

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : *d'Electrotechnique*



PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

Commande Numérique de Vitesse d'un Moteur
à Courant Continu. Projet d'Implantation
d'une commande numérique

Proposé par :

M^{me} K. Benhamza

Etudié par :

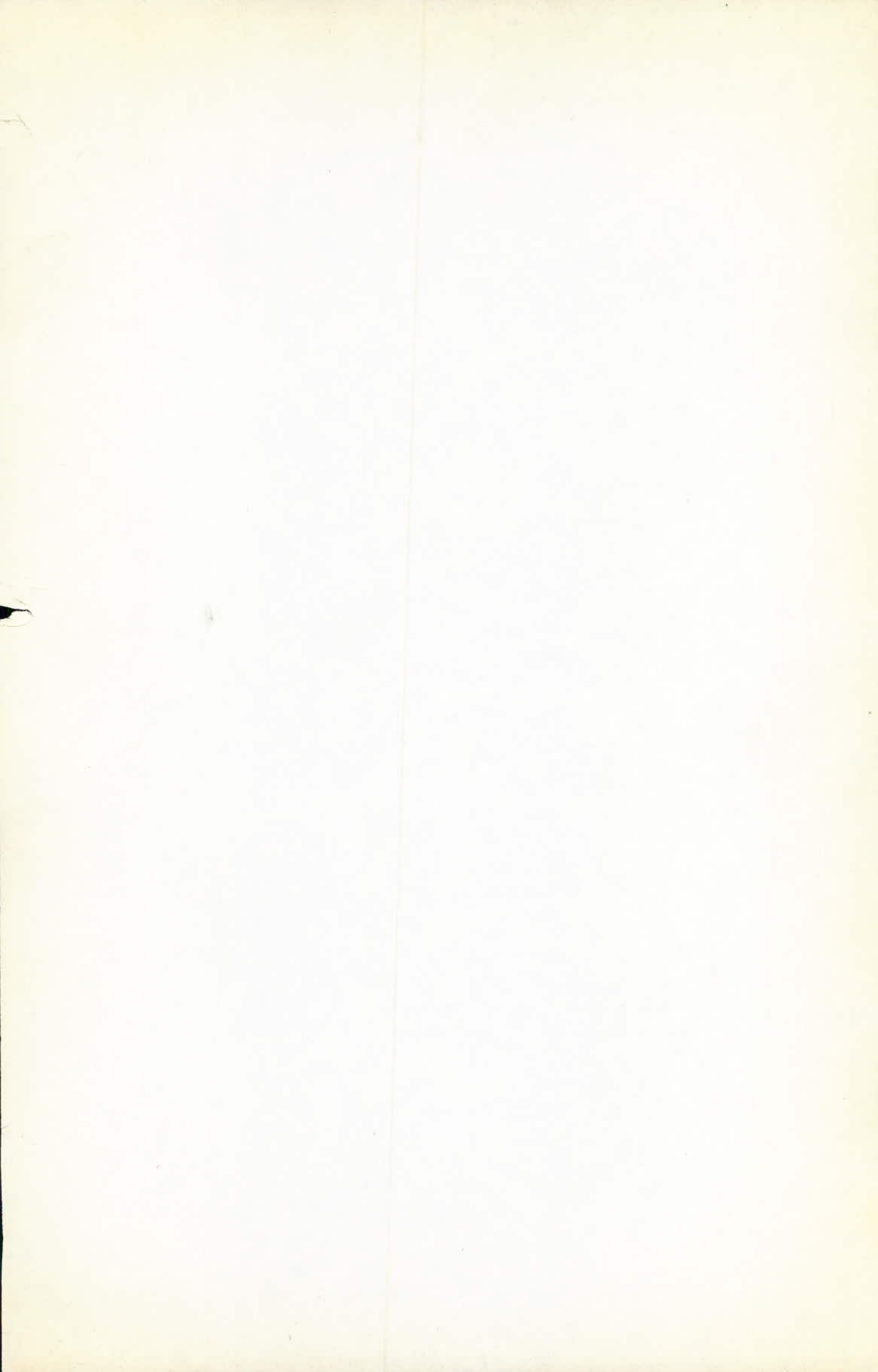
R. MELLAL

S. SMAIL

Dirigé par :

M^{me} K. Benhamza

PROMOTION : Juin : 1986



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : *d'Electrotechnique*

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

Commande Numérique de Vitesse d'un Moteur
à Courant Continu. Projet d'Implantation
d'une commande numérique

Proposé par :
M^{me} K. Benhamza

Etudié par :
R. MELLAL
S. SMAIL

Dirigé par :
M^{me} K. Benhamza

PROMOTION : Juin : 1986

رَبِّي سَجْدًا وَجْهِي وَأَمِّنْ بِكَ فُوَادِي
فَارْزُقْنِي عِلْمًا يَنْفَعُنِي وَعَمَلًا يَرْفَعُنِي

REMERCIEMENT

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Louange à ALLAH, maître des mondes

Nous remercions notre promoteur M^{me} K. BENHAMZA pour son aide et son suivi qu'elle nous a accordé durant notre travail

Nous remercions également l'ensemble des enseignants qui ont contribué de près ou de loin à notre formation

Nous remercions aussi les agents du centre de calcul pour leur aide technique.

Nous remercions également notre frère KHALED ainsi que son ami, qui nous ont été de grande utilité pour la réalisation de ce modeste ouvrage

SMAIL & MELLAL

DEDICACE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

- A mes chers parents
- A mes frères et soeurs
- A mes amis

Je dedie ce modeste
travail

MELLAL Rachid

- A ma mère (trois fois).
- A mon père
- A mes frères et soeurs.
- A ma tres chère famille
- A la mémoire de ma grand-mère MEG DOUDA.
- A la mémoire de mon cousin NASSER
- A mes amis de foie

Je dedie ce modeste
ouvrage.

SMAIL. Smail.

Ministère de l'enseignement supérieur

وزارة التعليم العالي

Ecole nationale polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Departement: d'Electrotechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

مصلحة: الإلكترونيات

Promoteur: M^{me} K. BENHAMZA.

موجهة: د. بن حمزة

Elevés Ingenieurs: MELLAL / SMAIL

التلفان المهندسان: ملال / سماعيل

موضوع: التحكم العددي لسرعة محرك ذو التيار المتواصل ومشروع غرس التحكم العددي:

ملخص: يتعدّل بحثنا في التحكم العددي لسرعة المحرك ذو التيار المتواصل المغذي بواسطة جسر وجهد المحر من التيرستورات. ويتم تشغيل التيرستورات بواسطة مولد عددي للنبقات المنغرس داخل العقل الآلي (MC 68701)

Sujet: Commande numérique de vitesse d'un moteur à courant continu, et projet d'implantation d'une commande numérique

Résumé: notre projet concerne la commande numérique de vitesse d'un moteur à courant continu, alimenté par un pont mono-phasé de thyristors.

Les thyristors sont amorcés par des impulsions générées par un générateur numérique d'impulsions implanté dans le micro processeur MC 68701

Subject: Digital speed control of D.C motor and digital control implantation project.

Abstract: Our project concern the digital control of speed of a D.C motor, fed by a single full-wave thyristors the thyristors are fired by pulses generated by a digital generator including in a micro-processor MC68701

PLAN

1) GÉNÉRALITES	1
2) CHAP I : ETUDE DE LA REGULATION DE VITESSE EN BOUCLE FERMÉE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU	
I.1) Rappels sur l'alimentation d'un moteur à courant continu alimenté par un pont monophasé de thyristors.	2
I.2) Modeles et simulations d'un régulateur numérique PI d'un moteur à courant continu	
I.3) Conclusion	27
3) CHAP II : ETUDE DE LA COMMANDE NUMERIQUE	
II.1) Présentation de la carte de commande. :	28
II.2) Gestion du temps.	-32-
4) CHAP III IMPLANTION DES TACHES	
III.1) Algorithme proportionnel-intégral de la vitesse	
III.2) Algorithme proportionnel de l'intégrale du courant	
III.3) Algorithme proportionnel-intégral de l'angle d'allumage.	
5) CONCLUSION	

GENERALITES

L'utilisation de la technique numérique dans la commande des processus industriels est aujourd'hui, très répandue, particulièrement après l'apparition des microprocesseurs. Elle a permis de compenser certaines lacunes de la technique analogique (flexibilité du système).

Les unités industrielles, comme par exemple les laminoirs, les unités de productions chimiques, sont en général équipées d'un grand nombre de boucles d'asservissement grâce aux capacités de traitement, de calcul et de mémorisation des calculateurs. Il est possible d'accroître leurs performances et d'obtenir une souplesse d'exploitation avec un matériel réduit.

Dans ce projet, nous étudions la commande par microordinateur d'un moteur à courant continu. Son application ouvre des perspectives intéressantes dans l'industrie et surtout dans la robotique.

Chap I ETUDE DE LA REGULATION DE VITESSE EN BOUCLE FERMEE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU.

I.1 Etude et rappels sur l'alimentation d'un moteur à courant continu alimenté par un pont de thyristors monophasé.

I.1.1 Principe de commande des convertisseurs statiques : Ce sont des dispositifs électroniques permettant de modifier la forme, la valeur, la fréquence des grandeurs électriques.

Le circuit de commande doit assurer :

- l'alimentation correcte de l'élément de déclenchement de l'interruption (interrupteur) électronique
- l'apparition correcte du signal de commande en fonction des critères imposés par le fonctionnement de l'ensemble.
- la souplesse de la commande des instants d'ouverture et de fermeture. qui constitue le principal critère de comparaison des divers systèmes de commande réalisables par un convertisseur

I.1.2 Convertisseur alternatif / continu. ce sont les plus répandus car ils partent directement de la tension du réseau. Ils sont mono- ou triphasé, suivant la puissance du moteur. et utilisent des thyristors dont l'amorçage est commandé et le désamorçage est naturel ou forcé.

Dans notre cas d'étude, on utilise un petit moteur à courant continu de petite puissance et à flux constant; ainsi le montage monophasé s'impose et est le plus souvent utilisé.

I.1.3 Circuits de commande : Pour leur étude, trois (03) paramètres doivent être considérés. ce sont :

- les caractéristiques des gâchettes des thyristors
- le mode de fonctionnement du convertisseur.
- le type d'asservissement du système.

En plus des deux fonctions fondamentales (dephasage et amplitude), les circuits de commande doivent assurer bien souvent d'autres fonctions comme; la limitation de dephasage, suppression des impulsions, séquences de distribution particulières.

a) Réglage de la position des impulsions de commande (dephasage)

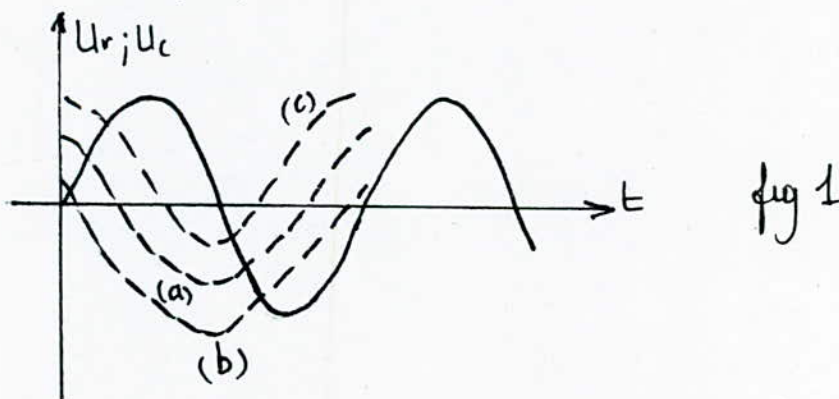
Dans les montages à thyristors, il est nécessaire de faire varier la position de l'impulsion pour régler la tension ou le courant. La référence de position ce sera la tension anode-cathode dans le convertisseur alternatif-continu, où le réglage de la position des impulsions est du type "Arc-cosinus".

Commande verticale Arc-Cosinus (fig 1) le dephasage "Arc-cosinus" est obtenu, par la superposition de deux tensions, la première U_r est cosinusoidale, la seconde U_c . ce qui donne une fonction de transfert de la forme:

$\alpha = \text{Arc cos}\left(\frac{U_c}{U_{cm}}\right)$. sur la figure 1 on distingue les trois cas:

(a) $U_c = 0$; $\alpha = 90^\circ$ (b) $U_c < 0$; $\alpha \rightarrow 0$

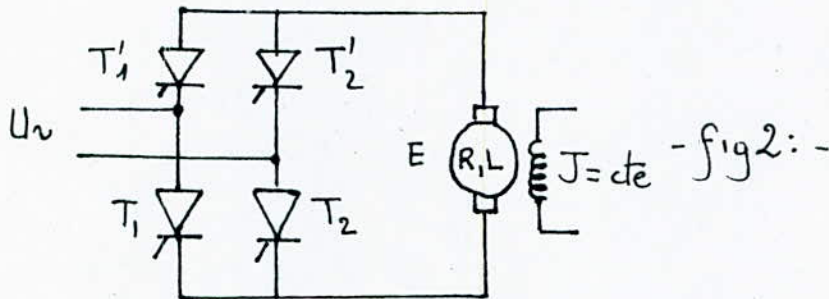
(c) $U_c > 0$; $\alpha \rightarrow 180^\circ$



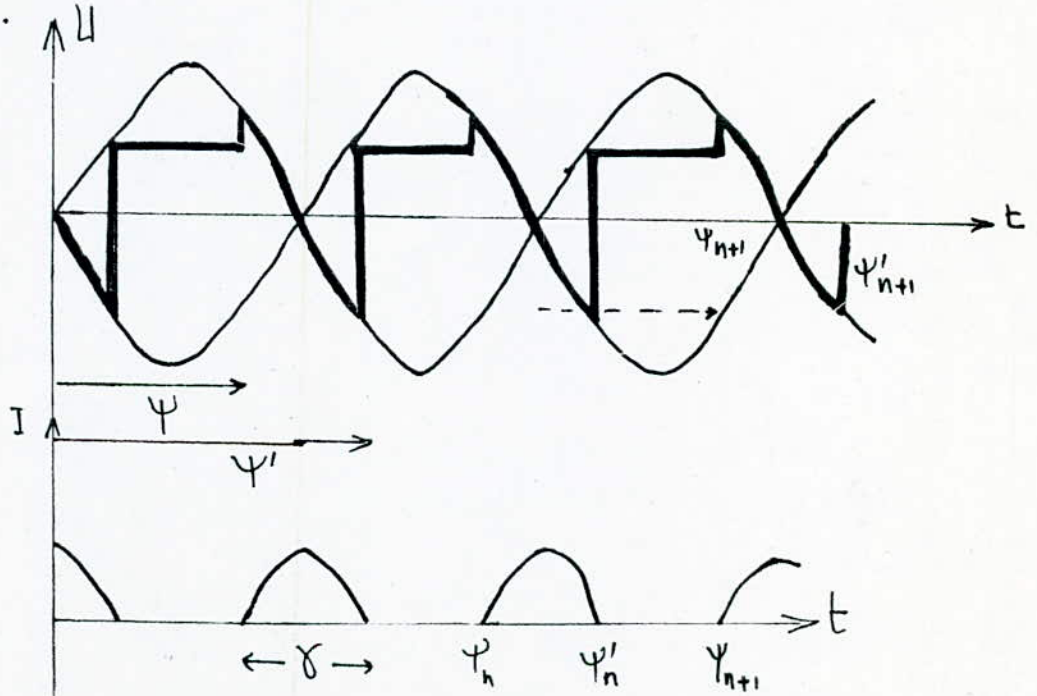
b) Durée des impulsions des gâchettes: Dans un montage à thyristors, la séquence de fonctionnement ou la nature de la charge impose très souvent l'emploi d'impulsions de commande d'une durée, très largement supérieure à celle nécessaire pour un thyristor seul.

I.1.4) Principe de fonctionnement du pont monophasé à thyristors.

Dans notre cas d'étude, nous utilisons les réponses en vitesse d'un moteur à courant continu, alimenté par un pont monophasé de thyristors en régime haché (discontinu). La commutation est naturelle. La variation de la vitesse se fait par variation de la tension d'induit. Le convertisseur de courant est constitué d'un pont monophasé totalement commandé (fig 2). Il représente deux branches avec deux thyristors en série. Il est nécessaire d'appliquer les impulsions d'amorçage chaque fois sur deux thyristors situés dans la diagonale du pont à savoir T_1 et T'_2 respectivement T_2 et T'_1 .



L'allure de la tension et du courant en régime discontinu est donnée par la fig 3.



- fig. 3 -

I-2 Modeles et simulations d'un régulateur numérique d'un moteur à courant continu

I.2.1 Régulation numérique de vitesse . a) Description du système

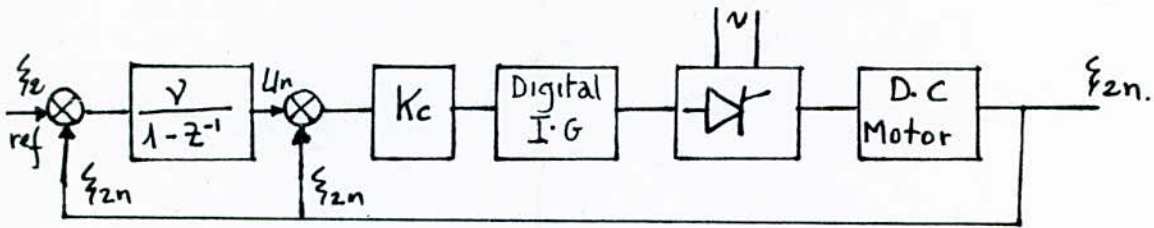


fig 1 : schéma fonctionnel du système

Equations du moteur : $\theta = \omega t$

$$L\omega \frac{di}{d\theta} + Ri + K\Omega = V_m \sin \theta \quad (1) \text{ équation électrique}$$

$$J\omega \frac{d\Omega}{d\theta} + f\Omega + \frac{T_c}{c} = K \cdot i \quad (2) \text{ équation mécanique}$$

Sous leurs formes réduites ces équations deviennent :

$$\Delta e \frac{d\xi_1}{d\theta} = -\xi_1 - \xi_2 + \sin \theta \quad (3).$$

$$\Delta m \frac{d\xi_2}{d\theta} = c \xi_1 - \xi_2 - c \xi_{1c} \quad (4)$$

avec les différentes variables définies en annexes.

Etant donné que la constante de temps mécanique est très grande devant la constante de temps électrique et est grande par rapport au délai entre deux instants d'amorçage et que dans l'équation mécanique nous supposons que le coefficient de frottement est petit. Alors la vitesse reste égale à $\xi_2(n)$. et le modèle mathématique se simplifie. L'intégration de l'équation (4) entre le $n^{\text{ème}}$ et le $(n+1)^{\text{ème}}$ angle d'amorçage, donne :

$$\xi_2(n+1) = \xi_2(n) + \frac{c}{\Delta m} \left[\int_{\psi_n}^{\psi_{n+1} + \pi} \xi_1 \cdot d\theta - \frac{1}{c} \xi_2(n) - \xi_{1c} (\pi - \psi_n - \psi_{n+1}) \right]. \quad (5)$$

L'intégration de l'équation (3), entre l'angle d'amorçage et l'angle d'extinction Ψ'_n , en tenant compte que $\xi_1(\Psi'_n) = \xi_1(\Psi_n) = 0$, donne l'intégrale du courant. soit :

$$\int_{\Psi_n}^{\Psi'_n} \xi_1 \cdot d\theta = \Psi_n \cdot \xi_2(n) + \cos \Psi_n - \Psi'_n \cdot \xi_2(n) - \cos \Psi'_n$$

en définissant : $g(\xi_2, \theta) = \theta \cdot \xi_2 + \cos \theta$; l'intégrale devient :

$$(6) : \int_{\Psi_n}^{\Psi'_n} \xi_1 \cdot d\theta = g(\xi_2(n); \Psi_n) - g(\xi_2(n); \Psi'_n)$$

L'équation (5) se met sous la forme :

$$\xi_2(n+1) = \xi_2(n) \cdot \left(1 + \frac{-\pi}{\Delta m} \right) + \frac{c}{\Delta m} \left[g(\xi_2(n); \Psi_n) - g(\xi_2(n); \Psi'_n) \right] - \frac{c}{\Delta m} \xi_1 \cdot (\Psi_{n+1} - \Psi_n + \pi) \quad (7)$$

La résolution de l'équation du courant (3), donne l'expression du courant $\xi_1(\theta)$, et l'angle d'extinction Ψ'_n est défini par : $\xi_1(\Psi'_n) = 0$; condition qui peut se mettre sous la forme : $F(\xi_2(n); \Psi'_n) = F(\xi_2(n); \Psi_n)$ (8)
 $F(\xi_2, \theta) = (\xi_2 - \cos \theta \cdot \sin(\theta - \phi)) \cdot e^{\theta/\Delta e}$; avec $\phi = \text{Arctg } \Delta e$.

b) regulateur P.I de vitesse et ces equations : les equations d'un regulateur numerique PI peuvent s'exprimer sous formes recurrentes comme suit :

$$U_n = U_{(n-1)} + v \left(\xi_{2ref} - \xi_{2n} \right) \quad (9)$$

$$\Psi_n = K_c \left(U_n - \xi_{2n} \right) \quad (10)$$

où U est la variable interne du regulateur et K_c et v sont les parametres correspondants.

Etant que le modele est mon lineaire (regime trache), le calcul des parametres K_c et v est alors difficile. Pour palier, nous linearisons le systeme autour d'un point de fonctionnement defini par :

$$\Psi_{n+1} = \Psi_n = \Psi_\infty ; \Psi'_{n+1} = \Psi'_n = \Psi'_\infty ; \xi_{2(n+1)} = \xi_{2n} = \xi_{2\infty}$$

L'équation (7) devient :

$$\delta \xi_2^{(n+1)} = \left(1 - \frac{\pi}{\Delta_m}\right) \delta \xi_2^{(n)} + \frac{c}{\Delta_m} \left[\frac{\partial g}{\partial \xi_2} \Big|_{\psi_\infty} \cdot \delta \xi_2 + \frac{\partial g}{\partial \psi_n} \Big|_{\psi_\infty} \cdot \delta \psi_n - \frac{\partial g}{\partial \xi_2} \Big|_{\psi'_\infty} \cdot \delta \xi_2 - \frac{\partial g}{\partial \psi'_n} \Big|_{\psi'_\infty} \cdot \delta \psi'_n \right] \quad (11)$$

où $\frac{\partial g}{\partial \xi_2} = 0$; $\frac{\partial g}{\partial \theta} = \xi_2 - \sin \theta = h(\xi_2, \theta)$. Pour le calcul de $\delta \psi'_n$ en

fonction de $\delta \xi_2$ et $\delta \psi_n$, nous utiliserons la condition (8) /

$$\frac{\partial F}{\partial \xi_2} \Big|_{\psi_\infty} \cdot \delta \xi_2^{(n)} + \frac{\partial F}{\partial \theta} \Big|_{\psi_\infty} \delta \psi_n = \frac{\partial F}{\partial \xi_2} \Big|_{\psi'_\infty} \cdot \delta \xi_2^{(n)} + \frac{\partial F}{\partial \theta} \Big|_{\psi'_\infty} \cdot \delta \psi'_n \quad \text{avec}$$

$$\frac{\partial F}{\partial \xi_2} = h(\xi_2, \theta) \cdot e^{\theta/\Delta e}$$

$$\delta \psi'_n = - \frac{\Delta e}{h(\xi_2; \psi'_\infty)} \cdot \left(1 - e^{-\gamma_\infty/\Delta e}\right) \cdot \delta \xi_2^{(n)} + \frac{h(\xi_2; \psi_\infty)}{h(\xi_2; \psi'_\infty)} e^{-\frac{\gamma_\infty}{\Delta e}} \cdot \delta \psi_n \quad (12)$$

Des équations (11) et (12) nous pouvons écrire le modèle du moteur

sous forme linéaire : $\delta \xi_2^{(n+1)} = A \cdot \delta \xi_2^{(n)} + B \delta \psi_n$ (13); avec

$$A = \left(1 - \frac{\pi}{\Delta_m}\right) + \frac{c}{\Delta_m} \left(\Delta e \cdot (1 - e^{-\gamma_\infty/\Delta e}) - \gamma_\infty\right) \quad \text{et}$$

$$B = \frac{c}{\Delta_m} \left(\xi_2 - \sin \psi_\infty\right) \cdot (1 - e^{-\gamma_\infty/\Delta e})$$

Les équations (9) et (10) du régulateur deviennent alors :

$$\begin{cases} \delta U_n = \delta U_{n-1} - \sqrt{B} \delta \xi_2^{(n)} & (14) \\ \delta \psi_n = K_c (\delta U_n - \delta \xi_2^{(n)}) & (15) \end{cases}$$

L'élimination de $\delta \psi_n$ des équations (13) et (15), et après une transformation en Z , donne l'équation caractéristique du système avec régulateur :

$$(16) \quad Z^2 - Z(1 - \sqrt{B}K_c + A - BK_c) + (A - BK_c) = 0; \quad \text{qu'on peut mettre sous la forme : } Z^2 - Z(Z_1 + Z_2) + Z_1 Z_2 = 0 \quad \text{avec}$$

$$(17) \quad A - BK_c = Z_1 Z_2 \quad \text{et} \quad (1 - \sqrt{B}K_c + A - BK_c) = Z_1 + Z_2 \quad (18)$$

$$\text{ce qui donne } K_c = (A - Z_1 Z_2) / B \quad (19) \quad \text{et } \sqrt{B} = (1 + Z_1 Z_2 - Z_1 - Z_2) / (A - Z_1 Z_2)$$

Ainsi les équations (19) et (20) donnent les paramètres du régulateur pour différents pôles choisis.

pendant par le tracé du Lieu d'EVANS et pour un fonctionnement optimum correspondant à l'argument 135° on peut déterminer les pôles correspondants aux valeurs de K_c fixées et en faisant varier le paramètre γ .

les valeurs de K_c choisies (ou les pôles choisis), seront telles que on aura trois types de fonctionnement : lent, rapide et plus rapide.

Résultats: les différents paramètres sont donnés par le tableau suivant:

vitesses (rd/s)	$157 \text{ rd/s}; \Psi_n = 128^\circ; \delta = 69^\circ$		
pôles (P)	$20 / 135^\circ$	$50 / 135^\circ$	$100 / 135^\circ$
K_c	-114,7	-238,7	-357,7
γ	0.14	0.35	0.66

La fig 2 représente la réponse du système à un échelon de vitesse de 10 tr/mn .

La fig 3 illustre le tracé du lieu d'evans pour ce type de régulation.

les programmes correspondants sont données en annexes.

le choix des paramètres (ou des pôles) est fait de manière à donner un dépassement admissible (inférieur à 5%) et un temps de réponse $t_r = \sqrt{2\pi}/P$ où P est le module du pôle dans le plan-P.

La courbe (a) donne un dépassement $D = 4\%$ et $t_r = \sqrt{2\pi}/20 = 0,1253 \text{ s}$

choix de la période d'échantillonnage T: nous étudions la réponse en vitesse, donc selon schannon T doit être inférieure ou égale à la moitié de celle du signal, mais comme on étudie aussi la réponse en courant: $T \leq \frac{T_{\text{réseau}}}{2} = 10,0 \text{ ms} \Rightarrow T = 0,01 \text{ s}$:

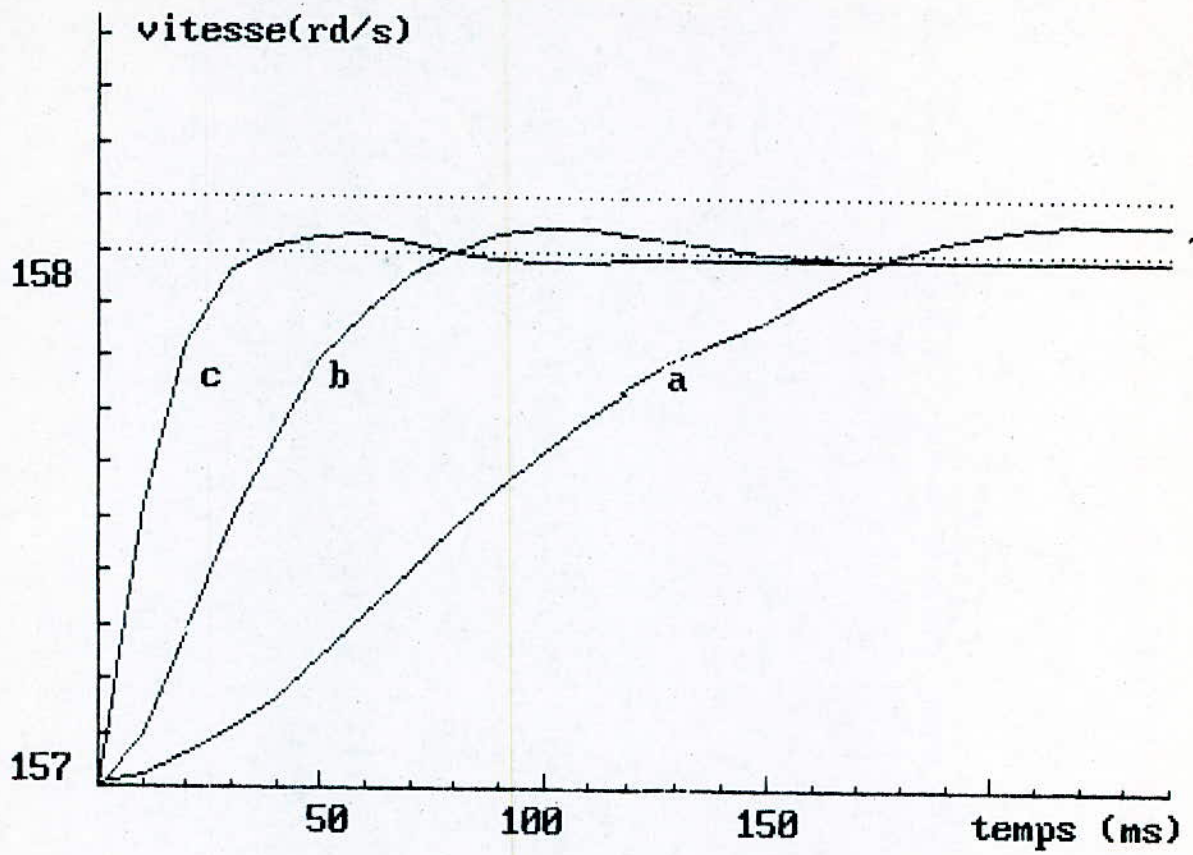


fig 2 Réponse à un échelon de vitesse 10 tr/mn
Régulation de vitesse

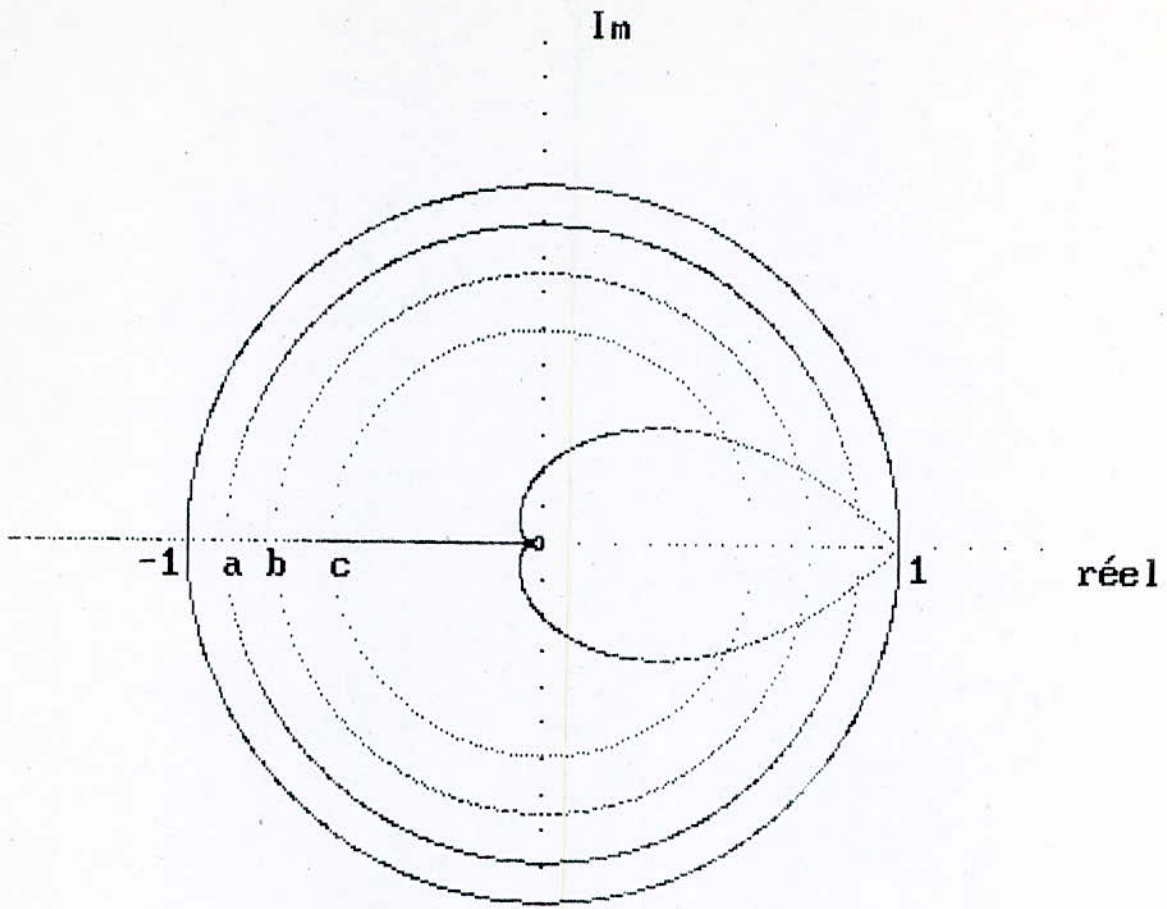


fig 3 traçé du lieu d'EVANS (lieu des racines)
Régulation synchrone de vitesse

I.2 Régulation numérique de vitesse avec boucle interne découplant.
moyen.

le schéma fonctionnel de la fig 4, représente le système complet de régulation en vitesse.

2.1 Equations utilisées en régime haché: on distingue trois modes (fig I.3.)

Mode 1: non conduction et $\int \alpha = 0$. $\theta_0 \leq \theta \leq \psi_n$.

$$T_w \frac{d\Omega}{d\theta} + \int \Omega + \Gamma_c = 0; \quad \alpha = \int \alpha = 0, \quad \Omega(\theta_0) = \Omega(n-1).$$

Mode 2: conduction. $\theta_n \leq \theta \leq \psi_n'$

$$L_w \frac{di}{d\theta} + Ri + K\Omega = V_m \sin \theta$$

$$T_w \frac{d\Omega}{d\theta} + \int \Omega + \Gamma_c = Ki; \quad \frac{d \int i}{d\theta} = i; \quad \alpha(\psi_n) = \int \alpha(\psi_n) = 0$$

$$\Omega(\psi_n^+) = \Omega(\psi_n^-).$$

Mode 3: non conduction et $\int \alpha \neq 0$; $\theta \in [\psi_n'; \theta_0 + \pi]$

identique au mode 1, à l'exception de: $\alpha = 0$

$$\int i(\theta) = \int i(\psi_n'); \quad \Omega(\psi_n^+) = \Omega(\psi_n'^-).$$

En passant aux variables réduites: on aura

$$\Delta e \cdot \frac{d\xi_1}{d\theta} = -\xi_1 - \xi_2 + \sin \theta \quad (1)$$

$$\Delta m \cdot \frac{d\xi_2}{d\theta} = c\xi_1 - \xi_2 - c\xi_{1c} \quad (2)$$

$$\frac{d\xi_3}{d\theta} = \xi_1 \quad (\text{intégrale du courant}).$$

La résolution de ce système d'équation (comme précédemment) aboutit à l'équation récurrente qui représente le modèle mathématique non linéaire de l'ensemble convertisseur-moteur. Dans une régulation numérique, un tel modèle sera aisément

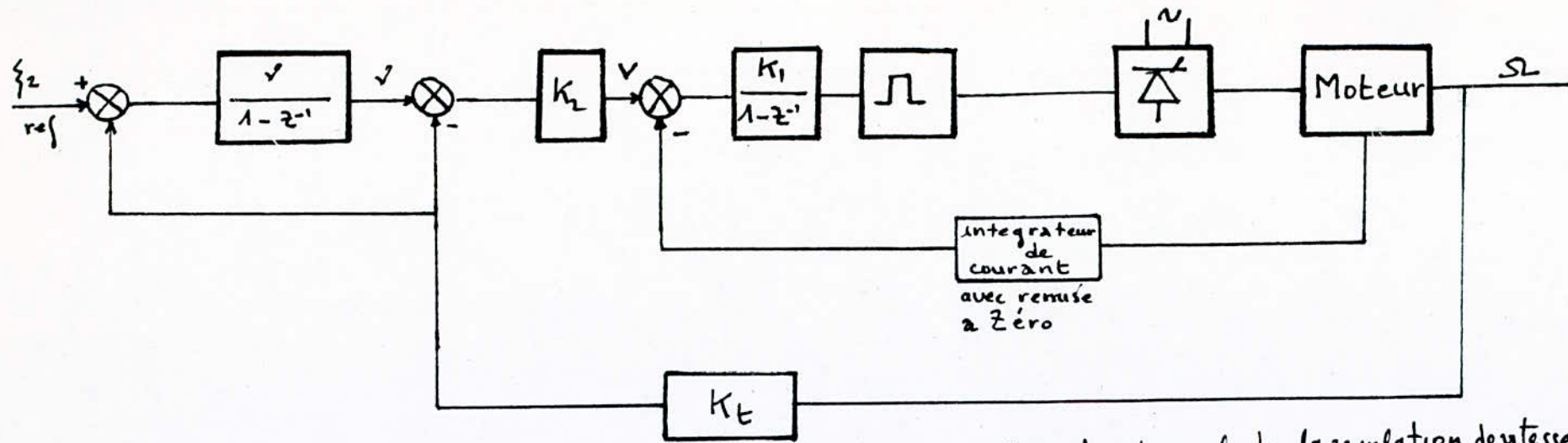


fig 4 . schéma fonctionnel de la regulation de vitesse synchrone.

manipulable à condition de l'étudier autour d'un point de fonctionnement. il devient alors linéaire pour des petites variations autour de ce point. et décrira ainsi le comportement dynamique du moteur.

2.2) équations du régulateur le même raisonnement que pour la régulation de vitesse, nous amène aux équations du régulateur de vitesse avec boucle interne du courant moyen.

l'étude autour d'un point de fonctionnement linéaire les équations du régulateur et deviennent :

$$\begin{cases} \delta U_n = \delta U(n-1) + v (\delta \xi_{2(n)} - \delta \xi_{2(n-1)}) \\ \delta V(n) = K_2 [\delta U(n) - \delta \xi_{2(n)}] \\ \delta \Psi_n = \delta \Psi(n-1) - K_1 [\delta V(n) - \delta \xi_{3(n)}] \end{cases} \quad (3)$$

les calculs étant faits pour une commande en temps réel par un micro-processeur, ils sont alors longs. pour palier à cet inconvénient, une représentation parabolique de f_i en fonction de Ψ_n a été envisagée à partir de la caractéristique. $f_i = f(\Psi_n)$. f_i est alors estimée par : $f_i = f_{i\infty} \cdot \left(\frac{\Psi - \Psi_L}{\Psi_\infty - \Psi_L} \right)^2$. où $f_{i\infty}$; Ψ_∞ ; Ψ_L sont respectivement, l'intégrale de courant, l'angle d'amorçage et l'angle correspondant à l'intersection de la f_{em} et de la tension du réseau, en régime permanent.

Ψ_L est défini par $K_2 \Omega = V_m \sin(\pi - \Psi_L) \approx V_m(\pi - \Psi_L)$.

L'équation caractéristique du système devient de 3^{ème} ordre et est égale à :

$$-z^3 + z^2(A + AK_1K_2(1+v) + (2 + K_1 \cdot C)) - z(2B + K_1BC - ADK_1 + AK_1K_2 + 1 + K_1C) + B + K_1(BC - AD) = 0$$

choix des paramètres du régulateur: l'équation caractéristique étant d'ordre 3, et étant donné que

le système est échantillonné, le choix d'un pôle nul est judicieux car il impose une réponse rapide et stable. ce choix donne.

$$K_1 = B/(AD - BC) \text{ . indépendant des pôles}$$

L'équation caractéristique devient alors de deuxième ordre, nous choisissons une paire de pôles conjugués. La relation entre z_1 et z_2 donne: $K_2 = (z_1 z_2 - B - 1 - K_1 C) / (AK_1)$.

$$v = \frac{z_1 + z_2 - B - 2 - K_1 C}{AK_1 K_2} - 1 \text{ . } z_i = e^{(T \cdot p_i)}$$

On peut fixer nos paramètres à partir du tracé du lieu d'EVANS pour le fonctionnement correspondant à l'argument 135° , on fixe le paramètre K_2 et on varie v jusqu'à ce que la courbe décrite (a, b, c) coupe la courbe correspondant à $\varphi = 135^\circ$.

en cette intersection, on fait le relevé du module du pôle p qui donne le fonctionnement du système.

de même manière que précédemment, on fait le choix de trois pôles donnant le fonctionnement lent, rapide et plus rapide.

la courbe (fig 5) donne la réponse du système en vitesse.

la fig. 5-a- donne le tracé du lieu d'evans.

la fig. 5 donne la réponse du système en vitesse et en courant

Résultat: Le tableau suivant donne les paramètres du régulateurs pour différents types de pôles.

Vitesse (tr/mn)	1500 tr/mn ; $\psi_m = 128^\circ$, $\delta_m = 69^\circ$		
pôles (P)	20 / 135°	50 / 135°	100 / 135°
K_1	9	9	9
K_2	12	21.5	28
v	0.14	0.3	0.45

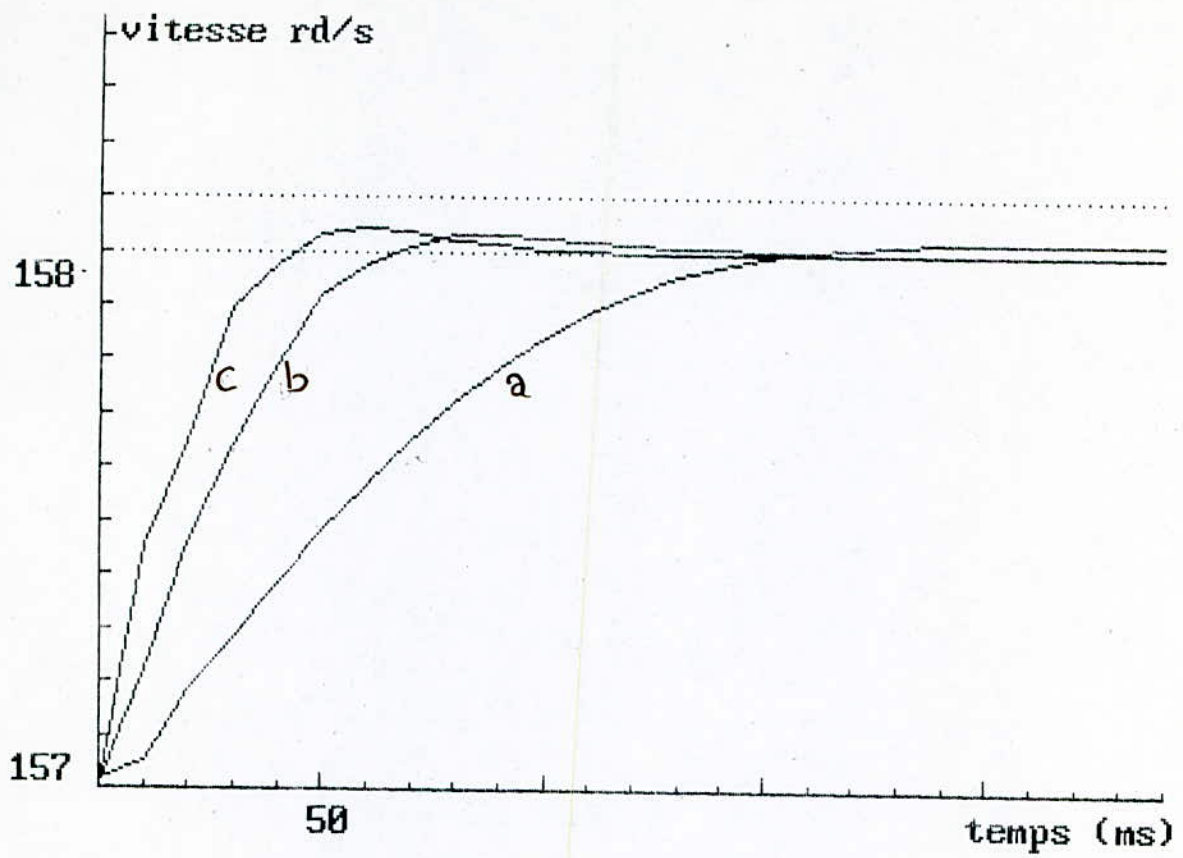


fig 5 - Réponse de la régulation synchrone de vitesse
(1500-1510 tr/mn)

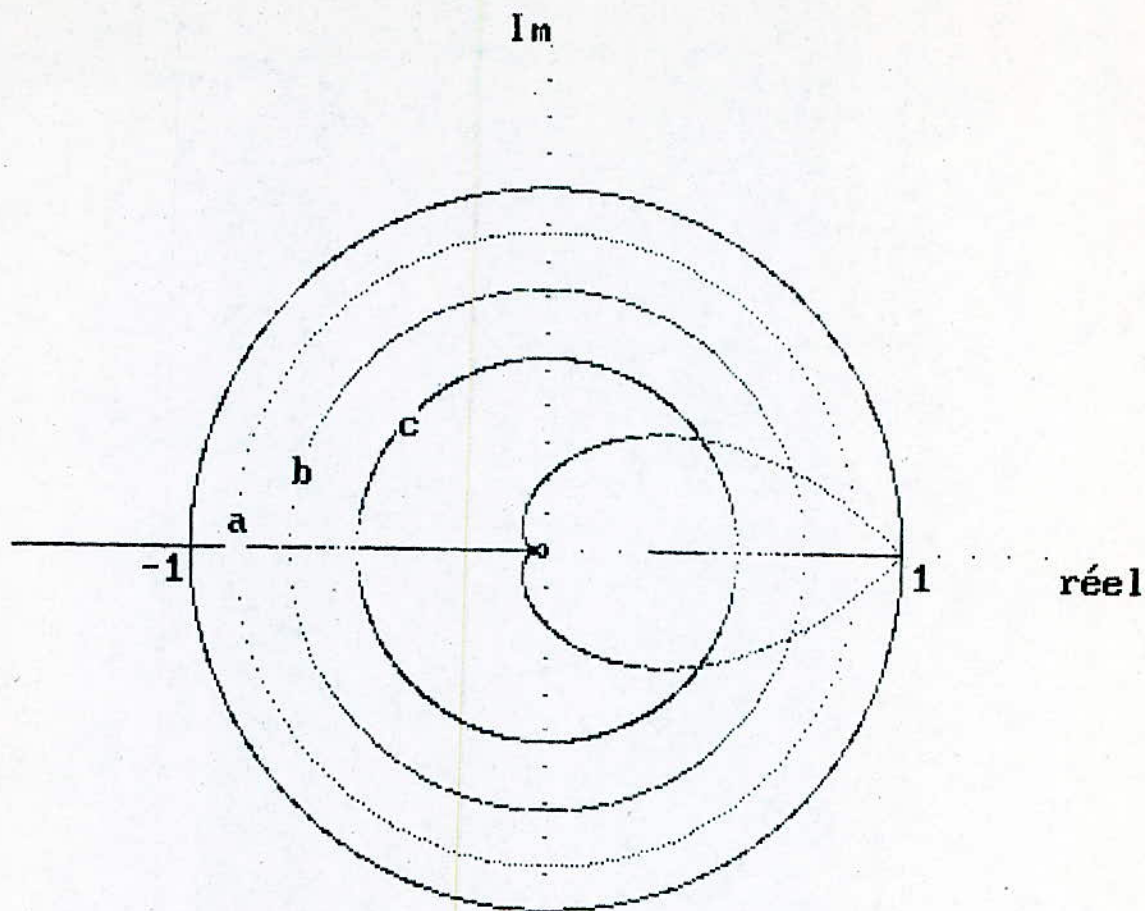


fig 6.a. traçé du lieu d'EVANS (lieu des racines)
 Régulation de vitesse avec boucle interne de courant.

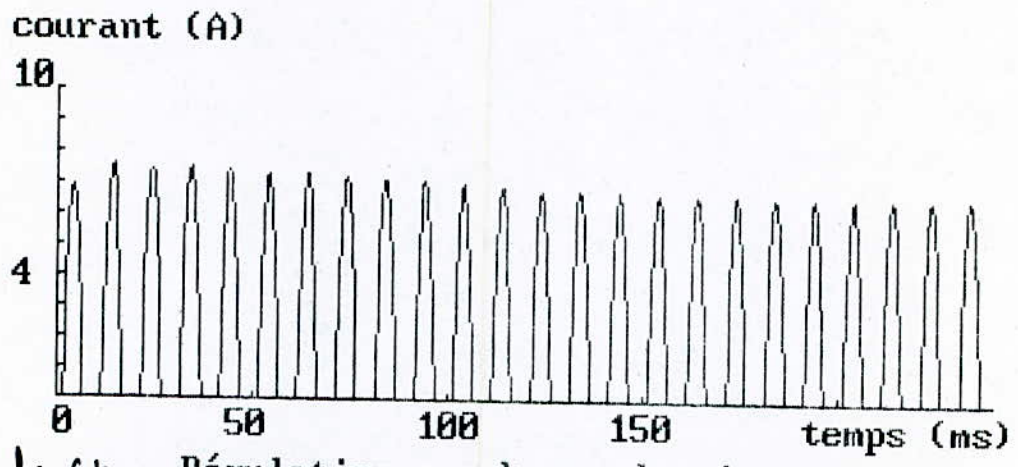
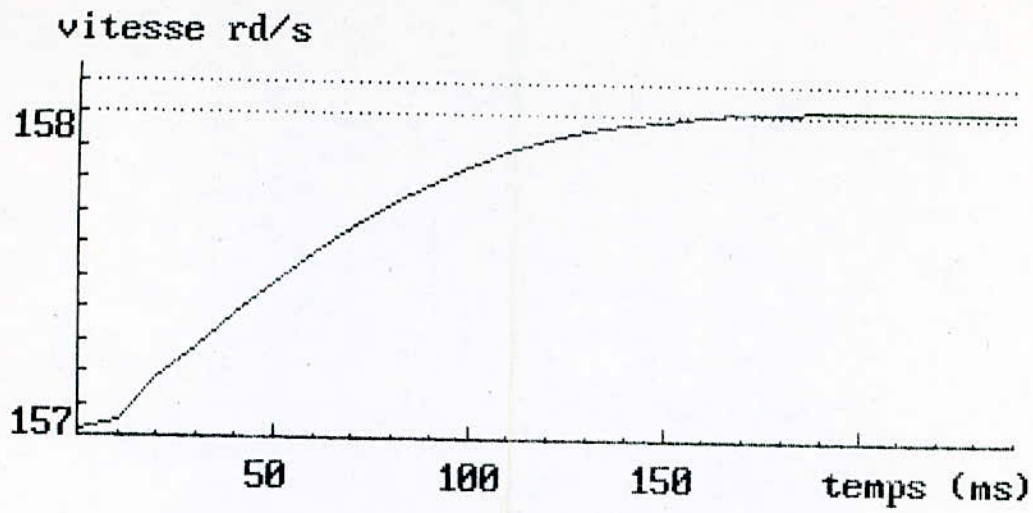


fig. 6b - Régulation synchrone de vitesse
 Reponse du systeme à un echelon de vitesse

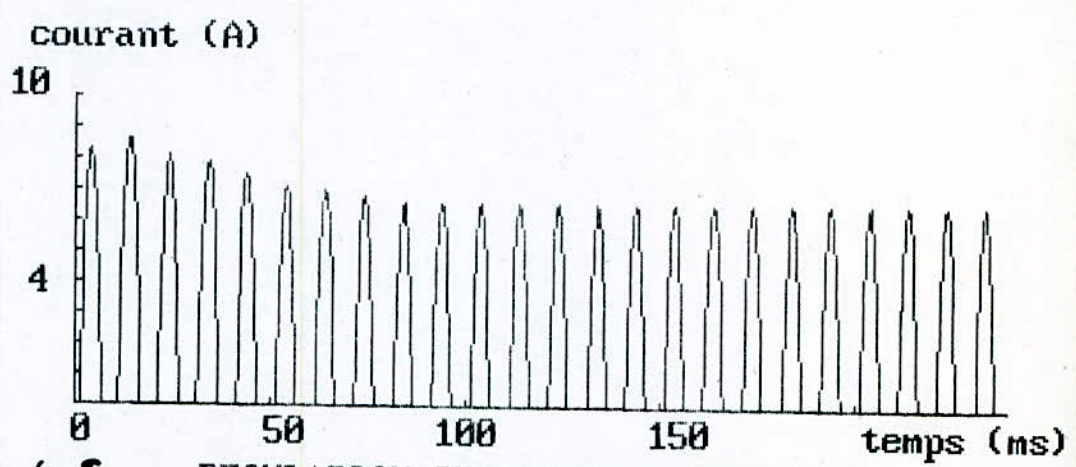
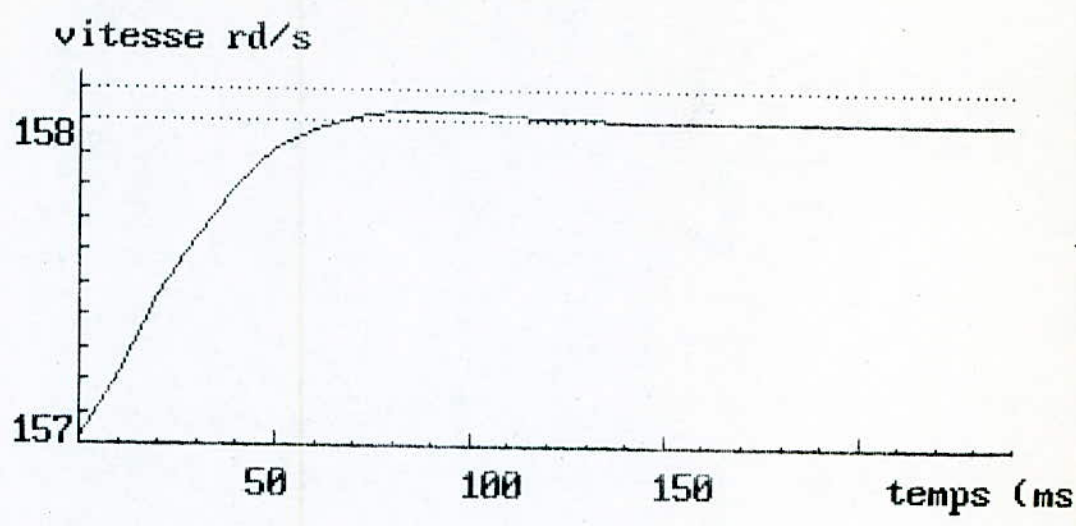


fig 6-5. REGULATION SYNCHRONNE DE VITESSE
 Reponse du systeme à un echelon de vitesse

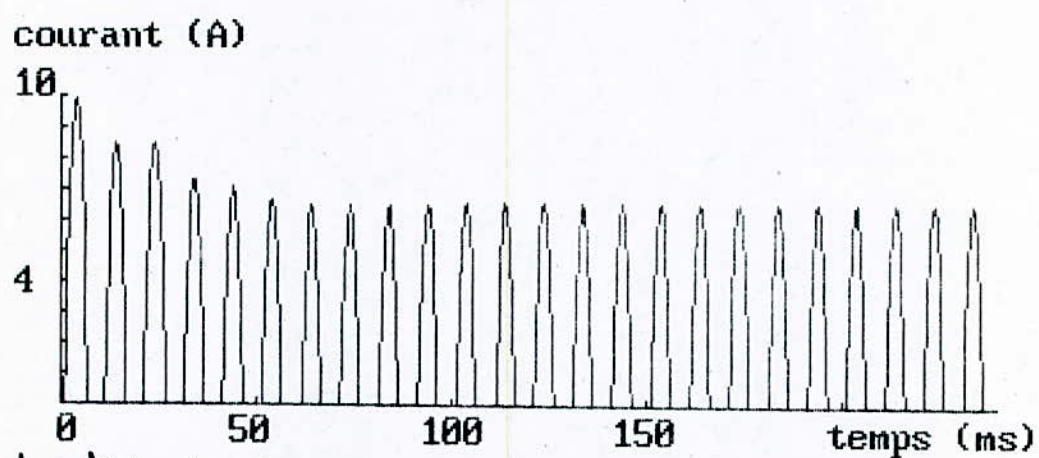
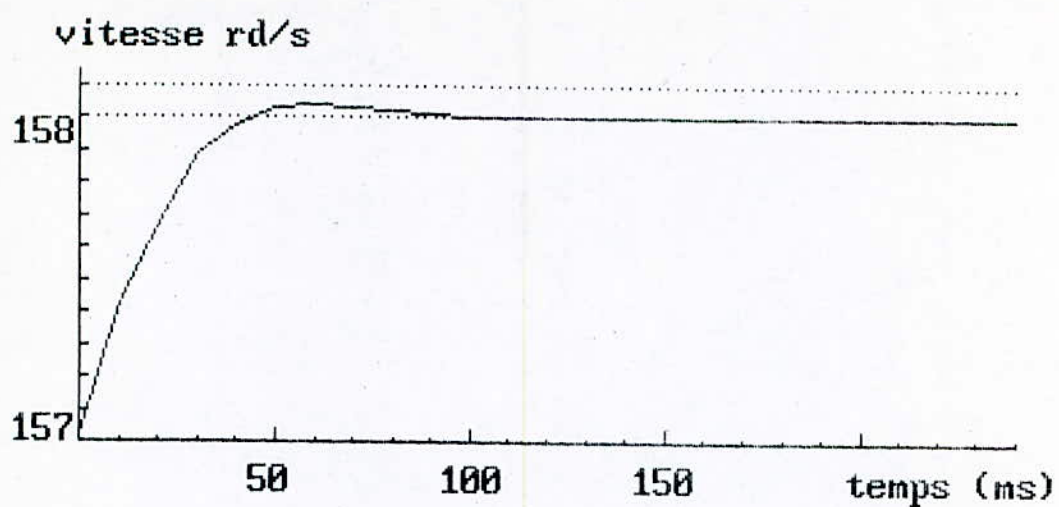


fig 6. Régulation synchrone de vitesse
 Reponse du systeme à un echelon de vitesse

I.3 Régulation de vitesse asynchrone. En réalité la détection du zéro de la tension réseau

n'est pas aussi facile qu'on le pense, pour palier on procède à une régulation de vitesse asynchrone.

Etant donné que l'évaluation de l'angle d'amorçage Ψ_n étant lié à la détection du zéro, elle sera faussée par les multiples passages à zéro occasionnés par le bruit dans une période du réseau. Le système est amené au point de fonctionnement en boucle ouverte. Lorsque le moteur atteint sa vitesse de référence, la stratégie de commande consiste à faire un relevé de la vitesse à un instant θ par le microprocesseur qui évaluera le délai α_n , d'après l'algorithme de calcul, pour obtenir le prochain amorçage tel que :

$$\Psi_{n+1} = \Psi_n + \alpha_n - \pi \quad (1).$$

En fait, il n'est pas nécessaire de synchroniser le régulateur aux passages à zéro de la tension d'alimentation, puisque le délai est indépendant du zéro de la tension (fig 7).

Pour obtenir une régulation simple et rentable, le système doit travailler en mode discontinu du courant. Les mesures de vitesse sont alors faiblement relevées aux instants d'allumage et le courant n'est pas une variable d'état, donc des équations du régulateur simplifiées.

a) Equations du moteur et du modèles: Les équations électriques et mécaniques du moteur sont

identiques que précédemment.

$$\Delta_m \frac{d\xi_2}{d\theta} = -c \xi_1(\theta) - \xi_2(\theta) - c \xi_{1c} \quad (2)$$

son intégration donne :

$$\xi_2(n+1) = \xi_2(n) + \frac{c}{\Delta_m} \xi_3(\Psi_n, \Psi'_n) - \frac{1}{\Delta_m} (\Psi_{n+1} + \pi - \Psi_n) \cdot (\xi_2(n) + c \xi_{1c})$$

on déduit un nouveau modèle linéarisé :

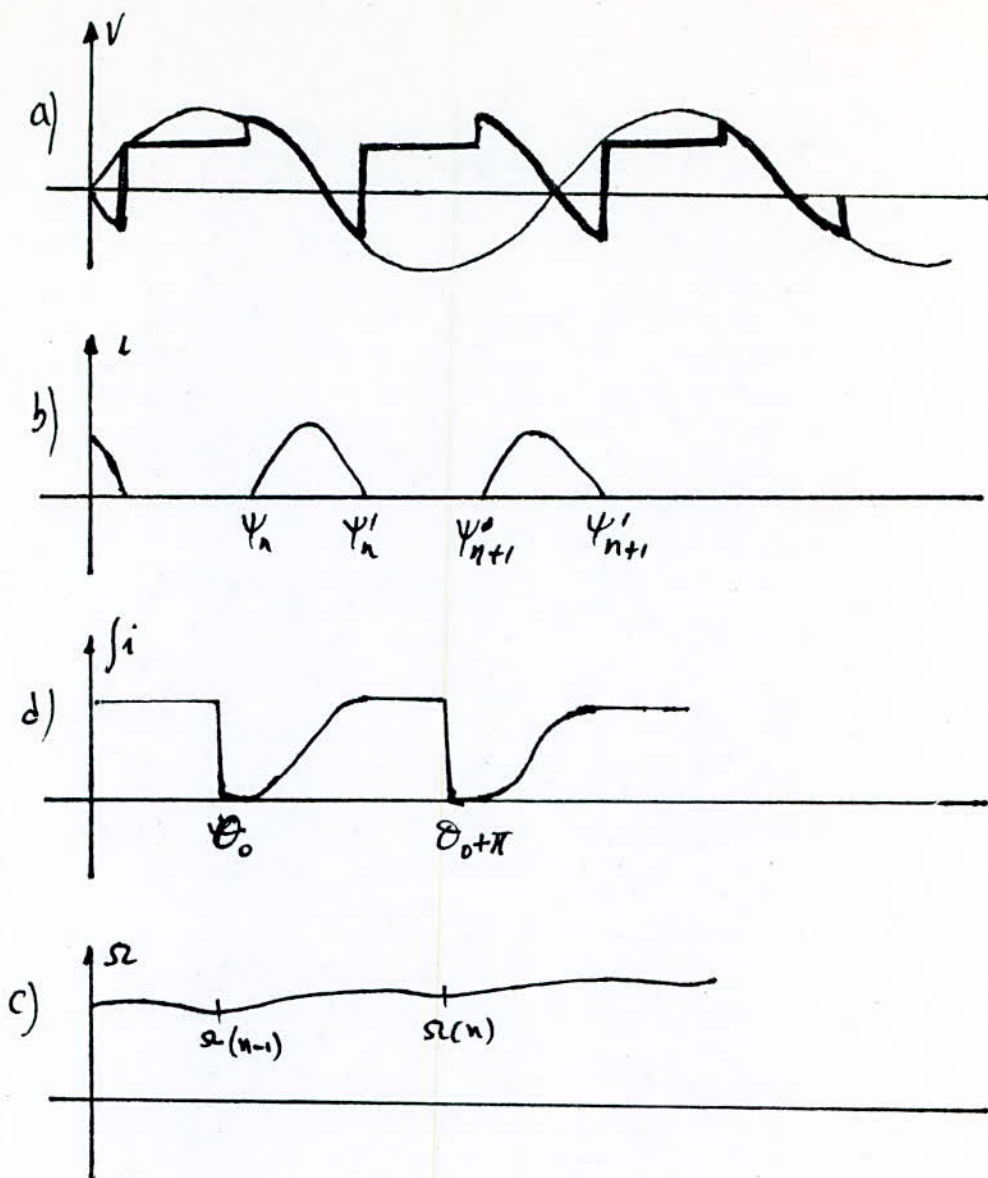


fig : 7 Représentation des signaux.

a) tension réseau, tension redressée

b) courant haché

c) vitesse

$\delta \xi_2(n+1) = -G_1 \delta \Psi_{n+1} + S_0 \delta \xi_2(n) + G_0 \delta \Psi_n$ avec S_0, G_0, G_1 définis en annexes.

en linearisons l'équation (1) : on obtient : $\delta \Psi_{n+1} = \delta \Psi_n + \delta \alpha_n$ (4)

b) loi de commande. au début du $n^{\text{ème}}$ cycle, à l'instant θ_n , un relevé de vitesse est opéré par le microprocesseur. ce dernier calcule l'angle α_n qui est traduit en un délai entre deux instants d'allumage successifs.

c) Equations du régulateur. Elles sont :

$$(5) \begin{cases} U_n = (\xi_2 \cdot \text{ref} - \xi_2(n)) - K_3 U_{n-1} \\ V_n = U_n + K_2 (\xi_2 \cdot \text{ref} - \xi_2(n)) \\ \alpha_n = \pi - K_1 (V_n - U_{n-1}) \end{cases}$$

Pour des petites variations autour du point de fonctionnement les equations deviennent :

$$(6) \begin{cases} \delta U_n = -\delta \xi_2(n) - K_3 \delta U_{n-1} \\ \delta V_n = \delta U_n - K_2 \delta \xi_2(n) \\ \delta \alpha_n(n) = -K_1 \delta V_n + K_1 \delta U_{n-1} \end{cases}$$

les systemes d'equations (5), (6) et l'équation 4, donnent le modele lineaire pour une boucle (externe) fermée de vitesse. Pour etudier la dynamique du systeme, l'équation caracteristique est nécessaire.

$$(z - S_0)(z - 1)(z + K_3)z + z(G_1 z - G_0)[(1 + K_2)z + K_2 K_3 - 1] \cdot K_1 = 0 \quad (7)$$

La réponse dynamique en vitesse aux petites perturbations est liée au systeme des pôles, qui à leur tour fixent les paramètres du régulateur l'identification de l'équation (7) par :

$$z^3 - z^2(z_1 + z_2 + z_3) + z(z_1 z_2 + z_2 z_3 + z_1 z_3) + z^0(-z_1 z_2 z_3) = 0 \text{ . donne}$$

$$1 + S_0 - (z_1 + z_2 + z_3) = K_3 + G_1 K_1 (1 + K_2) ; z_1 z_2 z_3 = -S_0 K_3$$

$$S_0 - (z_1 z_2 + z_2 z_3 + z_1 z_3) = (1 + S_0) K_3 + G_0 K_1 (1 + K_2) - G_1 K_1 (K_2 K_3 - 1)$$

$$z_1 z_2 z_3 = -S_0 K_3.$$

On définit alors le vecteur: $(\rho \quad p \quad \sigma)^T = (K_3 \quad K_1(1+K_2) \quad K_1(K_2 K_3 - 1))^T$

$$\begin{pmatrix} \rho \\ p \\ \sigma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & G_1 & 0 \\ 1+S_0 & G_0 & -G_1 \\ -S_0 & 0 & G_0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 1+S_0 - (z_1+z_2+z_3) \\ S_0 - (z_1 z_2 + z_1 z_3 + z_2 z_3) \\ z_1 z_2 z_3 \end{pmatrix}$$

on détermine les coefficients du régulateur asynchrone /

$$K_1 = \frac{\rho p - \sigma}{1 + \rho} ; K_2 = \frac{p + \sigma}{\rho p - \sigma} ; K_3 = \rho.$$

De même manière que pour les régulateurs précédents on déduit par exemple les coefficients du régulateur pour $P = 20/135$ soit dans le plan z ; $z = 0.868 \angle 8^\circ$. ($z = e^{T \cdot P}$; / $T = 0.01s$)

sur la figure (8) . La courbe (a) correspond à $K_1 = 30$; $K_2 = 0.65$
et $K_3 = 0.1$

La courbe (b) correspond à $K_1 = 18$; $K_2 = 0.23$
 $K_3 = 0.15$

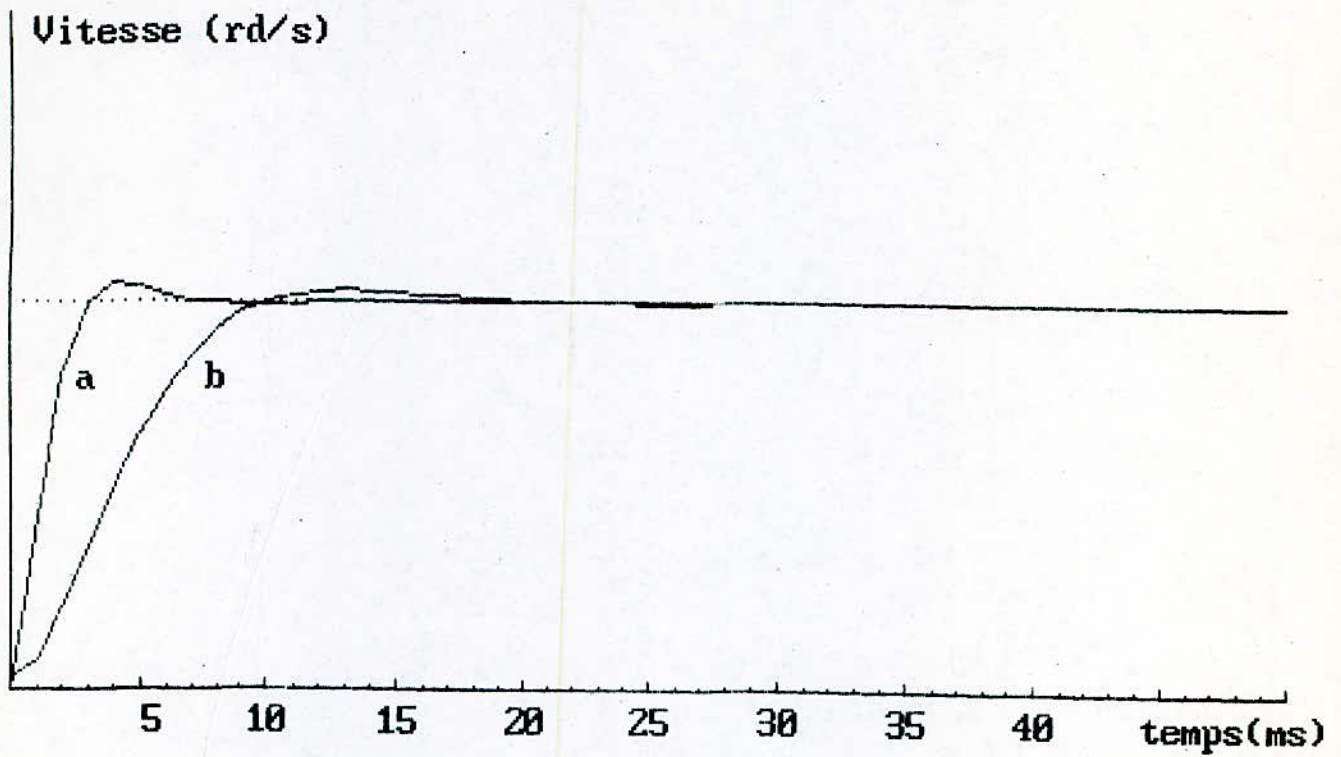


fig 8

Réponse en vitesse du système
pour un échelon de 10 tr/mn
Régulation asynchrone de vitesse

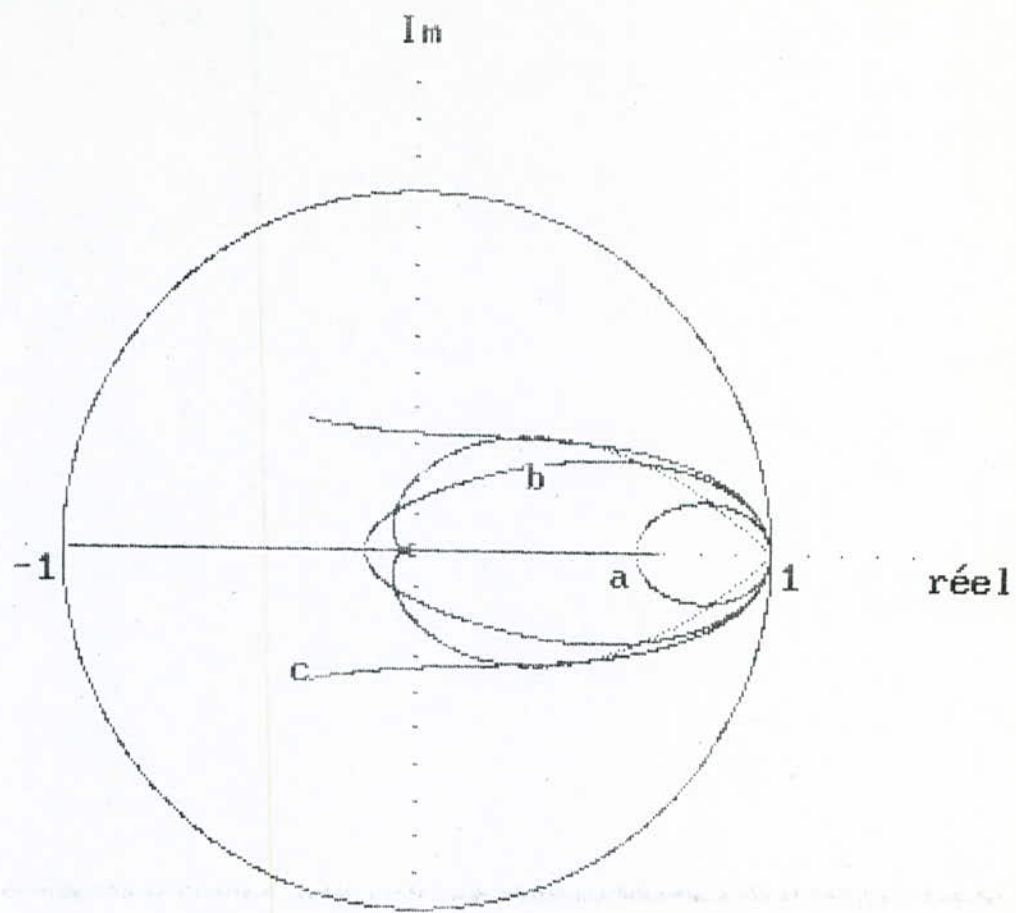


fig 9 lieu d'EVANS (lieu des racines)
Régulation asynchrone de vitesse

ORGANIGRAMME DE SIMULATION :

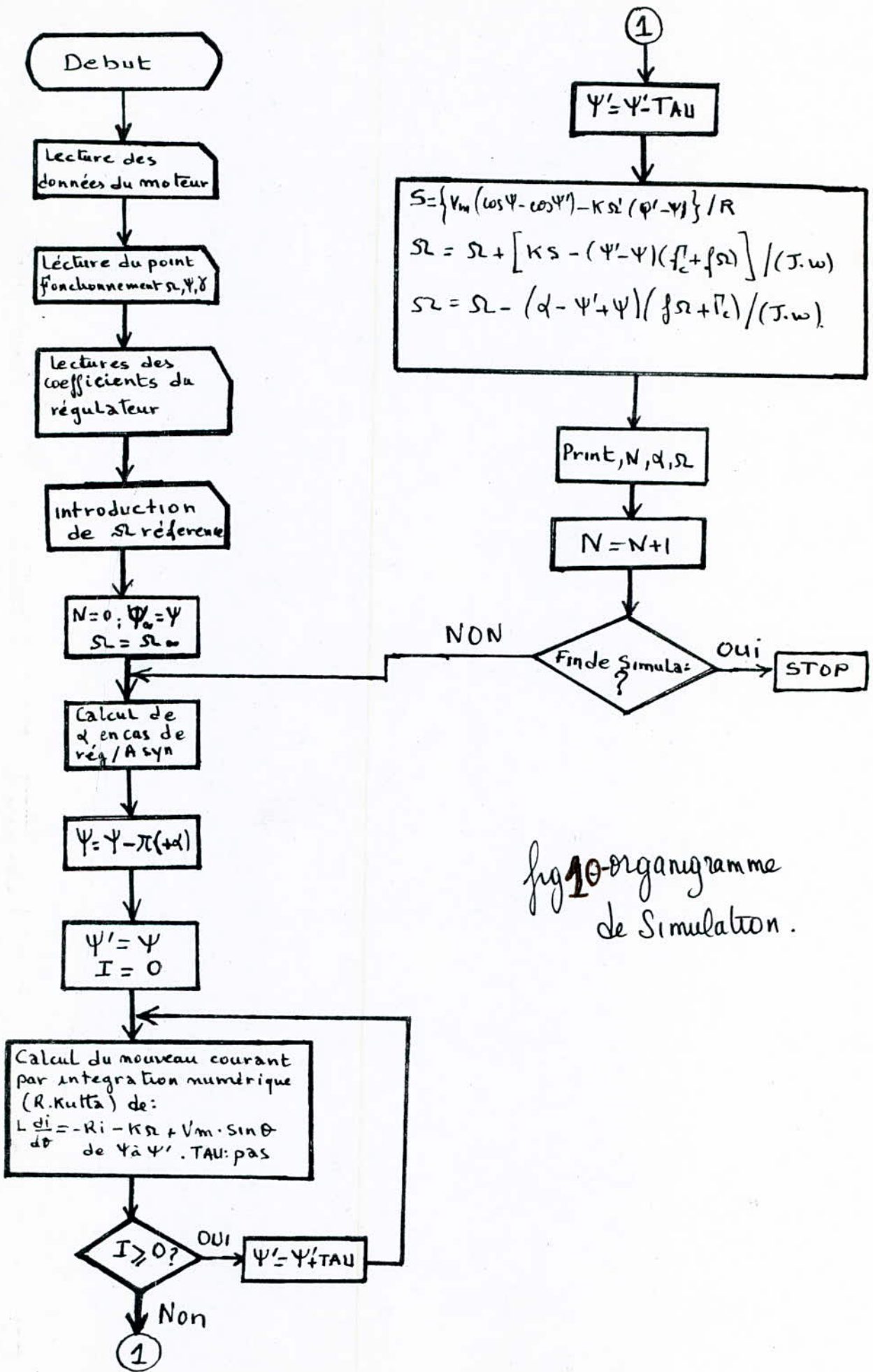


fig 10-organigramme de Simulation.

I3) CONCLUSION

Ce qu'on peut dire sur ces différentes régulations, c'est que la première est de type simple (régulation de vitesse seulement) et qu'elle devient inefficace une fois que le courant atteint des valeurs suffisamment supérieures à la valeur nominale, lors des régimes transitoires. Alors que la deuxième est plus générale et est pourvue d'un limiteur de courant. car la boucle interne de courant a pour rôle de limiter le courant. cependant elle suppose que la détection du zéro de la tension réseau est facile, ce qui n'est pas le cas en pratique en raison des perturbations et des harmoniques d'ordre supérieur. On procède alors à une régulation asynchrone qui est indépendante du passage par zéro.

CHAP II ETUDE DE LA COMMANDE NUMERIQUE

II.1) Presentation de la carte de commande:

La carte de commande possède une unité centrale de calcul et de gestion, qui est le MC 68701. celui-ci est relié à:

1.1) Une entrée de référence: C'est la vitesse de référence. Elle est envoyée par un PIA d'un kit 6800, sur des octets Latches 81LS97. Lorsque ces derniers sont sélectionnés par le MC 68701, ils laissent passer la référence qui est lue par le microordinateur.

1.2) Une entrée mesure Un convertisseur A/D: HS 574K. envoie sur le bus de données, la

vitesse mesurée. Elle est convertie d'abord par la génératrice tachymétrique en tension, qui est élevée pour l'entrée du convertisseur A/D, elle est alors réduite par un diviseur de tension dont l'impédance n'est pas compatible avec celle d'entrée du convertisseur. nous interposerons alors un amplificateur opérationnel branché en suiveur. L'entrée est convertie en un mot de 12 bits lorsque la ligne d'adresse A_0 est à zéro. les 8 bits des poids forts sont acheminés par le bus de données. Lorsque A_0 passe à 1, les 4 bits restants suivis de 4 zéros forment l'octet à charger dans le bus.

1.3) Un montage de programmation du mots: formé par des switches auxquels sont reliés les pattes P20, P21, P22, lorsqu'elles sont libérées par un multiplexeur

1.4) Une entrée horloge: le MC 68701 divise la fréquence d'entrée par 4. Pour avoir un cycle machine d'1 μ s, nous choisissons une horloge de 4 MHz

1.5) Un signal de synchronisation: Il est multiplexé avec P20. son apparition dans

le Timer provoque l'enregistrement de la valeur contenue dans le compteur dans le registre FRC. ce signal est délivré par le transformateur 220V/9V, redressé, puis envoyé sur l'entrée d'un comparateur.

1.6) Un Timer: Il intervient lors d'une commande entièrement numérique. Il adapte l'information en sortie d'un codeur, en données exploitables par le microordinateur. Une adaptation et une inversion de tension sont à réaliser.

1.7) Un decodeur: Les lignes d'adresses A_{11} à A_{15} , sont ces entrées ainsi que A_0 et la ligne R/\bar{W} . Il est réalisé par des inverseurs, des ports OR en NAND.

1.8) une PROM rendant la carte de commande valable pour différentes applications.

1.9) le système de développement. Pour la mise au point des programmes, plusieurs matériels sont nécessaires, comme un émulateur, (Rem: on peut utiliser un émulateur du MC 6801, compatible avec le MC 68701) un exoriser équipé de plusieurs cartes mémoires, intercept module, MC 6800, un interface buffer équipé du MC 68704, une sonde. le reliant à la carte de commande.

les programmes sont stockés dans une mémoire RAM de l'émulateur. Ils peuvent être lus, corrigés sans contraintes sur les mémoires. La mémoire joue le rôle de l'EPROM du MC 68701. de la carte de commande finale. ces programmes initialement sauvegardés sur disquettes, un appel de l'émulation transfère le contenu de cette disquette dans la mémoire RAM.

II.2 Gestion du temps : Pour amener le moteur en régime établi, nous devons faire varier la vitesse, par conséquent la tension d'induit. Pour cela un générateur d'impulsion est implanté dans le MC 68701.

2.1) Générateur d'impulsions Le générateur fait appel à des variables logiques que nous allons définir :

2.1.1) Les variables : * PSI = instant d'amorçage évalué en multiple de la période d'horloge et codé en hexadecimal.

* $REFAN$: angle d'amorçage codé sur 12 bits (utilisé dans l'algorithme de calcul).

* $VMEs$: vitesse mesurée du moteur codée sur 12 bits ($VMEs = FFFF$ pour 1500tr/mn et $VMEs = \$FFF$ pour 3000tr/mn).

* $VREF$: vitesse de référence imposée par l'utilisateur

* $Thyr$: variable définissant la paire de thyristors à amorcer

* ICR : registre contenant l'instant de passage à zéro du signal de synchronisation.

* OCR : registre contenant l'angle d'amorçage.

2.1.2) Les fonctions : le principe d'un générateur d'impulsion regroupe les fonctions suivantes :

* Génération des signaux de synchronisation : Ils sont en nombre de trois dans le triphasé et un seul en monophasé.

Le signal a une période égale à celle de la tension du réseau. Un circuit analogique (fig 3) transforme cette dernière en un signal carré compatible avec l'entrée TTL P20 du port 2 du MC 68701. Cette dernière achemine le signal vers le registre de saisie de l'entrée ICA. Cette information servira d'instant de référence dans le temps

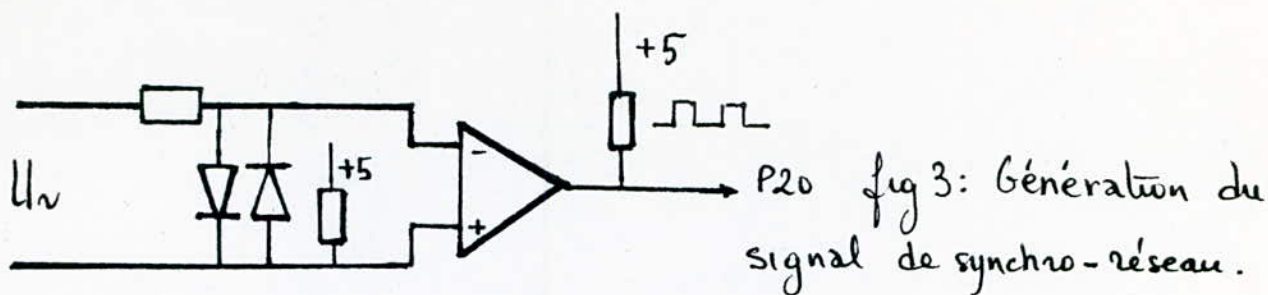


fig 3: Génération du signal de synchro-réseau.

* Génération de rampe : dans le cas du monophasé, une seule rampe suffit pour l'amorçage des paires de thyristors.

La rampe est générée par le compteur FRC du timer.

Son instant initial est stocké dans le registre ICR.

Elle est incrémentée à chaque période par le FRC.

* Génération d'angle de référence : Il est imposé par l'algorithme d'allumage. (amorçage)

Il est mesuré par rapport à l'instant de référence. Il est stocké

dans le registre de comparaison OCR. Lorsque la rampe atteint la valeur contenue dans OCR, une impulsion d'amorçage est envoyée sur le circuit des gâchettes de la paire de thyristors conservée à cet instant

2.1.3) L'algorithme d'allumage : Les variables et les fonctions étant définies, nous allons exposer l'algorithme d'allumage. Une phase d'initialisation des variables et des registres constituera la première partie du programme.

Ainsi tous les registres des ports P1, P2, P3, P4, les registres d'état du Timer (TC SR) de l'interface de communication série auront des valeurs qui leur seront affectées selon le mode de fonctionnement du MC 68701. Le mode qu'on utilise est le mode multiplexé (mode 2). Il offre la possibilité de sélectionner un grand espace mémoire externe.

La programmation du mode matériellement, le dispositif de la figure 3, programme le mode.

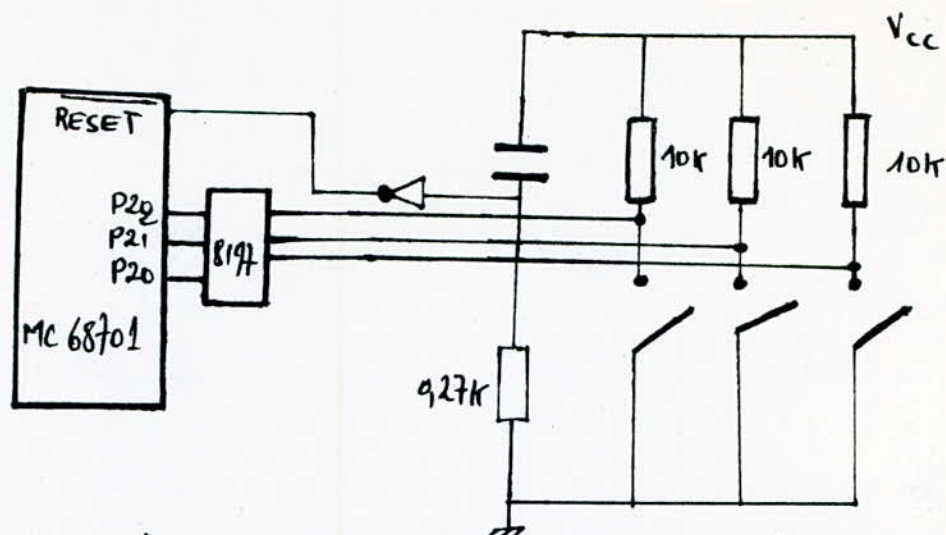


fig 3: Dispositif de programmation du mode.

La position des interrupteurs déterminera le mode. L'interrupteur en position OFF indiquera "un" logique, alors que la position ON indiquera "zéro" logique. Par exemple, pour programmer le mode 3, les switches reliés aux pattes P20 et P21 seront en position OFF et celui relié à la patte P22 sera en position ON.

Les registres et les ports: le mode étant programmé, une configuration des registres et des ports leur sont partiellement imposés. L'état des registres reste à déterminer pour exécuter l'algorithme d'allumage.

Le registre d'état du Timer: il sera programmé pour capter la transition positive du signal de synchronisation. le bit caractérisant la transition (IE0G) est alors mis à "1".

Lorsque la transition est présente, un signal d'interruption ($\overline{IRQ2}$) est généré par l'indicateur ICF (fig 4), validé par EIC3. Cette interruption branche le programme à un sous programme appelé "interruption synchro". ce dernier réinitialise le registre TCSR pour une transition inverse de la première et inhibe le bit de validation pour éviter une interruption parasite.

Le registre ICR du Timer contient l'instant initial de la rampe.

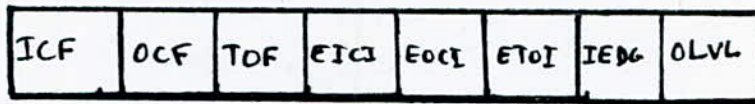


fig 4 : registre d'état du Timer.

Cette étape de l'algorithme détermine la paire de thyristors à allumer. un branchement à une sous-routine de démarrage permet la lecture de l'angle d'allumage de référence, la mesure de la vitesse. Le sous-programme de démarrage fera appel à un sous-programme d'identification lorsque la vitesse mesurée atteint la vitesse de référence.

Le registre de comparaison: Il stock la valeur de l'angle d'amorçage (ou allumage), lu dans le sous-programme de démarrage. Lorsque la valeur du compteur atteint celle contenue dans ce registre, l'indicateur OCF validé par EOCT provoque une interruption du programme principal qui se branchera au sous-programme d'allumage. ce dernier inhibe l'interruption par sécurité et génère une impulsion de largeur correspondant aux thyristors utilisés. cette impulsion est envoyée sur le bit P10 (ou P11) du drapeau par la variable Thyr.

L'algorithme de commande est composé de trois algorithmes.

III.1 Algorithme proportionnel-intégral de la vitesse

Cet algorithme nécessite la mesure de la vitesse et une lecture de la vitesse.

a) Mesure de la vitesse : Le capteur de vitesse est une génératrice tachymétrique (fig 1).

En aval de la génératrice, on dispose d'un convertisseur A/D (HS 504 K) de 12 bits et de temps de conversion de $25\mu s$.

compatible avec le microprocesseur. Une adaptation d'impédance et de tension est nécessaire pour connecter la sortie de la génératrice au convertisseur A/D (fig 2). Un montage de détection du zéro du courant (fig 3), nous permettra de relever la vitesse, lorsque seule la f.e.m est appliquée au moteur.

b) Référence vitesse : La vitesse de référence est envoyée par un un clavier d'un kit 6800 via son PIA, ou par une console reliée au port 2, entrée de la communication sérialisée.

c) L'algorithme proportionnel-intégral. Il utilise la technique du cumul pour sauvegarder l'écart de vitesse de référence - vitesse mesurée, à chaque pas d'intégration. Sachant que le coefficient proportionnel de l'algorithme est inférieur à un, il sera décomposé en une somme de puissances de deux négatives, la division de l'écart par ces nombres risque d'être nulle. d'où l'importance de la technique du cumul. Toutes les variables sont en double longueur.

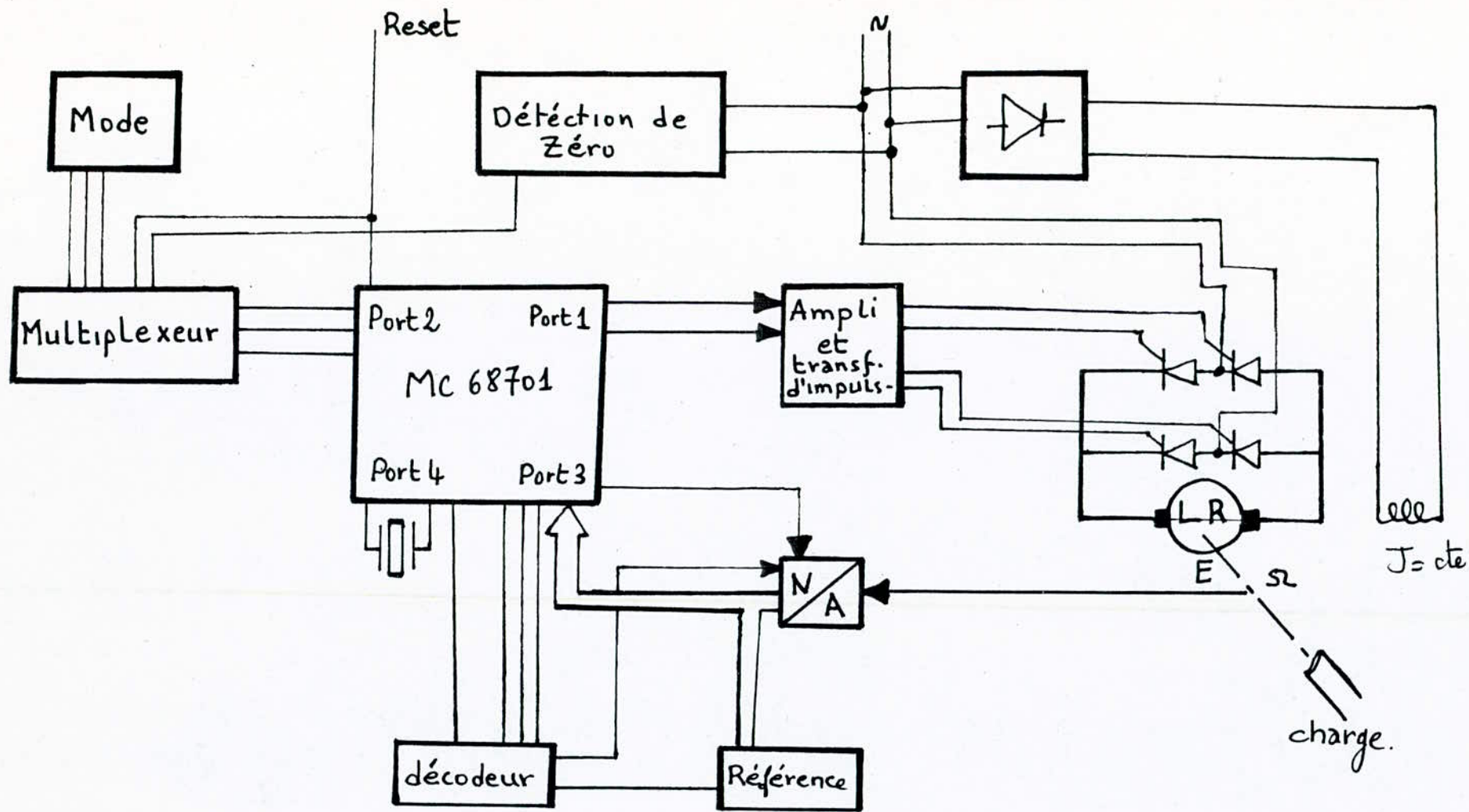


fig 1 : Carte de commande et dispositif du systeme.

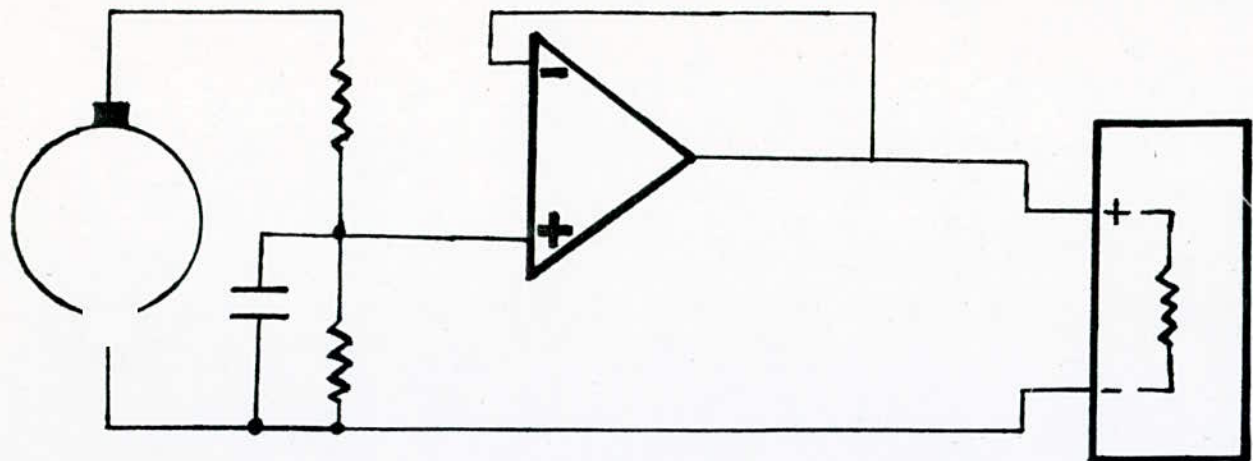


fig 2 : montage d'adaplation au
convertisseur HS 574 K (12 bits).

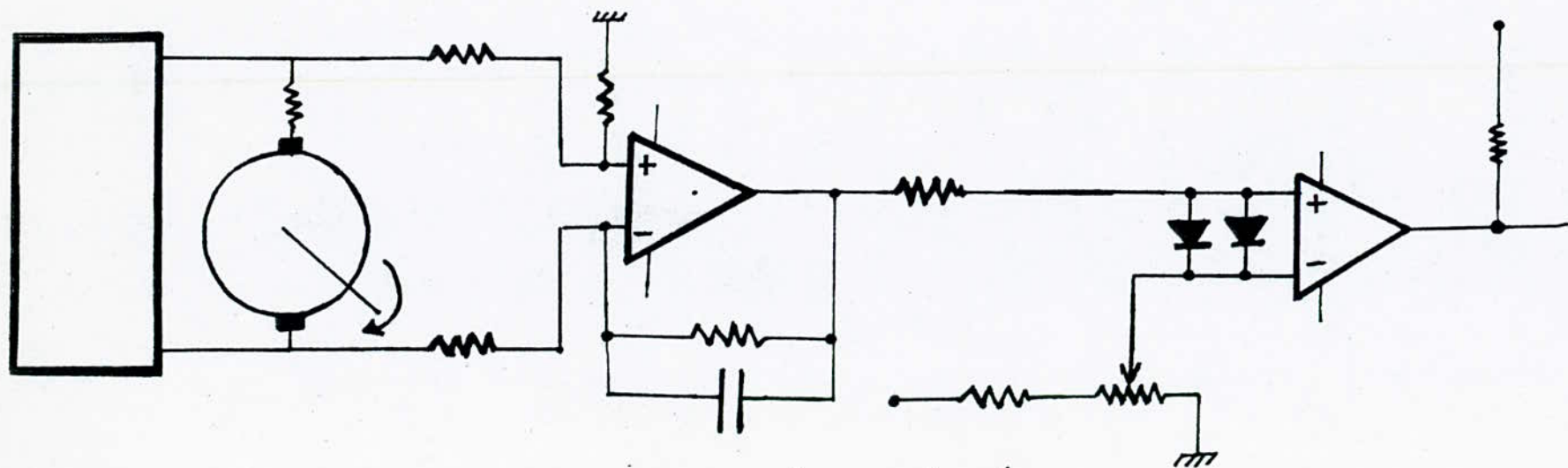


fig 3. Detection du courant nul.

chaque variable sera chargée dans deux mémoires consécutives par le registre D (concaténation des accumulateurs A et B) de 16 bits
 La variable interne $U(n)$ de l'équation (I.2.3) nommée INTEV, dans le programme est calculée, après une lecture de la vitesse et conversion de la vitesse. La figure 4 représente l'organigramme de cet algorithme :
$$INTEV = INTEV + A (VREF - VMES) \quad (1)$$

III.2 Algorithme proportionnel de l'intégrale du courant.

La valeur $V(n)$ de l'équation (I.2.3) sert de référence à l'intégrale du courant. on la notera I_{ref} :

$$I_{ref} = B (INTEV - VMES) \quad (2)$$

III.3 Algorithme proportionnel - intégral de l'angle d'allumage

Il fait appel aux variables des deux premiers algorithmes et à une nouvelle variable INTI qui est l'intégrale du courant i_i estimée :

i_i est évaluée à partir de l'équation (I.2.1).

$$i_i = I_{\infty} \cdot \left(\frac{\Psi - \Psi_L}{\Psi_{\infty} - \Psi_L} \right)^2 ; \Psi_L = \pi - \frac{K\Omega}{V_m} \quad (3)$$

on notera Ψ_L , $Refal$ et Ψ , $Refan$. $Refal = 7FF - C/VMES$ (3)'

La valeur 2π est codée sur 12 bits, ce qui explique la correspondance entre π et 7FF

L'intégrale du courant s'écrit : $INTI = D (Refal - Refan)^2 \quad (4)$

En conclusion l'angle d'allumage sera évalué par l'algorithme proportionnel-intégral : $Refan = Refan + E (INTI - I_{REF}) \quad (5)$

Remarque : 1) La variable $Refan$ a pour unité des radians alors que les

variables $INTI$ et $IREF$ ont des dimension de vitesse (rd/s). pour palier à cette disparité d'unités, nous avons introduit dans E un coefficient de transcodage. Sachant que $IREF$ et $INTI$ sont des petits nombres, E un nombre inférieur à un, ces variables pourraient s'annuler lorsqu'on les divise par les nombres entiers puissance 2 qui composent E ; aucune correction ne sera apportée à l'angle d'allumage.

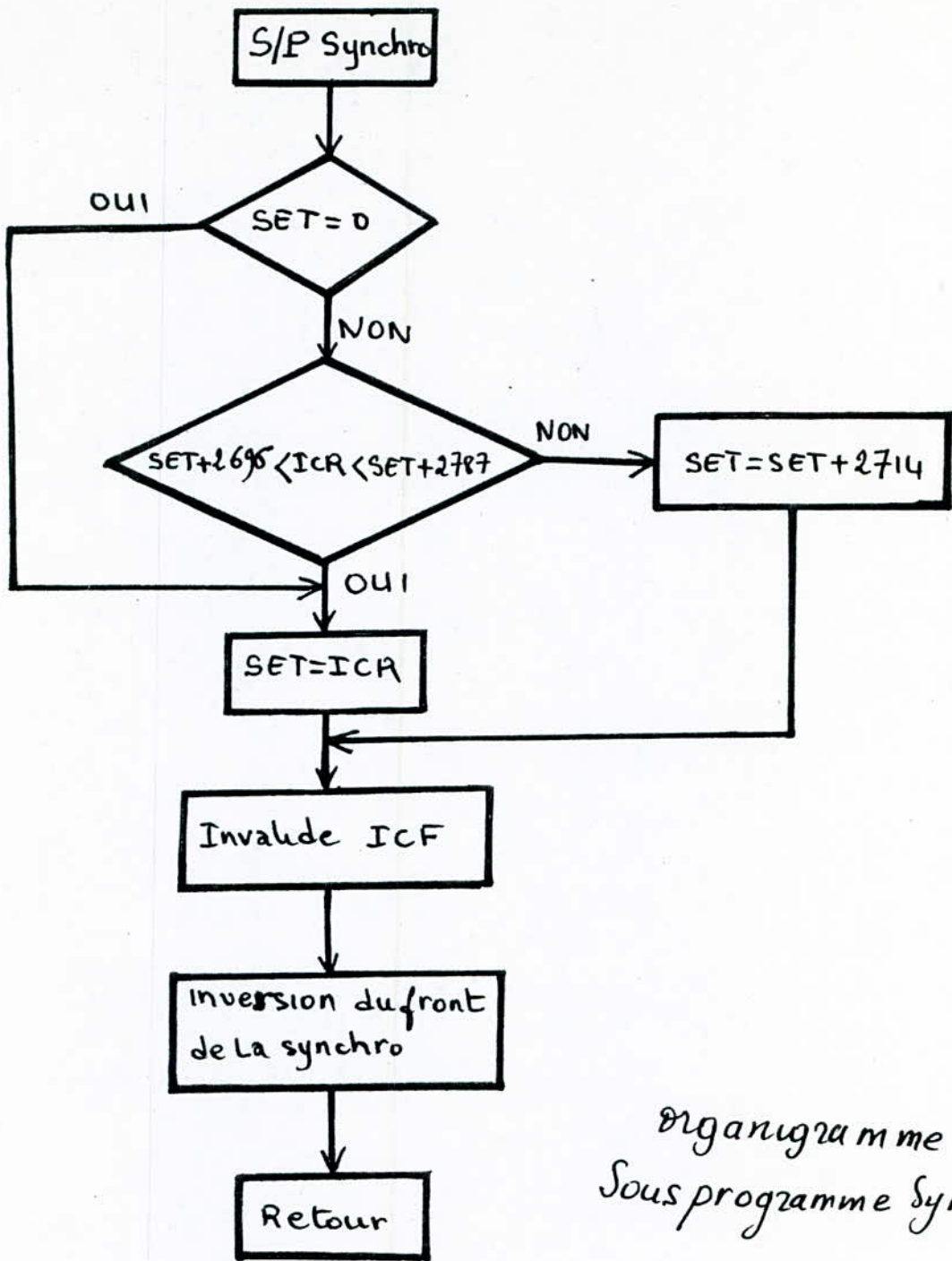
Afin d'éviter cet aléa, nous avons introduit le coefficient de transcodage qui est de l'ordre 50, dans les termes $INTI$ et $IREF$.

2) De même, nous utilisons la technique du cumul pour les équations (1) (5), pour éviter la disparition des écarts lors de leur division par les coefficients respectifs qui sont inférieurs à un.

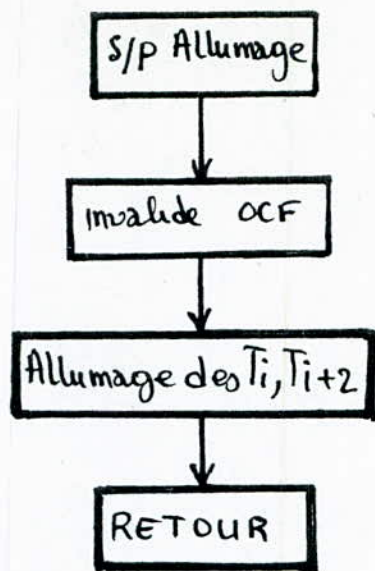
3) lorsqu'on transfère le coefficient de transcodage dans l'équation (4), $INTI$ peut atteindre de grandes valeurs. une saturation de $INTI$ est introduite dans le programme.

4) Dans l'équation (3)', un facteur d'échelle est introduit dans le coefficient C pour homogénéiser les deux membres.

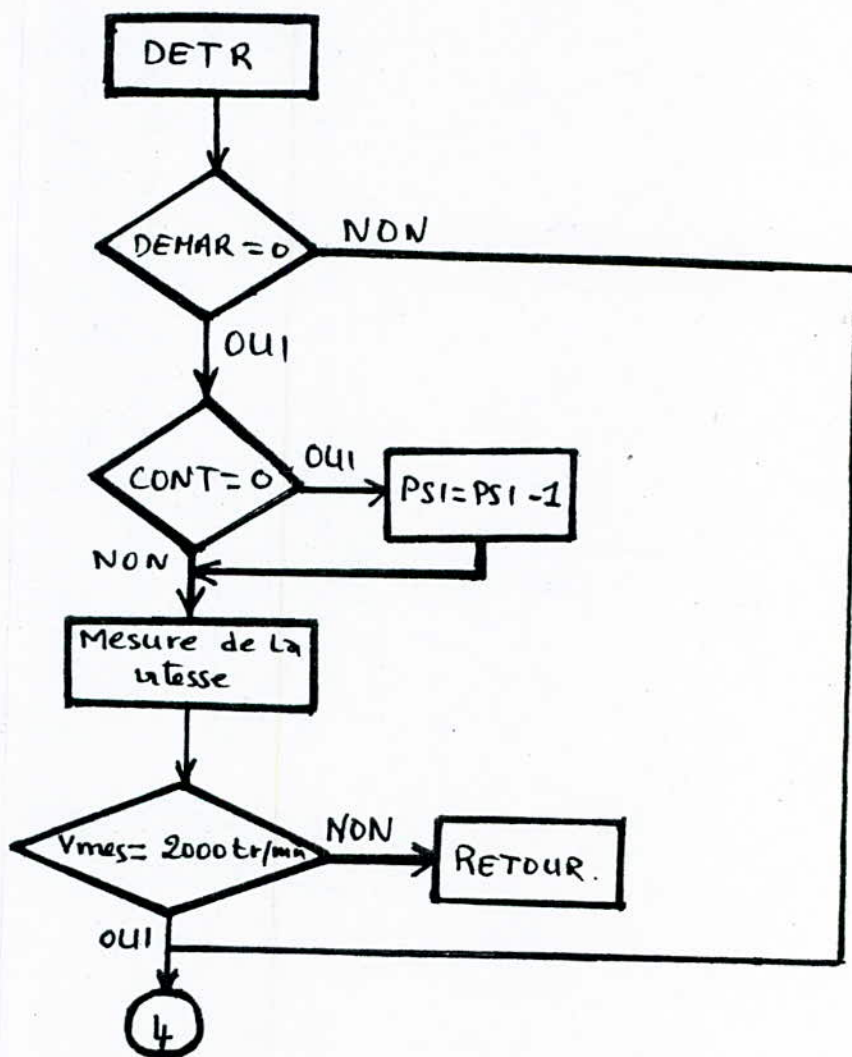
5) L'angle $REFAN$ est une variable codée sur 12 bits, il doit être converti en un multiple du cycle d'horloge. Un facteur d'échelle devra être multiplié par $REFAN$ pour donner l'instant d'allumage.

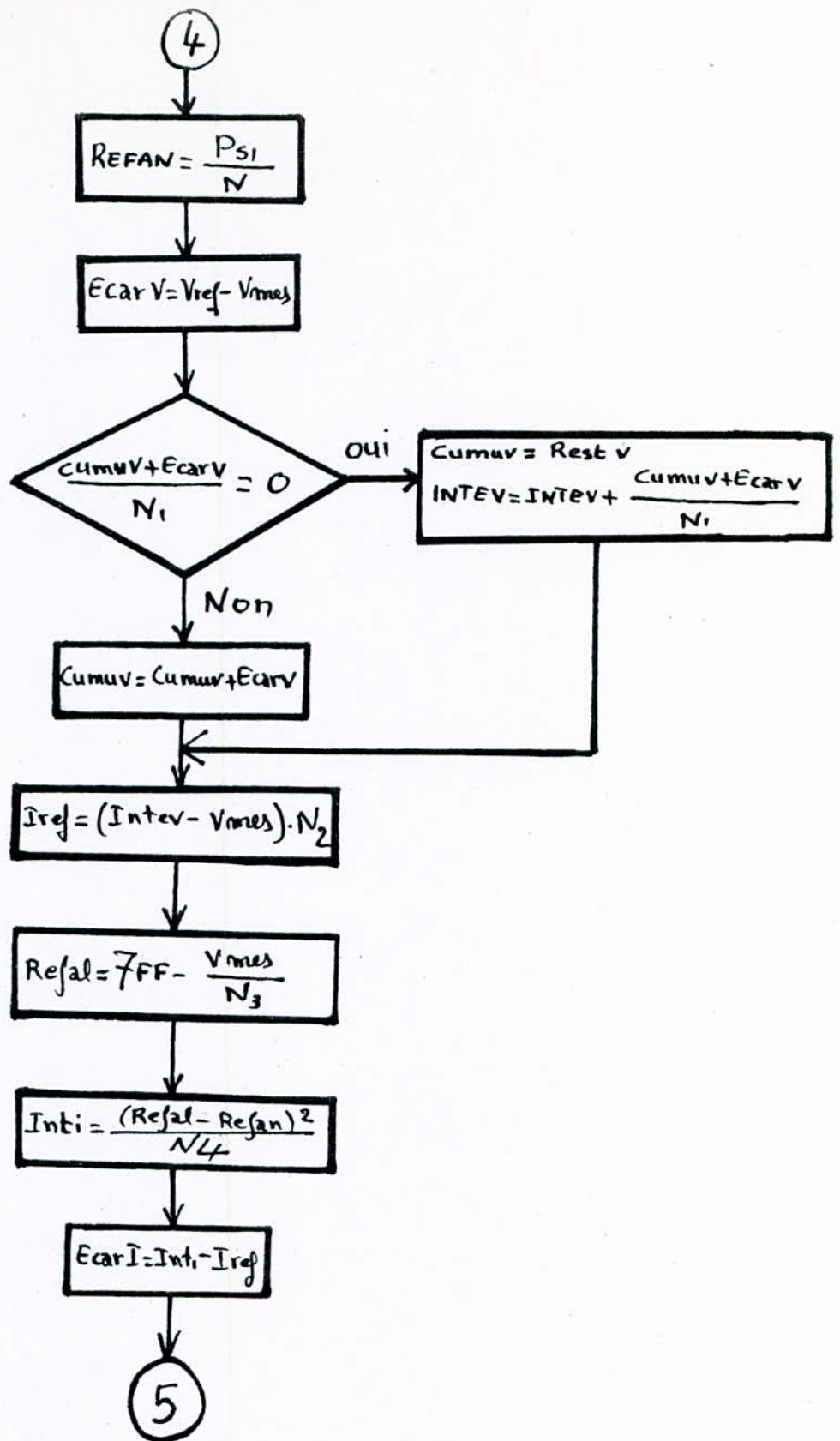


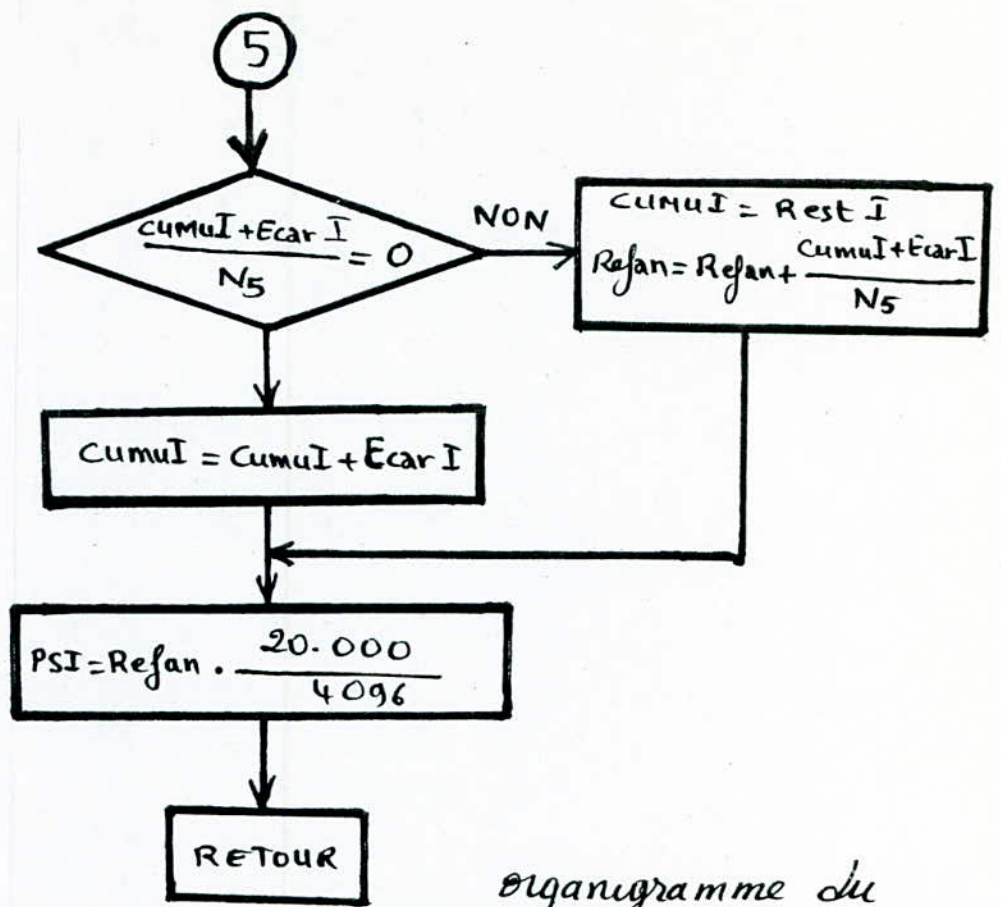
organigramme du
Sous programme Synchro.



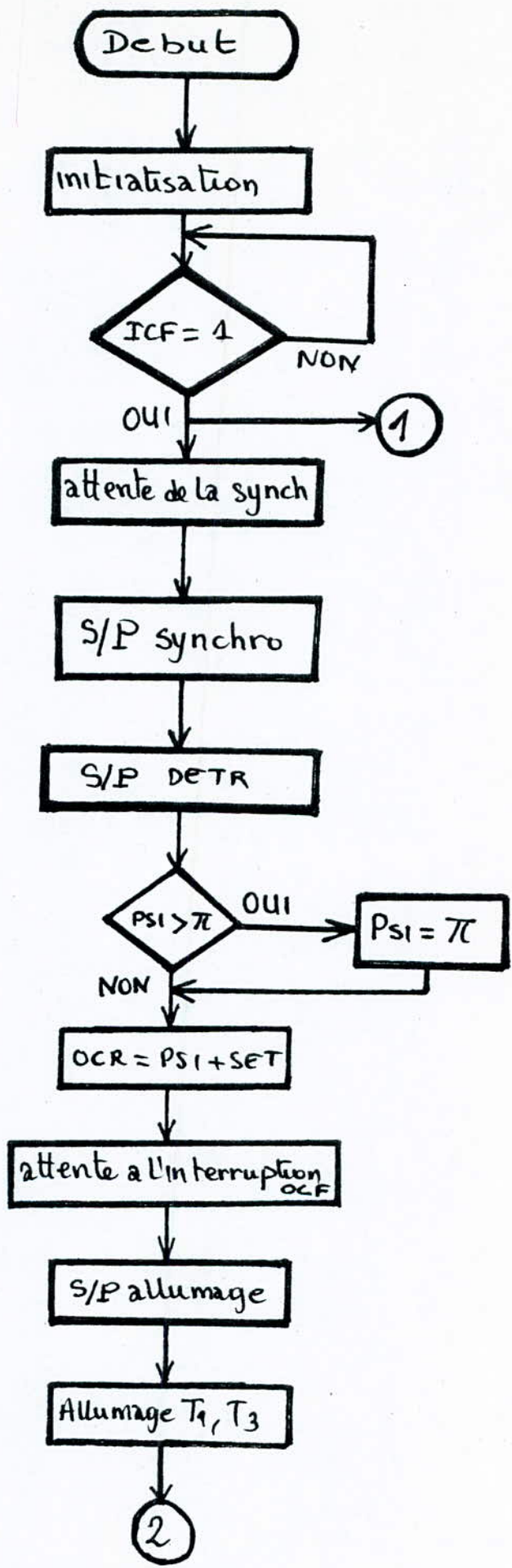
organigramme du.
Sous programme allumage.

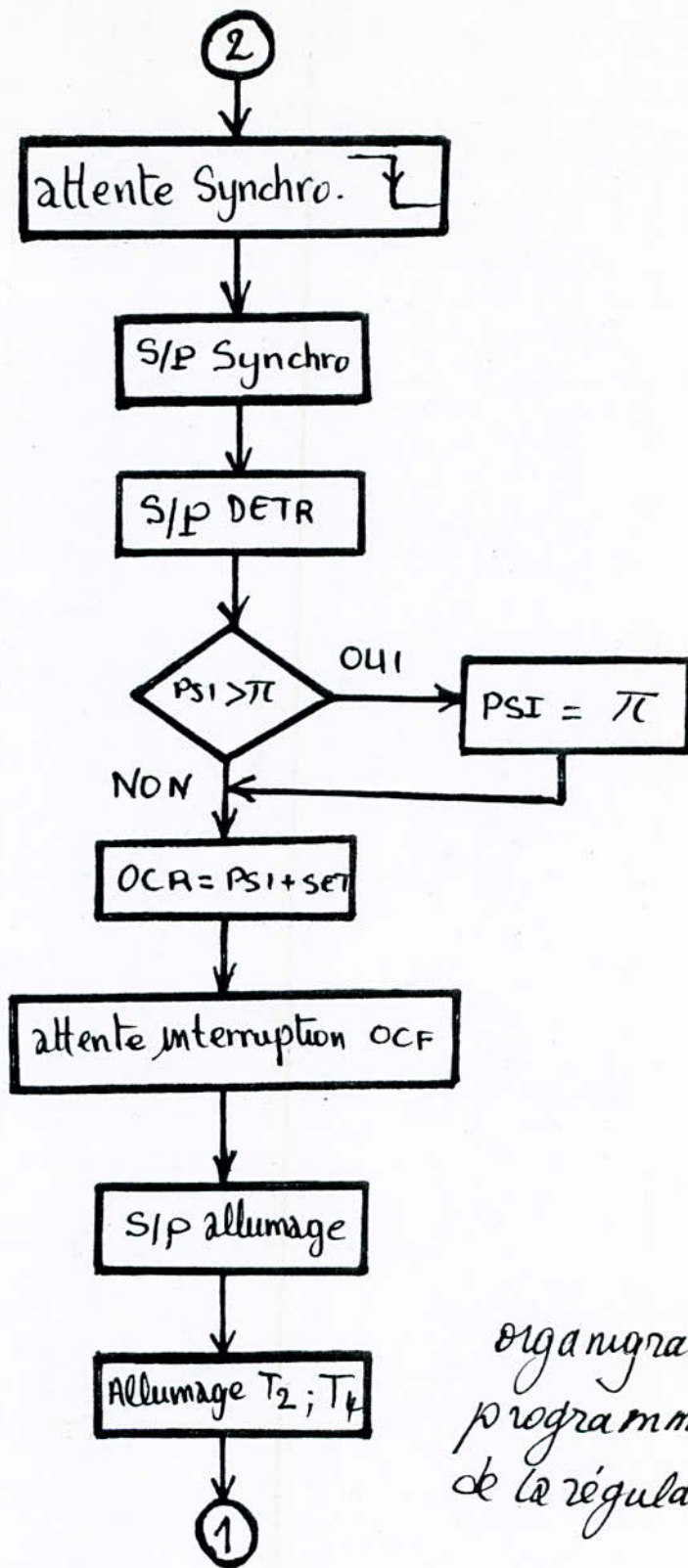




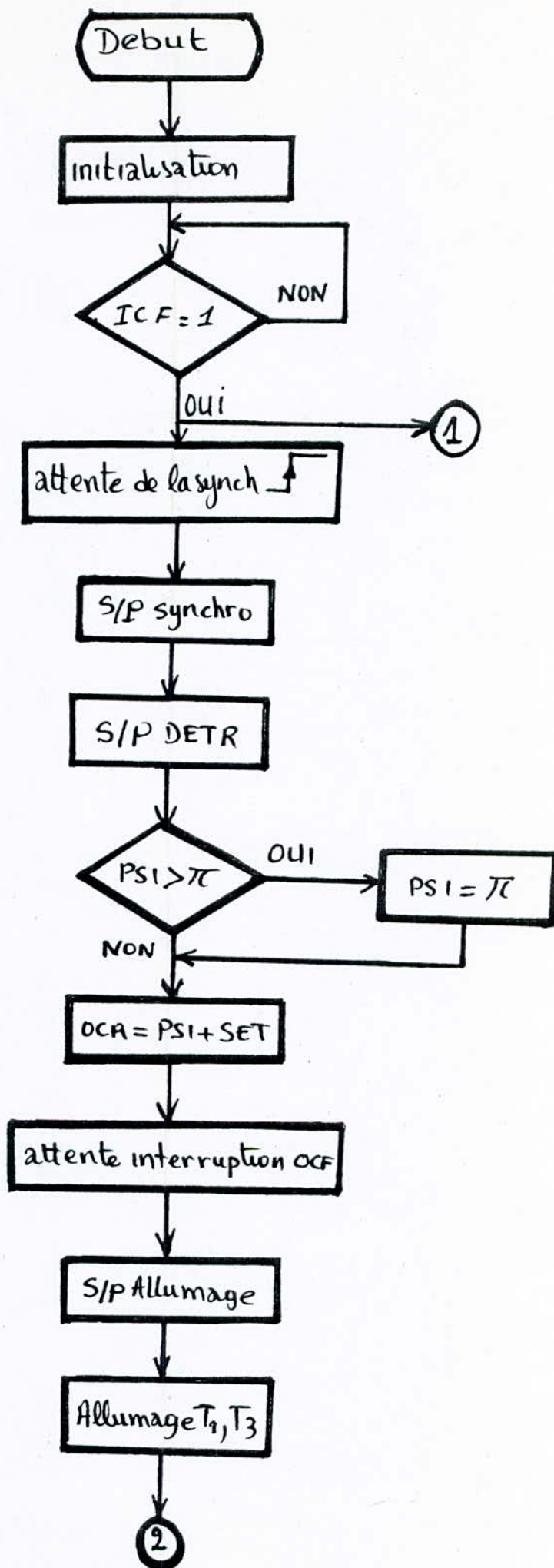


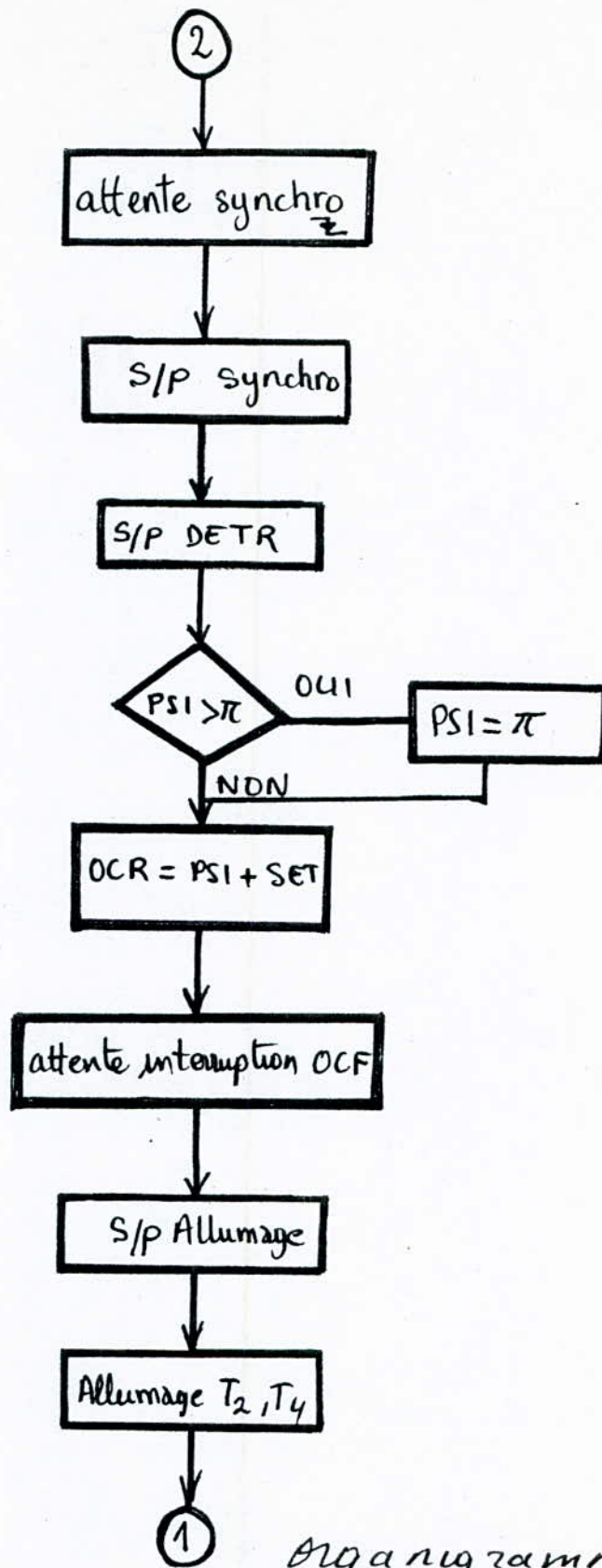
organigramme du
sous programme DETR.



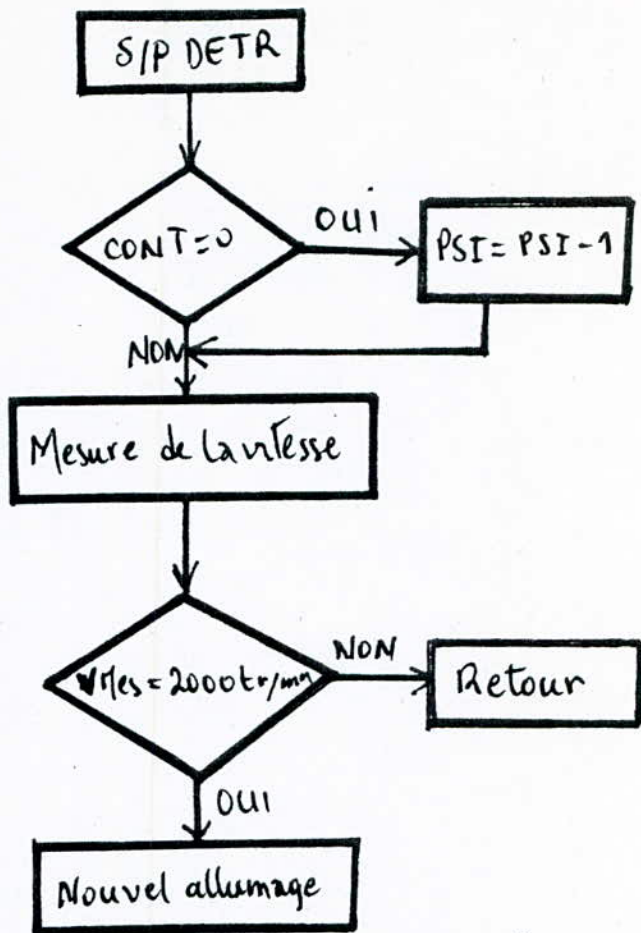


organigramme du programme principale de la régulation synchrone.

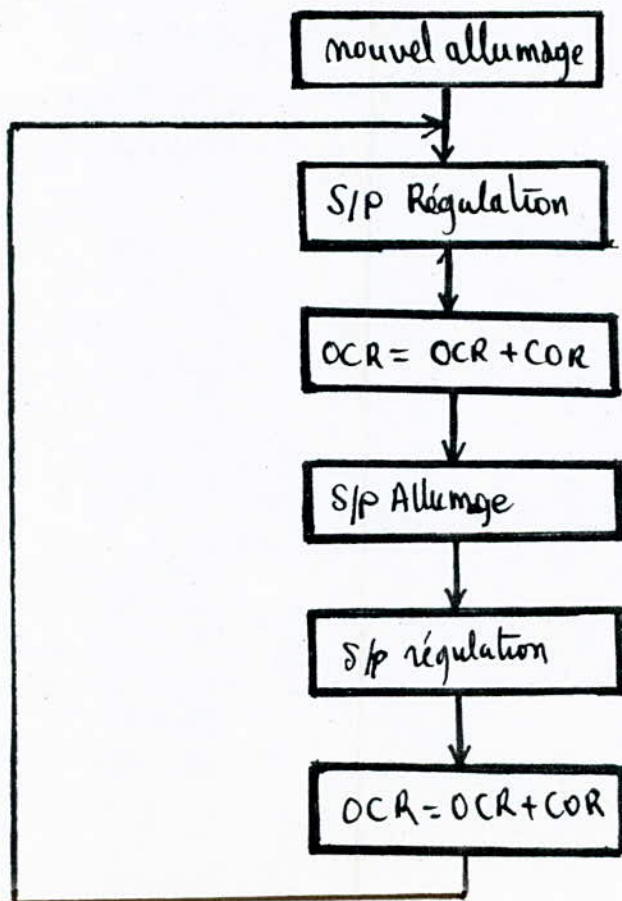




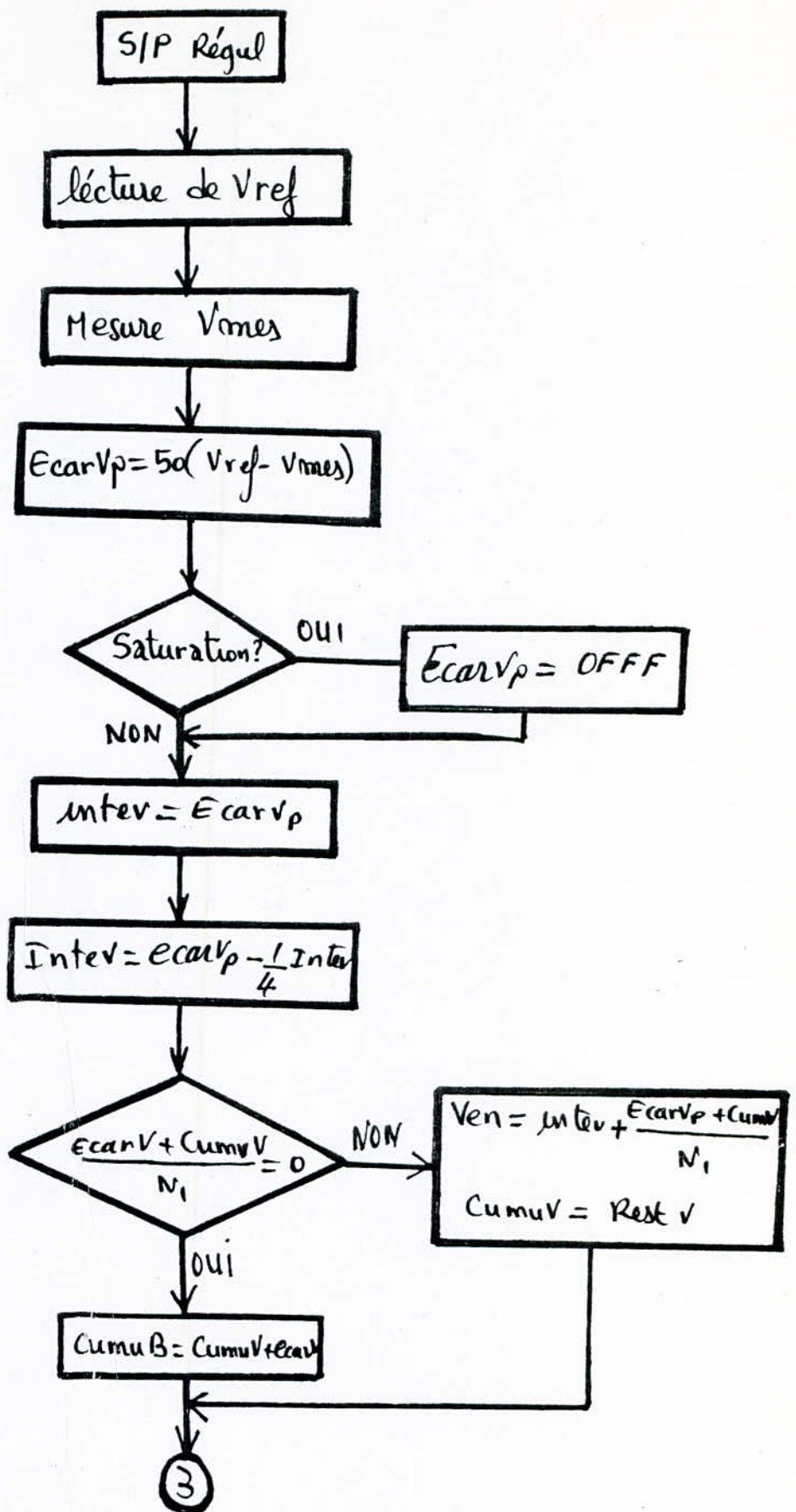
organigramme du programme principal de la régulation asynchrone.

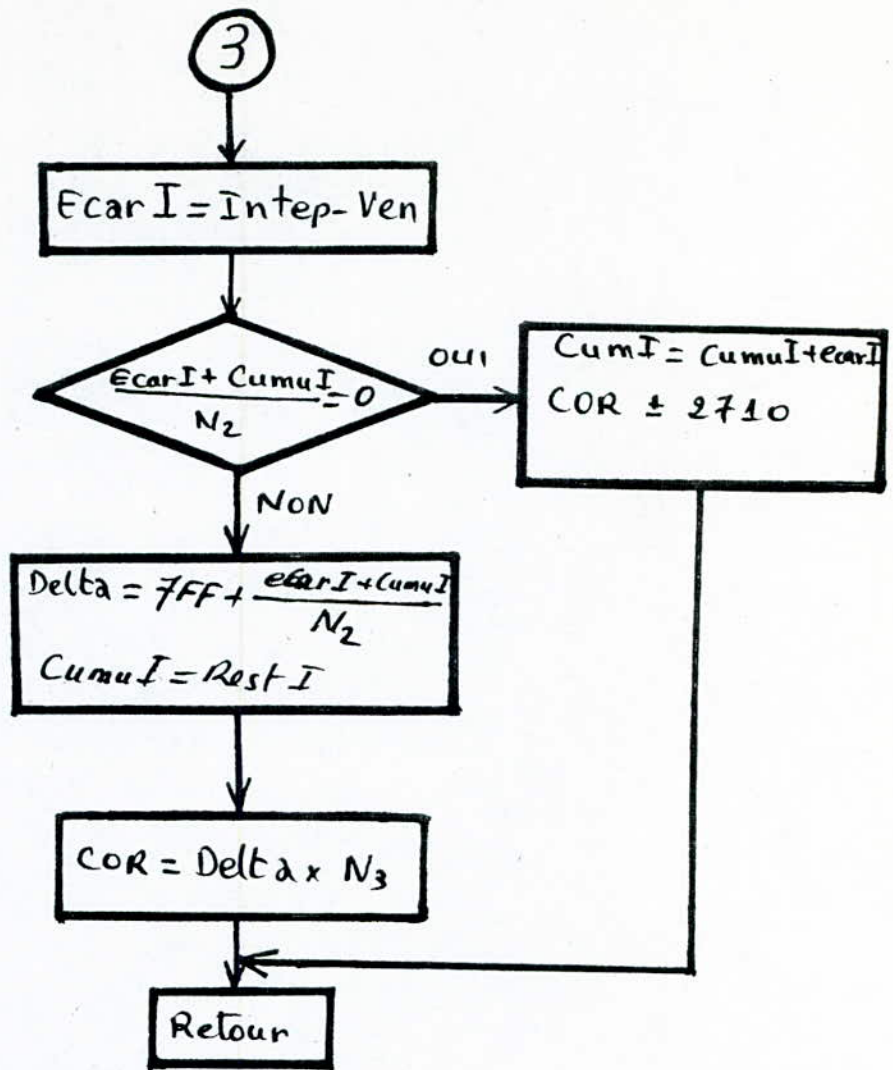


organigramme du sous programme
DETR.



organigramme du
sous-programme
nouvel allumage.





organigramme du sous-programme
Régul

CONCLUSION

Les trois applications que nous avons présentées montrent la flexibilité et l'évolution des systèmes numériques. Elles s'inscrivent dans un ensemble d'étude sur la commande numérique.

Nous avons vu à travers ce travail qu'avec un minimum de matériel autour des nouveaux microprocesseurs, il était possible de réaliser des commandes élaborées.

Étant donné que notre étude est faite seulement pour un point (ou deux) de fonctionnement, on peut penser à élargir l'application de la régulation en vitesse pour toute une gamme de points de fonctionnement et cela grâce à une commande adaptative et qui pourrait être un sujet de projet de fin d'étude.

Annexes (1)

Caracteristiques du moteur: c'est un moteur à courant continu à excitation indépendante et à flux constant.

$R = 1,65 (\Omega)$ resistance d'induit . $L = 904 (H)$ inductance d'induit

$E = K \Omega$: f.cem du moteur . $J = 0,022 \text{ kg m}^2$ moment d'inertie de l'ensemble moteur

. $F = 0,0055 \text{ N.m.A/rd.s}^{-1}$ coefficient des frottement . $\Gamma_c = 0,207 \text{ N.m}$: couple résistant . $V_m = 304 \text{ V}$

amplitude maximale de la tension reseau. $K = 0,518$.

$\omega = 314 \text{ rd/s}$ pulsation du reseau.

Les variables reduites utilisees sont: $\xi_1 = R.i/V_m$; $\xi_2 = K\Omega/V_m$.

$$\xi_{1c} = \frac{R \cdot \Gamma_c}{K \cdot V_m} ; C_0 = \frac{K^2}{R \cdot F} ; \Delta e = \frac{L \cdot \omega}{A} ; \Delta m = \frac{J \cdot \omega}{F}$$

$$\beta_0 = \sqrt{\left(\frac{\Delta m - \Delta e}{\Delta m \cdot \Delta e}\right)^2 - 4 \frac{C_0}{\Delta e \Delta m}} \cdot \frac{1}{2} ; \alpha_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta m + \Delta e}{\Delta e \Delta m}\right) ; \gamma = \Psi'_{\infty} - \Psi_{\infty}$$

$$\alpha = -\gamma_{\infty} + \Delta e \left(1 - e^{-\gamma_{\infty}/\Delta e}\right) ; \beta = (\sin \theta - \xi_2) \cdot \left(e^{-\frac{\gamma_{\infty}}{\Delta e}} - 1\right)$$

$$S_0 = 1 + \frac{C_0}{\Delta m} \alpha - \frac{\pi}{\Delta m} ; G_1 = \frac{1}{\Delta m} \xi_{2\infty} + \frac{C_0}{\Delta m} \xi_{1c} ; G_0 = G_1 + \frac{C_0}{\Delta m} \beta$$

$$S_1 = -\alpha_0 + \beta_0 ; S_2 = -\alpha_0 - \beta_0 ; g_0 = \left(-\xi_{2\infty} + \sin \Psi_{\infty}\right) \cdot \frac{1}{\Delta e}$$

$$g_1 = \left(\xi_{2\infty} + C_0 \xi_{1c}\right) \cdot \frac{1}{\Delta m}$$

$$\Phi_{11} = \left[\left(\frac{1}{\Delta m} + S_1\right) \cdot e^{S_1 \gamma_{\infty}} - \left(\frac{1}{\Delta m} + S_2\right) \cdot e^{S_2 \gamma_{\infty}} \right] \cdot \frac{1}{2 \beta_0}$$

$$\Phi_{21} = \left[e^{S_1 \gamma_{\infty}} - e^{S_2 \gamma_{\infty}} \right] \cdot \frac{C_0}{2 \beta_0 \Delta m} ; \alpha_1 = -\frac{\Delta e}{1 + C_0} ; \alpha_2 = \frac{\Delta m}{1 + C_0}$$

$$\Phi_{12} = \left(e^{S_2 \gamma_{\infty}} - e^{S_1 \gamma_{\infty}} \right) \cdot \frac{1}{2 \beta_0 \Delta m}$$

$$\Phi_{22} = \left[\left(\frac{1}{\Delta e} + S_1\right) \cdot e^{S_1 \gamma_{\infty}} - \left(\frac{1}{\Delta e} + S_2\right) \cdot e^{S_2 \gamma_{\infty}} \right] \cdot \frac{1}{2 \beta_0}$$

Annexes (2).

$$W_1 = \alpha_1 (\phi_{11} - 1) + \alpha_2 \phi_{21}; \quad W_2 = \alpha_1 \phi_{12} + \alpha_2 (\phi_{22} - 1)$$

$$A = -g_0 \phi_{21} e^{(\psi_0 - 3\pi/2)/\Delta_m}; \quad B = \phi_{22} e^{-\pi + \gamma_0}$$

$$C = -W_1 \cdot g_0; \quad D = W_2 \cdot e^{(\pi/2 - \psi_0)/\Delta_m}$$

Rappels des équations utilisées en régime haché: On distingue 3 modes de fonctionnement.

Mode. 1: mode de non conduction et intégrale de courant nulle.

$$\theta_0 \leq \theta \leq \psi_n \quad \text{on a};$$

$$J\omega \frac{d\Omega}{d\theta} + \Gamma \Omega + \Gamma_c = 0; \quad i = \int i = 0; \quad \Omega(\theta_0) = \Omega(\psi_{n-1})$$

Mode. 2: mode de conduction $\psi_n \leq \theta \leq \psi'_n$. on a;

$$L\omega \frac{di}{d\theta} + R_i + K\Omega = V_m \sin \theta$$

$$J\omega \frac{d\Omega}{d\theta} + \Gamma \Omega + \Gamma_c = K i; \quad \frac{di}{d\theta} = i; \quad i(\psi_n) = \int i(\psi_n) = 0$$

$$\Omega(\psi_n^+) = \Omega(\psi_n^-)$$

Mode. 3: mode de non conduction et intégrale de courant non nulle. $\psi'_n \leq \theta \leq \theta_0 + \pi$

ce mode est presque identique au mode 1; à l'exception de: $i = 0; \int i(\theta) = \int i(\psi'_n)$. $\Omega(\psi_n^+) = \Omega(\psi'_n)$

ψ_n : désigne l'angle d'amorçage des thyristors

ψ'_n : désigne l'angle d'extinction des thyristors

$\gamma = \psi'_n - \psi_n$: l'angle de conduction des thyristors.

Annexes (3):

LE MICROPROCESSEUR 68701

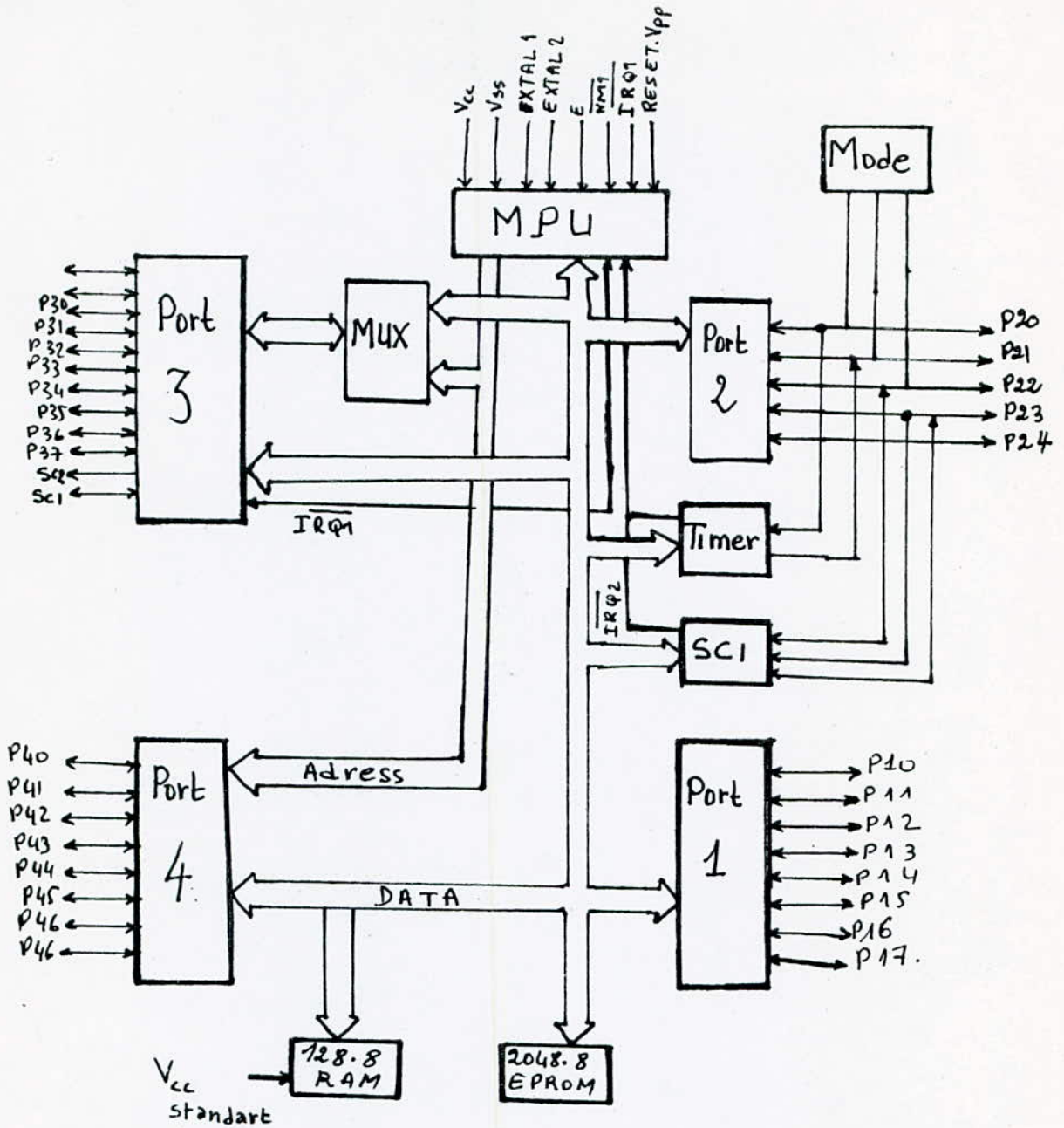


Fig 1 : Architecture du MC 68701

Le microprocesseur 68701 possède 6 registres : • Le registre de code condition. • Le compteur de programme. • Le pointeur de pile. • Le registre index. • Deux accumulateurs A et B de huit bits, qui concaténés, donnent l'accumulateur D qui a permis d'introduire plusieurs nouvelles instructions. Les nouvelles caractéristiques du MC68701 se résument : • en un plus grand nombre d'instructions que celle du MC6800. • une instruction multiplication 8x8 bits. • une interface de communication série. • une compatibilité ascendante avec le MC6800. • un Timer programmable de 16 bits. • un espace adresse de 64 kbytes. • une Eprom de 2048 bytes. • une Ram de 128 bytes. • quatre ports. • une horloge avec diviseur d'entrée.

**** REGULATION SYNCHRONE DE VITESSE ****
 ** CALCUL DES COEFFICIENTS Kc ET Nu DU REGULATEUR **

```

10 'les données du moteur sont en unites SI:VM=304:W=314:R=1.65
20 L=0.04:J=0.022:Cp=0.207:f=0.0055:K=0.518:T=0.01
30 'le point de fonctionnement est:INPUT"PSI2=",PSI2
40 INPUT"GAMA=",GAMA:INPUT"KSI2=",KSI2:CE=3.14/180:PSI2=CE*PSI2
50 GAMA=CE*GAMA:KSI2=KSI2*K*6.28/(60*VM):DE=L*W/R:DM=J*W/f
60 C=K*K/(f*R):A=1-3.14/DM+C*(DE*(1-EXP(-GAMA/DE))-GAMA)
70 B=C*(KSI2-SIN(PSI2))*(1-EXP(-GAMA/DE))/DM
80 'les poles choisis sont:INPUT"FI=",FI:INPUT"RO=",RO:FI=FI*CE
90 PRZ=EXP(-2*T*COE(FI)*RO)
100 SOZ=2*EXP(-T*RO*COE(FI))*COE(T*RO*SIN(FI))
110 'les paramètres du régulateur sont:Kc=(A-PRZ)/B
120 Nu=(1+PRZ-SOZ)/(A-PRZ):PRINT Kc,Nu:END
  
```

**** REGULATION DE VITESSE AVEC BOUCLE INTERNE DE COURANT ****
 ** CALCUL DES COEFFICIENTS K1,K2 ET Nu DU REGULATEUR **

```

10 'les données du moteur sont:VM=304:W=314:R=1.65:L=0.04:J=0.022
20 Cp=0.207:K=0.518:T=0.01:f=0.0055
30 'le point de fonctionnement est:INPUT"PSI2=",PSI2
40 INPUT"GAMA=",GAMA:INPUT"KSI2=",KSI2:CE=3.14/180:PSI2=PSI2*CE
50 GAMA=GAMA*CE:KSI2=KSI2*K*6.28/(60*VM):DE=L*W/R:DM=J*W/f
60 C=K*K/(R*f):BT=(KSI2-SIN(PSI2))*(1-EXP(-GAMA/DE)):GO=C*BT/DM
70 AFA=-GAMA+DE*(1-EXP(-GAMA/DE)):SO=1+C*AFA/DM:INPUT"FI=",FI
80 FI=FI*CE:INPUT"RO=",RO:PRZ=EXP(2*COE(FI)*RO*T)
90 SOZ=2*EXP(COE(FI)*RO*T)*COE(RO*T*SIN(FI))
100 'les paramètres du régulateur sont:K1=SO/(AFA*GO-BT*SO)
110 K2=DM*(1-PRZ)/C:Nu=(SOZ-2)/(PRZ-1)-1:PRINT K1,K2,Nu:END
  
```

***** REGULATION ASYNCHRONE DE VITESSE *****
 ** CALCUL DES COEFFICIENTS K1,K2 ET K3 DU REGULATEUR **

```

10 'les données du moteur sont:VM=304:W=314:R=1.65:L=0.04:J=0.022
20 Cp=0.207:K=0.518:T=0.01:f=0.0055:C=K^2/(R*f):DE=L*W/R:DM=L*W/R
30 KSI1c=R*Cp/(K*VM):le point de fonctionnement est:
40 INPUT"PSI2=",PSI2:INPUT"GAMA=",GAMA:INPUT"KSI2=",KSI2
50 INPUT"FI=",FI:INPUT"RO=",RO:CE=3.14/180:PSI2=PSI2*CE:FI=FI*CE
60 GAMA=GAMA*CE:KSI2=KSI2*6.28*K/(60*VM)
70 AFA=-GAMA+DE*(1-EXP(-GAMA/DE)):SO=1+(C*AFA-3.14)/DM
80 BAT=(KSI2-SIN(PSI2))*(1-EXP(-GAMA/DE)):G1=(KSI2+C*KSI1c)/DM
90 GO=G1+C*BTA/DM:PRZ=EXP(2*COE(FI)*RO*T)
100 SOZ=2*EXP(COE(FI)*RO*T)*COE(RO*SIN(FI)*T):V1=1+SO-SOZ:V3=0
110 V2=SO-PRZ:T0=G0^2-G1*G0*(1+SO)+SO*G1^2:L1=G0^2/T0:L2=-G1*G0/T0
120 L4=(G1*SO-(1+SO)*G0)/T0:L5=G0/T0:L7=SO*G0/T0:L8=-SO*G0/T0
130 MU=L1*V1+L2*V2:RR=L4*V1+L5*V2:SIG=L7*V1+L8*V2
140 'les paramètres du régulateur sont:K1=(MU*RR-SIG)/(1+MU):K3=MU
150 K2=(RR+SIG)/(MU*RR-SIG):PRINT K1,K2,K3:END
  
```


***** REGULATION SYNCHRONE DE VITESSE *****

** PROGRAMME DE SIMULATION DE VITESSE **

```

01 GOSUB 300
10 DIM X0(2):DIM C(2):DIM C1(2):DIM C2(2):DIM X(2):DIM C3(2)
20 DIM C4(2):VM=304:W=314:R=1.65:L=0.04:J=0.022:F=0.0055
30 T=0.207:H=0.1:AF=128:K=0.518:V=1500:VR=1510:
40 LOCATE 1,20:INPUT "Kc=",Kc:LOCATE 1,35:INPUT "NU=",NU:AF=128
50 V=1500:VR=1510:AF=AF*3.14/180:CTE=6.28/60:V=V*CTE:VR=VR*CTE
60 U=AF/Kc+K*V/VM:X0(2)=V:N=0:N0=N
70 X0(1)=0:AE=AF
80 GOSUB 280:FOR I=1 TO 2:C1(I)=C(I)*H:X(I)=X0(I)+C1(I)/2:NEXT I
90 AE=AE+H/2:GOSUB 280:FOR I=1 TO 2:C2(I)=H*C(I)
100 X(I)=X0(I)+C2(I)/2:NEXT I:GOSUB 280:FOR I=1 TO 2
110 C3(I)=H*C(I):X(I)=X0(I)+C3(I):NEXT I:AE=AE+H/2:GOSUB 280
120 FOR I=1 TO 2:C4(I)=H*C(I)
130 X(I)=X0(I)+(C1(I)+2*C2(I)+2*C3(I)+C4(I))/6:NEXT I
140 FOR I=1 TO 2:X0(I)=X(I):NEXT I:IF X(I)>=0 THEN 80:AE=AE-H/2
160 GOSUB 210:IF 270>AE THEN 160:AE=AE*3.14/180
170 U=U+NU*K*(VR-X(2))/VM:AF=Kc*(U-K*X(2))/VM)
180 GOSUB 210:IF (AF+3.14)>AE THEN 180
190 LINE (N0,V-157)-(N,X(2)-157):N0=N:V=X(2):N=N+1
200 IF 30>N THEN 70:GOTO 40:END
210 'SUBROUTINE:GOSUB 270:C1(2)=H*C(2):X(2)=X0(2)+C1(2)/2
220 AE=AE+H/2:GOSUB 270:C2(2)=H*C(2):X(2)=X0(2)+C2(2)/2
230 GOSUB 270:C3(2)=H*C(2):X(2)=X0(2)+C3(2):AE=AE+H/2:GOSUB 270
240 C4(2)=H*C(2):X(2)=X0(2)+(C1(2)+2*C2(2)+2*C3(2)+C4(2))/6
250 X0(2)=X(2):AE=AE*180/3.14:RETURN
270 'SUBROUTINE:C(2)=(-F*X(2)-T)/(J*W):RETURN
280 'SUBROUTINE:C(1)=(VM*SIN(AE)-R*X(1)-K*X(2))/(L*W)
290 C(2)=(K*X(1)-F*X(2)-T)/(J*W):RETURN
300 CLS:XMAX=30:YMAX=1.5:SCREEN 3:VIEW (50,50)-(550,300)
310 WINDOW (0,0)-(XMAX,YMAX):LINE (0,0)-(XMAX,0)
320 LINE (0,0)-(0,YMAX):RETURN

```



```

10 *****
20 ***** TRACE DU LIEU D'EVANS POUR REGULATION *****
30 ***** SYNCHRONE DE VITESSE *****
40 VM=304:W=314:R=1.65:L=0.04:K=0.518:J=0.022:f=0.0055:Cp=0.207
50 DE=L*W/R:DM=J*W/f:C=K^2/(R*f):CE=3.14/180:INPUT"PSI2=",PSI2
60 INPUT"GAMA=",GAMA:PSI2=PSI2*CE:GAMA=GAMA*CE:INPUT"KSI2=",KSI2
70 KSI2=KSI2*6.28*K/(60*VM):CLS:GOSUB 210
80 FOR TETA=0 TO 6.28 STEP 6.28/1000
90 X=COS(TETA):Y=SIN(TETA):PSET (X,Y):NEXT TETA
100 FOR P=0 TO 900 STEP 2
110 REL=EXP(0.01*P*COS(2.355))*COS(0.01*P*SIN(2.355))
120 IM=EXP(0.01*P*COS(2.355))*SIN(0.01*P*SIN(2.355))
130 PSET (REL,IM):PSET(REL,-IM):NEXT P
140 A=1-3.14/DM+C*(DE*(1-EXP(-GAMA/DE))-GAMA)/DM
150 LOCATE 1,3:INPUT"Kc=":FOR Nu=0 TO 20 STEP 0.05
160 B=C*(KSI2-SIN(PSI2))*(1-EXP(-GAMA/DE))/DM
170 Q=1-Nu*B*Kc+A-B*Kc:S=A-B*Kc:DETA=Q^2-4*S:IF DETA >0 THEN 190
180 ZR=Q/2:ZI=SQR(-DETA)/2:PSET (ZR,ZI):PSET (ZR,-ZI):GOTO 200
190 ZR=Q/2:ZI=SQR(DETA):PSET (ZR+ZI,0):PSET(ZR-ZI)
200 NEXT Nu:GOTO 150
210 CLS:XMAX=1.5:YMAX=1.5:SCREEN 3:VIEW (0,0)-(400,350)
220 WINDOW (-XMAX,-YMAX)-(XMAX,YMAX):FOR I=-XMAX TO XMAX STEP 0.1
230 LINE (I,-YMAX/400)-(I,YMAX/400):NEXT I
240 FOR I=-YMAX TO YMAX STEP 0.1:LINE (-XMAX/400,I)-(XMAX/400,I)
250 NEXT I:LOCATE 23,10:PRINT"traçé du lieu d'EVANS"
260 LOCATE 12,51:PRINT"réel":LOCATE 1,28:PRINT"Im"
270 LOCATE 12,7:PRINT"-1":LOCATE 12,43:PRINT"1"
280 LOCATE 23,31:PRINT"(lieu des racines)":RETURN

```

```

-----
10 *****
20 ***** REGULATION ASYNCHRONE DE VITESSE *****
30 *****
40 VM=304:R=1.65:L=0.04:K=0.518:J=0.022:Cp=0.207:f=0.0055:W=314
50 T=0.01:DE=L*W/R:DM=J*W/f:KSI1c=R*Cp/(K*VM):C=K^2/(R*f)
60 INPUT"PSI2=",PSI2:INPUT"GAMA=",GAMA:INPUT"KSI2=",KSI2
70 CE=3.14/180:GAMA=GAMA*CE:PSI2=PSI2*CE:KSI2=KSI2*6.28*K/(60*VM)
80 GOSUB 180:AFA=-GAMA+DE*(1-EXP(-GAMA/DE)):SO=1+(C*AFA-3.14)/DM
90 BTA=(KSI2-SIN(PSI2))*(1-EXP(-GAMA/DE)):G1=(KSI2+C*KSI1c)/DM
100 GO=G1+BTA*C/DM
110 LOCATE 1,3:INPUT"K2=",K2:FOR K3=0 TO 2 STEP 0.005
120 K1=SO*K3/(GO*(K2*K3-1)):A=K3-1-SO+K1*G1*(1+K2)
130 B=SO-(1+SO)*K3+K1*G1*(K2*K3-1)-K1*GO*(1+K2):DETA=A^2-4*B
140 IF DETA>0 THEN 160
150 ZR=-A/2:ZI=SQR(-DETA)/2:PSET (ZR,ZI):PSET (ZR,-ZI):GOTO 170
160 ZR=-A/2:ZI=SQR(DETA)/2:PSET (ZR+ZI,0):PSET (ZR-ZI,0)
170 NEXT K3:GOTO 110
180 CLS:XMAX=1.5:YMAX=1.5:SCREEN 3:VIEW (0,0)-(400,350)
190 WINDOW (-XMAX,-YMAX)-(XMAX,YMAX):FOR I=-XMAX TO XMAX STEP 0.1
200 LINE (I,-YMAX/400)-(I,YMAX/400):NEXT I
210 FOR I=-YMAX TO YMAX STEP 0.1:LINE (-XMAX,I)-(XMAX,I):NEXT I
220 FOR TETA=0 TP 6.28 STEP 6.28/1000:X=COS(TETA):Y=SIN(TETA)
230 PSET (X,Y):NEXT TETA:FOR P=0 TO 900 STEP 2
240 REL=EXP(T*P*COS(2.355))*COS(T*P*SIN(2.355))
250 IM=EXP(T*P*COS(2.355))*SIN(T*P*SIN(2.355)):PSET(REL,IM)
260 PSET(REL,-IM):RETURN

```



```

10 *****
20 ***** TRACE DU LIEU D'EVANS POUR REGULATION DE VITESSE *****
30 ***** AVEC BOUCLE INTERNE DE COURANT *****
40 *****

50 VM=304:K=0.518:R=1.65:L=0.04:J=0.022:Cp=0.207:f=0.0055:W=314
60 INPUT"PSI2=",PSI2:INPUT"GAMA=",GAMA:INPUT"KSI2=",KSI2
70 CE=3.14/180:GAMA=GAMA*CE:PSI2=PSI2*CE:KSI2=KSI2*6.28*K/(60*VM)
80 BT=(KSI2-SIN(PSI2))*(1-EXP(-GAMA/DE)):GOSUB 220
90 AF=-GAMA+DE*(1-EXP(-GAMA/DE)):GO=C*BT/DM:SO=1+C*AF/DM
100 K1=SO/(AF*GO-BT*SO):FOR TETA=0 TO 6.28/1000:X=COS(TETA)
110 Y=SIN(TETA):PSET (X,Y):NEXT TETA:FOR P=0 TO 900 STEP 2
120 REL=EXP(0.01*P*COS(2.355))*COS(0.01*P*SIN(2.355))
130 IM=EXP(0.01*P*COS(2.355))*SIN(0.01*P*SIN(2.355))
140 PSET (REL,IM):PSET (REL,-IM):NEXT P
150 INPUT"K2=",K2:FOR Nu=0 TO 20 STEP 0.05
160 Q=2+SO+K1*BT+GO*K1*K2*(1+Nu)
170 S=1+2*SO+K1*BT+K1*(BT*SO-AF*GO)+K1*K2*GO:DETA=Q^2-4*S
180 IF DETA>0 THEN 200
190 ZR=Q/2:ZI=SQR(-DETA):PSET (ZR,ZI):PSET (ZR,-ZI):GOTO 210
200 ZR=Q/2:ZI=SQR(DETA):PSET (ZR+ZI,0):PSET (ZR-ZI,0)
210 NEXT Nu:GOTO 150
220 CLS:XMAX=1.5:YMAX=1.5:SCREEN 3:VIEW (0,0)-(400,350)
230 WINDOW (-XMAX,-YMAX)-(XMAX,YMAX)
240 FOR I=-XMAX TO XMAX STEP 0.1
250 LINE (I,-YMAX/400)-(I,YMAX/400):NEXT I
260 FOR I=-YMAX TO YMAX STEP 0.1
270 LINE (-XMAX/400,I)-(XMAX/400,I):NEXT I
280 LOCATE 1,24:PRINT"Im":LOCATE 12,50:PRINT"réel"
290 LOCATE 23,10:PRINT"traçé du lieu d'EVANS (lieu des racines)"
300 LOCATE 12,7:PRINT"-1"
310 LOCATE 12,43:PRINT"1":RETURN

```

Bibliographie

- 1) K. Benhamza : Identification et commande numérique directe par monochip d'un moteur à courant continu
- 2) A. El Hafnawy - J.F Aubry - Fischer : Rapport d'activité de l'équipe de recherche . Commande analogique et numérique des machines électriques
- 3) J.L. Duarte - K. Benhamza - J.F Aubry - J.P Louis : Digital incremental speed control of D.C motor drives fed by thyristors
- 4) R. Feuillet : Commande de vitesse et optimisation énergétique par microprocesseur
- 5) CHAUPRADE : Commande électronique des moteurs à courant continu
- 6) P. Naslin : Automatique . calcul algébrique
- 7) Y. Sevely : Systèmes et asservissement linéaire
- 8) Buhler : Electronique de commande et de réglage

