

Tesc

وزارة التعليم العالي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : *Electronique*

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

SIMULATION
DE LA
REGULATION EN CASCADE D'UN MEC

Proposé par :

M^{lle} MOUSSAOUI

Etudié par :

BELKHOUS
DJAMEL

Dirigé par :

M^{lle} MOUSSAOUI

PROMOTION : JUIN 90

D E D I C A C E
--*-*-*-*-*-*-*-*-*-*-*-*-*

Je dédie ce travail à:

- Mon défunt père
- Ma mère
- Ma soeur

INTRODUCTION	-----	6
CHAPITRE I	-----	7
I.1 INTRODUCTION	-----	7
I.2 CARACTERISTIQUE MECANIQUE D UNE MACHINE	-----	7
I.3 CARACTERISTIQUE MECANIQUE DES MOTEUR A COURANT CONTINU		
I.4 MOTEUR SHUNT OU A EXCITATION SEPARÉE	-----	8
I.5 MOTEUR SERIE	-----	9
I.6 REGLAGE DE LA VITESSE D UN MOTEUR SHUNT	-----	10
I.6.a REGLAGE RHEOSTATIQUE	-----	10
I.6.b REGLAGE PAR LE FLUX	-----	11
I.6.c REGLAGE PAR LA TENSION	-----	11
I.7 ETUDE DU DEMARRAGE	-----	11
I.8 LA MISE EN EQUATION DU MOTEUR	-----	12
I.9 SIMULATION NUMERIQUE	-----	13
I.10 DONNEES NUMERIQUES	-----	16
CHAPITRE II	-----	18
II.1 INTRODUCTION	-----	18
II.2 ORGANE D ENTREE	-----	18
II.2a ORGANE DE CONSIGNE	-----	18
II.2b ORGANE DE MESURE	-----	19
II.2b1 MESURE DE COURANT CONTINU	-----	19
II.2b2 MESURE DE VITESSE	-----	20

II.3	ORGANES DE TRAITEMENT DES SIGNAUX	-----	20
II.3a	COMPARAISON DES VALEUR DE CONSIGNE ET REELE	-----	20
II.3b	REGULATEUR	-----	21
II.3b1	REGULATEUR P	-----	21
II.3b2	REGULATEUR P I	-----	21
II.3b3	REGULATEUR P I D	-----	22
II.4	CIRCUIT DE LISSAGE	-----	22
II.5	LIMITATION	-----	23
CHAPITRE	III	-----	24
III.1	INTRODUCTION	-----	24
III.2	DISPOSITIF DE COMMANDE DE GACHETTES	-----	24
IV	CHAPITRE		
IV -1	INTRODUCTION	-----	27
IV -2	ETUDE DU MOTEUR EN REGIME LIBRE	-----	28
IV -2a	REPONSE A UN ECHELON DE TENSION	-----	29
IV -2b	REPONSE A UN ECHELON DU COUPLE RESISTANT	-----	29
IV -3	SCHEMA DE PRINCIPE D UN ENTRAINEMENT REGLE AVEC MOTEUR A COURANT CONTINU	-----	30
IV -3a	DIAGRAMME FONCTIONNEL DE LA REGULATION EN CASCADE	-----	34
IV -4	CALCUL DES REGULATEURS	-----	34
IV -4a	CALCUL DU REGULATEUR DE COURANT	-----	34
IV -4b	CALCUL DU REGULATEUR DE VITESSE	-----	37
IV -5	INFLUENCE DU COUPLE RESISTANT SUR LA VITESSE	-----	44
IV -6	INFLUENCE DU COUPLE RESISTANT SUR LE COURANT	-----	45
IV -7	LIMITATION DU GRADIENT DE COURANT	-----	48

V-8 LIMITATION DU COURANT AVEC UN GRADIENT IMPOSE -----52

V- 8a CALCUL DES SIGNAUX -----

المركز الوطني المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — مكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

CONCLUSION -----

ANNEXE -----60

BIBLIOGRAPHIE -----70

- II INTRODUCTION -

Les entraînements réglés, c à d les entraînements électromécaniques à vitesse variable, constituent l'application la plus importantes de l'électronique industrielle.

L'industrie au sens le plus large du terme, et les transports, ont de plus en plus besoin de systèmes à vitesse, vitesse continûment variable, doués de souplesse et de précision.

Pour la réalisation des entraînements réglés, on utilise souvent les moteurs à courant continu, qui sont par nature des machines à vitesse variables pour la commande de ces moteurs on utilise des variateurs électronique qui sont 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.

Dans la régulation de ces moteurs, on doit asservir la vitesse qui est considéré comme variable principale, et le courant d'induit qui est considéré comme variable secondaire.

Le but de ce projet est la simulation numérique de la régulation en cascade d'un moteur à courant continu, pour se faire la démarche à suivre est la suivante .

- Le premier chapitre est consacré à l'étude théorique du système à régler (Moteur à courant continu).
- Le deuxième et troisième chapitre ont pour but l'étude des équipements de réglage et de commande .
- Le dernier chapitre est destiné à l'étude de la régulation en cascade du moteur.

- // H A P I T R E I -

ETUDE THEORIQUE DU MOTEUR A COURANT CONTINU

I.1 INTRODUCTION :

Dans Ce chapitre est présentée une étude théorique des moteurs électriques en général et des moteurs courant continu en particulier.

Cette étude va nous permettre de modéliser le moteur ainsi que la simulation de son fonctionnement.

I.2 CARACTERISQTUQUE MECANIQUE D'UNE MACHINE

On appelle caractéristique mécanique d'une machine la courbe du couple en fonction de la vitesse soit :

$$\begin{aligned} C_m &= F_m^{(N)} \text{ pour un moteur.} \\ C_r &= F_r^{(N)} \text{ pour une machine entraînée.} \end{aligned}$$

Le point de fonctionnement d'un ensemble moteur-machine entraînée est donnée par l'intersection de ces deux caractéristiques.

La condition pour que le fonctionnement d'un tel ensemble soit stable est traduite mathématiquement par :

$$(C_m - C_r) / \Delta N < 0$$

Le temp de demarrage d'un groupe est donné, après une aproximation adéquate :

$$t_1 - t_0 = \frac{2 \pi K}{C_m - C_r} (N_1 - N_0)$$

I.3 CARACTERISTIQUE MECANIQUE DES MOTEURS A COURANT CONTINU.

Soit un moteur à excitation séparée
 U_a et V_e les tensions continues respectivement appliquées à l'armature et à l'excitation, d'après la loi d'ohm on a :

$$U_a = E' + R_a I_a \quad \text{--- I-1}$$

avec $E' = \frac{P}{a} N M \phi \quad \text{--- I-2}$

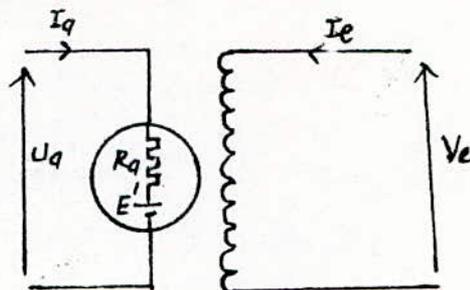


Fig I-1

Le flux utile est produit par le courant d'excitation ($I_e = V_e / R_e$), multiplions l'équation (I - 1) par I_a , on obtient :

$$U_a I_a = E' I_a + R_a I_a^2$$

Si $P_a = R_a I_a$, représente la puissance absorbée par l'induit et $P_j = R_a I_a^2$ les pertes par effet joule, alors la puissance électrique intégralement transformée en puissance mécanique (P_e) est donnée par :

$$P_e = P_a - P_j = E' I_a ; \text{ puissance électromagnétique}$$

Le couple électromagnétique résultant est par conséquent :

$$C_e = \frac{P_e}{2\pi N} = \frac{E' I_a}{2 N} = K I_a \phi, \text{ avec } K = \frac{P \cdot \eta}{2 \cdot \pi \cdot a}$$

Si on tient compte des pertes fer et des pertes mécaniques, le couple moteur serait :

$$C_m = C_e - C_p$$

Dans la pratique $C_p \ll C_e$ c'est pourquoi on peut écrire

$$C_m \cong C_e = K I_a \cdot \phi$$

On en conclue que le couple moteur est proportionnel au courant d'induit et au flux de l'inducteur.

I.4 MOTEUR SHUNT OU A EXCITATION SEPARÉE

Pour ces deux types de moteurs, V_e et I_e sont indépendants de la charge du moteur, c'est pourquoi leurs propriétés sont identiques .

Pour un moteur Shunt on a $I = I_a + I_e$ avec $I_e = U/R_i$

La resistance de l'inducteur est toujours élevée c'est pourquoi on peut écrire :

$$I \cong I_a$$

Si on est à saturation, donc ϕ constant, il vient alors :

$$C_m = K \cdot \phi \cdot I_a \cong K_m \cdot I \text{ avec } K_m = \frac{K_m \cdot R \cdot \eta}{2\pi a} \cdot \phi$$

et d'autre part on : $U - R_a I_a = E' = \frac{P}{a} n N \phi = \lambda \cdot N \cdot \phi$ avec $\lambda = \frac{P \cdot n}{a}$

$$\Rightarrow N \cong \frac{U - R_a I}{\lambda \cdot \phi} = \lambda' \cdot (U - R_a I) \text{ avec } \lambda' = 1/\lambda \cdot \phi$$

En pratique $R_a I \ll U$, c'est pourquoi la caractéristique $N = f(I)$ est une droite descendante de pente très faible.

A partir des équations (I - 3) et (I - 4), on peut déterminer la caractéristique mécanique; soit graphiquement, ou par calcul:

$$C_m = \frac{K}{R_a} \cdot \left(U - \frac{U}{\lambda'} \right)$$

I.5 MOTEUR SERIE

Pour le moteur serie on a $I = I_a = I_e$, si pour simplifier on suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé, le flux utile est alors proportionnel au courant d'excitation ($\phi = I_e \cdot T_g \theta$) il vient alors :

$$C_m = K \phi I_a = K_1 \cdot I^2 \text{ avec } K_1 = K T_g \theta$$

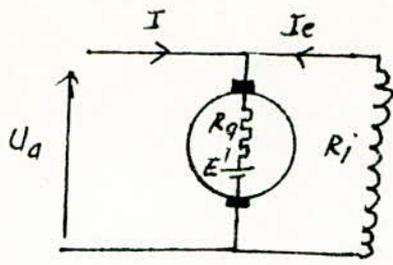
$$U - (R_a + R_i) \cdot I = E' = \frac{P}{a} n N \phi = \lambda N \cdot I \Rightarrow N = \frac{U - (R_a + R_i) I}{\lambda I} = \frac{U - (R_a + R_i) I}{I}$$

La caractéristique $C_m = F_1(I)$ est une parabole passant par l'origine .

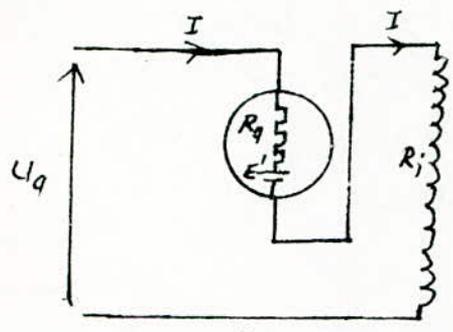
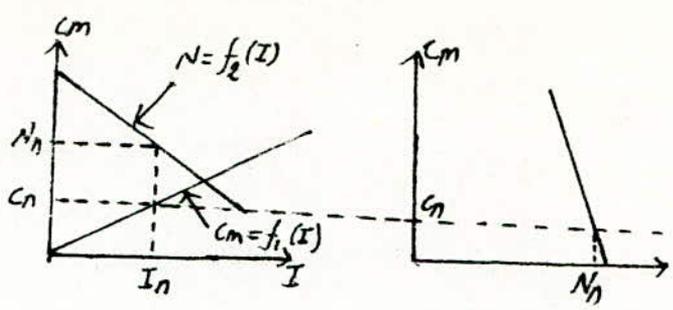
La caractéristique $N = F_2(I)$ est une branche positive décroissante d'une hyperbole.

L'élimination de I entre ces deux caractéristiques permet d'obtenir graphiquement la caractéristique mécanique et on peut conclure que la vitesse d'un moteur serie diminue très rapidement lorsque le couple augmente .

Sur la figure I - 2 on peut voir les différentes caractéristiques pour les deux types de moteur.



(a)



(b)

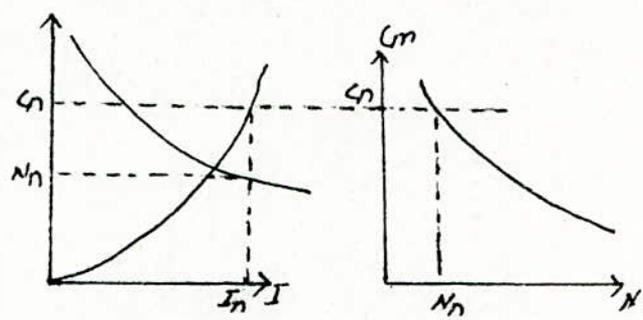


Fig I-2 (a) moteur shunt (b) moteur serie.

Le moteur serie, son emploi s'impose pour des entrainements qui presentent des demarrages frequents sous couple eleve ainsi que de brusque variation de charge.

Cependant lorsque de grosses variations de la vitesse avec la charge sont inacceptables, on utilise un moteur Shunt (machine outil).

Dans la pratique, la grande majorite des entrainements sont a couple constant, tandis que le moteur electrique doit avoir une caracteristique Shunt. C'est pourquoi le moteur que je vais etudier est le moteur Shunt.

I.6 REGLAGE DE LA VITESSE D'UN MOTEUR SHUNT

D'apres l'expression $(N = \frac{1}{\lambda} \frac{U - Ra I}{\phi})$ on constate qu'il y a trois parametres (Ra, ϕ, U) que l'on peut regler donc trois possibilites qui sont :

I.6 -a - Reglage Rheostatique : on peut faire varier la vitesse a l'aide d'un Rheostat branche en serie avec l'induit. Ce type de reglage est mauvais

a cause de la consommation importante d'énergie due à la présence du Rheostat. Dans la pratique le Rheostat n'est utilisé que pour le démarrage ou le freinage.

I.6 b - Reglage par le Flux : Ce type de réglage est bon du point de vue technique parce que les caractéristiques se déplacent parallèlement à la caractéristique d'origine, et de point de vue économique, car la consommation est faible dans l'inducteur. Par ce procédé, on ne peut qu'augmenter la vitesse du moteur par rapport à la vitesse nominale, car lors de démarrage, le flux étant à sa valeur maximale.

I.6.C Réglage par la tension : Ce procédé de réglage nécessite un variateur de tension qui est malheureusement très difficile à réaliser, ce type de réglage permet de réduire la vitesse du moteur, il est bon de point de vue technique car les caractéristiques ne sont pas déformées et de point de vue économique car aucune énergie n'est gaspillée dans des rhéostats.

I.7 ETUDE DU DEMARRAGE

On ne peut appliquer directement la tension U_a à l'induit du moteur à l'arrêt, car on risque d'avoir un courant trop fort, sachant qu'au démarrage ($N = 0$), le courant I_{init} est tel que :

$$R \cdot I_{init} = U_a$$

Pour limiter I_{init} , on met en série avec l'induit un Rheostat R_h de démarrage. Le couple de démarrage a pour valeur :

$$C_{dem} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{P}{a} \cdot n \cdot \phi \cdot I_{init}$$

Pour que ce couple de démarrage soit fort il faut :

I_{init} soit le plus fort qu'on puisse admettre ($1,5 I_{nom} \ll I_{init} \ll 2,5 I_{init}$)

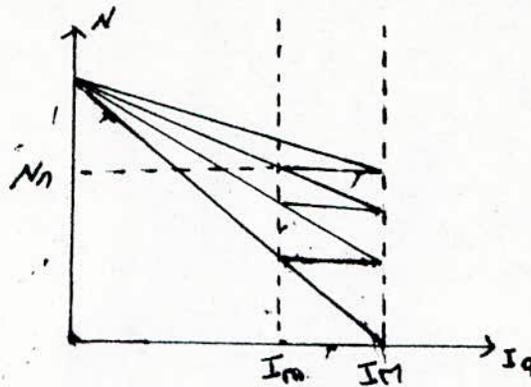
- On démarre toujours à flux maximum.

On veut, par une division convenable du Rheostat R_h , maintenir le courant I_a entre une valeur maximale I_m et une valeur minimale I_M .

On a d'après l'équation

$$N = \frac{U}{\lambda \cdot \phi} - \frac{(R_o + R_h) I_a}{\lambda \cdot \phi}$$

La fonction $N(I_a)$ est une droite de pente $-(R_a+R_h)/\lambda \cdot \phi$, les diverses droites correspondant aux diverses valeurs de r_h partent toutes du point de coordonnées $N=U_a/$, voir la figure ci-dessous.



La droite correspondante à R_a+R_h est telle que $I=I_M$ pour $N=0$ quand la vitesse atteint N_1 , I devient égale à I_m , on élimine alors R_h . R_h est telle que la droite de pente $-(R_a+R_h+R_{h1})/\lambda \phi$, donne $I=I_M$ Pour $N=N_1$ et ainsi de suite, à la vitesse N_n , l'élimination de la dernière portion R_{hn} doit amener le courant de I_m à I_M .

I-8 MISE EN EQUATION DU MOTEUR :

Si l'on tient compte de l'inductance du moteur on peut écrire l'équation électrique du moteur sous la forme :

$$U = E + R \cdot I_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt}$$

l'équation mécanique est donnée par :

$$C_m - C_r = J \cdot \frac{dW}{dt} \quad ; \text{avec } W = 2 \cdot N \quad (\text{rad/sec})$$

Avec $C_m = K_m \cdot I_a$ et $E = K_m \cdot W$

SI la machine entraînée est une génératrice, on a alors :

$$U_g = E_g = (R_g + R_{ch}) \cdot I_g \quad I_g = K_g \cdot W / R_c$$

$$E_g = K_g \cdot W \quad \text{et} \quad R_c = R_g + R_{ch}$$

le couple électromagnétique est donné par : $C_{em} = K_g \cdot I_g = K_g^2 \cdot W / R_c$

Le couple résistant développé par la génératrice serait donc :

$$C_r = (K + K_g^2 / R_c). W = K_r. W, \quad K_r = K_f + K_g^2 / R_c$$

Le coefficient K_f est introduit pour tenir compte des frottements.

On obtient finalement les équations suivantes :

$$\begin{array}{l} \text{!} \\ \text{!} \quad \frac{d I_a}{dt} = \frac{U_a}{L} - \frac{R I_a}{L} - \frac{K_m \cdot W}{L} \\ \text{!} \\ \text{!} \quad \frac{d W}{dt} = \frac{K_M \cdot I_a}{J} - \frac{K_r \cdot W}{J} \\ \text{!} \\ \text{!} \end{array}$$

I.9 SIMULATION NUMERIQUE :

Pour résoudre le système d'équations différentielles linéaires encadré ci-dessous, on recour à la méthode numérique de RUNGE KUTTA du 4ème ordre :

Le système à résoudre est de la forme :

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{dt} &= F_1 (T, Y_1, Y_2) \\ \frac{dy_2}{dt} &= F_2 (T, Y_1, Y_2) \end{aligned}$$

L'algorithme de solution est :

$$Y_{1i+1} = Y_{1i} + (K_{11} + 2 K_{12} + 2 K_{13} + K_{14}) \cdot h$$

$$Y_{2i+1} = Y_{2i} + (K_{21} + 2 K_{22} + 2 K_{23} + K_{24}) \cdot h$$

Avec

$$K_{11} = h \cdot f_1(T_i, Y_{1i}, Y_{2i})$$

$$K_{21} = h \cdot f_2(T_i, Y_{1i}, Y_{2i})$$

$$K_{12} = h \cdot f_1(T_i + h/2, Y_{1i} + K_{11}/2, Y_{2i} + K_{21}/2)$$

$$K_{22} = h \cdot f_2(T_i + h/2, Y_{1i} + K_{11}/2, Y_{2i} + K_{21}/2)$$

$$K_{13} = h \cdot f_1(T_i + h/2, Y_{1i} + K_{12}/2, Y_{2i} + K_{22}/2)$$

$$K_{23} = h \cdot f_2(T_i + h/2, Y_{1i} + K_{12}/2, Y_{2i} + K_{22}/2)$$

$$K_{14} = h \cdot f_1(T_i + h/2, Y_{1i} + K_{13}/2, Y_{2i} + K_{23})$$

$$K_{24} = h \cdot f_2(T_i + h/2, Y_{1i} + K_{13}, Y_{2i} + K_{23})$$

$H = T / n$ étant le pas de calcul

on pose $Y1 = I_a (T)$, $Y2 = W (T)$

Le système d'équations devient alors :

$$F1 (T, Y1, Y2) = \frac{U_a}{L_a} - R \cdot \frac{Y1}{L_a} - KM \cdot \frac{Y2}{L_a}$$

$$F2 (T, Y1, Y2) = \frac{KM Y1}{J} - \frac{KM Y2}{J}$$

En utilisant l'intégration par la méthode des rectangles on calcule l'énergie nécessaire au moteur pour arriver à son point de fonctionnement :

$$S = \sum_{K=1}^n \frac{U_a \cdot I_a (K \cdot H) \cdot H}{K}$$

On doit aussi calculer le Rheostat du démarrage pour que ceci soit adapté au moteur C.à.D, lors de démarrage le courant doit varier entre deux limites I_{max} et I_{min} .

Le Rheostat se compose de n Rheostats en série

$$Rh1, Rh2, \dots, Rhn$$

Le calcul mathématique donne :

$$Rt = U_a / I_M \quad ; \quad (Rt = Rh1 + Rh2 + \dots + Rhn)$$

$$Rhn = Rt \cdot \alpha$$

$$Rhn-1 = Rt \cdot (1 - \alpha) \cdot \alpha$$

$$Rhn-2 = Rt \cdot (1 - \alpha)^2 \cdot \alpha$$

$$Rh1 = Rt \cdot (1 - \alpha)^{n-1} \cdot \alpha$$

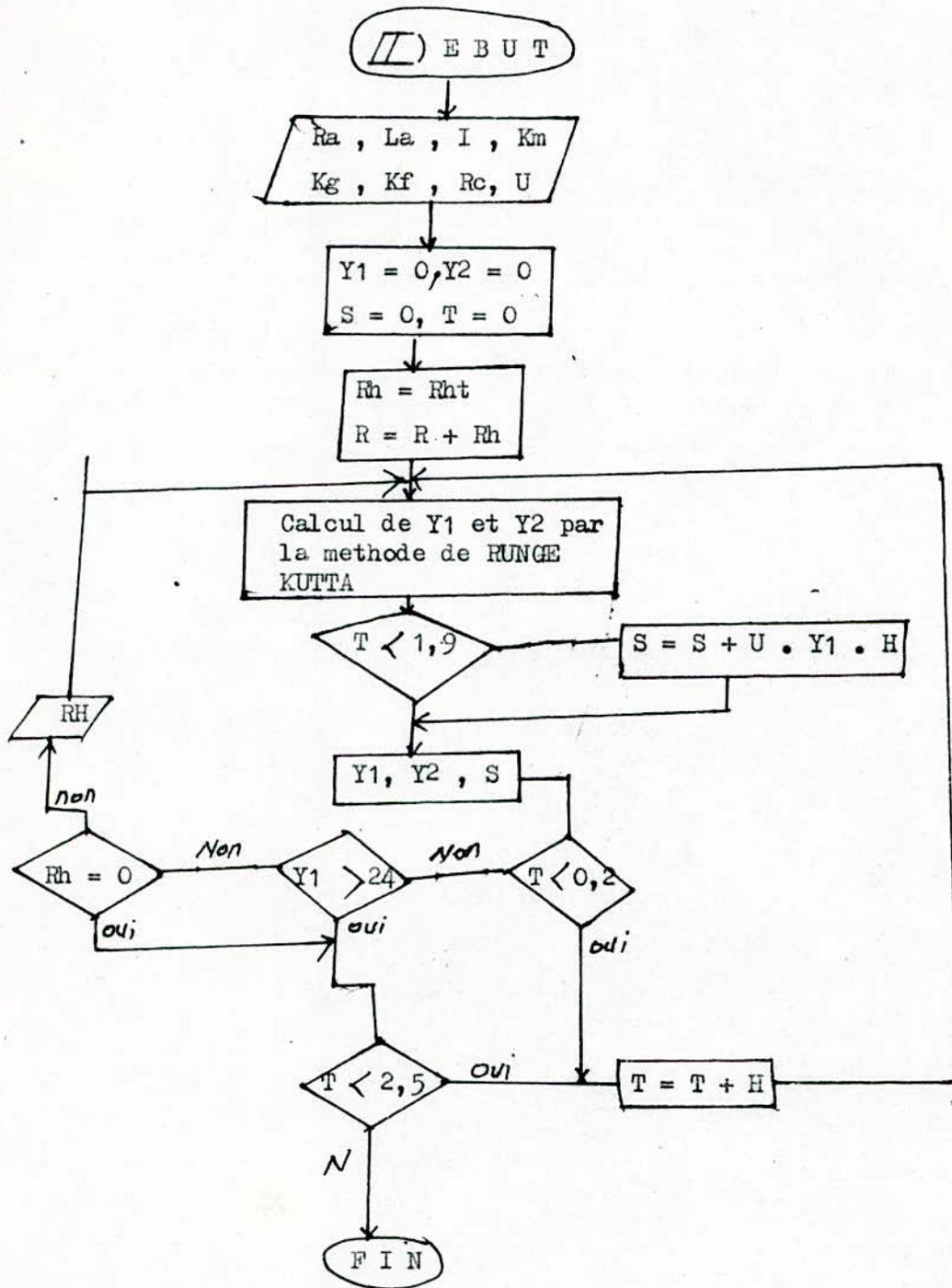
Valeurs des résistances

$$\text{avec} \quad \alpha = \frac{I_M - I_m}{I_M}$$

Le nombre des résistances qui composent le Rheostat est donné par :

$$n = \frac{\text{Log} (R / Rt \cdot \alpha)}{\text{Log} (1 - \alpha)} \quad ; \quad R : \text{Résistance d'induit}$$

L'organigramme ci-dessous va permettre de calculer les variations du courant et de la vitesse lors d'un démarrage Rheostatique :



ORGANIGRAMME : Variations du courant et de la vitesse.

I.10 DONNÉES NUMÉRIQUES :

La vitesse nominale $N_{nom} = 1800$ tr/min

Pour l'inducteur la tension $U_n = 110$ V et le courant $J_n = 0,9$ A

Pour l'induit $U_n = 110$ V et $I_n = 24$ A

La résistance de l'induit $R_a = 0,26$ ohms

et l'inductance $L_a = 9,2$ mh

$K_m = 0,6$ V .S/rad

Le moment d'inertie des parties tournantes: $J = 0,081$ Kg.M²

$K_f = 0,01$ M.N /rd : S

Pour la génératrice : $R_g = 1,6\Omega$ et $K_g = 0,64$ V.S/rd

Pour un démarrage Rheostatique adapté on prend

$$I_m = 1,5 I_n \text{ et } I_m = I_n ; \alpha = \frac{I_M - I_m}{I_M} = 0,33$$

$$R_t = U / I_m = \frac{110}{1,5 \cdot 24} = 3,1 \Omega \text{ et je trouve } N = 4$$

$$R_{h1} = R_t \cdot (1 - \alpha)^{N-1} \cdot \alpha = 3,1 \cdot (1 - 0,33)^{4-1} \cdot 0,33 = 0,31$$

$$R_{h2} = R_t \cdot (1 - \alpha)^{N-2} \cdot \alpha = 3,1 \cdot (1 - 0,33)^{4-2} \cdot 0,33 = 0,46$$

$$R_{h3} = R_t \cdot (1 - \alpha)^{N-3} \cdot \alpha = 3,1 \cdot (1 - 0,33)^{4-3} \cdot 0,33 = 0,68$$

$$R_{h4} = R_t \cdot (1 - \alpha)^{N-3} \cdot \alpha = 3,1 \cdot 0,33 = 1,023$$

Le temps mis par le moteur pour atteindre son régime permanent est égal $T = 1,9$ ms

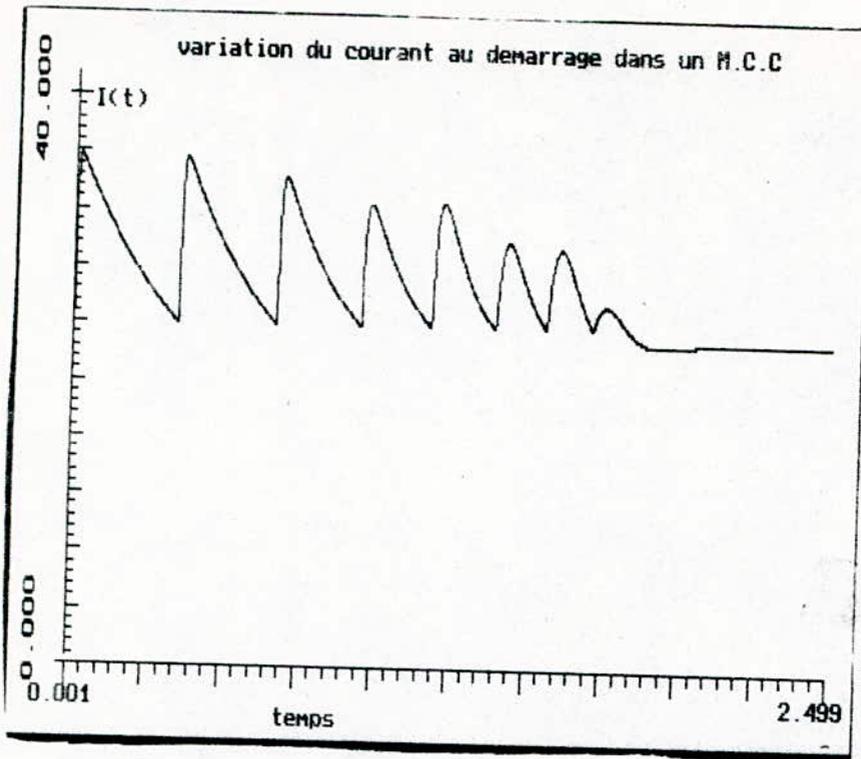


FIG I-A

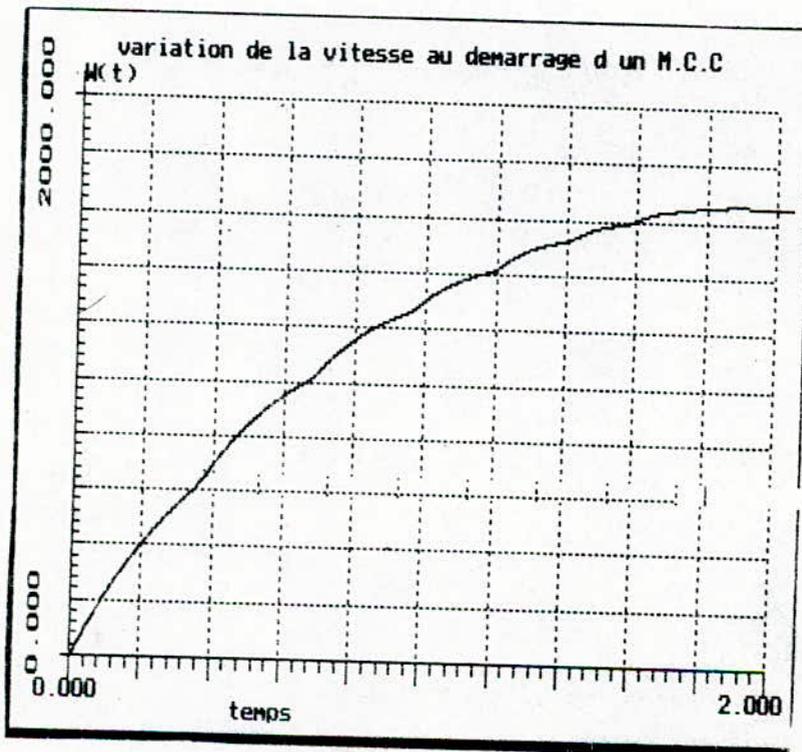


FIG I-B

EQUIPEMENT DE REGLAGE ET DE COMMANDE

- ORGANE D'ENTREE ET REGULATEUR -

II -1-INTRODUCTION

Le but de cette partie est la presentation des equipements de reglage et de commande. selon la figure II -1 Un equipement de reglage comprend :

- Organe d'entrée (organe de consigne-organe de mesure)
- Organe de traitement (comparateur-regulateur-limiteur)
- Organe de sortie ou de commande (convertisseur)
- Systeme à regler (le moteur à courant continu)

L'etude du systeme à regler a été déjà faite dans le premier chapitre le but de ce chapitre est d'etudier les organes de traitement ,tandisque le chapitre III sera consacré à l'etude des convertisseurs.

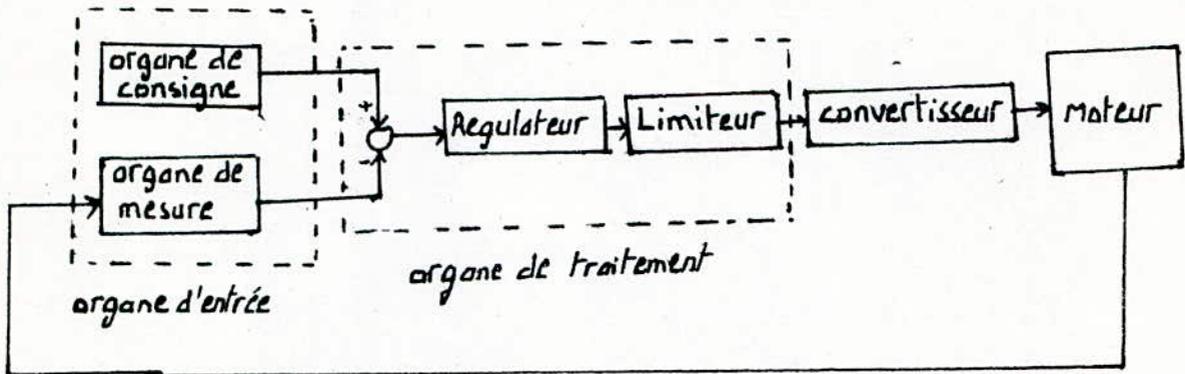


Fig II-1. Equipement de reglage

II -2-ORGANE D'ENTREE

II-2-a-ORGANE DE CONSIGNE:

Un potentiometre ajustable peut fournir une tension de consigne à partir d'une source de tension stabilisée (voir fig II2a)

$$U_c = U_a \cdot \rho$$

ρ : Position relative du curseur

U : Tension stabilisée

U_c : Tension de consigne

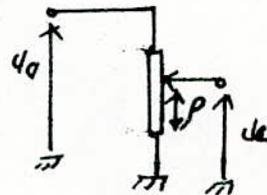


Fig II-2-a

Pour éviter les brusques variations de la valeur de consigne, on fait appel alors à un filtre de la valeur de consigne, composé d'un circuit RC et d'un amplificateur opérationnel en montage suiveur (voir fig II-2-b)

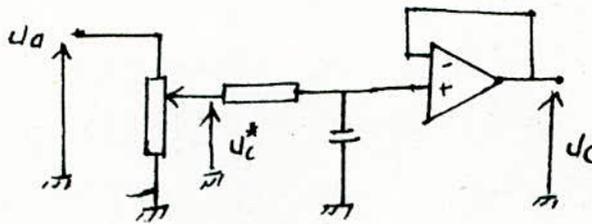


Fig II-2 b Filtre pour la valeur de consigne

II-2-b-ORGANE DE MESURE

LE rôle d'un organe de mesure est la conversion d'une grandeur physique en une tension continue.

$x = \frac{X}{X_n}$: grandeur physique exprimée en grandeurs relatives.

$x_M = \frac{U_{xM}}{U_{xMn}}$: grandeur mesurée relative

le facteur de transfert est défini par:

$K = x_M/x$: pour une caractéristique statique linéaire ($x_M = f(x)$)

$K = \Delta x_M / \Delta x$: pour une caractéristique statique non linéaire

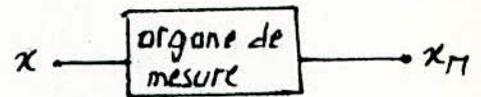


Fig II-2c Représentation schématique d'un organe de mesure

II-2-b1- MESURE DE COURANT CONTINU

La mesure du courant continu est effectuée à l'aide de transformateur de courant continu, basés sur le principe des amplificateur magnétique ou de l'effet HALL.

Le principe de compensation fournit une méthode de mesure très efficace. Un circuit magnétique possède deux enroulements, le premier conduit le courant à mesurer tandis que le second conduit le courant de compensation fourni par un amplificateur, le courant est ajusté automatiquement de façon à avoir le flux magnétique, mesuré par une sonde de HALL. Nulle la résistance de précision conduisant le courant de compensation, donne à ses bornes une tension qui est mesure du courant.

Sur la figure II-2-d est présentés différentes possibilités de mesure de courant

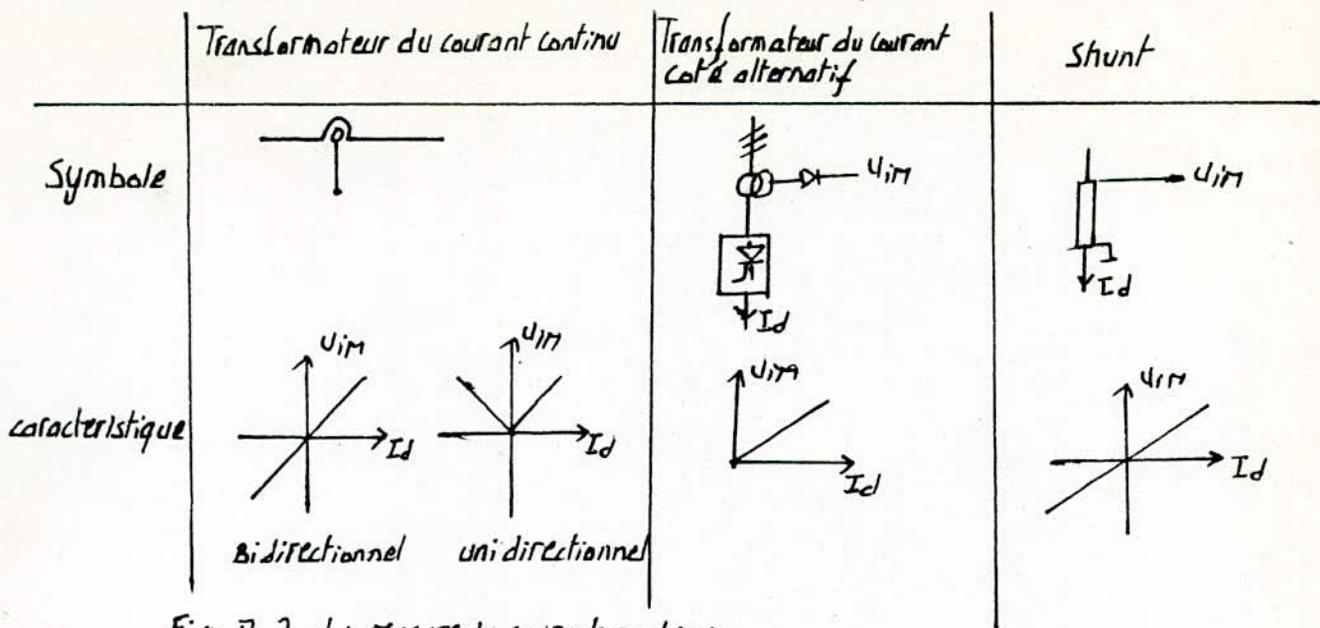


Fig II-2-d : mesure du courant continu.

II-2-b2 MESURE DE VITESSE

A l'aide d'un dynamo tachymétrique on peut mesurer la vitesse de rotation. Un dynamo tachymétrique est une génératrice à courant continu avec une excitation par aimants permanents, la tension continue proportionnelle à la vitesse, obtenue entre les deux balais est une mesure de la vitesse et sa polarité indique le sens de rotation. (voir figure)

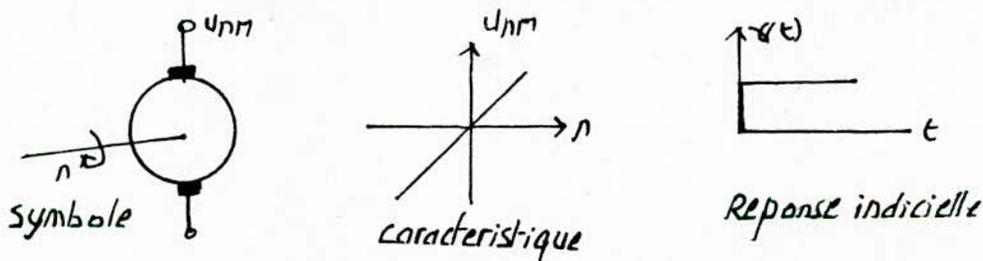


Fig II-2-c - dynamo tachymétrique

II-3 ORGANES DE TRAITEMENT DES SIGNAUX

II-3-a COMPARAISON DES VALEURS DE CONSIGNE ET REELLE

Le bloc de traitement de signaux (régulateur) a pour tâche de comparer la valeur réelle avec la valeur de consigne, et de stabiliser le circuit de réglage, et parfois limiter aussi la grandeur traitée.

On peut former l'écart de réglage ($\lambda_e = \lambda_c - \lambda_r$) à partir du de la figure II-3-a

le calcul donne

$$X_s = \frac{R_l U_{cn}}{R_c U_{sn}} \left(X_c - \frac{R_c U_{rn}}{R_r U_{cn}} X_r \right)$$

Pour que X_s soit proportionnel à l'écart de réglage il faut que la condition suivante soit respectée

$$\frac{U_{cn}}{R_c} = \frac{U_{rn}}{R_r}$$

II-3-b REGULATEUR :

Il existe trois types de regulateur

- 1- Regulateur P
- 2- Regulateur PI
- 3- Regulateur PID

II-3-b1 REGULATEUR " P "

La relation entrée -sortie est : $X_s = K \cdot (X_c - X_r) = X_e$
 en utilisant le circuit de la figure II-3-a on peut ecrire :

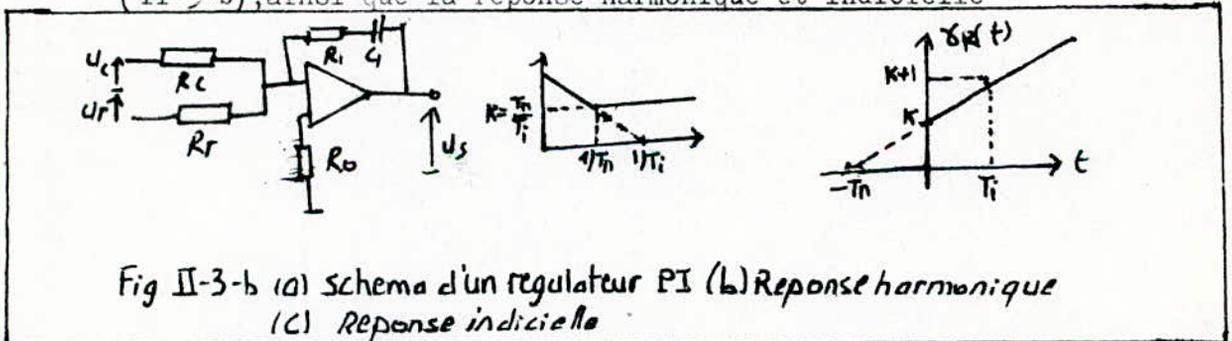
$$K = \frac{R \cdot U_{cn}}{R_c U_{sn}} = \frac{R \cdot U_{rn}}{R_r U_{sn}}$$

II-3-b2 REGULATEUR " PI "

Sa fonction de transfert est donnée par l'équation suivante :

$$Gr(P) = \frac{1 + s T_n}{S \cdot T_i} \quad \begin{array}{l} T_n : \text{dosage de corrélation de l'intégral} \\ T_i : \text{constante de temps d'intégration} \end{array}$$

un exemple pratique de ce type de regulateur est représenté sur la figure (II-3-b), ainsi que la reponse harmonique et indicielle



Une fois les constantes de temps T_i et T_n soient déterminées à partir de l'étude de la stabilité du système à régler, on trouve :

$$C_1 = \frac{T_i}{R_c} \cdot \frac{U_{cn}}{U_{sn}} ; R = \frac{T_n}{C_1} \quad \text{avec } R_c \text{ et } R_r \text{ à choisir entre } 10 \text{ et } 10 \text{ K}\Omega$$

II-3-b3 REGULATEUR "PID"

Sa fonction de transfert est donnée par:

$$G_R(S) = \frac{(1 + ST_n)(1 + ST_v)}{S T_i} \quad ; T_v : \text{dosage de la corrélation dérivée}$$

Le schéma de principe de ce régulateur est donné sur la figure (II-3-C) ainsi que la réponse harmonique et indicielle.

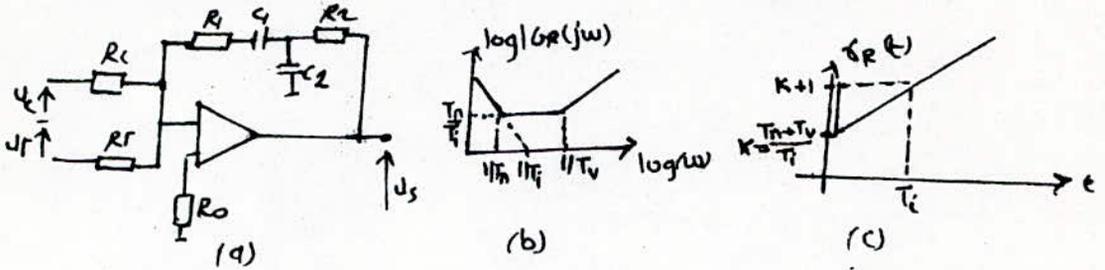


Fig II-3-(a) schéma du régulateur PID (b) Réponse harmonique (c) Réponse indicielle

Le calcul de la fonction de transfert à partir du schéma du principe donne après identification avec l'équation ci-dessus.

$$T_i = R_0 C_1 \frac{U_{sn}}{U_{cn}} = R_1 C_1 \frac{U_n}{U_{rn}}$$

$$T_{n,v} = \frac{A}{2} \pm \sqrt{\frac{A^2}{4} - R_1 C_1 R_2 C_2} \quad ; \text{ avec } A = R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_2 C_1$$

II-4 CIRCUIT DE LISSAGE.

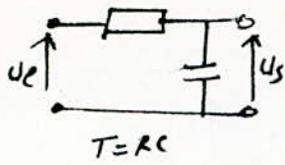
Les circuits de lissage sont utilisés pour éliminer les ondulations qui gênent énormément le circuit de réglage et influent sur la stabilité, pour un circuit de lissage du premier ordre la fonction du transfert est

$$G(S) = \frac{1}{1+ST}$$

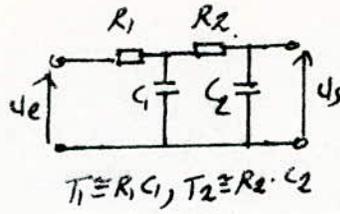
et pour un circuit de lissage de deuxième ordre on a

$$G(S) = \frac{1}{(1+ST_1)(1+ST_2)}$$

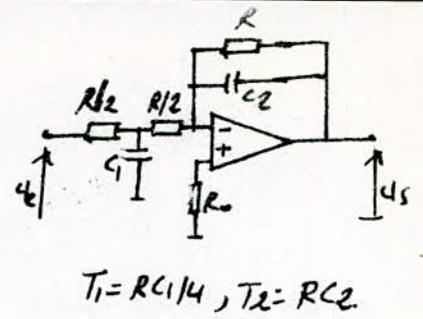
des exemples pratiques de ces circuits sont donnés sur la figure II-4.



(a)



(b)



(c)

Fig II-4 (a) circuit de lissage simple (b) circuit de liss. double (c) circuit de lissage actif de deuxième ordre.

II-5 LIMITATION

Parfois on a besoin de limiter une grandeur dans un circuit de réglage ; comme la limitation du courant d'induit dans le cas des entraînements réglés. parmi les limiteurs utilisés est celui représenté sur la figure

(II-5) ainsi que sa caractéristique de limitation

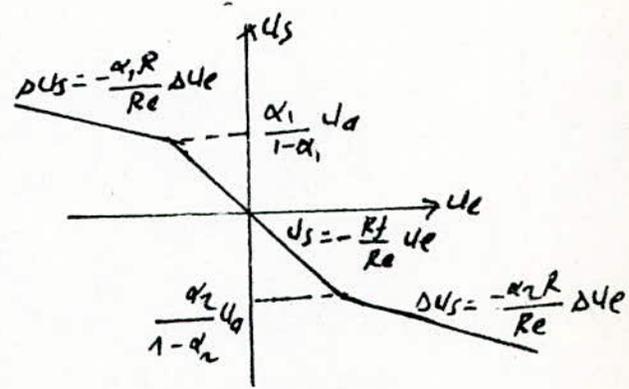
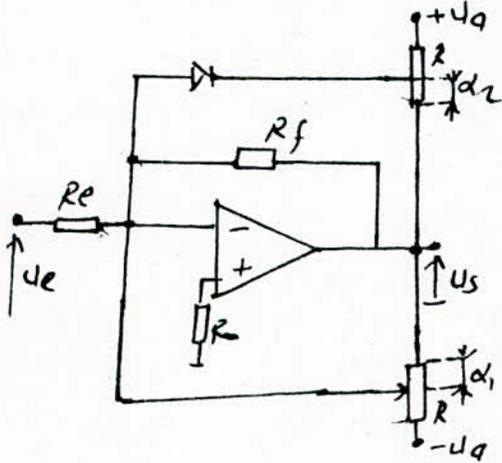


Fig II-5 (a) schéma de limiteur (b) la caractéristique de limitation.

ORGANE DE COMMANDE - CONVERTISSEUR .

III-1 INTRODUCTION

Les organes de commande font office d'interface entre les regulateurs et le système à regler, la tâche essentielle de ces organes est l'amplification en puissance, pour permettre aux signaux à faible puissance fournis à la sortie des regulateurs d'intervenir sur le système à regler.

Parmi les organes de commande les plus utilisés en électronique industrielle sont les convertisseurs de courant

III-2 DISPOSITIFS DE COMMANDE DE GACHETTES.

Les dispositifs de commande de gâchettes sont utilisés pour contrôler les convertisseurs de courant, pour allumer les convertisseurs de ces thyristor on doit appliquer des impulsions à leur gâchettes. Ces impulsions doivent avoir un certain angle de retard par rapport à l'intersection des tensions alternatives alimentant le convertisseur. Une tension de commande U_{cm} appliquée à l'entrée des dispositifs de commande gâchettes permet de varier cet angle de retard. Sur la figure III-2 a est représenté un schéma d'un dispositif de commande de gâchettes

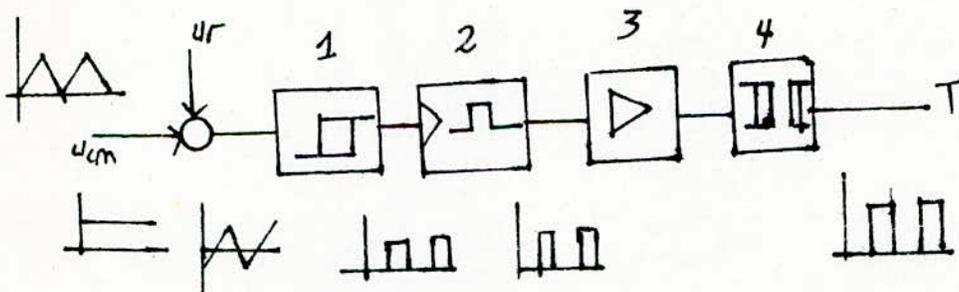


FIG III-2a Représentation schématique d'un dispositif de commande de gâchettes.

- 1- Bascule de SMITT
- 2- Bascule MONOSTABLE
- 3- Amplificateur d'impulsion
- 4- Transformateur d'impulsion

Le fonctionnement de ce dispositif est résumé sur la figure III-2b.

L'angle de retard est :

$$\alpha = \arccos\left(\frac{U_{cm}}{U_r}\right) = \arccos(u_{cm}) ; \text{ avec } u_{cm} = \frac{U_{cm}}{U_r}$$

La tension redressée est donnée par :

$$u_{di\alpha} = u_{dio} \cdot \cos(\alpha) = u_{dio} \cdot \cos(\alpha) = u_{dio} \cdot u_{cm}$$

Le facteur de transfert est donné par : $K_{cm} = \frac{u_{di\alpha}}{u_{cm}} = u_{dio}$

REMARQUE

Les calculs précédents sont fait pour un convertisseur tout-thyristor. pour le comportement dynamique ,il faut remarquer qu'une variation de la tension de commande U_{cm} se repercute sur la tension redressée U_{di} seulement à partir un certain temps de retard t_r ,dont la valeur moyenne est $T_{cm} = T/2 = 1/2f$;ou f est la fréquence du reseau d'alimentation .

Si l'on tient compte de ce temps de retard ,la fonction de transfert de l'ensemble du convertisseur de courant avec le dispositif de commande de gachettes est donc:

$$G_{cm} = K_{cm} \cdot \exp(-p \cdot T_{cm})$$

Une approximation adèquate de l'exponentielle donne :

$$G_{cm} \approx K_{cm} / (1 + p \cdot T_{cm})$$

Un exemple de convertisseur complètement controlé est donné sur la figure III-2b

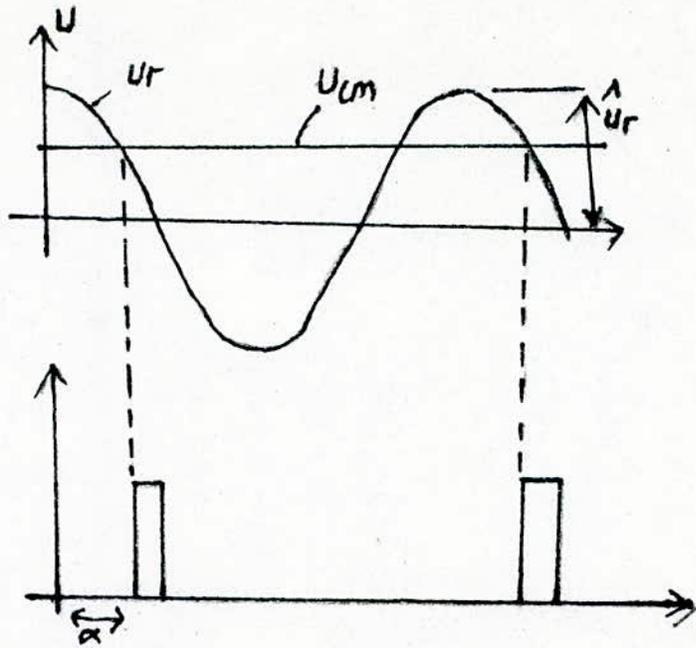


FIG III-2b fonctionnement d'un dispositif de commande de gachettes.

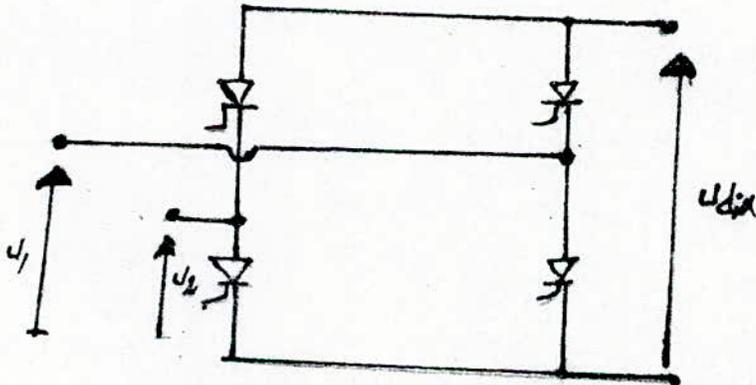


FIG III-2b exemple de convertisseur de courant continu complètement contrôlé.

ETUDE DE LA REGULATION EN CASCADE

IV -1 INTRODUCTION

Pour effectuer un certain travail avec des performances données ,le systeme doit etre asservi.

Le role principal d'un systeme de régulation est de minimiser autant que possible ,l'écart entre les grandeur de sorties et celles que l'on considere comme idéales ,on peut aussi demander du regulateur de remplir un certain nombre de fonctions ,nécessaire au bon comportement des machines :

a - Commande précise des variables pour éviter une rapidité excessive dans leurs évolutions(limitation du gradient du courant)

b - Limitation des grandeurs critiques(courant d'induit)

c - Transfert sans-à-coup d'un mode de commande à un autre

d - Ajustement et optimisation aisés d'une boucle de commande ,indépendamment des autres boucles.

Aujourd'hui on utilise souvent les trois types de régulation suivants:

-Regulation en boucle convergente

- Regulation en boucle multiples ou en cascade

- Regulation à boucles en parallele ou à commutation parallele

Ces trois types de regulation permettent de controler la variable principale et de limiter les variables secondaires

Dans ce chapitre on s'intéresse à la regulation en cascade

puisque c'est la plus utilisée en pratique ,et présente les avantages suivants:

- 1 - Il y'a un regulateur séparé pour chacune des variables controlées ,chaque boucle peut être donc ajustée à l'optimum .
- 2 - les caractéristiques statiques et dynamiques des différentes boucles peuvent être ajustées successivement en partant de la plus interne.
- 3 - On passe aisement et sans-à-coup d'un mode de fonctionnement à un autre .
- 4 - L'etude et la mise en route sont simple

IV- 2 ETUDE DU MOTEUR EN REGIME LIBRE

Le moteur est régit par deux équations ,la première électrique et la seconde mécanique

$$U = R_t \cdot i + L_t \cdot \frac{di}{dt} + K_m \cdot \omega$$

$$K_m \cdot i = M_r + J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

en passant à la transformée de laplace on obtient:

$$I(p) = \frac{J \cdot P \cdot U(P)}{J \cdot L_t \cdot p^2 + J \cdot R_t \cdot P + K_m^2} + \frac{K_m \cdot M_r(p)}{J \cdot L_t \cdot p^2 + J \cdot R_t \cdot P + K_m^2}$$

$$\omega(p) = \frac{U(p) \cdot K_m}{J \cdot L_t \cdot p^2 + J \cdot R_t \cdot P + K_m^2} - \frac{(R_t + L_t \cdot p) \cdot M_r(p)}{J \cdot L_t \cdot p^2 + J \cdot R_t \cdot P + K_m^2}$$

En posant $T_e = L_t/R_t$ et $T_{em} = R_t/K_m^2$

T_e : constante de temps électrique

T_{em} : constante du temps électromécanique

et en utilisant l'approximation :

$$1 + T_{em} \cdot P + T_e \cdot T_{em} \cdot p^2 \approx (1 + P \cdot T_{em}) \cdot (1 + T_e \cdot P) \quad \text{puisque } T_{em} \gg T_e$$

on obtient :

$$I(P) = \frac{T_{em} \cdot P \cdot U(P) / R_t}{(1 + T_e \cdot P) \cdot (1 + T_{em} \cdot P)} + \frac{M_r(P) / K_m}{(1 + T_{em} \cdot P) \cdot (1 + T_e \cdot P)}$$

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

IV-2-a REPONSE A UN ECHELLEON DE TENSION

En supposant M_r constant ($M_r(p) \neq 0$), la réponse indicielle du courant sera donnée par :

$$I(P) = \frac{(T_{em} \cdot P / R_t) \cdot U(P)}{(1+T_e \cdot P)(1+T_{em} P)} ; U(P) = 1/P \text{ (échelon unité)}$$

$$\Rightarrow \mathcal{L}^{-1} \left\{ I(P) = i(t) = \frac{1}{R_t \cdot T_e} \frac{1}{b-a} (e^{-at} - e^{-bt}) \right\}; b = \frac{1}{T_{em}}$$

$$\text{et } a = \frac{1}{T_e}$$

On remarque que le courant après un certain régime transitoire revient à sa valeur initiale, donc le courant n'est pas sensible à la variation de tension.

La réponse indicielle de la vitesse est donnée par :

$$W(P) = \frac{U(P)/K_m}{(1+T_{em} P)(1+T_e P)} ; U(P) = \frac{1}{P} \text{ (échelon unité)}$$

$$\Rightarrow \mathcal{L}^{-1} \left\{ W(P) = w(t) = \frac{1}{K_m T_e T_{em}} \cdot \frac{1}{a \cdot b} \left(1 - \frac{b e^{-at}}{b-a} + \frac{a e^{-bt}}{b-a} \right) \right\}$$

On remarque donc que la vitesse est sensible à la variation de tension puisque il existe une erreur en régime permanent. L'allure de ces deux réponses est représentée sur la figure IV-2-a

IV-2-b REPONSE A UN ECHELLEON DU COUPLE RESISTANT (U(p)=0)

De même on obtient

$$I(p) = \frac{M_r(p)/K_m}{(1+T_{em} P)(1+T_e P)} ; M_r(p) = 1/P \text{ (échelon unité)}$$

$$\Rightarrow \mathcal{L}^{-1} \left\{ I(p) = i(t) = \frac{1}{K_m T_e T_{em}} \cdot \frac{1}{a \cdot b} \left(1 - \frac{b e^{-at}}{b-a} + \frac{a e^{-bt}}{b-a} \right) \right.$$

$$\Rightarrow i(\infty) = 1/K_m \neq 0$$

On en déduit que le courant est sensible à la variation du couple résistant .

La réponse indicielle de la vitesse est donnée par :

$$w(p) = - \frac{Rt(1+T_e p)/K_m^2 \cdot M_r(p)}{(1+T_{em} p)(1+T_{ep})} ; M_r(p) = 1/P \text{ (échelon unité)}$$

$$\Rightarrow \mathcal{L}^{-1} \left\{ w(p) = w(t) = - \frac{Rt}{K_m^2 \cdot T_{em}} \cdot \frac{1}{a} \cdot (1 - e^{-at}) \right. ; \text{ avec } a = 1/T_{em}$$

On remarque que la vitesse est aussi sensible à la variation du couple résistant , une variation du couple résistant provoque une chute de vitesse et un accroissement du courant .

L'allure de la réponse indicielle du courant et de la vitesse est représentée sur la figure **IV-2-b**

IV-3 SCHEMA DE PRINCIPE D'UN ENTRAINEMENT REGLE

AVEC MOTEUR A COURANT CONTINU

Le schéma de principe est représenté sur la figure **IV-3**, le moteur est alimenté à l'induit par le convertisseur du courant .

Sur le schéma de principe , on peut voir un premier circuit réglant le courant sur lequel est superposé un deuxième circuit réglant la vitesse , donc il s'agit d'une régulation en cascade , cette disposition est utilisée aujourd'hui presque exclusivement permettant d'obtenir des performances dynamiques parfaites .

Le circuit de réglage du courant d'induit est composé du dispositif de commande de gachettes et du régulateur plus la mesure du courant d'induit , tandis que le circuit de réglage de vitesse contient le régulateur , la mesure de la vitesse (dynamo tachymétrique) et l'organe de consigne (potentiomètre) .

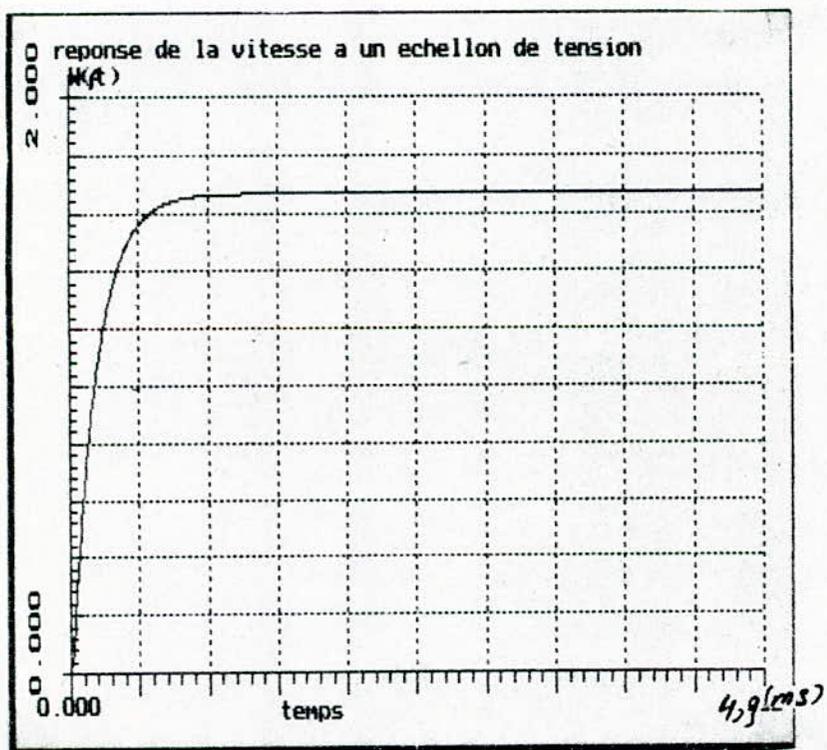
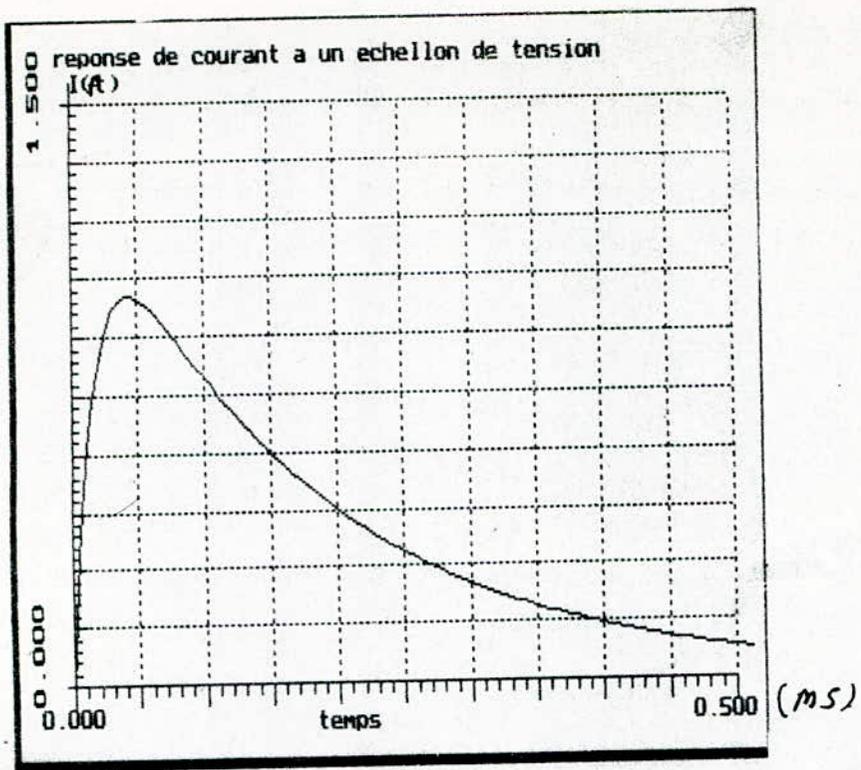


Fig II -2a

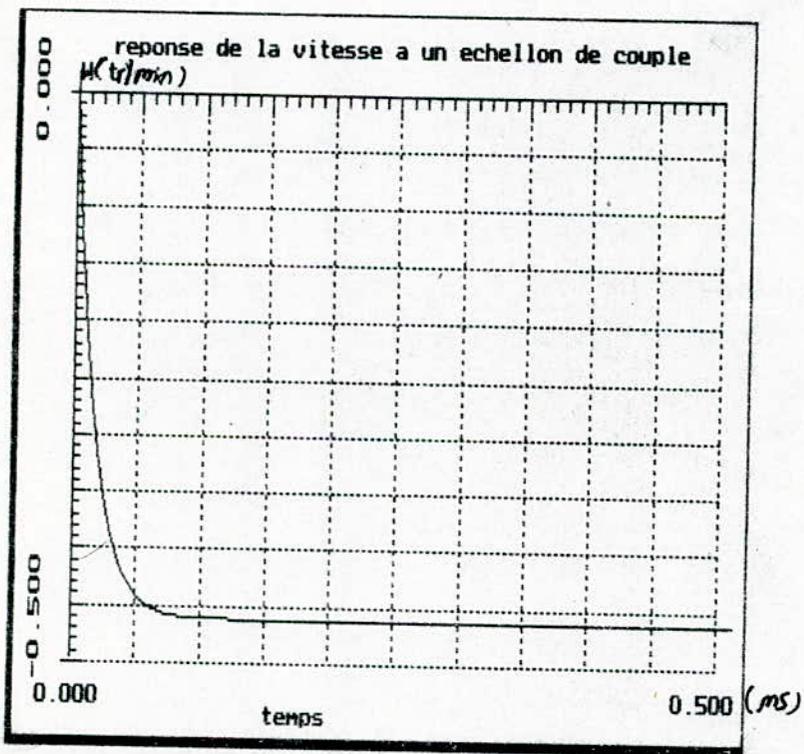
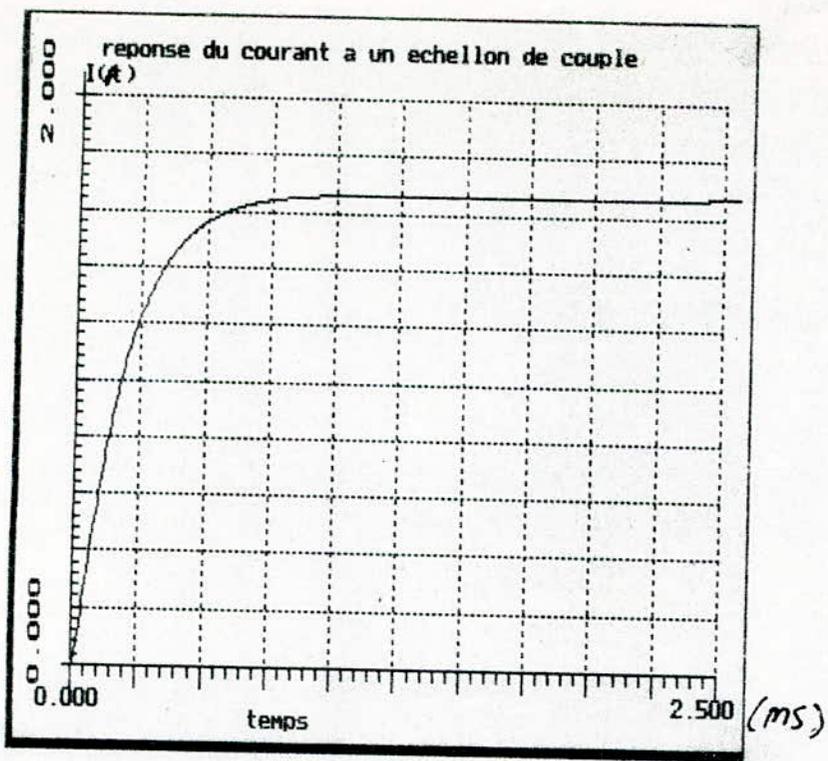


Fig IV-2b

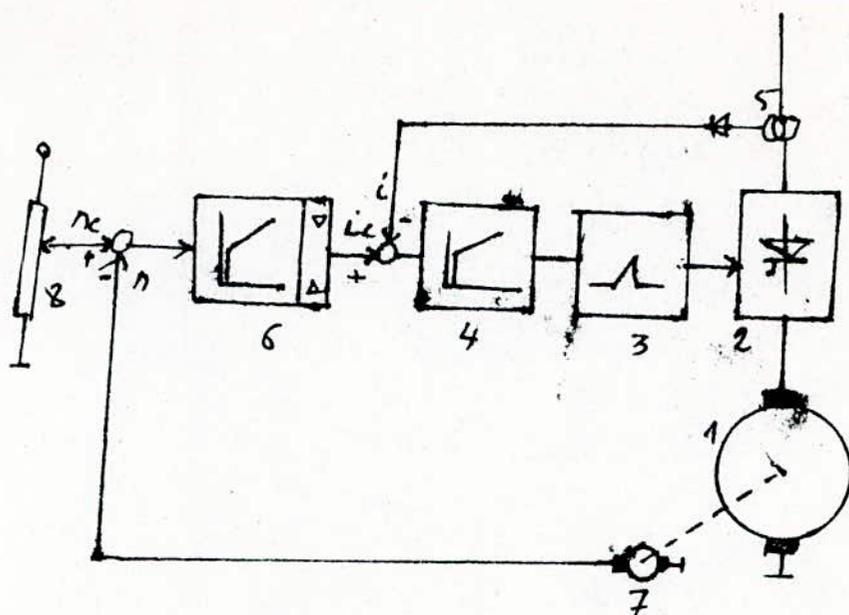


Fig -3 Schema de principe d'un entrainement réglé avec moteur à courant continu

- 1- Le moteur à courant continu
- 2- Convertisseur du courant
- 3- dispositif de commande de gachettes
- 4- regulateur du courant
- 5- la mesure du courant d'induit
- 6- regulateur de vitesse
- 7- dynamo tachymetrique

IV-3-a DIAGRAMME FONCTIONNEL DE LA REGULATION EN CASCADE

Le schéma bloc de la regulation en cascade est représenté sur la figure IV-3-a1

la fonction de transfert du convertisseur est donnée par

$$G_{cm} = \frac{K_{cm}}{1 + T_{cm}P}$$

T_{cm} représente le retard mis par le convertisseur pour fournir une tension à sa sortie, la valeur moyenne de ce retard pour un convertisseur en pont triphasé est de l'ordre de 2ms.

La figure IV-3-a2 représente le diagramme fonctionnel de la regulation en cascade.

Dans ce diagramme on peut négliger l'effet de la boucle de retour de la f.c.e.m du moteur puisque en général la constante du temps électrique est très faible devant la constante du temps électromécanique.

IV-4 CALCUL DES REGULATEURS

IV-4-a CALCUL DU REGULATEUR DE COURANT

A partir de la figure IV-4-a2, on peut en déduire la fonction de transfert en boucle ouverte $F(p)$

$$F_i(p) = \frac{G_{RI}(p) \cdot G_{cm}(p)}{R \cdot (1 + T_e p)} = G_{RI}(p) \cdot \frac{K_{cm}}{R \cdot (1 + T_e p)(1 + T_{cm} p)}$$

T_e : constante dominante

T_{cm} : petite constante du temps

Pour compenser la constante de temps dominante (T_e) on utilise un régulateur P I, sa fonction de transfert est donnée par

$$G_{RI}(p) = \frac{1 + T_{ni} p}{T_{ii} p}$$

Pour compenser T_e on prend $T_{ni} = T_e$

Pour obtenir un ajustement optimal on choisit $T_{ii} = 2 \cdot K_{cm} T_{cm} / R t$

$F(p)$ devient alors :

$$F_i(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{cm} \cdot P (1 + T_{cm} P)}$$

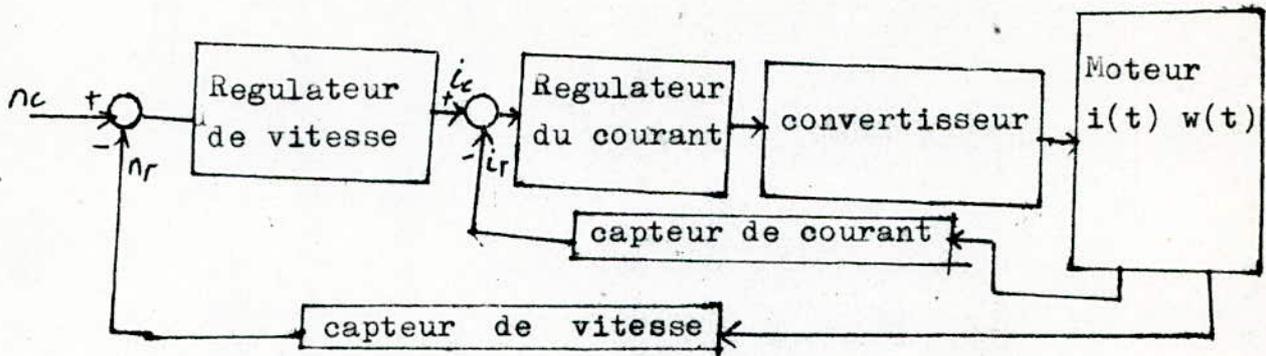


Fig V-3-a1 Schéma bloc de la regulation en cascade

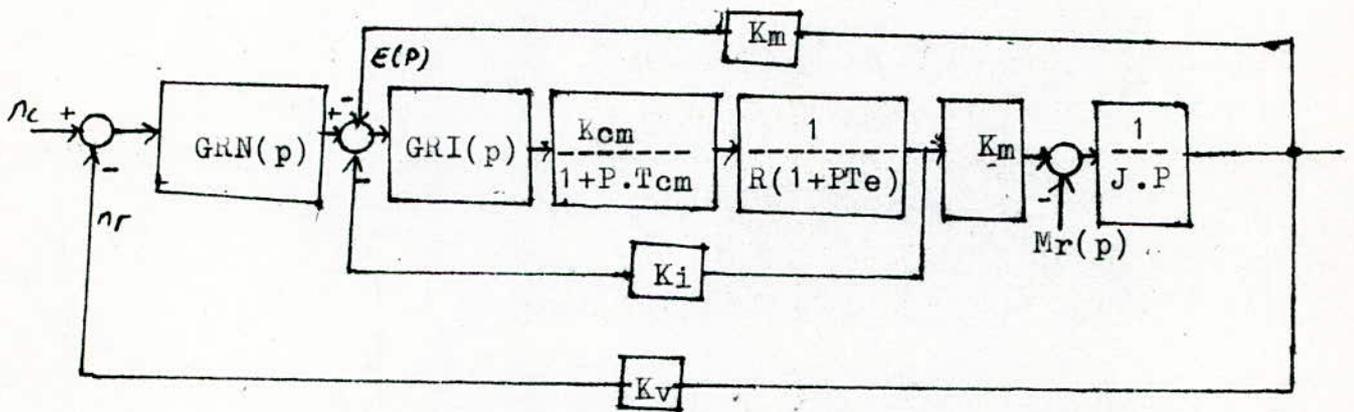


Fig V-3a2 Diagramme fonctionnel de la regulation en cascade

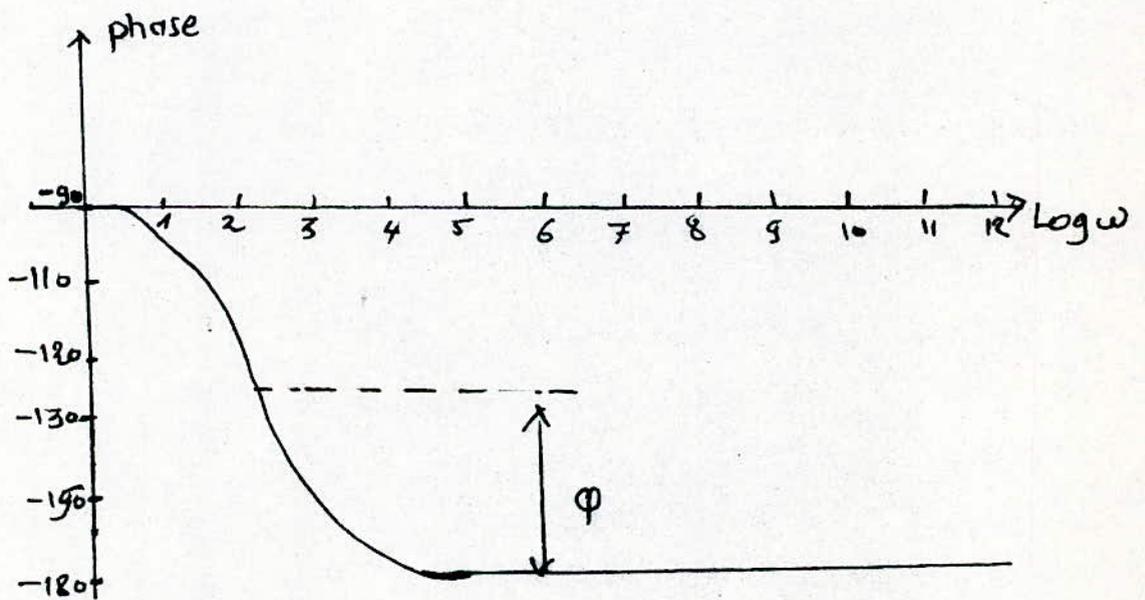
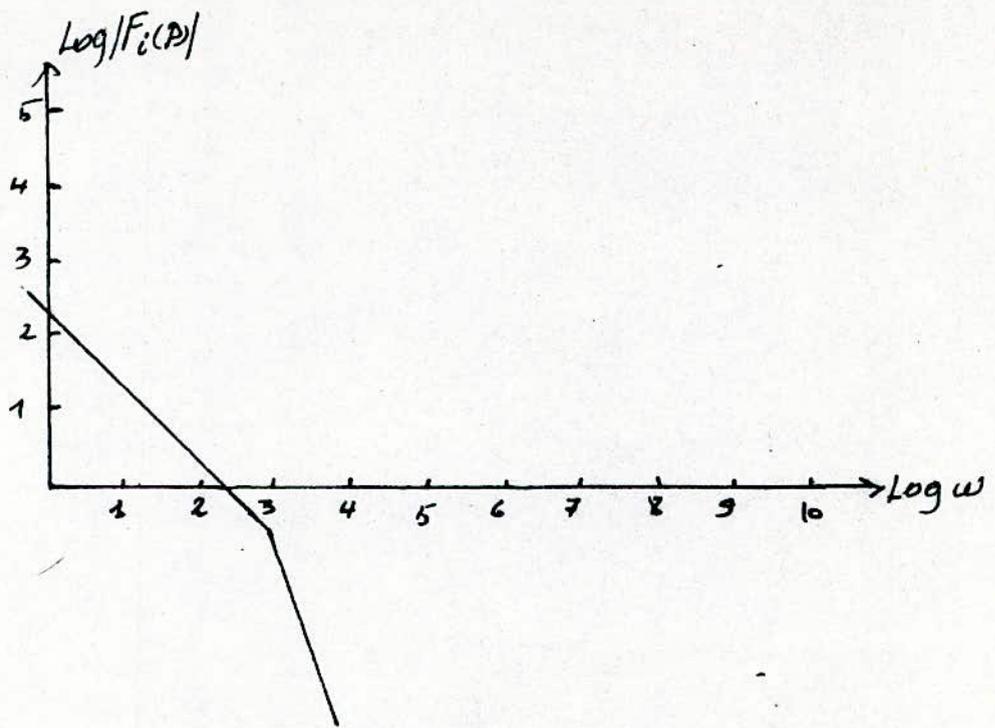


Fig IV-4-a Module et phase de la reponse harmonique de la boucle du courant

Sur la figure IV -4-a est représentée la réponse harmonique du système, sachant que la condition de stabilité du système est que le module de $F(p)$ passe par l'axe des "0db" avec une pente égale à -1.

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

$$F_i'(p) = \frac{F_i(P)}{1 + F_i(P)}$$

$$F_i'(p) = \frac{1}{2T_{cm}^2} \cdot \frac{1}{P^2 + 2\xi\omega_n P + \omega_n^2}; \omega_n = 2/2T_{cm}, \xi = \sqrt{2}/2 = 0.7$$

La réponse indicielle de la boucle fermée du courant est :

$$F_i'(p)/p = \frac{1}{2 \cdot T_{cm}^2} \left(\frac{1}{\omega_n^2} - \frac{1}{\omega_n \omega_d} e^{-\xi \omega_n t} \cdot \sin(\omega_d \cdot t + \phi) \right)$$

avec $\omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1 - \xi^2}$ et $\phi = \cos(\xi)$

On trouve :

temps de montée = $t_m = 9.52 \text{ ms}$

dépassement = $4.55 /$

IV-4-b CALCUL DU REGULATEUR DE VITESSE

A partir du diagramme fonctionnel, la fonction de transfert en boucle ouverte de la vitesse est donnée par :

$$F_v(p) = G_R N(p) \cdot F_i'(p) \cdot \frac{\Delta_m}{J \cdot P}$$

En négligeant le terme $2 \cdot T_{cm}^2$ dans le dénominateur de $F_i'(p)$ on obtient :

$$F_i'(p) = \frac{1}{1 + 2 \cdot T_{cm} P}$$

$$\Rightarrow F_v(p) = \frac{\Delta_m}{J} \cdot \frac{G_R N(p)}{P(1 + 2T_{cm})}$$

Donc on a affaire à un système à comportement intégral (on pose $T=J/k_m$), donc on utilise un régulateur P I dont la fonction de transfert est donnée par:

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

$$\Rightarrow F_v(p) = \frac{K_m}{J} \cdot \frac{1+T_{nv}P}{T_{iv}P^2(1+2 \cdot T_{cm})} = \frac{1+T_{nv}P}{T \cdot T_{iv}P^2(1+T_p \cdot P)}$$

Pour avoir un réglage rapide de la grandeur de sortie lors d'une variation brusque de la grandeur perturbatrice, il faut choisir $T_{nv} = 4 \cdot T_p$.

Pour choisir T_{iv} on trace l'allure de $F_v(p)$ de la réponse harmonique, afin que le tracé de $F_v(p)$ coupe l'axe des "Odb" avec une pente égale à -1 .

Finalement pour avoir un amortissement optimal, il faut que T_{nv} et T_{iv} satisfassent la relation suivante :

$$T_{nv}/T_{iv} = T/2T_p$$

Toutes ces considérations donnent :

$$F_v(p) = \frac{1+4 \cdot T_p P}{8T_p^2 P^2 (1+T_p P)}$$

La fonction de transfert de la boucle fermée sera donc :

$$F'_v(p) = \frac{F_v(p)}{1+F_v(p)} = \frac{1+4T_p P}{8T_p^2 P^3 + 8T_p P^2 + 4T_p P + 1}$$

Apartir de cette fonction de transfert on tire la réponse indicielle:

$$w(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{F'_v(p)}{p} \right] = \mathcal{L}^{-1} \frac{1+4T_p P}{P(8T_p^2 P^3 + 8T_p P^2 + 4T_p P + 1)}$$

Après un calcul laborieux (décomposition en fractions simples, pour se faire ; on détermine une racine de l'équation $8T_p^3 P^3 + 8T_p^2 P^2 + 4T_p P + 1 = 0$; la méthode de dichotomie donne une racine $P_1 = -124.9$), on trouve :

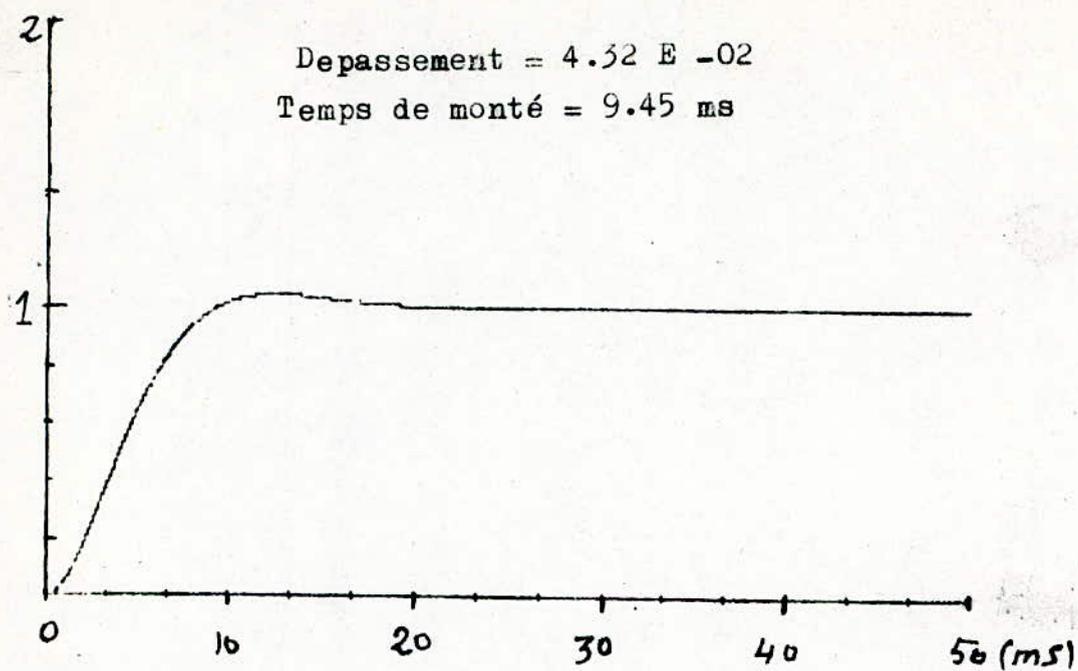


Fig IV-4-c Reponse indicielle du courant

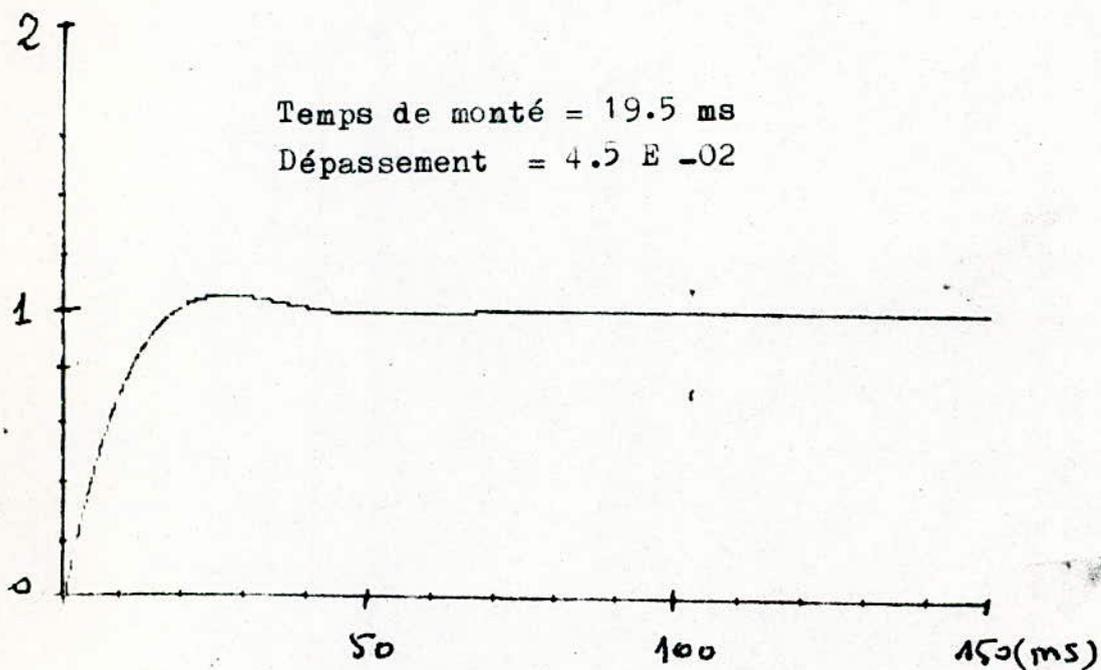


Fig V-4-d Reponse indicielle de la vitesse

(Voir organigramme IV-4-e)

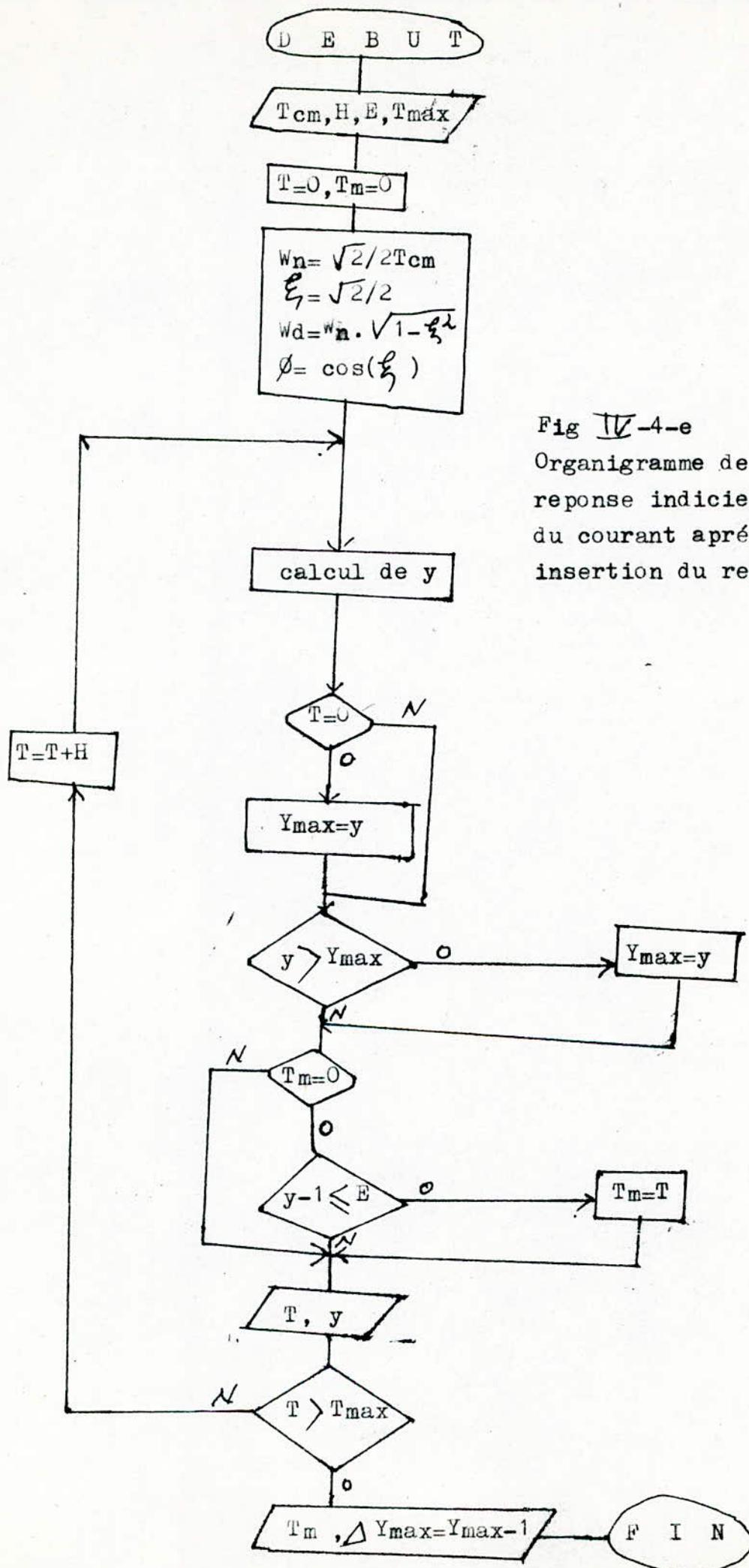


Fig IV-4-e
Organigramme de la
reponse indicielle
du courant après
insertion du regulateur

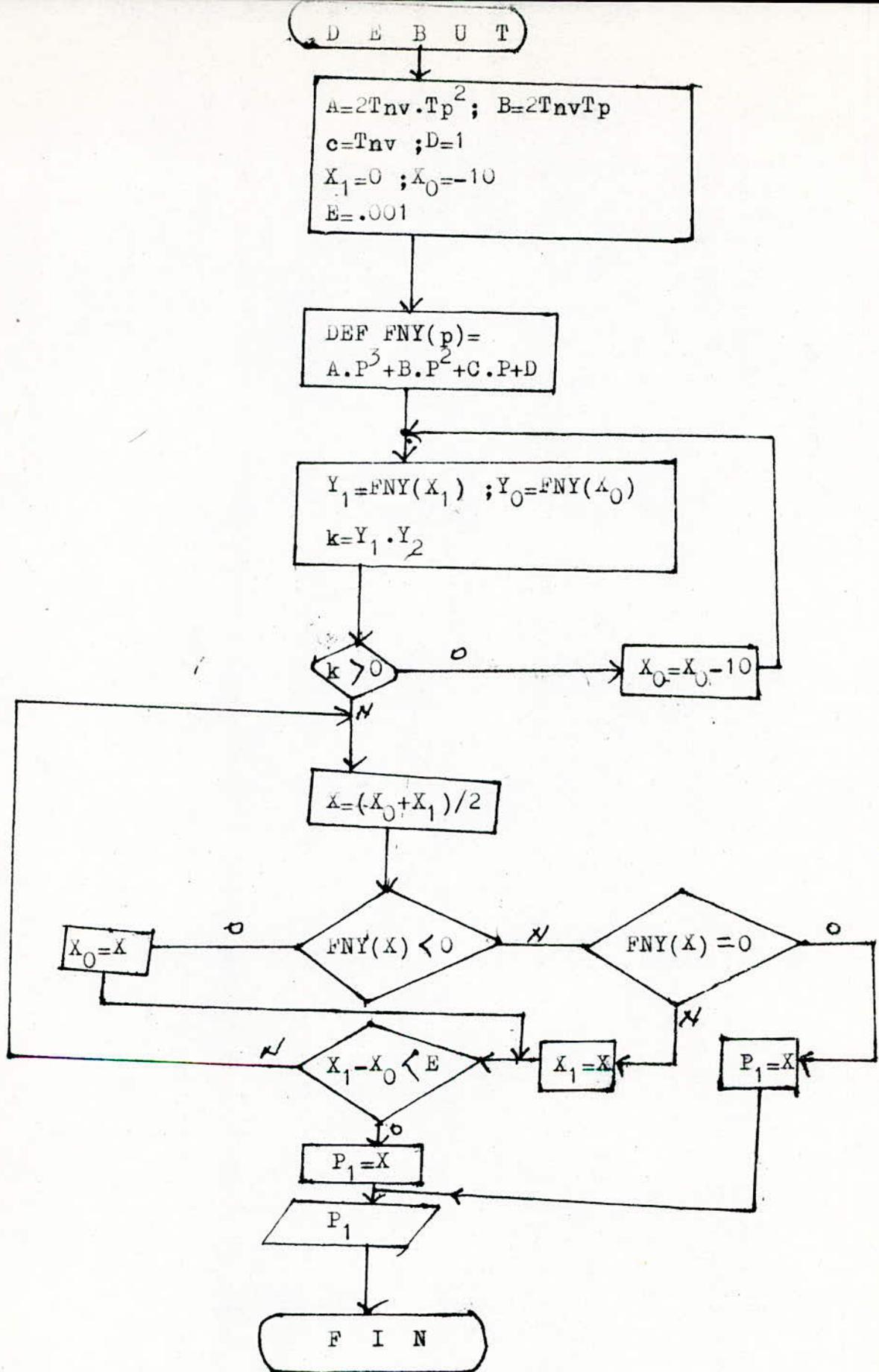


Fig IV-4-f Cet organigramme permet de trouver le pole réel P_1 de la fonction de transfert $F_i(p)$

D E B U T

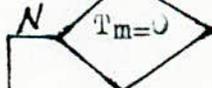
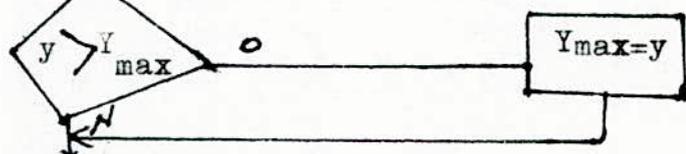
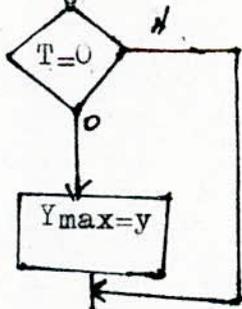
$T_{cm}, H, E, T_{max}, P_1$

$T=0, T_m=0$
 $T_p=2T_{cm}, \alpha=1/T_p, \beta=1/2T_p^2$
 $\zeta=1/8T_p^3, x=\alpha+P_1,$
 $y'=-\zeta/P_1, \omega_n=\sqrt{y'}, \omega_d=\omega_n \cdot \sqrt{1-\zeta^2}$
 $=x/2\omega_n, A_1=4T_p/(2\omega_n P_1 + \omega_n^2 + P_1^2 - 1)$
 $B_1=-A_1, C=(A_1 \omega_n^2 - 1)/P_1$
 $z=C/B_1, A=A_1 / (\frac{A_1}{P_1} - \frac{B_1 z}{\omega_n^2})$
 $B=A \cdot B_1 / A_1, \phi = \arccos(\zeta)$

$Y_1 = A(1 - e^{-P_1 T}) / (-P_1)$
 $Y_2 = B(\frac{z}{\omega_n^2} + \frac{1}{\omega_d} \cdot e^{-\omega_n T} \sin(\omega_d T))$
 $Y_2 = Y_2 - \zeta \cdot e^{-\omega_n T} \sin(\omega_d T + \phi) / \omega_n \omega_d \cdot B$

**

$y = Y_1 + Y_2$



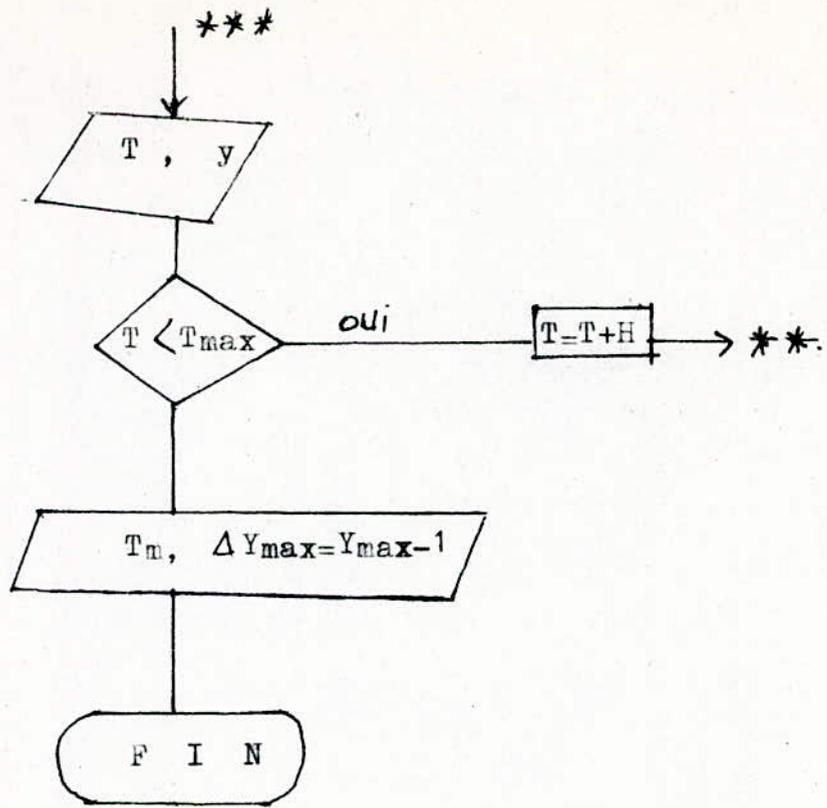


Fig IV-4-f

Organigramme de la reponse indicielle
 après insertion du regulateur .

$$w(t) = Y_1 + Y_2$$

$$Y_1 = A \cdot (1 - e^{P_1 t}) / (-P_1)$$

$$Y_2 = B \cdot \left(\frac{Z}{\omega_n^2} + \frac{1}{\omega_d} \cdot e^{-\xi \omega_n \cdot t} \sin(\omega_d \cdot t) - \frac{Z}{\omega_n \omega_d} \cdot e^{-\xi \omega_n \cdot t} \sin(\omega_d t + \phi) \right)$$

$$A = A_1 / \left(\frac{A_1}{P_1} - \frac{B_1 \cdot Z}{\omega_n^2} \right) ; B = B_1 / \left(\frac{A_1}{P_1} - \frac{B_1 \cdot Z}{\omega_n^2} \right)$$

En posant :

$$\alpha = 1/T_p ; \beta = 1/2 \cdot T_p^2 ; \gamma = 1/8 \cdot T_p^3 ; x = \alpha + P_1 ; y = -\gamma / P_1$$

$$\omega_n = \sqrt{y} ; \xi = x/2 \cdot \omega_n ; A_1 = 4T_p / (2\xi \omega_n P_1 + \omega_n^2 + P_1^2 - 1)$$

$$B_1 = -A_1 ; C = (A_1 \omega_n^2 - 1) / P_1 ;$$

$$Z = C/B_1 ; \omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1 - \xi^2} ; \phi = \arccos(\xi)$$

L'allure de la réponse idicielle (vitesse, courant) est portée sur la figure IV-4(c,d) (voir aussi organigramme IV-e,f,g)

IV-5 INFLUENCE DU COUPLE RESISTANT SUR LA VITESSE :

En supposant que la référence garde une valeur fixe, l'influence du couple résistant sur la vitesse s'exprime par la fonction de transfert suivante:

$$W(p) = \frac{-2T_n v T_p P (1 + T_p \cdot P) / K_m T}{2T_n v T_p^2 P^3 + 2T_n v T_p P^2 + T_n v P + 1}$$

$$\Rightarrow w(t) = W(p) / P M_r(p) = - \frac{2}{K_m \cdot t} \cdot (y_1 + y_2)$$

$$y_1 = A \cdot e^{P_1 \cdot t}$$

$$y_2 = B \sqrt{\frac{(Z - \xi \omega_n)^2 + \omega_d^2}{\omega_d^2}} e^{-\xi \omega_n \cdot t} \sin(\omega_d \cdot t + \phi)$$

En posant

$$\alpha = 1/Tp ; \beta = 1/2Tp^2 ; \gamma = 1/8Tp^3 ; x = \alpha + P_1 ; y = -\gamma/P_1$$

$$w_n = \sqrt{y} ; \xi = x/2.w_n ; w_d = w_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

$$A = Tp / (2\xi.w_n.P_1 + w_n^2 + P_1^2 - 1) ; B = -A ; C = (A.w_n^2 - 1) / P_1$$

$$\theta = \arctang(w_d / (2 - \xi.w_n)) ; \text{avec } Z = C/B$$

On constate qu'après un certain régime transitoire la vitesse revient à sa valeur initiale (voir figure IV-5)

IV-6 INFLUENCE DU COUPLE RESISTANT SUR LE COURANT

A partir du diagramme fonctionnel on tire :

$$\frac{I(p)}{Mr(p)} = \frac{1}{2.T_{cm}^2.T.P^3 + 2T_{cm}T.P^2 + T.P + K_m}$$

On applique le théorème de la valeur finale on trouve :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} i(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p.I(p) = 1/K_m ; (Mr(p) = 1/p)$$

On conclue que lors d'une variation d'un échelon du couple résistant le courant après un certain régime transitoire ne revient à sa valeur initiale , on peut remédier à cela en plaçant un intégrateur dans la boucle de retour du courant .

Remarque :

Il n'est pas possible d'obtenir en meme temps un comportement optimal par rapport à des variations de la valeur de consigne et des variations de la grandeur perturbatrice .

Sur la figure IV-6 est représentée la réponse indicielle du courant .

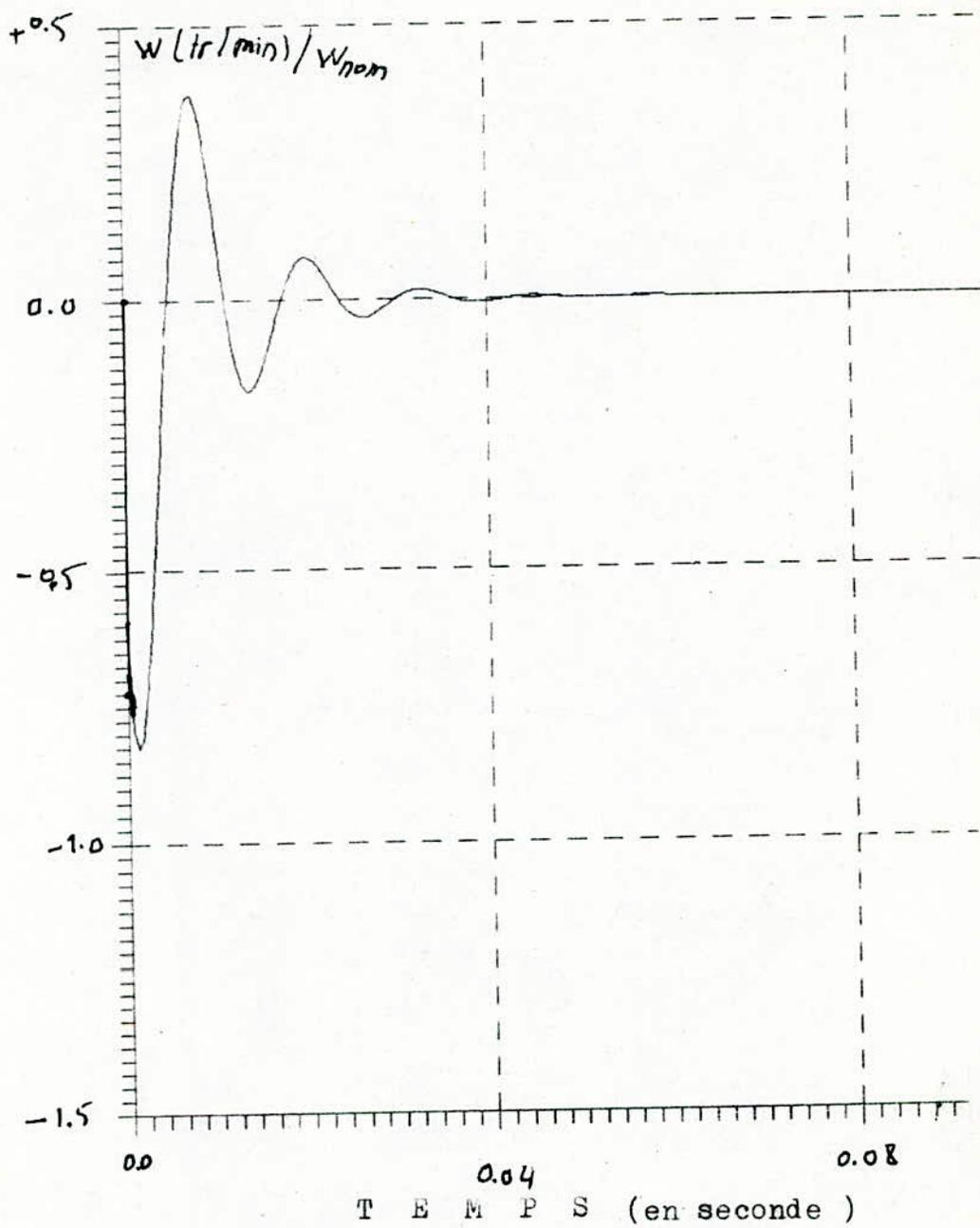


Fig IV-5 Reponse de la vitesse à echelon de couple.

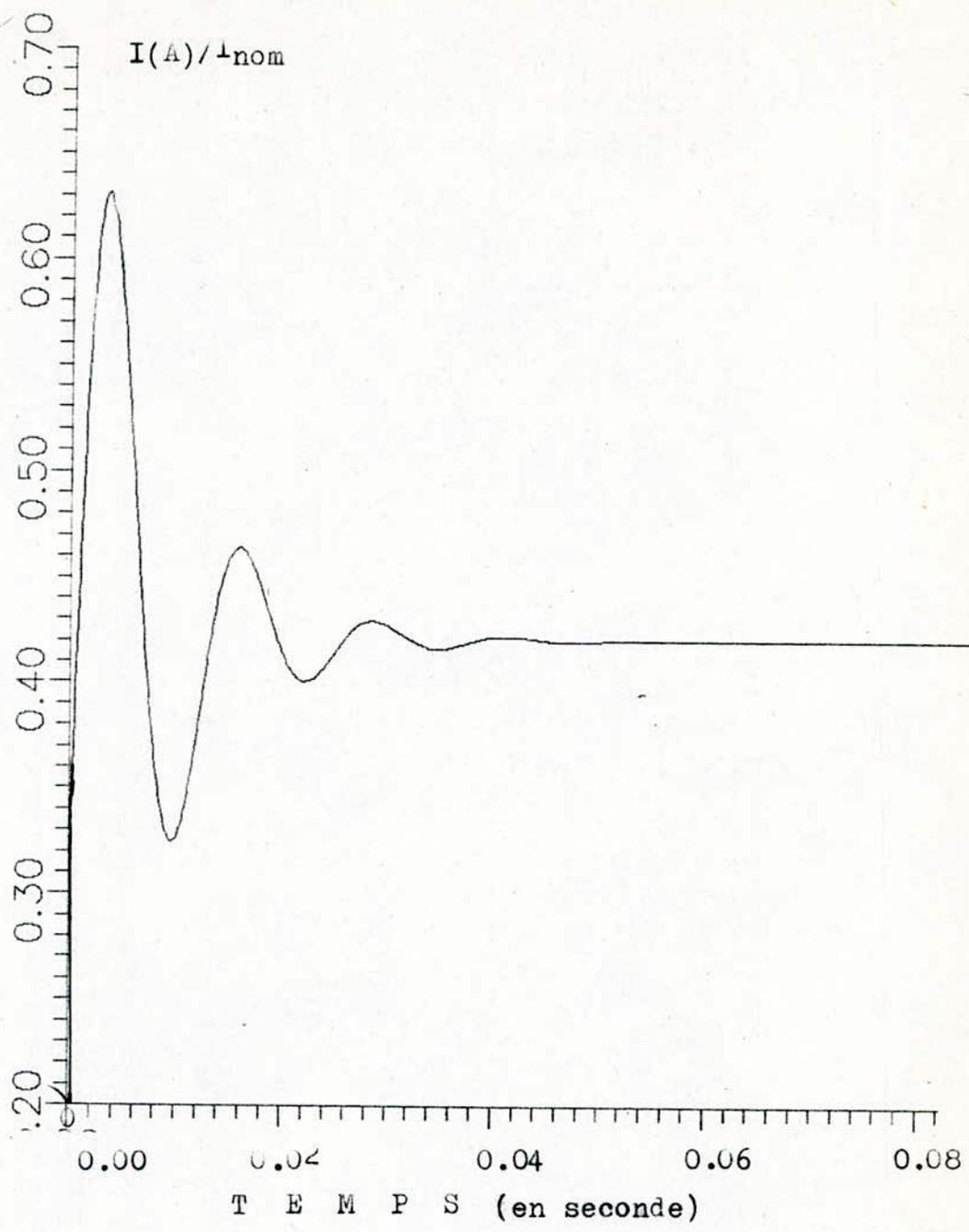


Fig IV-6 Réponse du courant à un échelon de couple .

V-7 LIMITATION DU GRADIENT DE COURANT

Pour protéger les lames du collecteur des étincelles provoquées par un gradient élevé du courant, on fait appel à un limiteur de pente qui sera placé entre le régulateur de vitesse et la référence du courant (voir figure V-7).

En général on choisit : di/dt [20 %, 50 % I_n/s]

Si on prend $di/dt = 50 \% \cdot I_n/s \implies di/dt = 12 \text{ A/s}$

La tension $U_s(t)$ à la sortie du limiteur est donnée par :

$$U_s(t) = 12 \cdot t \implies U_s(p) = 12/P^2 \quad \text{pour } t < 12s$$

$$U_s(t) = 1 \implies U_s(p) = 1/P \quad \text{pour } t \gg 12s$$

Pour limiter le gradient de courant on utilise un intégrateur de montage donné sur la figure V-7a.

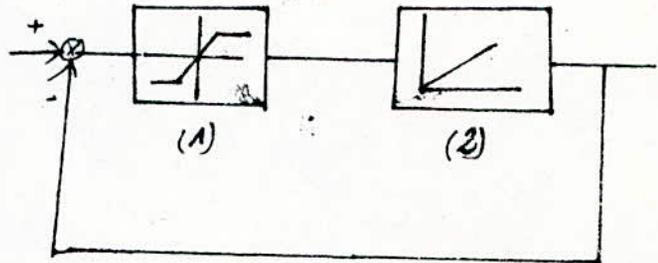


Fig V-7a Schéma bloc de l'intégrateur de montage.

le module (1) représente un limiteur possédant une amplification élevée, et le module (2) représente un intégrateur.

La figure V-7b montre bien que le courant croît suivant le gradient imposé par la régulation, donc les lames du collecteur sont bien protégées des surtensions (voir aussi organigramme)

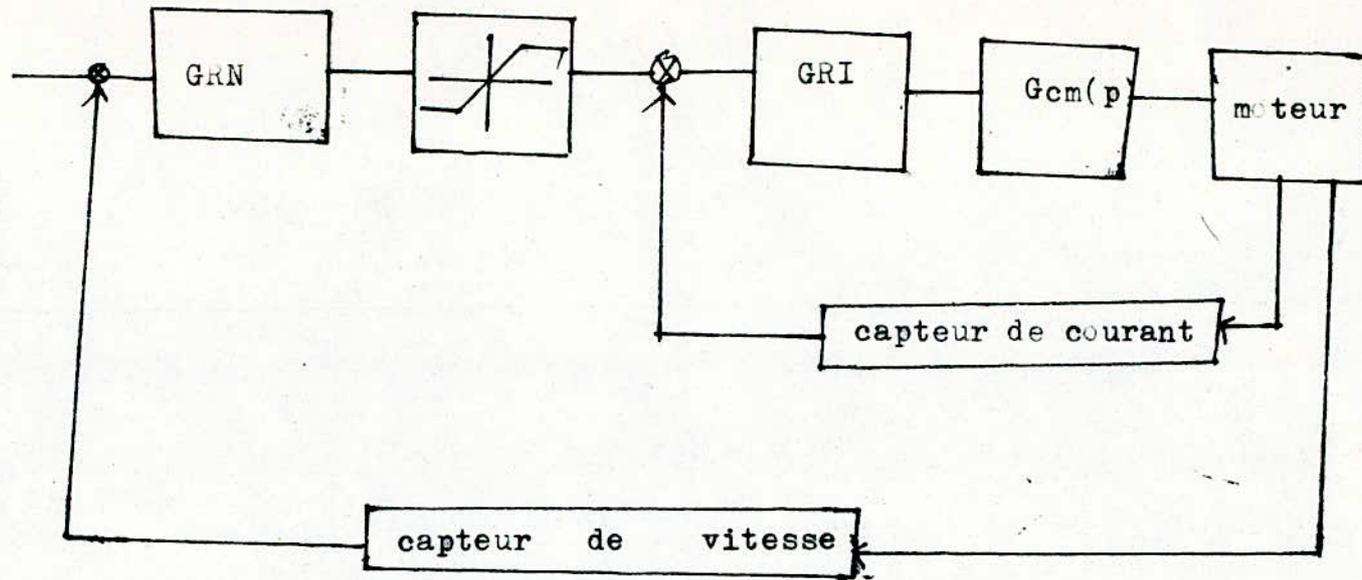


Fig -7 Schéma fonctionnel avec limitation du gradient de courant

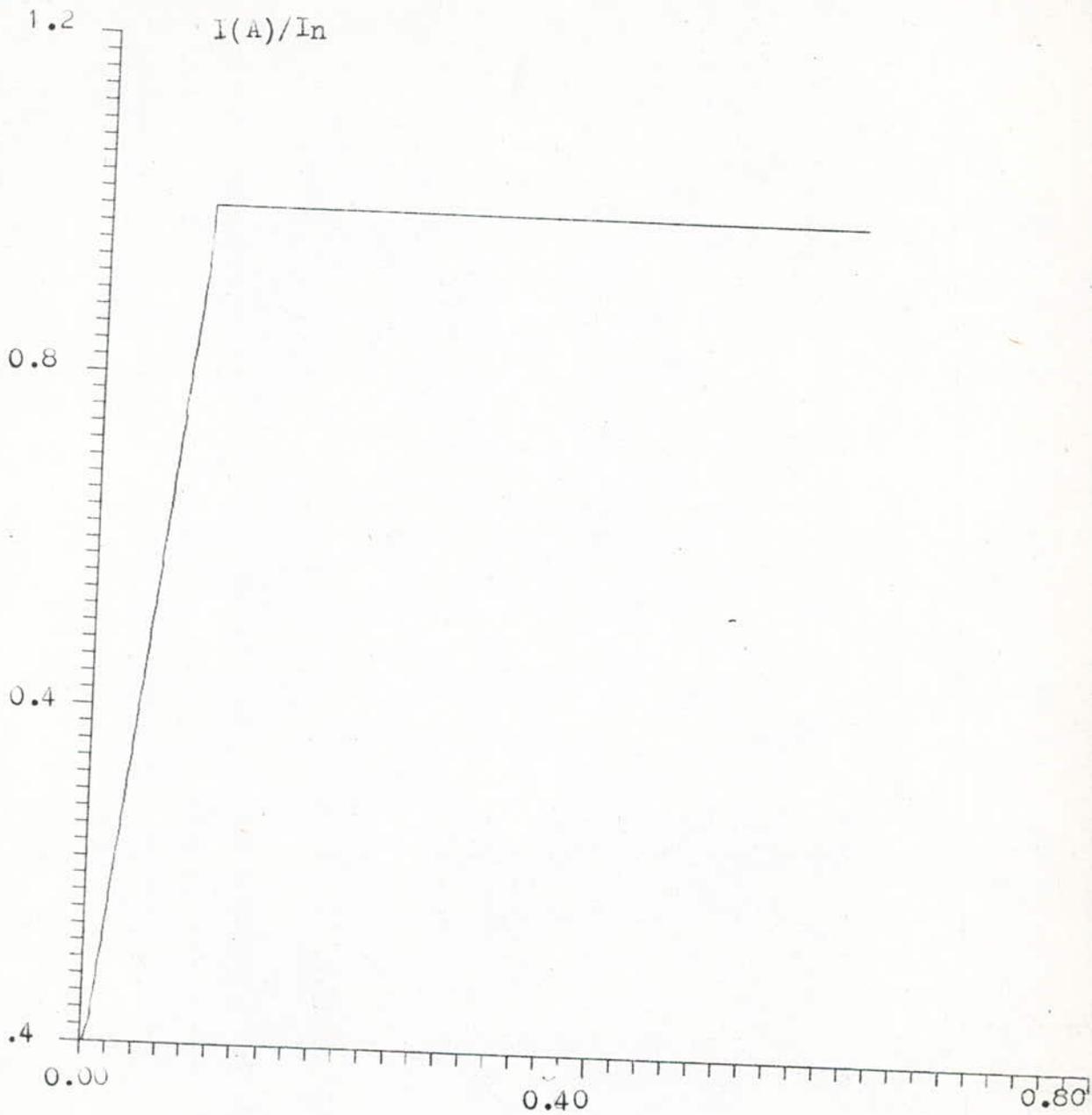


Fig IV-7b Limitation du gradient de courant

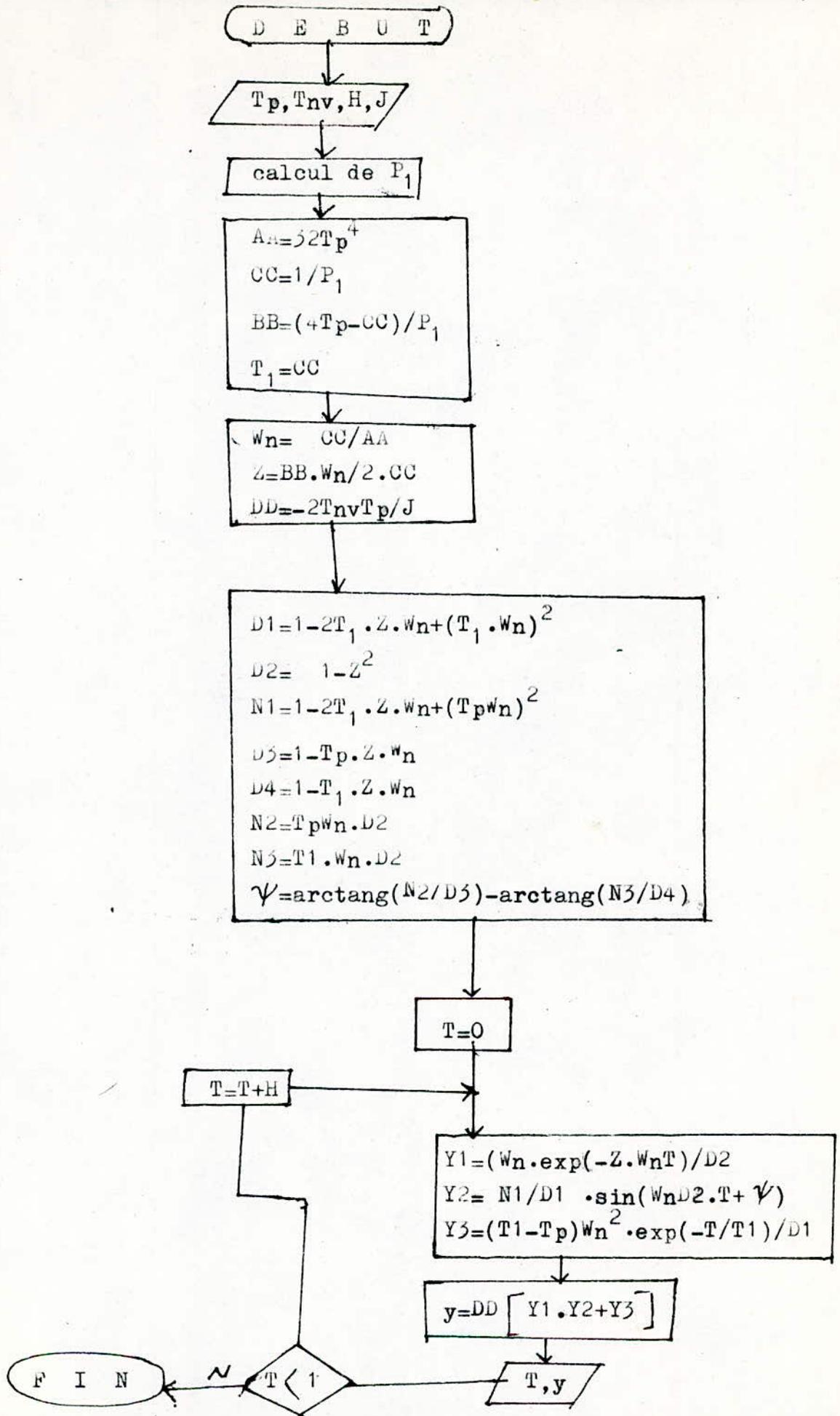


Fig W-7c Organigramme de limitation du gradient du courant

IV - 8 LIMITATION DU COURANT AVEC UN GRADIENT IMPOSE

En regime des grandes variations, on doit limiter la cosigne du courant, cette limitation revient à limiter le couple dynamique qui s'exerce sur l'arbre du moteur. Le schéma complet de la simulation est représenté sur la figure IV 8-a, les regulateurs du courant et de la vitesse peuvent se mettre sous la forme indiquée à la figure IV -8-b, c ; ce qui facilite le calcul des différents signaux.

A partir de la figure IV 8, b et la figure IV -8, c on peut écrire :

$$GRN(p) = \frac{1+P.T_{nv}}{T_{iv}.P} = \frac{K_{iv}}{P} + K_{pv} \implies T_{nv} = T_{nv}/T_{iv} \text{ et } K_{iv} = \frac{1}{T_{iv}}$$

Et pour le regulateur du courant on obtient :

$$k_{pi} = T_{ni}/T_{ii} \quad \text{et} \quad K_{ii} = 1/T_{ii}$$

IV -8-a CALCUL DES SIGNAUX

- S1 ; Valeur de référence de la vitesse
 - S2 : Signal à la sortie du comparateur
 - S3 : Signal à la sortie du regulateur de vitesse
 - S4 : Signal à la sortie du limiteur de courant
 - S5 : Signal à la sortie du limiteur du gradient du courant
 - S6 : Signal à la sortie du comparateur de courant
 - S7 : Signal à la sortie du regulateur de courant
 - S8 : Signal à la sortie du convertisseur de courant
- Le calcul des signaux donne :

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

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

Si on suppose la tension de limitation $U_l = 1$ alors :

$$\text{Si } S_5 > U_1 \implies S_4 = U_1$$

$$\text{Si } S_5 < U_1 \implies S_4 = S_5$$

Si V_1 est la tension de limitation de limiteur (2) alors:

$$e = S_4 - S_5$$

$$\text{si } e > V_1 \implies S_e = 1 \quad (\text{puisque } V_1 = 1/G \text{ et } G: \text{gain de limiteur})$$

$$\text{si } e < V_1 \implies S_e = e \cdot G$$

$$S_5 = K_i \cdot \int_0^t S_e \cdot dt$$

$$S_6 = S_5 - 1$$

$$S_7 = K_{pi} \cdot S_6 + K_{ii} \cdot \int_0^t S_6 \cdot dt$$

$$S_8(p) = K_{cm} \cdot S_7(p) / (1 + T_{cm} \cdot p) \implies S_8(1 + T_{cm} \cdot p) = K_{cm} \cdot S_7$$

$$\implies \frac{dS_8}{dt} = \frac{K_{cm}}{T_{cm}} \cdot S_7 - \frac{1}{T_{cm}} \cdot S_8$$

On résout cette équation par la méthode de RUNGE KUTTA :

$$S_8(n \cdot h) = S_8((n-1)h) + (k_1 + k_2) / 2$$

$$k_1 = h \cdot f'(t, S_8)$$

$$k_2 = h \cdot F(t+h, S_8+k_1)$$

Avec :

$$f'(t, S_8) = (K_{cm} \cdot S_7 - S_8) / T_{cm}$$

S_8 : La tension appliquée à l'induit du moteur

Le calcul de $y(1)$ et $y(2)$ se fait à partir des deux équations qui caractérisent le moteur. En introduisant les grandeurs relatives :

$$U_r = S8 = U/U_n ; i_r = i/I_n ; w_r = w/W_n ;$$

$$i_r = y(1) ; w_r = y(2)$$

On obtient alors :

$$d y(1)/dt = C - \frac{Rt}{Lt} \cdot y(1) - B \cdot y(2)$$

$$d y(2)/dt = D \cdot y(1) + B \cdot y(2)$$

$$\text{Avec } A = K_m W_n / I_n \cdot Lt ; B = -K_r / J ; C = S8 - U_n / I_n Lt \text{ et } D = K_m I_n / J W_n$$

Le calcul de $y(1)$ et $y(2)$ se fait par la méthode de RUNGE KUTTA déjà développée dans le premier chapitre .
Sur la figure IV-8d est représentée la variation du courant avec limitation du courant et du gradient et aussi la variation de la vitesse .

On remarque que la variation de la vitesse est moins rapide que celle du courant , ce qui est tout à fait logique puisque la boucle de courant est la boucle interne et celle est externe .

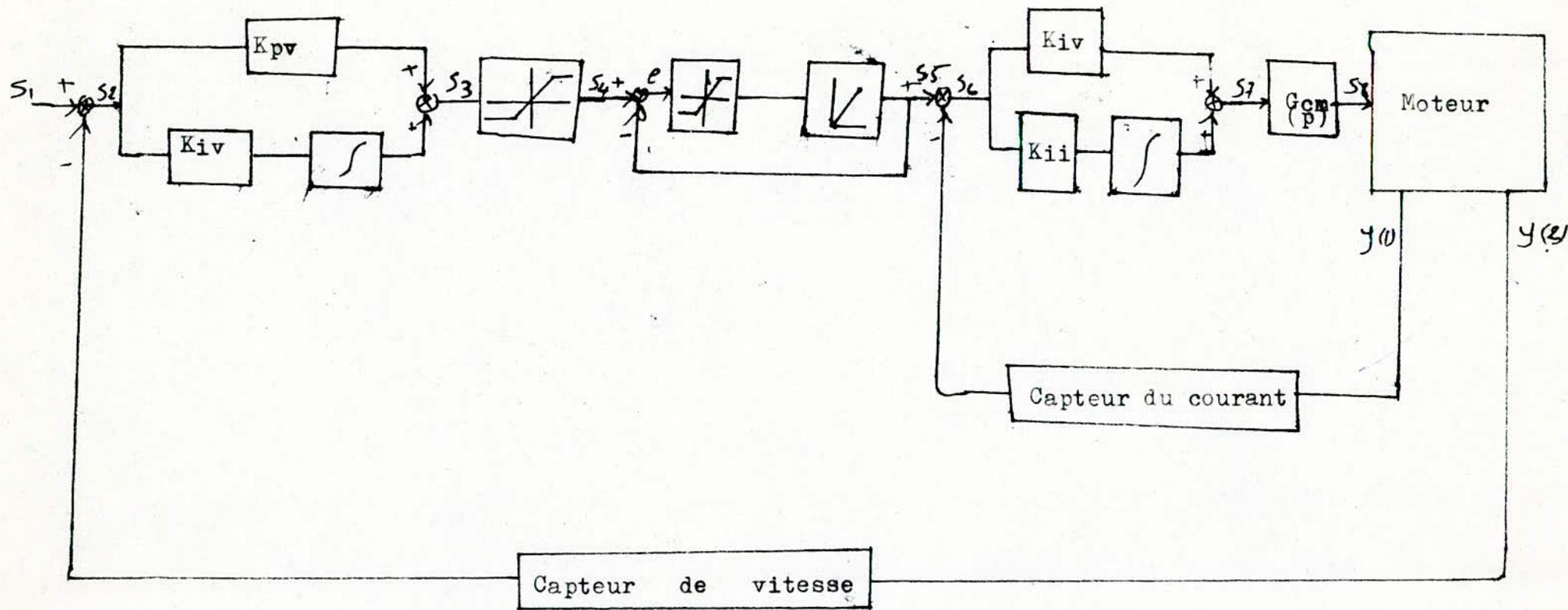


Fig IV-8a Schéma fonctionnel complet de la simulation

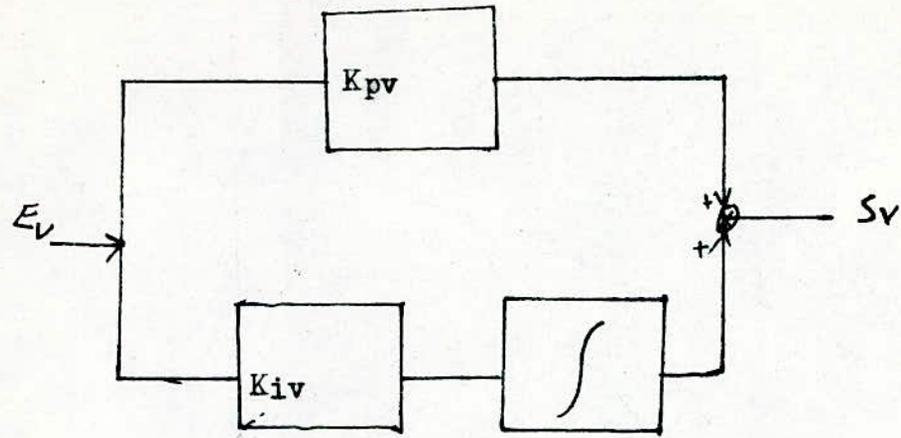


Fig IV-8b schéma de regulateur de vitesse

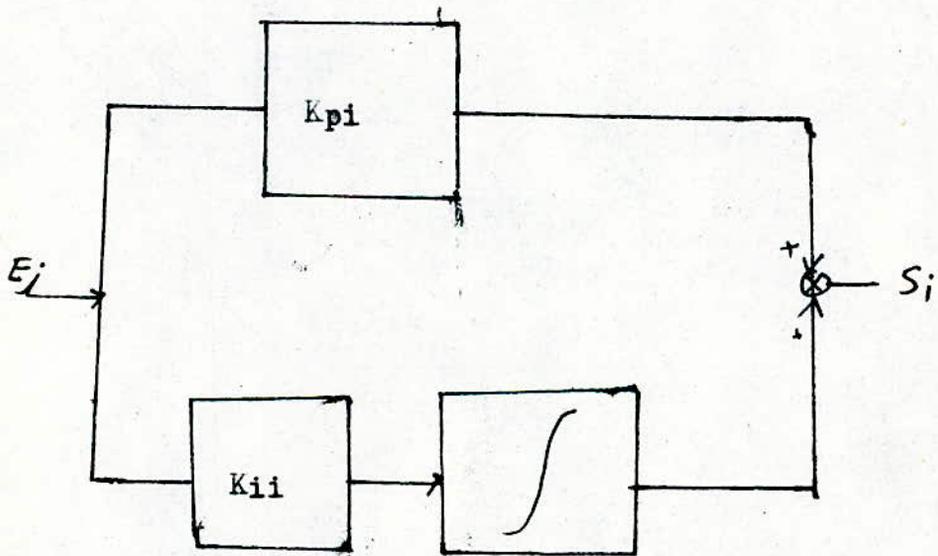


Fig IV-8c schéma de regulateur de courant

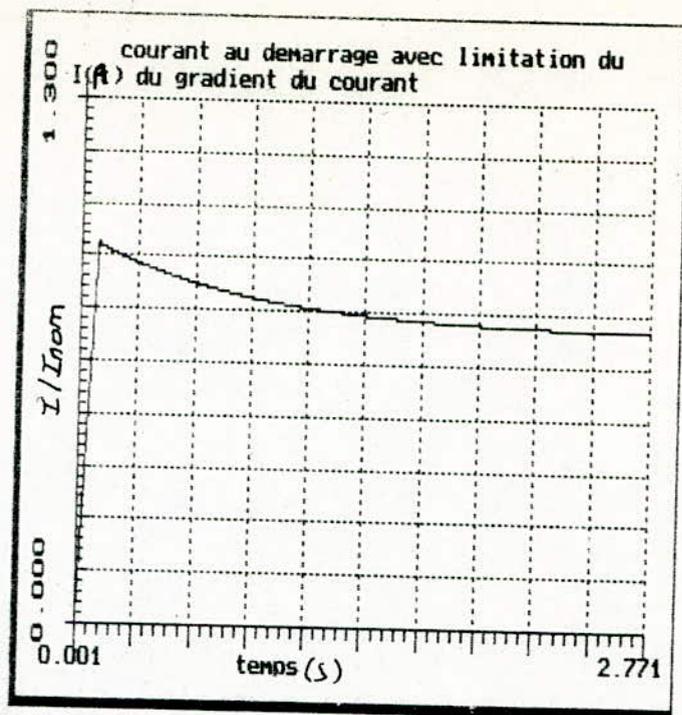


Fig IV-8d Variation du courant avec limitation du courant et de son gradient.

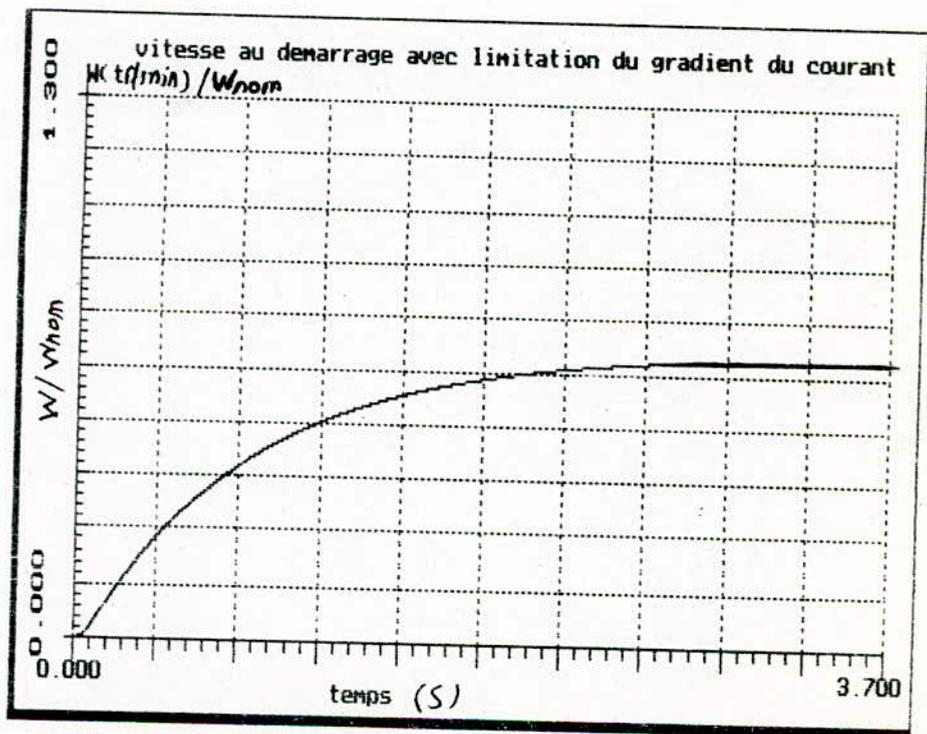


Fig IV-8a Variation de la vitesse avec limitation de gradient et de courant. (au démarrage)

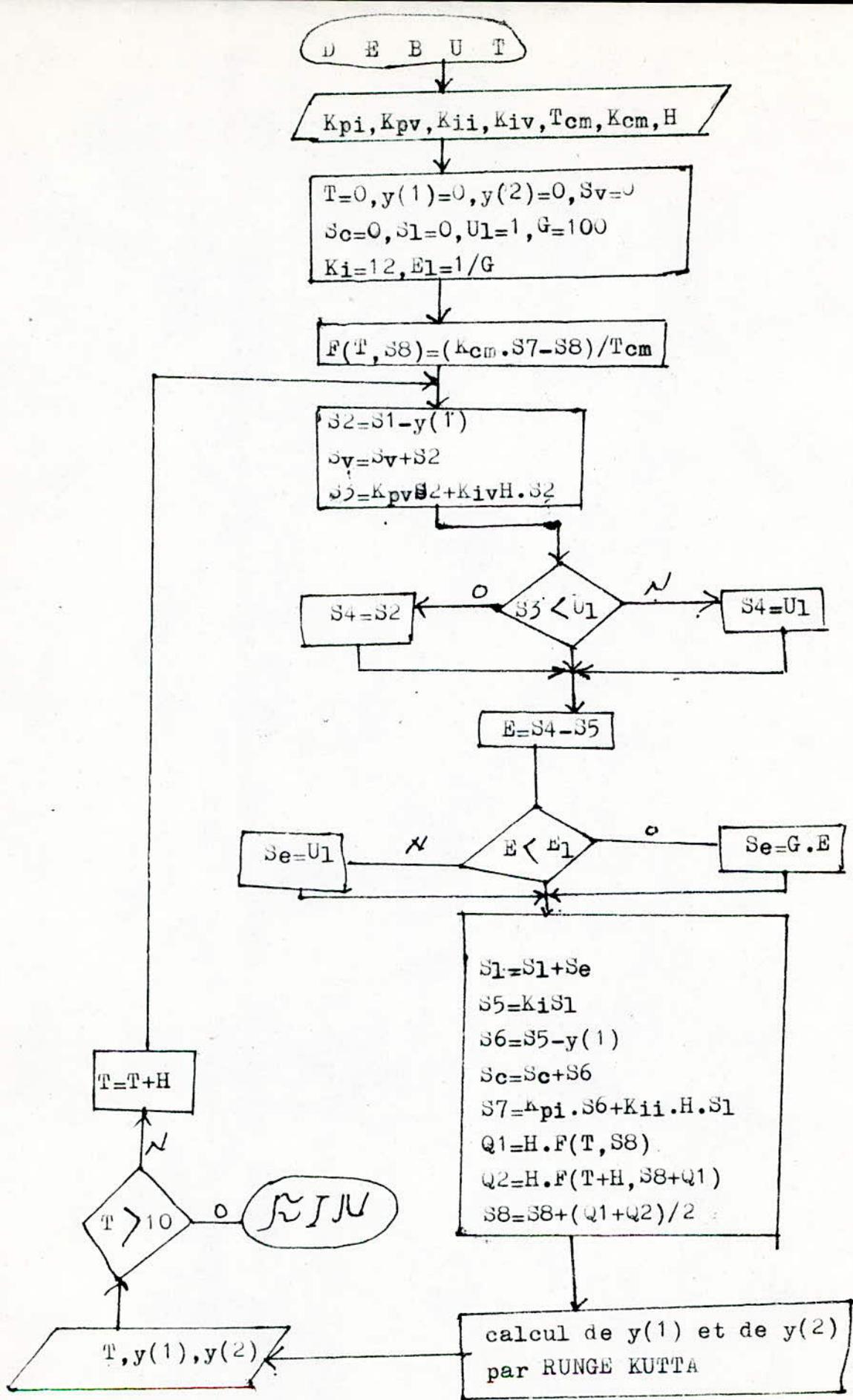


Fig V-8e Organigramme de simulation de la limitation du courant et de son gradient.

CONCLUSION

L'étude théorique ,du moteur à courant continu ,élaborée dans le premier chapitre montre que le moteur est exposé à plusieurs risques parmi lesquels:

- Pointes du courant d'induit
- Gradient du courant élevé

C'est pourquoi le moteur doit être asservi pour éviter ces risques et aussi obtenir les performances désirées (précision, stabilité, rapidité).

D'après l'étude faite en quatrième chapitre ;le moteur semble être bien stable ,précis et a une rapidité acceptable.

En imposant un gradient du courant bien déterminé ;et en limitant le courant d'induit le moteur devient très bien protégé et loin d'être exposé aux risques mentionnés précédemment.

SYMBOLE	DESIGNATION
C_m, M_m	couple moteur
C_r, M_r	couple résistant
N	vitesse de rotation (Tr/min)
U_a	tension d'induit
E'	f . c . e . m du moteur
I_a, i	courant d'induit
O	flux
R_h	résistance de rheostat
C_{dem}	couple moteur au démarrage
U_g	tension induite de la génératrice
I_g	courant dans l'induit de la génératrice
K_g	constante de la f e m de la génératrice
J	moment d'inertie des parties tournantes
R_{ch}	résistance de charge
K_m	constante de la f e m du moteur
W	vitesse de rotation (rad/s)
E_g	f c e m de la génératrice
K_{cm}	gain du convertisseur de courant
K_f	coefficient de frottement
L_a, L_t	inductance de l'induit de moteur et celle du convertisseur
N_n	vitesse nominale
N_r	vitesse relative
I_r	grandeur relative du courant
R_c	résistance de l'induit de la génératrice plus celle de la charge
R_t	résistance de l'induit du moteur plus celle du convertisseur
T_{cm}	constante de temps de convertisseur
T_e	constante de temps électrique
T_{em}	constante de temps électromécanique
Z	coefficient d'amortissement
ω_n	pulsation propre
U_n	tension nominale
U_r	tension relative

A N N E X E 2 (programme 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 VARIATIONDU COU-
60 REM RANT ET DE LA VITESSE LORS DU
70 REM DEMARRAGE DU MOTEUR >>
80 REM << les parametres du moteursont:
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*s/d rd >>
130 REM-----
135 REM
140 REM << les parametres de la generatrice sont:
150 REM KG:constante de la generatrice en V*s/rd
160 REM KF:coeficient de 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 tention nominale du moteur en V >>
210 REM << RH resistance du rehostat du demarrage
220 REM en ohms >>
230 REM-----
240 REM
250 PRINT "1-----COURANT"
260 PRINT "2-----VITESSE"
265 PRINT "3-----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;Y2: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

```

```

485 REM CALCUL DES COEFFICIENTS DE RUNGE-KUTTA
486 REM -----
490 FOR I=0 TO NS
495 X(I)=Y(I)
500 NEXT I
510 GOSUB 880
525 FOR I=1 TO NS
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 NS
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 NS
630 K3(I)=H*F(I)
640 X(I)=Y(I)+K3(I)
650 NEXT I
660 GOSUB 880
680 FOR I=1 TO NS
682 K4(I)=H*F(I)
685 NEXT I
688 FOR I=1 TO NS
690 Y(I)=Y(I)+(K1(I)+2*K2(I)+2*K3(I)+K4(I))/6
700 NEXT I
710 T=T+H
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
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 10
940 VIEW(15,80)-(380,280)
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"energie s(t)"
1083 IF UU=1 THEN LOCATE 18,15:PRINT"courbe de courant i(t) au dem"
1084 IF UU=2 THEN LOCATE 18,15:PRINT"vitesse n(tr/min) au dem"
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 calcul de l energie
1120 REM methode des rectangles
1150 REM s: energie
1160 S=S+(U*Y(1)*H)
1170 REM
1180 IF UU=3 THEN LOCATE 6,10 :PRINT"energie consommee au dem"
1190 RETURN

```

A N N E X E 3 (programme 2)

```
1 ' *****
2 ' * reponse indicielle du courant et de la vitesse *
3 ' *      après regulation      *
4 ' *****
10 INPUT "donner le nom du fichier:";YY$
20 INPUT "xmin=";XMIN
30 INPUT "xmax=";XMAX
40 AA=XMAX-XMIN
50 INPUT "le nombre de points=";N
60 INPUT "e=";E
70 INPUT "wn=";WN
80 WD=WN*(1-E^2)^.5
90 INPUT "phi=";PHI
100 TCM=.002:TP=.004:TNV=.016:TE=.016:KM=.6:RT=.78
110 TEM=.17:Z1=1/TP:Z2=1/(4*TP)
120 A=1/TEM:B=1/TE
130 OPEN "o",#1,YY$
140 FOR I=XMIN TO XMAX STEP AA/N
150 Y1=1-B*EXP(-A*I)/(B-A)+A*EXP(-B*I)/(B-A)
160 Y2=(EXP(-A*I)-EXP(-B*I))/(RT*TE*(B-A))
170 Y3=-RT*(1-EXP(-A*I))/(KM^2)
180 Y4=(1/WN^2)-(1/(WN*WD))*EXP(-E*WN*I)*SIN(WD*I+PHI)
190 Y4=Y4/(2*TCM^2)
270 PRINT #1,USING"##.###^";I,Y1,Y2,Y3,Y4
275 NEXT I
280 CLOSE#1
290 INPUT "donner le nom du fichier:";XX$
295 INPUT "wn=";WN
300 OPEN "o",#2,XX$
310 A1=1/(4*TP) :T=.135
320 FOR I=XMIN TO XMAX STEP AA/N
330 Y5=A1/WN^2+(1/WD)*EXP(-E*WN*I)*SIN(WD*I)
340 Y5=Y5-A1*EXP(-E*WN*I)*SIN(WD*I+PHI):Y5=Y5/(2*TP)
350 Y6=1/WN^2-EXP(-E*WN*I)*SIN(WD*I+PHI)/(WN*WD)
360 Y6=Y6+TP*EXP(-E*WN*I)*SIN(WD*I)/WD:Y6=-Y6
370 Y7=(-1/(KM*T))*(((Z1-E*WN)^2+WD^2)/WD^2)^.5)
      *EXP(-E*WN*I)*SIN(WD*I+PHI))
380 Y8=(Z2/WN^2)+EXP(-E*WN*I)*SIN(WD*I)/WD-Z2
      *EXP(-E*WN*I)*SIN(WD*I+PHI)/(WN*WD)
390 Y8=Y8/(2*KM*TP)
400 PRINT #2,USING"##.###^";I,Y5,Y6,Y7,Y8
420 NEXT I
425 CLOSE #2
430 END
```

A N N E X E 4 (programme 3)

```
1 '*****
2 '* simulation de la limitation du gradient du courant *
3 '*****
5 INPUT "donner le nombre de points:";N
6 INPUT "xmin=";XMIN
7 INPUT "xmax=";XMAX
10 TCM=.002
20 WN=353.55
30 Z=.71 :AA=XMAX-XMIN
40 D1=.7042 : D2=WN*D1:PSI1=-44.765:PSI2=2*PSI1
50 OPEN "o",#1,"trace3.dat"
60 FOR T=XMIN TO XMAX STEP AA/N
70 S1=SIN(D2*T-PSI1)
80 S2=SIN(D2*T-PSI2)
90 I1=(T-(2*Z/WN)+EXP(-Z*WN*T))*S2/D2)*12
100 I2=1+EXP(-Z*WN*T)*S1/D1
110 TI=1/I2
120 IF T<TI THEN I=I1
130 IF T>=TI THEN I=I2
140 PRINT #1,USING"##.###" ;T,I
150 NEXT T
160 CLOSE #1
170 END
```

A N N E X E 5 (programme 4)

```
1 REM*****
2 REM* simulation de la regulation en cascade *
3 REM*****
4 '
5 '** etudes 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 resistance du moteur
13 'L inductance du moteur
14 'J moment d inertie du moteur
15 'constante du moteur en v*s/rd
16 'kf coefficient du frottement
17 '
18 'les parametres de la generatrice sont
19 'kg constante de la generatrice en v*s/rd
20 'rc resistance de la charge nominale plus celle de la generatrice
21 '
22 'u tension nominale du moteur en v
23 'rh resistance du rheostat du demarrage
24 '
25 XMAX-10
26 YMAX-2
27 GOSUB 1050
28 GOSUB 1270
29 READ KM,R,L,J,KF,KG,RC
30 DATA .6,.78,126.8e 4,.001,.01,.64,5.89
31 'les grandeurs nominales
32 READ UN,IN,NN
33 DATA 110,24,188.5
34 'calcul des des regulateurs
35 TE=L/R
36 TNI=TE
37 KCM=11
38 T1=.004
39 TII=T1*KCM/R
40 TNV=4*T1
41 T2=J/KM
42 TIV=2*TNV*T1/T2
43 TPV=TNV/TIV
44 KIV=1/TIV
45 KPI=TNI/TII
46 'calcul des grandeurs relatives
47 'Rt resistance relative
48 RT=R*IN/UN
49 'l inductance relative
50 LT=L*IN/UN
51 'mr couple resistant nominale
52 KR=KF*KG^2/RC
53 MR=KR*NN
54 REM
55 A=KM*NN/(UN*LT)
```

```

370 B=KR/3
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 'resolution du systeme d equation differentielle 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
950 END
1000 'sub calcul des fonctions de runge kutta

```

```

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 10
1070 VIEW(15,80) (380,280)
1075 CLS:SCREEN 10
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,"s":LOCATE 13,2:PRINT 2:LOCATE 17,2:PRINT 1
1112 LOCATE 22,3:PRINT 0:LOCATE 22,48:PRINT 10;"s"
1120 RETURN
1130 '
1135 'sub de calcul du signal s8
1140 TCM=.002
1150 DEF FNF(T,S8)-(1/TCM)*(KCM*S7 S8)
1160 Q1-H*FNF(T,S8)
1170 Q2-H*FNF(T+H,S8+Q1)
1180 S8-S8+(Q1+Q2)/2
1190 RETURN
1200 'sub de calcul d energie
1210 'methodes des rectangles
1220 S-S+H*S8*Y(1)*110*24
1230 LOCATE 5,10:PRINT "enrgie-";S*1000;"10e 6 kj"
1240 RETURN
1250 'sub
1260 SCREEN 10
1270 VIEW(15,80) (380,280)
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(15,80) (380,280)
1430 WINDOW( XMAX/100, YMAX/10) (XMAX,YMAX)
1440 LINE(TI,YI1) (T,Y(1))
1450 YI1-Y(1):TI-T
1460 RETURN
1470 VIEW(15,80) (380,280)
1480 WINDOW( XMAX/10, YMAX/10) (XMAX,YMAX)
1490 LINE(TI,YI2) (T,Y(2))
1500 YI2-Y(2):TI-T
1510 RETURN

```

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

H. BUHLER, ELECTRONIQUE DE REGLAGE ET DE COMMANDE

H. BUHLER, ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

R. CHAUPRADE, COMMANDE DES MOTEURS A COURANT CONTINU

G. SEGUIER, ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

J. J. DI STEFANO, SYSTEMES ASSERVIS T1, T2

11/86 BENKHORIS THESE , SIMULATION DES DIFFERENTES METHODES
DE REGULATION D UN MOTEUR A COURANT CONTINU

15/87 FETOUS THESE , SIMULATION DE LA COMMANDE NUMERIQUE
ET ANALOGIQUE D UN M C C

CHIGARA, COURS D AUTOMATIQUE (4^{eme} ANNEE), ELECTRONIQUE DE
PUISSANCE (5^{eme} ANNEE)

B. DEMIDOVITCH, ELEMENT DE CALCUL NUMERIQUE