a trouvé des difficultés dues aux capacités limités du
calculateur analogique.

Calcul de régulation en cascade

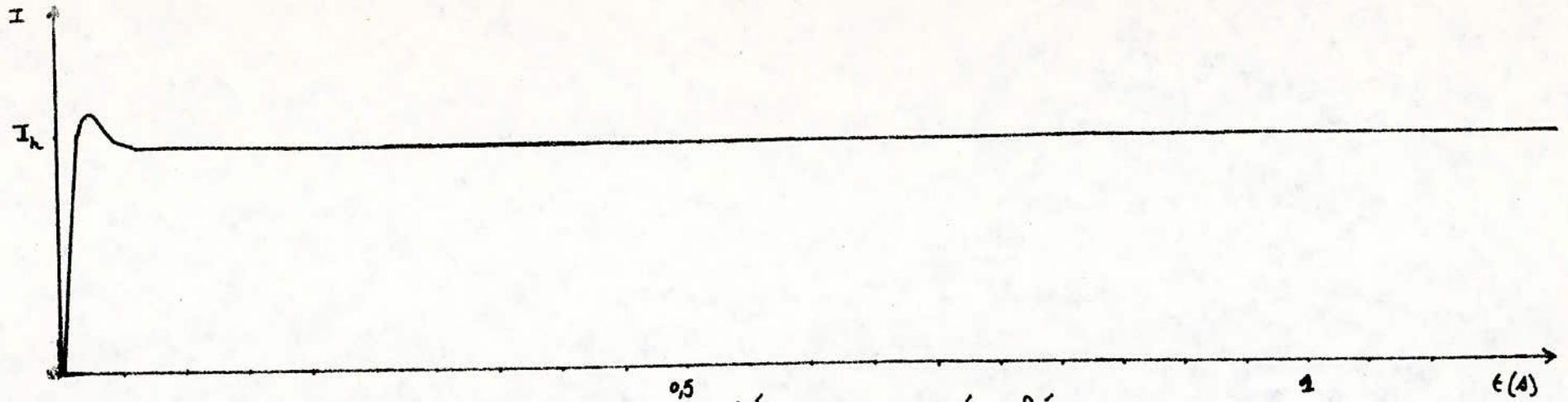


Fig: 3.6 courant au démarrage régulé

-58-

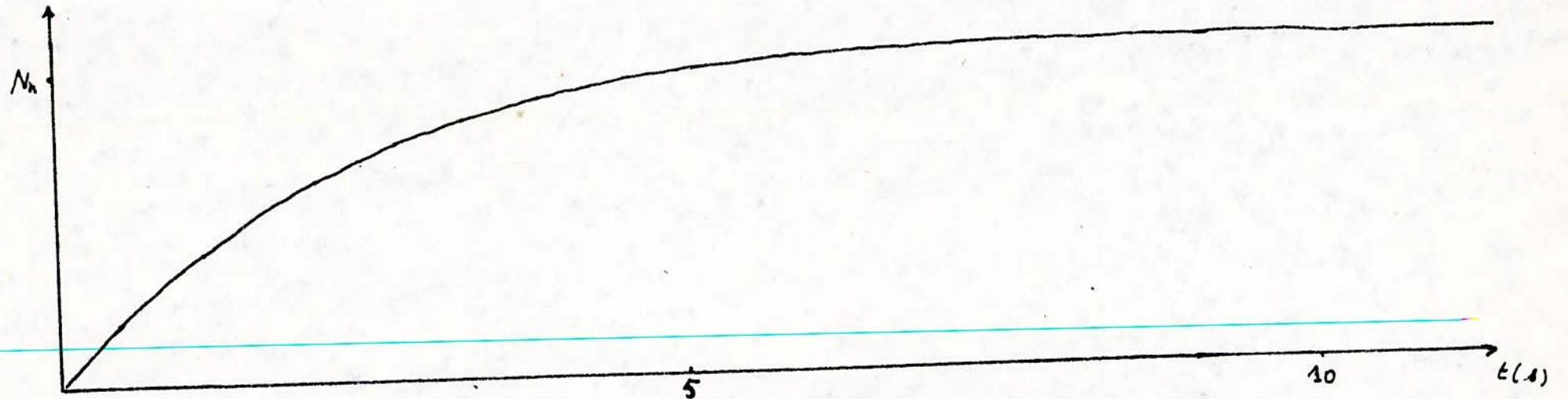


Fig: 3.7 vitesse au démarrage

CONCLUSION

Notre étude nous a permis d'aboutir aux résultats suivants :
 l'adaptation du rhéostat de démarrage au moteur est nécessaire afin de limiter la variation du courant dans la plage admissible fixée, mais la caractéristique de limitation gradient de courant n'est pas vérifiée.

La possibilité du réglage à l'optimum des régulateurs pour les deux types de régulation étudiés, du fait de la présence d'un régulateur séparé pour chaque boucle, d'où la simplicité des calculs et la mise en service.

En comparant les deux types de régulation étudiés nous avons pu montrer que la variation de vitesse est plus rapide dans le cas de la régulation en parallèle que dans le cas de la régulation en cascade. Donc le temps mis par le moteur pour démarrer est plus court dans le cas de la régulation en parallèle.

Nous avons pu montrer qu'il est possible de fixer le gradient de courant dans les plages admissibles, ainsi on évite les problèmes des surtensions aux bornes des lames du collecteur provoquant la naissance des étincelles.

Quel que soit le type de régulation analogique ou numérique on obtient le même résultat. L'avantage de la simulation analogique et de rapprocher le système étudié au cas physique réel en remplaçant le système par des opérateurs logiques (intégrateur, sommateur, inverseur etc...). En plus la simulation analogique est plus rapide moins coûteuse.

Annexe 1

```

10 REM*****
20 REM* ETUDE DU DEMARRAGE D UN MOTEUR *
30 REM*MOTEUR A COURANT CONTINU *
40 REM*****
45 REM
50 REM<<ETUDE DES LOIS DE VARIATION DU COUR-
60 REM RANT ET DE LA VITESSE LORS DU
70 REM DEMARRAGE DU MOTEUR >>
71 REM-----
75 REM
80 REM <<les parametres du moteur sont:
90 REM RA:resistance de l'induit en ohms
100 REM L:inductance de l'induit en henry
110 REM J:moment d'inertie en kg*m^2
120 REM KM:constante du moteur en v*sd/rd >>
130 REM-----
135 REM
140 REM <<les parametres de la generatrice sont:
150 REM KG:constantes de la generatrice en V*s/rd
160 REM KF:coefficient du frottement >>
170 REM -RC la somme de la resistance de la charge
180 REM -nominale et de l'induit de la generatrice >>
190 REM-----
195 REM
200 REM << U tension nominale du moteur en V >>
210 REM << RH resistance du rheostat du demarrage
220 REM en ohms >>
230 REM-----
240 REM
250 PRINT"1-----COURANT"
260 PRINT"2-----VITESSE"
265 PRINT"3----- L'ENERGIE"
270 INPUT "COURBE A TRACER EST: ",UU
280 IF UU=1 THEN YMAX=50
290 IF UU=2 THEN YMAX=2000
295 IF UU=3 THEN YMAX=8000
300 XMAX=2.5
310 GOSUB 920
320 READ KM,RA,L,J,KF,KG,RC,U,NS
330 DATA .6, 26,92E-4,.081,.01,.64,5,88,110,2
340 XINIT=0
350 YINIT=0
360 RH=2.75
370 R=RA+RH
380 REM PRINT"RH=";RH
385 REM APPLICATION DE LA METHODE DE RUNGE KUTTA
386 REM-----
387 REM Y(1):COURANT ; Y(2):VITESSE
388 REM-----
389 DIM Y(2),K(2,4),X(2),F(2)
390 FOR I=1 TO NS
400 Y(I)=0
401 NEXT I
403 REM-----
405 REM T:LE TEMPS ,H:LE PAS ,S:L'ENERGIE
407 REM-----
410 T=0
415 S=0

```

```

420 KR=KF+(KG^2)/RC
440 H=.001
481 REM-----
485 REM CALCUL DES COEFFICIENTS DE RUNGE KUTTA
486 REM-----
490 FOR I=0 TO N5
495 X(I)=Y(I)
500 NEXT I
510 GOSUB 880
525 FOR I=1 TO N5
530 K1(I)=F(I)*H
535 X(I)=Y(I)+K1(I)/2
540 NEXT I
560 GOSUB 880
570 FOR I=1 TO N5
580 K2(I)=H*F(I)
590 X(I)=Y(I)+K2(I)/2
600 NEXT I
610 GOSUB 880
620 FOR I=1 TO N5
630 K3(I)=H*F(I)
640 X(I)=Y(I)+K3(I)
650 NEXT I
660 GOSUB 880
680 FOR I=1 TO N5
682 K4(I)=H*F(I)
685 NEXT I
688 FOR I=1 TO N5
690 Y(I)=Y(I)+(K1(I)+2*K2(I)+2*K3(I)+K4(I))/6
700 NEXT I
710 T=T+H
720 REM PRINT"Y(1)=";Y(1),"Y(2)=";Y(2),"T=";T
722 IF T<1.9 THEN 725
723 IF UU=3 THEN 790
725 GOSUB 1110
730 X=T
740 IF UU=1 THEN Y=Y(1)
750 IF UU=2 THEN Y=Y(2)*60/6.28
755 IF UU=3 THEN Y=S
760 LINE (XINIT,YINIT)-(X,Y)
770 XINIT=T
780 YINIT=Y
790 IF T<.082 THEN 850
800 IF Y(1)>24 THEN 850
810 IF RH=0 THEN 850
820 READ RH
830 DATA 1.7,1.05,.65,.35,0.18,.05,0
835 REM PRINT"RH=";RH
840 R=RA+RH
850 IF T>2.5 THEN 870
860 GOTO 490
870 END
875 '-----
880 REM SUB. CALCUL DES FONCTIONS
890 F(1)=U/L-(R/L)*X(1)-(KM/L)*X(2)
900 F(2)=(KM/J)*X(1)-(KR/J)*X(2)
905 RETURN
906 '-----
910 REM (SUB DES COURBES A TRACER)
920 CLS
930 SCREEN 3
940 VIEW (2,45)-(380,250)
950 WINDOW (-XMAX/10,-YMAX/10)-(XMAX,YMAX)

```

```

960 LINE (0,0)-(XMAX,0)
970 LINE (0,0)-(0,YMAX)
980 FOR I=0 TO YMAX STEP YMAX/8
990 LINE (-XMAX/200,I)-(XMAX/200,I)
991 NEXT I
1010 FOR I=0 TO YMAX STEP YMAX/4
1020 LINE (-XMAX/100,I)-(XMAX/100,I)
1030 NEXT I
1040 FOR I=0 TO XMAX STEP XMAX/15
1050 LINE(I,-YMAX/200)-(I,YMAX/200)
1060 NEXT I
1070 FOR I=0 TO XMAX STEP XMAX/5
1080 LINE(I,-YMAX/100)-(I,YMAX/100)
1081 NEXT I
1082 IF UU=3 THEN LOCATE 18,15:PRINT"énergie S(t)"
1083 IF UU=1 THEN LOCATE 18,15 :PRINT"courbe du courant I(t) au
1084 IF UU=2 THEN LOCATE 18,15:PRINT"vitesse n(tr/mn) au demarra
1085 LOCATE 16,48:PRINT"2.5"(s)"
1088 IF UU=3 THEN LOCATE 4,1:PRINT"(J)"
1090 IF UU=3 THEN LOCATE 3,1:PRINT"8000"
1091 IF UU=3 THEN LOCATE 9,1 :PRINT"4000"
1094 LOCATE 16,5:PRINT"0"
1095 IF UU=1 THEN LOCATE 3,2:PRINT"50(A)"
1097 IF UU=2 THEN LOCATE 3,1:PRINT"2000"
1098 LOCATE 16,13:PRINT".5":LOCATE 16,22:PRINT"1"
1099 LOCATE 16,30:PRINT"1.5":LOCATE 16,39:PRINT"2"
1101 IF UU=1 THEN LOCATE 9,1:PRINT"25"
1102 IF UU=2 THEN LOCATE 9,1:PRINT"1000"
1105 RETURN
1106 '-----
1110 REM ((SUB DE CALCUL D'ENERGIE))
1120 REM ((METHODE DES RECTANGLES ))
1150 REM S:L'ENERGIE
1160 S=S+(U*Y(1))*H
1170 REM PRINT "S=";S
1180 IF UU=3 THEN LOCATE 6,10:PRINT"energie consommée au demarr:
1190 RETURN

```

Annexe 2

```

1 REM*****
2 REM* SIMULATION DE LA REGULATION EN CASCADE *
3 REM*****
4 '
5 '**ETUDE DES LOIS DE VARIATIONS DU COURANT ET DE LA VITESSE **
6 '**                                                                 **
7 '**          AU DEMARRAGE A LA CHARGE NOMINALE          **
8 '*****
9 '
10 'LES PARAMETRES DU MOTEUR SONT:
11 '
12 'RA résistance du moteur
13 'L inductance du moteur
14 'J moment d'inertie du moteur
15 'KM constante du moteur en V*s/rd
16 'KF coefficient du frottement
17 '
18 'les parametres de la generatrice
19 'KG constante de la generatrice en V*s/rd
20 'RC résistance de la charge nominale plus celle de la generatrice
21 '
22 ' U tension nominale du moteur en V
23 ' RH résistance du rhéostat de démarrage
24 '-----
84 XMAX=10
85 YMAX=2
86 GOSUB 1050
90 GOSUB 1270
100 READ KM,R,L,J,KF,KG,RC
110 DATA .6,.78,126.8E-4,.081,.01,.64,5.88
120 'les grandeurs nominales
130 READ UN,IN,NN
140 DATA 110,24,188.5
150 'calcul des constantes des regulateurs
160 TE=L/R
170 TNI=TE
175 KCM=11
180 T1=.004
190 TII=T1*KCM/R
200 TNV=4*T1
210 T2=J/KM
220 TIV=2*TNV*T1/T2
230 TPV=TNV/TIV
240 KIV=1/TIV
250 KPI=TNI/TII
260 KII=1/TII
270 'Calcul des grandeurs relatives
280 'RT:résistance relative
290 RT=R*IN/UN
300 'LT:inductance relative
310 LT=L*IN/UN
320 'MR:couple résistant nominale
330 KR=KF+KG^2/RC
340 MR=KR*NN

```

```

350 REM-----
360 A=KM*NN/(UN*LT)
370 B=-KR/J
380 D=KM*IN/(J*NN)
390 DIM Y(2),X(2),F(2),K(2,4)
400 SV=0
410 SC=0
415 SL=0
420 Y(1)=0
430 Y(2)=0
435 H=.001
440 S1=1
450 S2=S1-Y(2)
460 SV=SV+S2
470 S3=KPV*S2+KIV*H*SV
480 UL=1
490 IF S3<UL THEN S4=S3
500 IF S3>=UL THEN S4=UL
502 KI=12.G=100
504 E=S4-S5
506 EL =1/G
508 IF E<EL THEN SE=G*E
510 IF E>=EL THEN SE=1
512 SL=SL+SE
514 S5=KI*H*SL
520 S6=S5-Y(1)
530 SC=SC+S6
540 S7=KPI*S6+KII*H*SC
550 GOSUB 1130
560 'Résolution du Systeme D'équation Différentielle Par Runge Kutta
570 '-----
575 NS=2
580 FOR I=1 TO NS
590 X(I)=Y(I)
600 NEXT I
610 GOSUB 1000
630 FOR I=1 TO NS
640 K1(I)=H*F(I)
650 X(I)=Y(I)+K1(I)/2
660 NEXT I
670 T=T+H/2
680 GOSUB 1000
700 FOR I=1 TO NS
710 K2(I)=H*F(I)
720 X(I)=Y(I)+K2(I)/2
730 NEXT I
740 GOSUB 1000
760 FOR I=1 TO NS
770 K3(I)=H*F(I)
780 X(I)=Y(I)+K3(I)
790 NEXT I
800 T=T+H/2
810 GOSUB 1000
830 FOR I=1 TO NS
840 K4(I)=H*F(I)
850 NEXT I
860 FOR I=1 TO NS
870 Y(I)=Y(I)+(K1(I)+2*K2(I)+2*K3(I)+K4(I))/6
880 NEXT I
890 'PRINT "T=";T,"Y(1)=";Y(1),"Y(2)=";Y(2)
900 GOSUB 1420
901 GOSUB 1470
902 IF T<3 THEN GOSUB 1200
910 TI=T
911 IF T>10 THEN 950
920 GOTO 450

```

```

1000 'SUB. Calcul Des Fonctions De Runge Kutta
1010 C=58/LT
1020 F(1)=C-(RT/LT)*X(1)-A*X(2)
1030 F(2)=D*X(1)+B*X(2)
1040 RETURN
1050 'SUB DES COURBES A TRACER
1060 CLS:SCREEN 3
1070 VIEW (2,45)-(380,200)
1075 CLS:SCREEN 3
1080 WINDOW (-XMAX/10,-YMAX/10)-(XMAX,YMAX)
1090 LINE (0,0)-(XMAX,0)
1100 LINE (0,0)-(0,YMAX)
1101 FOR I=0 TO YMAX STEP YMAX/8
1102 LINE (-XMAX/200,I)-(XMAX/200,I)
1103 NEXT I
1104 FOR I=0 TO YMAX STEP YMAX/4
1105 LINE (-XMAX/100,I)-(XMAX/100,I)
1106 NEXT I
1107 FOR I=0 TO XMAX STEP XMAX/15
1108 LINE (I,-YMAX/200)-(I,YMAX/200)
1109 NEXT I
1110 LOCATE 3,2:PRINT 2:LOCATE 8,2:PRINT 1:LOCATE 12,2:PRINT 0
1111 LOCATE 13,46:PRINT 10,"5":LOCATE 13,2:PRINT 2:LOCATE 17,2:PRINT 1
1112 LOCATE 22,3:PRINT 0:LOCATE 22,48:PRINT 10,"5"
1129 RETURN
1130 '-----
1135 'SUB DE CALCUL DU SIGNAL 58
1140 TCM=.002
1150 DEF FNF(T,58)=(1/TCM)*(KCM*57-58)
1160 Q1=H*FNF(T,58)
1170 Q2=H*FNF(T+H,58+Q1)
1180 S8=58+(Q1+Q2)/2
1190 RETURN
1200 'SUB DE CALCUL D'ENERGIE
1210 ' METHODE DES RECTANGLES
1220 S=5+H*58*Y(1)*110*24
1230 LOCATE 5,10:PRINT "ENERGIE=";S*1000,"10E-6 KJ"
1240 RETURN
1250 'SUB
1260 SCREEN 3
1270 VIEW (0,200)-(400,350)
1280 WINDOW (-XMAX/10,-YMAX/10)-(XMAX,YMAX)
1290 LINE (0,0)-(XMAX,0)
1300 LINE (0,0)-(0,YMAX)
1310 FOR I=0 TO XMAX STEP XMAX/15
1320 LINE (I,-YMAX/200)-(I,YMAX/200)
1330 NEXT I
1340 FOR I=0 TO YMAX STEP YMAX/4
1350 LINE (-XMAX/100,I)-(XMAX/100,I)
1360 NEXT I
1370 FOR I=0 TO YMAX STEP YMAX/8
1380 LINE (-XMAX/200,I)-(-XMAX/200,I)
1390 NEXT I
1400 RETURN
1420 VIEW (2,45)-(380,200)
1430 WINDOW (-XMAX/10,-YMAX/10)-(XMAX,YMAX)
1440 LINE (T1,Y11)-(T,Y(1))
1450 Y11=Y(1)
1460 RETURN
1470 VIEW (0,200)-(400,350)
1480 WINDOW (-XMAX/10,-YMAX/10)-(XMAX,YMAX)
1490 LINE (T1,Y12)-(T,Y(2))
1500 Y12=Y(2)
1510 RETURN

```

Annexe 3

```

1 REM*****
3 '*SIMULATION DE LA REGULATION EN PARALLELE *
4 '-----
5 '**ETUDE DES LOIS DE VARIATIONS DU COURANT ET DE LA VITESSE **
6 '****
7 '** DEMARRAGE EN CHARGE NOMINALE **
8 '*****
9 '
10 'LES PARAMETRES DU MOTEUR SONT:
11 '
12 'RA résistance du moteur
13 'L inductance du moteur
14 'J moment d'inertie du moteur
15 'KM constante du moteur en V*s/rd
16 'KF coefficient du frottement
17 '
18 'les parametres de la generatrice
19 'KG constante de la generatrice en V*s/rd
20 'RC résistance de la charge nominale plus celle de la generatrice
21 '
22 'U tension nominale du moteur en V
23 'RH résistance du rhéostat de démarrage
24 '-----
80 PRINT*1-----COURANT"
81 PRINT*2-----VITESSE"
84 XMAX=5
85 YMAX=2
86 GOSUB 1050
90 GOSUB 1210
100 READ KH,R,L,J,KF,KG,RC
110 DATA .6,.78,126.8E-4,.081,.01,.64,5.88
120 'les grandeurs nominales
130 READ UN,IN,NN
140 DATA 110,24,188.5
150 'calcul des constantes des regulateurs
160 TE=L/R :TEM=R*J/KM^2
170 TNI=TE
175 KCM=11 :TCM=.002
180 T1=.006
190 TII=2*KCM*TCM/R
200 TNU=TEM
210 T2=J/KH
220 TIV=2*KCM*TCM/KM
230 KPV=TNU/TIV
240 KIV=1/TIV
250 KPI=TNI/TII
260 KII=1/TII
270 'Calcul des grandeurs relatives
280 'RT:résistance relative
290 RT=R*IN/UN
300 'LT:inductance relative
310 LT=L*IN/UN
320 'MR:couple resistant nominale
330 KR=KF+KG^2/RC
340 MR=NN
350 REM-----
360 A=KM*NN/(IN*L)
370 B=-KR/J
380 D=KM*IN/(J*NN)
390 DIM Y(2),X(2),F(2),K(2,4)
400 SV=0

```

```

410 SC=0
415 SL=0
420 Y(1)=0
430 Y(2)=0
435 H=.001
440 S01=1
450 KI=12:G=100
460 E=S01-S1
470 EL =1/G
490 IF E<EL THEN SE=G*E ELSE SE=1
500 SL=SL+SE
502 S1=KI*H*SL
505 S2=S1-Y(1)
510 SC=SC+S2
514 S3=KPI*S2+KII*H*SC
515 S02=1
520 S4=S02-Y(2)
530 SV=SV+S4
531 SVL=1/(KIV*H)
532 IF SV<SVL THEN SV=SV ELSE SV=SVL
540 S5=KPV*S4+KIV*H*SV
541 UL=1
542 IF S5<UL THEN S6=S5 ELSE S6=UL
545 IF S3<S6 THEN S7=S3 ELSE S7=S6
550 GOSUB 1130
555 'PRINT "S7=";S7,"S8=";S8
560 'Résolution du Systeme D'équation Différentielle Par Runge Kutta
570 '-----
575 N5=2
580 FOR I=1 TO N5
590 X(I)=Y(I)
600 NEXT I
610 GOSUB 1000
630 FOR I=1 TO N5
640 K1(I)=H*F(I)
650 X(I)=Y(I)+K1(I)/2
660 NEXT I
670 T=T+H/2
680 GOSUB 1000
700 FOR I=1 TO N5
710 K2(I)=H*F(I)
720 X(I)=Y(I)+K2(I)/2
730 NEXT I
740 GOSUB 1000
760 FOR I=1 TO N5
770 K3(I)=H*F(I)
780 X(I)=Y(I)+K3(I)
790 NEXT I
800 T=T+H/2
810 GOSUB 1000
830 FOR I=1 TO N5
840 K4(I)=H*F(I)
850 NEXT I
860 FOR I=1 TO N5
870 Y(I)=Y(I)+(Y1(I)+2*K2(I)+2*K3(I)+K4(I))/6
880 NEXT I
890 'PRINT "T=";T,"Y(1)=";Y(1),"Y(2)=";Y(2)
900 GOSUB 1240
901 GOSUB 1400
905 IF T<3 THEN GOSUB 1480
910 TI=T
911 IF T/5 THEN 950
920 GOTO 440
950 END

```

```

1000 'SUB. Calcul Des Fonctions De Runge Kutta
1010 C=58/LT
1020 F(1)=C-(R/L)*X(1)-A*X(2)
1030 F(2)=D*X(1)+B*X(2)
1040 RETURN
1050 'SUB DES COURBES A TRACER
1060 CLS:SCREEN 3
1070 VIEW (2,45)-(380,200)
1075 CLS:SCREEN 3
1080 WINDOW (-XMAX/10,-YMAX/10)-(XMAX,YMAX)
1090 LINE (0,0)-(XMAX,0)
1100 LINE (0,0)-(0,YMAX)
1101 FOR I=0 TO YMAX STEP YMAX/8
1102 LINE (-XMAX/400,I)-(XMAX/400,I)
1103 NEXT I
1104 FOR I=0 TO YMAX STEP YMAX/4
1105 LINE (-XMAX/200,I)-(XMAX/200,I)
1106 NEXT I
1107 FOR I=0 TO XMAX STEP XMAX/15
1108 LINE (I,-YMAX/200)-(I,YMAX/200)
1109 NEXT I
1110 LOCATE 3,2:PRINT 2
1111 LOCATE 6,2:PRINT 1
1112 LOCATE 12,2:PRINT 0:LOCATE 13,48:PRINT 5*(5)"
1113 LOCATE 13,13:PRINT 1:LOCATE 13,21:PRINT 2
1114 LOCATE 13,30:PRINT 3:LOCATE 13,39:PRINT 4
1129 RETURN
1130 '-----
1140 TCM=.002
1150 DEF FNF(T,58)=(1/TCM)*(KCM*57-58)
1160 Q1=H*FNF(T,58)
1170 Q2=H*FNF(T+H,58+Q1)
1180 S8=58+(Q1+Q2)/2
1190 RETURN
1200 '
1210 SCREEN 3
1220 VIEW (0,200)-(400,350)
1230 WINDOW (-XMAX/10,-YMAX/10)-(XMAX,YMAX)
1240 LINE (0,0)-(XMAX,0)
1250 LINE (0,0)-(0,YMAX)
1260 FOR I=0 TO XMAX STEP XMAX/15
1270 LINE (I,-YMAX/200)-(I,YMAX/200)
1280 NEXT I
1290 FOR I=0 TO YMAX STEP YMAX/4
1300 LINE (-XMAX/100,I)-(XMAX/100,I)
1305 NEXT I
1310 FOR I=0 TO YMAX STEP YMAX/8
1311 LINE (-XMAX/200,I)-(XMAX/200,I)
1312 NEXT I
1313 LOCATE 23,4:PRINT 0:LOCATE 23,13:PRINT 1
1314 LOCATE 23,21:PRINT 2:LOCATE 23,30:PRINT 3
1315 LOCATE 23,39:PRINT 4:LOCATE 23,48:PRINT 5*(5)"
1316 LOCATE 13,2:PRINT 2:LOCATE 17,2:PRINT 1
1320 RETURN
1330 '
1340 VIEW (2,45)-(380,200)
1350 WINDOW (-XMAX/10,-YMAX/10)-(XMAX,YMAX)
1360 LINE (T1,Y11)-(T,Y(1))
1370 Y11=Y(1)
1380 RETURN
1390 '
1400 VIEW (0,200)-(400,350)
1410 WINDOW (-XMAX/10,-YMAX/10)-(XMAX,YMAX)
1420 LINE (T1,Y12)-(T,Y(2))
1430 Y12=Y(2)

```

1450 '-----
1460 'SUB. DE CALCUL D'ENERGIE
1470 'METHODE DES RECTANGLES
1480 S=5+58*Y(1)*H*110*24
1490 LOCATE 4,8:PRINT "ENERGIE=";S*1000;"10E-6 KJ"
1500 RETURN

BIBLIOGRAPHIE

- /1/ G. SEGUIER - F. NOTELET
ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE
- /2/ R. CHAUPRADE
ELECTRONIQUE DE PUISSANCE
1. COMMANDE DES MOTEURS A COURANT CONTINU
- /3/ H. BUHLER
ELECTRONIQUE DE COMMANDE ET DE REGLAGE
- /4/ J. CH. GILLE - P. DECAULNE - M. PELEGRIN
THEORIE ET CALCUL DES ASSERVISSEMENTS LINEAIRES
- /5/ MADAME C. VALLEE
MANUEL DIDACTIQUE
CALCUL ANALOGIQUE
- /6/ G. FLORENT
EQUATIONS ET SYSTEMES DIFFERENTIELLES
- /7/ G. SEGUIER
ELECTRONIQUE DE PUISSANCE
- /8/ H. CHEKIREB
THESE DE MAGISTER
ETUDE DU REGIME DISCONTINU D'UN MOTEUR A COURANT
CONTINU ALIMENTE PAR UN PONT A THYRISTORS.
- /9/ CONFERENCE D'AUTOMATISME
I. N. P. NANCY
- /10/ R. LORTAL
BASIC CONVENTIONNEL
ANALYSE NUMERIQUE