

2/86
2ed

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

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

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

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

SUJET

**COMMANDE D'UN CHARGEUR
AUTOMATIQUE PAR
MICRO ORDINATEUR**

Proposé par :

Dr. SCHREYER

Etudié par :

M. ATOUI

N. BOUFASSA

Dirigé par :

Dr. SCHREYER

PROMOTION : JANVIER 1986

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

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

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

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

SUJET

COMMANDE D'UN CHARGEUR
AUTOMATIQUE PAR
MICRO ORDINATEUR

Proposé par :

Dr. SCHREYER

Etudie par :

M. ATOUI

N. BOUFASSA

Dirigé par :

Dr. SCHREYER

PROMOTION : JANVIER 1986

Thème: ELECTROTECHNIQUE

صناعة الالكترونيات

Leur:SCHREYER...

رئيسه شرايز

Ingenieur: N. Boufassa - M. Atoui

مهندس م. ن. بوفاسة - م. عطوي

- الموضوع: المتحكم في رافعة آليه بواسطة العقل الالكتروني
- الملخص: الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو إنجاز التحكم في رافعة آليه بواسطة العقل الالكتروني. في القسم الاول من هذا المشروع نقدم دراسة نظرية للتحكم باستخدام نموذج خطي لمركبات الحملية. والقسم الثاني من هذا المشروع يضمن إنجاز الواجهة ووضع برنامج لعملها على العقل الالكتروني

Objet: COMMANDE D'UN CHARGEUR AUTOMATIQUE PAR MICRO ORDINATEUR

le projet que nous presentons dans cette memoire de fin d'etude consiste en la realisation d'une commande automatique d'un chargeur par micro ordinateur.

nous avons montré dans la premiere partie du travail une etude theorique de la commande en utilisant le modele lineaire des composants du systeme. la 2nd partie consiste a realiser la structure du programme de fonctionnement.

Abstract: the project we present in this thesis of final studies of ingenering consist of the realisation of an automatic commande using a micro computer.

In this thesis we have shower in the first part a theoretical study of the command using linear models of systeme composants the 2nd part consists the realising a program model.

- DEDICACES -

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

A la memoire de mon pere.
A ma famille
Aux Amis

Nacerdine.

A la memoire de mon pere
A ma mere DJEMAA
A ma chere soeur BANI
A mes deux Freres SALIM et ALDUANI
A mes neveux et nieces
A tous ceux qui m'aiment

MOHAMED.

- REMERCIEMENTS -

nous tenons à remercier vivement
notre promoteur Mr : SCHREYER.
qui nous a dirigé et conseillé tout le long
de ce travail .

nous adressons également tous nos
remerciements à AZIZ , KAMEL et Mr
LOUALI et tous ceux qui ont contribué
de près ou de loin à l'élaboration de ce
travail .

sans oublier nos professeurs qui
ont contribué à notre formation .

SOMMAIRE .

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : ANALYSE D'UN ASSERVISSEMENT A RELAIS	
I-1 transmittance de la partie lineaire	2
I-2 linearisation de l'organe non lineaire	6
I-3 etude de la stabilite'	11
I-4 application au systeme reel	15
CHAPITRE II : LA COMMANDE AUTOMATIQUE	18
II-1 structure de la commande	19
II-2 calculateur numerique	21
II-3 les convertisseurs	24
CHAPITRE III : ANALYSE DE LA COMMANDE	27
III-1 mise en equations	28
III-2 freinage	30
III-3 remarques	35
CHAPITRE IV : PARTIE PRATIQUE	37
IV-1 pre liminaire	37
IV-2 identification des machines	38
IV-3 principe de fonctionnement du chargeur	40
IV-4 Programme d'acceptation des coordonnees . et leur conversion en binaire	42
IV programme d'execution des taches	44
CONCLUSION	52
BIBLIOGRAPHIE	53

- INTRODUCTION -

L'apparition au début des années 70 des micro-processeur, a apporté, un nouveau esprit à la recherche scientifique dans le domaine de la technologie et de l'informatique.

La naissance des micro calculateur a fait suite à un vaste regard sur l'évolution de la technique numérique et son application dans la commande automatique ainsi que son adaptation aux problématiques de la technique analogique.

dans le domaine de l'industrie comme par exemple les centrales nucléaires, les unités où travaillent des manipulateurs automatiques les centrales spatiales etc..., l'utilisation de la commande automatique assisté par des calculateurs numériques, présente un aspect fonctionnel ainsi rapide que précis.

Ce projet que nous présentons n'est qu'une simple image sur les perspectives de la technique numérique est son application dans le domaine de la commande automatique.

CHAPITRE I .

ANALYSE . D'UN ASSERVISSEMENT PAR RELAIS.

Introduction.

le relais est un organe très utilisé en asservissement mais l'analyse d'un processus asservi par relais présente une particularité, c'est que les méthodes linéaires ne s'avèrent pas toujours applicables du fait de la caractéristique non linéaire que présente le relais.

en d'autres termes il n'existe pas une relation linéaire reliant la sortie du relais à son entrée.

les méthodes d'étude des systèmes non linéaires se divisent essentiellement en deux méthodes :

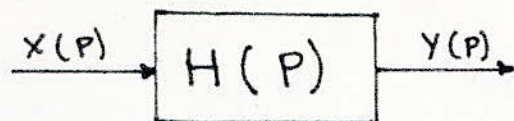
- fréquentielles
- Temporelles .

les méthodes fréquentielles consistent essentiellement à linéariser l'organe non linéaire en vue d'appliquer l'analyse harmonique .

I.1. transmittance de la partie ~~non~~ linéaire.

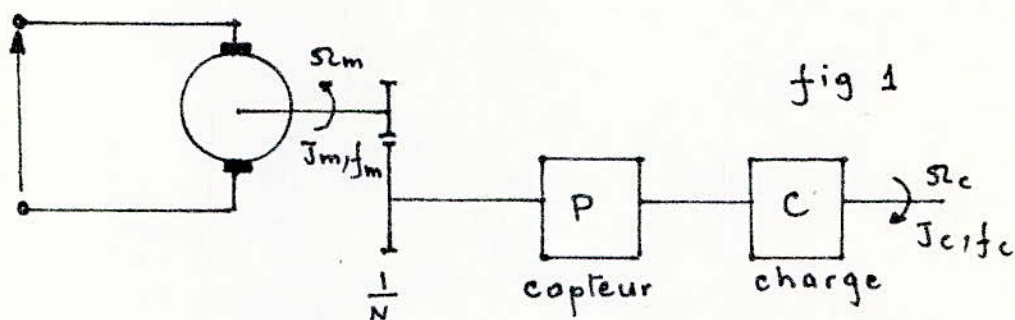
la notion de transmittance est généralement utilisée dans le but de représenter la relation qui existe entre la transformée de Laplace du signal d'entrée et celle du signal de sortie

le systeme etant initialement au repos.



$$H(P) = \frac{Y(P)}{X(P)}$$

la fig 1 represente le systeme dont la variable d'entrée est la tension d'alimentation U . et la grandeur de sortie est la vitesse Ω .



mise en equations :

les moteurs utilisés sont à flux constant dont les équations fondamentales :

$$- E = K_e \Omega.$$

$$- \Gamma_m = K_m I.$$

le principe fondamentale de la dynamique donne.

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega = \Gamma_m - \Gamma_r.$$

l'équation électrique. donne.

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

en introduisant l'operateur de Laplace $p \equiv \frac{d}{dt}$.

les equations electrique et mecanique deviennent

$$U - E = (R + LP) I$$

$$J_m \Omega - J_r = (f + JP) \Omega$$

avec:

$$f = f_m + f_c/N^2$$

$$J = J_m + J_c/N^2$$

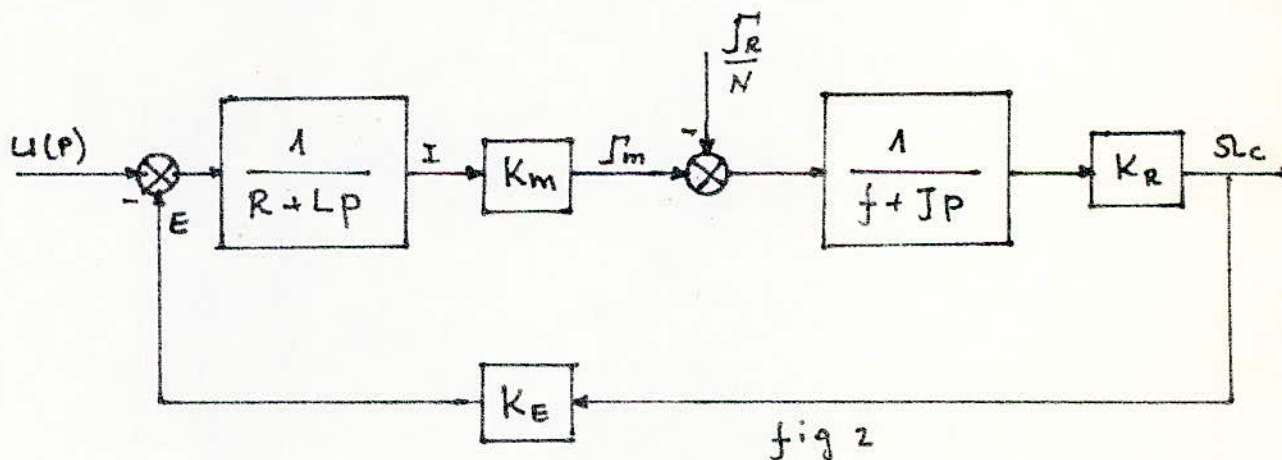
où :

f_m et J_m : sont respectivement le frottement et le moment d'inertie du moteur.

f_c/N^2 et J_c/N^2 : sont les frottement et le moment d'inertie de la charge ramenés sur l'arbre du moteur.

$\frac{1}{N} = K_R$ c'est le rapport de reduction mecanique.

le schema bloc du systeme est alors :



la transmittance du systeme relative à l'entrée principale $U(p)$ est :

$$H_{\Omega}(p) = \frac{\Omega_c(p)}{U(p)} = \frac{K_m K_R}{(R+LP)(f+JP) + K_m \cdot K_E \cdot K_R}$$

si $L \ll R$.

et $f \ll \frac{K_m \cdot K_E \cdot K_R}{R}$

la transmittance devient

$$H_{\Omega}(P) = \frac{\Omega(P)}{U(P)} = \frac{K}{1 + TP}$$

avec : $K = \frac{1}{K_R}$ et $T = \frac{J \cdot R}{K_m \cdot K_E \cdot K_R}$

en designant par θ la position angulaire de l'arbre qui est liée à la vitesse par :

$$\Omega = \frac{d\theta}{dt}$$

ou bien $\theta = P\Omega$.

on obtient :

$$H_{\theta}(P) = \frac{\theta(P)}{U(P)} = \frac{K}{P(1 + TP)}$$

I.2. linearisation de l'organe non lineaire

on considere un relais avec zone d'insensibilite suppose sans hysteresis. dont la caracteristique est represente sur la fig ci-dessous.

les equation qui decrivent ce relais sont :

$$y = \begin{cases} -y_0 & \text{pour } x < -x_0 \\ 0 & \text{pour } |x| \leq x_0 \\ +y_0 & \text{pour } x > x_0 \end{cases}$$

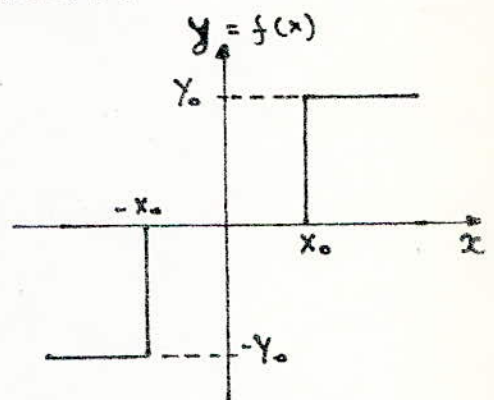


fig 4

on remarque que la non linearite est instantanee. supposons que le regime stationnaire du systeme est un processus harmonique. c'est a dire :

$$\text{si : } x = A \sin \omega t$$

où A est l'amplitude de la composante sinusoidale.
ω est la pulsation.

Alors la sortie de l'element non lineaire "y" contient la fonction periodique de même pulsation c.à.d :

$$f\left(t + \frac{2k\pi}{\omega}\right) = f\left[A \sin \omega\left(t + \frac{2k\pi}{\omega}\right)\right] = f(A \sin \omega t) = f(t).$$

ce qui permet de dire que. la sortie $y = f(x)$ est une superposition d'oscillations harmoniques de pulsation multiples de ω. qui constituent les termes du developpement en serie de FOURIER.

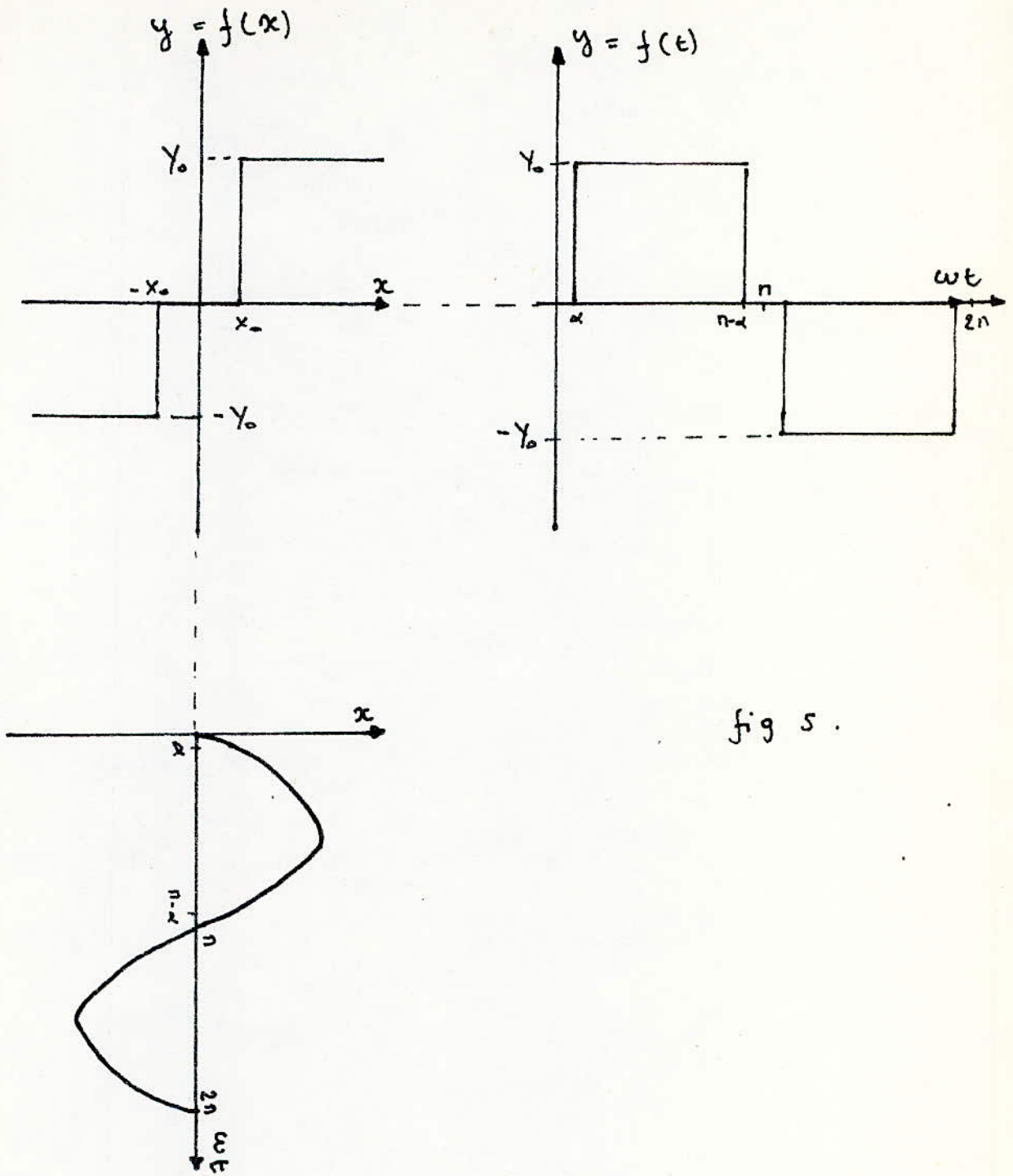


fig 5.

construction de la sortie $y(t)$. du relais
 a partir la caractéristique non linéaire
 et l'entre $x(t)$ supposée sinusoidale.

comme tout système physique la partie linéaire possède une bande passante et probablement dans le cas considéré le deuxième des harmoniques et les harmoniques d'ordre supérieur sont filtrées.

en vertu de cette hypothèse il suffit de se borner à l'examen de "y" sous la forme :

$$y = y_0 + y_1 \sin(\omega t + \varphi) = y_0 + A_1 \sin \omega t + B_1 \cos \omega t$$

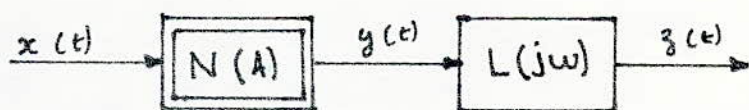
soit : $y_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2}$ et $\varphi_1 = \arctg \frac{B_1}{A_1}$.

cette méthode porte le nom du : - Premier harmonique

si y est appliqué à un système linéaire de Transmittance $L(j\omega)$

$$L(j\omega) = G(\omega) \cdot \exp[j\phi(\omega)]$$

en traversant $L(j\omega)$ chacune des composantes de l'oscillation "y", voit son amplitude multipliée par $G(\omega)$ et sa phase augmentée de $\phi(\omega)$.



à la sortie on recueille un signal $z(t)$. et en adoptant la méthode du premier harmonique on peut écrire $z(t)$ sous la forme :

$$z(t) = G(\omega) \cdot y_1(A) \cdot \sin[\omega t + \varphi_1(A) + \phi(\omega)]$$

$y_0 = 0$ due à l'imparité de la caractéristique.

en posant :

$$G(\omega) \cdot y_1(A) = Z_1.$$

$$\varphi(A) + \phi(\omega) = \Psi.$$

donc

$$z(t) = Z_1 \sin(\theta + \Psi) \quad ; \quad \theta = \omega t.$$

ce qui permet d'écrire indépendamment du temps.

$$Z_1 \cdot e^{j\varphi} = G(\omega) \cdot y_1(A) \cdot e^{j(\varphi + \phi)}$$

soit encore :

$$\begin{aligned} Z_1 e^{j\varphi} &= L(j\omega) \cdot y_1(A) \cdot e^{j\varphi} \\ &= L(j\omega) \cdot \frac{y_1(A)}{A} \cdot e^{j\varphi} \cdot A. \end{aligned}$$

sous cette forme la fonction :

$$\frac{y_1(A)}{A} e^{j\varphi} = N(A).$$

definit un bloc linéaire. qui sera nommé gain complexe équivalent.

y_1 et φ sont définies plus haut :

$$y_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \quad \text{et} \quad \text{tg} \varphi = \frac{B_1}{A_1}.$$

en tant que termes de la série de Fourier A_1 et B_1 sont définies par :

$$A_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \cdot \sin \theta \cdot d\theta \quad ; \quad \theta = \omega t$$

$$B_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \cdot \cos \theta \cdot d\theta \quad ; \quad \theta = \omega t.$$

en complexe : $N(A) = a_1 + j b_1$

où : $a_1 = \frac{A_1}{A}$ et $b_1 = \frac{B_1}{A}$.

le relais considéré étant sans hysteresis, on en déduit donc que le déphasage entre le signal d'entrée et le fondamentale du signal de sortie est nul

$$\varphi = 0$$

ce qui implique que le gain équivalent du relais est réel et par conséquent :

$$N(A) = a_1 = \frac{A_1}{A}$$

A_1 étant le premier terme de la série de FOURIER. d'où :

$$N(A) = \frac{1}{\pi A} \int_0^{2\pi} f(\theta) \sin \theta \, d\theta.$$

en tenant compte de la courbe donnant $f(\theta)$ en fonction de θ . on peut écrire.

$$\begin{aligned} N(A) &= \frac{2}{\pi A} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} Y_0 \sin \theta \, d\theta. \\ &= \frac{4\pi}{\pi A} \cdot \cos \alpha. = \frac{4Y_0}{\pi A} \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}. \end{aligned}$$

avec $\sin \alpha = \frac{X_0}{A}$

soit finalement :

$$N(A) = \frac{4Y_0}{\pi A} \sqrt{1 - \left(\frac{X_0}{A}\right)^2}.$$

I-3- - ETUDE DE LA STABILITE -

les systemes non lineaires sont susceptibles de presenter des regimes d'auto oscillations que l'on appelle aussi oscillations limites ou cycles limites, qui sont caracterises par une pulsations et une amplitude bien determinees

ces regimes d'auto oscillations ne dependent pas d'une maniere critique de la valeur que prend les parametres du systeme

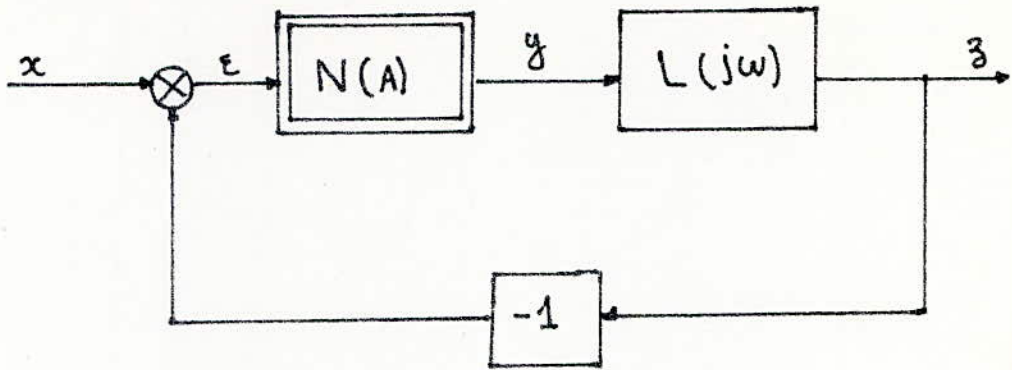
l'etude de la stabilite du systeme revient donc a l'analyse de ces regimes auto-oscillatoires, qui s'etudient facilement par les methodes graphiques simples.

on etudiera le cas d'une caracteristique non lineaire impaire et univoque.

soit la boucle d'asservissement suivante dont la chaine d'action comprend:

- un organe non lineaire $N(A)$ qui represente le relais.

- un systeme lineaire de transmittance $L(j\omega)$ representant le moteur a commander.



la condition pour laquelle le systeme est le siege d'auto oscillations s'ecrit :

$$\varepsilon = -z.$$

soit simplement :

$$L(j\omega) \cdot N(A) = -1 \quad \text{--- --- --- (1)}$$

où A designe l'amplitude de l'oscillation. ε.

la solution de cette équation. donne les couples de valeurs (ω, A) qui definissent donc les regimes d'auto oscillation possibles dont en envisage leur stabilité.

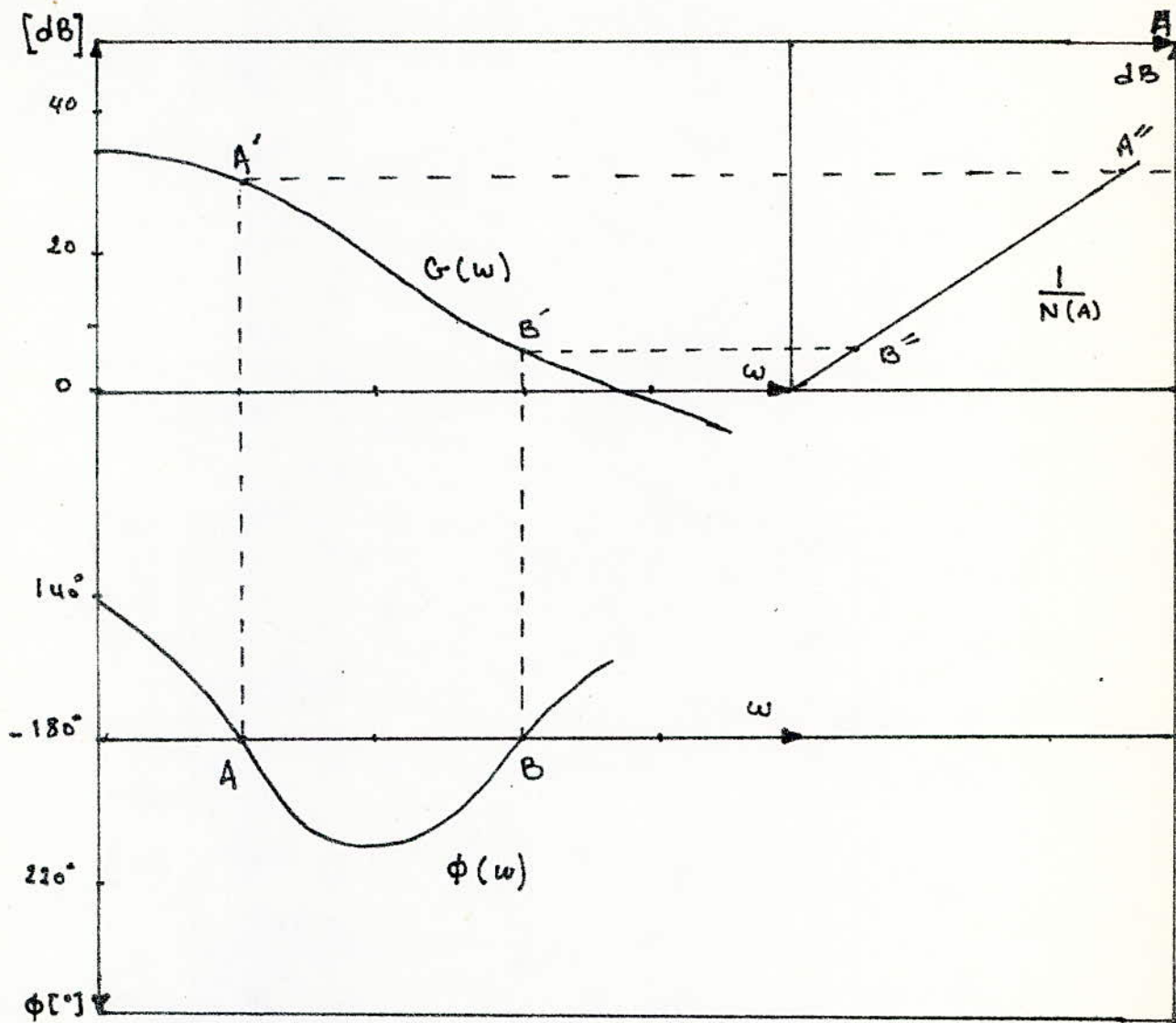
l'équation (1) peut s'ecrire :

$$\ast \quad \phi(\omega) = (2k+1)\pi \quad \text{(2)}$$

$$\ast \quad G(\omega) = \frac{1}{N(A)} \quad \text{(3)}$$

la methode de resolution consiste a tracer les courbes de gain et phase. ainsi que la courbe

ainsi que la courbe représentant la transmittance de l'organe non linéaire. $\frac{1}{N(A)}$.



la courbe de phase de la figure ci-dessus montre que les seules fréquences d'auto-oscillations possibles sont ceux des points A, et B.

et d'autre part pour que ces oscillations existent effectivement il faut qu'il existe une valeur de "A" qui satisfait à l'équation ③
la courbe. $\frac{1}{N(A)}$ montre quelle existe.

- Discussion:

on considère qu'une perturbation extérieure provoque un accroissement de l'amplitude de l'oscillation.

le point A'' sur la courbe $\frac{1}{N(A)}$ se déplace vers la droite et par conséquent les points (A', A) se déplacent vers la gauche, donc entraîne une marge de phase positive. donc un amortissement positif qui tend à réduire l'amplitude de l'oscillation.

de même pour le cas contraire, : une diminution de l'amplitude de $\frac{1}{N(A)}$ provoque un amortissement négatif qui tend à augmenter l'amplitude d'oscillation.

ainsi toute variation d'amplitude de l'oscillation entraîne une action correctrice en sens contraire. l'oscillation est donc stable.

alors que l'oscillation $B.B'.B''$ est instable. car la variation d'amplitude. n'entraîne pas une action correctrice dans l'autre sens.

APPLICATION AU SYSTEME REEL .

la transmittance du systeme lineaire en boucle ouverte est donnée par :

$$H_0(p) = \frac{K}{p(1+Tp)}$$

soit

$$H(j\omega) = \frac{K}{j\omega(1+jT\omega)}$$

$$K = \frac{1}{K_R} \quad \text{et} \quad T = \frac{J R}{K_m \cdot K_E \cdot K_R}$$

$$K = 1,26 \quad T = 0,15 .$$

$$\frac{1}{N(A)} = \left(\frac{4 V_0}{\eta A} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x_0}{A}\right)^2} \right)^{-1} .$$

$$\frac{1}{N(A)} = 0,006 \cdot A \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,11}{A}\right)^2}} .$$

la representation graphique du module et de la phase de l'element lineaire ainsi que le module de l'organe non lineaire est donné par la figure I-7 .

Discussions :

on voit que d'après la fig I-7 la courbe de phase tend asymptotiquement vers -180° pour des pulsations infiniment grandes ce qui correspond a une amplitude de

de l'oscillation très importante.

on remarque toute fois que la marge de phase est d'autant plus faible que l'erreur est petite.

ainsi pour une faible amplitude de l'erreur la marge de phase est faible après une perturbation le régime transitoire est oscillant avec un amortissement et une période tendant tout deux vers zéro avec l'amplitude A .

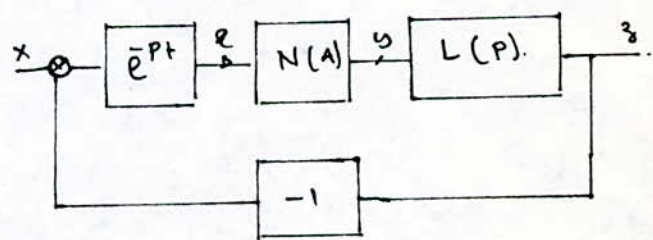
REMARQUES:

1 - compte tenu de la zone morte du réducteur de vitesse mécanique constitué par 2 roues dentées qui présente un certain jeu entre l'arbre du moteur et l'arbre de sortie. q'on note T_r .

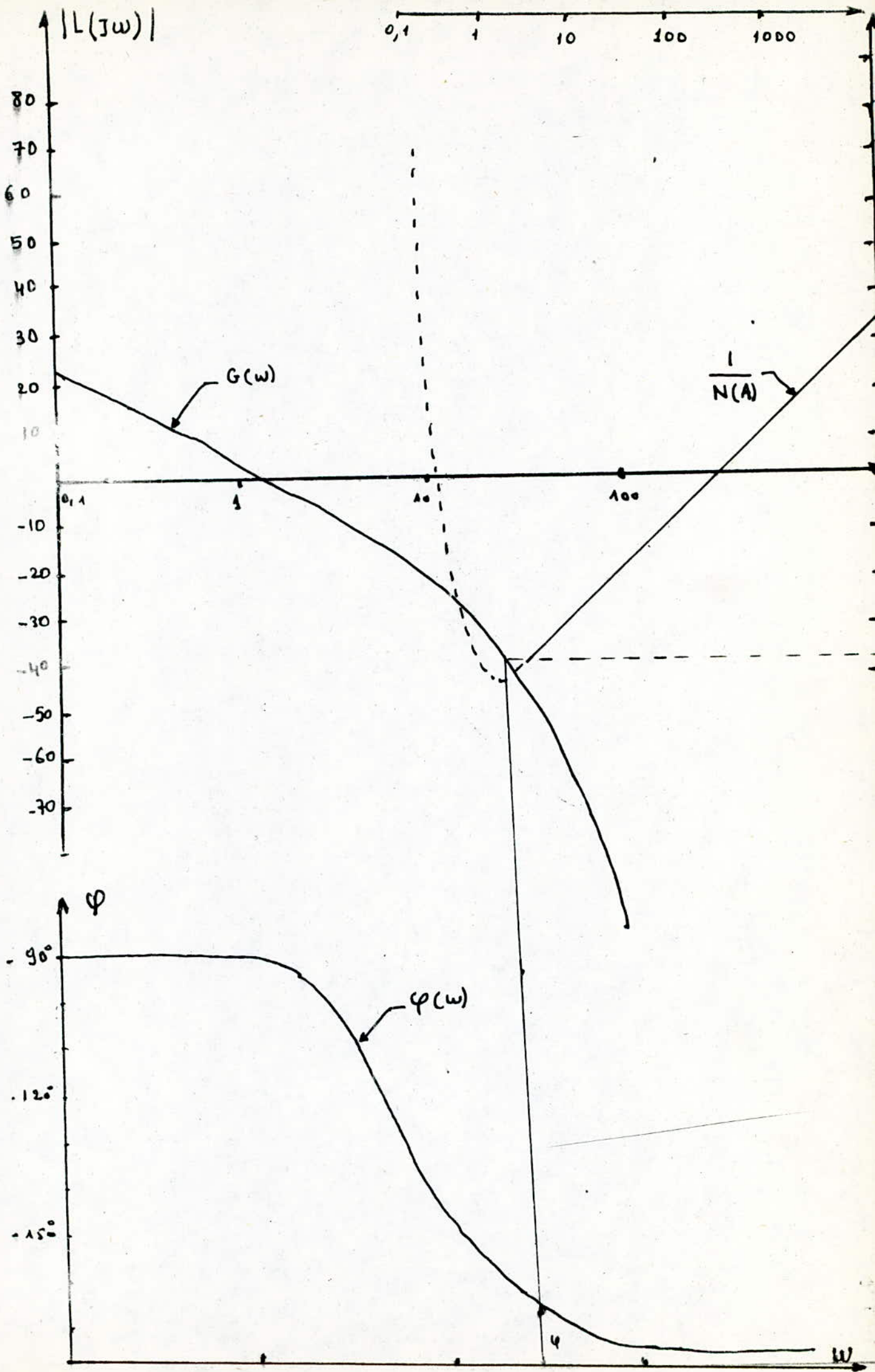
ce jeu en pratique peut engendrer un temps de retard, et de la même manière en tenant compte du temps de retard du calculateur T_c on aura un temps total de $T = T_r + T_c$ dont la transmittance est

$$T(P) = \frac{-PT}{e^{-PT}}$$

l'influence de la phase de T est repercuté sur la phase de $L(P)$ qui sera décalée de $-T\omega$.



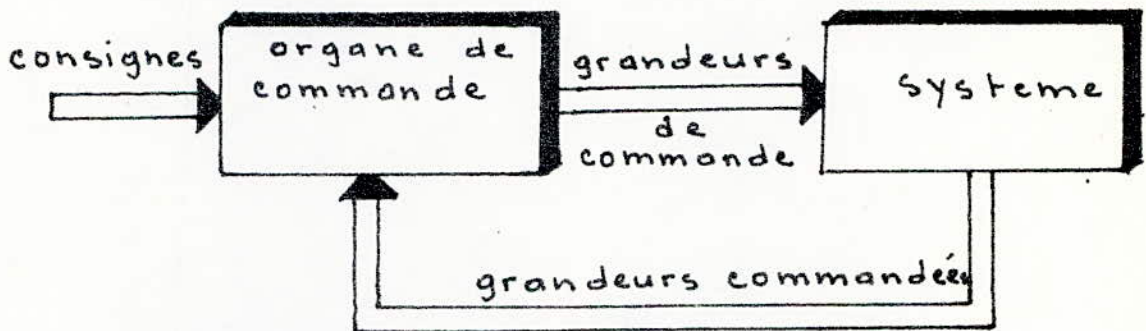
toute fois les régimes d'auto oscillations restent toujours dans les pulsations grandes. dont le régime transitoire est suffisamment amortit



- CHAPITRE II -

LA COMMANDE AUTOMATIQUE.

en règle générale la notion commande automatique est associée à l'ensemble constitué par le système et l'organe de commande qui assure le fonctionnement automatique du système. tandis qu'elle évoque en réalité un fonctionnement en chaîne fermée.



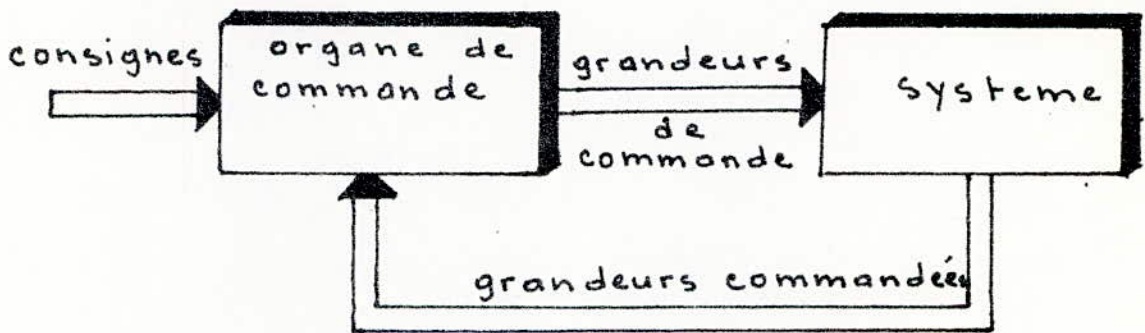
cependant l'organe de commande développe à sa sortie un signal en fonction du signal de retour de la grandeur commandée, selon un programme préalable contenant les grandeurs de consigne.

le programme permet un langage facile entre l'opérateur (être humain) et le système à travers l'organe de commande qui adopte à son tour un langage avec le système.

- CHAPITRE II -

LA COMMANDE AUTOMATIQUE.

en règle générale la notion commande automatique est associée à l'ensemble constitué par le système et l'organe de commande qui assure le fonctionnement automatique du système. tandis qu'elle évoque en réalité un fonctionnement en chaîne fermée.



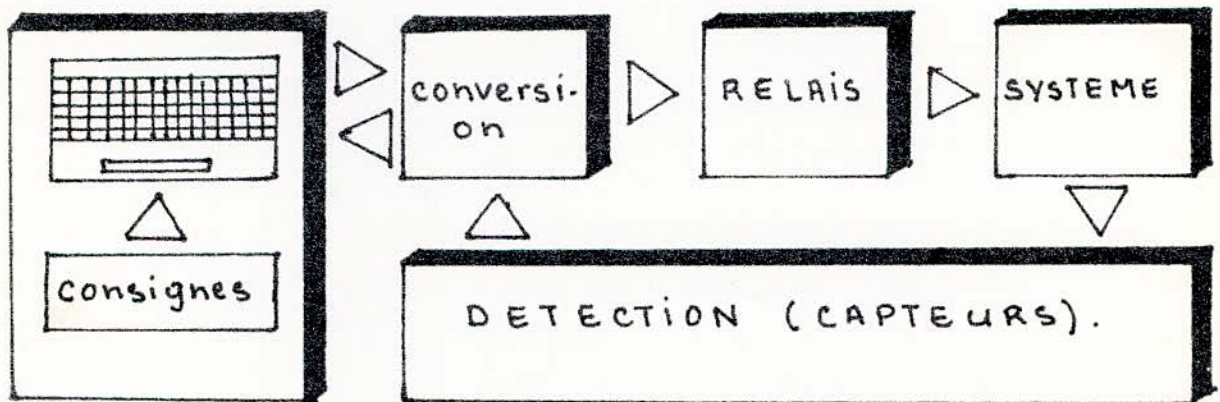
cependant l'organe de commande développe à sa sortie un signal en fonction du signal de retour de la grandeur commandée, selon un programme préalable contenant les grandeurs de consigne.

le programme permet un langage facile entre l'opérateur (être humain) et le système à travers l'organe de commande qui adopte à son tour un langage avec le système

II - 1 - STRUCTURE DE LA COMMANDE -

L'organe de commande est à l'origine un calculateur numérique qui traite des nombres et capable d'exécuter des calculs assez complexes.

L'utilisation d'un calculateur numérique dans un asservissement en boucle fermée nécessite des organes qui assurent le signal de retour qui sont à l'origine des capteurs ainsi que les organes de conversions qui jouent le rôle d'interprète entre le calculateur et le monde extérieur.



La figure ci-dessus représente le déroulement d'un asservissement en boucle fermée assisté par micro ordinateur "calculateur" muni d'un organe de traitement qui reçoit l'ensemble des informations saisies par l'organe

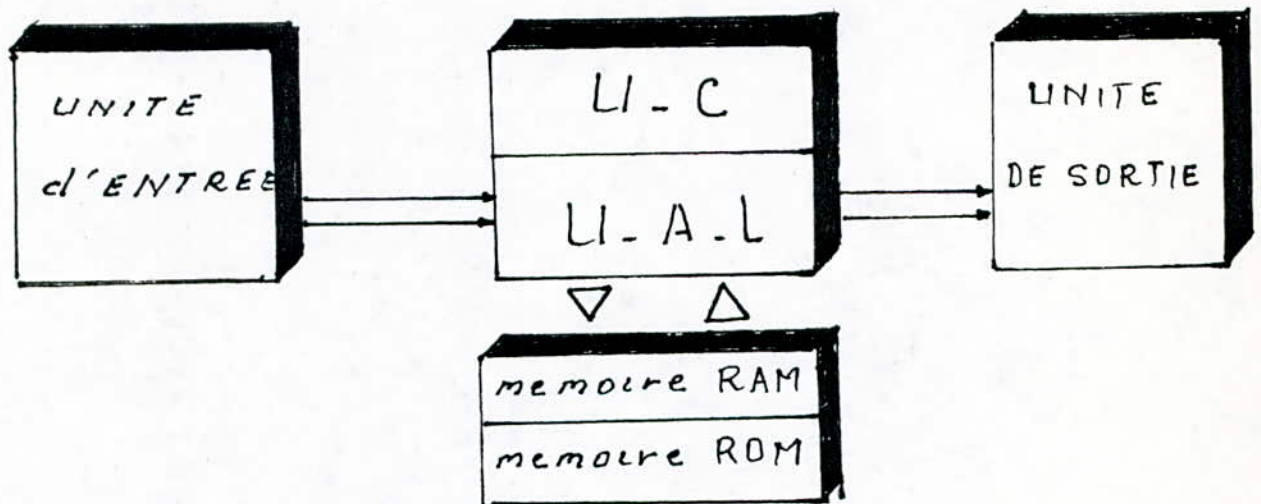
de detection .

les actionneurs qui sont à l'origine, dans le cas tout a fait general des organes de commande de puissance " RELAIS "

II-2. CALCULATEUR NUMERIQUE

Le calculateur numérique, par ailleurs est un système complet de calcul construit autour d'une unité de contrôle et de traitement, et il présente éventuellement une unité centrale de la commande.

Les principaux constituants d'un calculateur numérique sont illustrés dans la figure ci-dessous où l'unité centrale de traitement comporte à la fois l'unité de contrôle et l'unité arithmétique et logique.



II-2-1 unité de contrôle - UC -

Son rôle est de lire les instructions mémorisées, de les décoder, et de les exécuter ainsi que le contrôle du flux d'informations dans le bus de données et le bus d'adresses.

II.2-2. unité arithmétique et logique.

Le traitement des données est une fonction qui comprend à la fois les calculs et la manipulation des données.

les calculs sont effectués par les circuits constituant l'unité arithmétique et logique.

II.2-3 unité d'entrées et sorties.

c'est un dispositif qui sert à faire entrer et sortir une information, et qui présente le moyen de communication avec l'homme, qui peut être un clavier ou une bande magnétique. utilisée comme unité d'entrée, et l'unité de sortie peut être une imprimante ou un écran.

II.2-4 mémoire vive - RAM.

c'est une mémoire à lecture et écriture, qui contient les données et les résultats définitifs qui seront perdues une fois que la mémoire n'est pas alimentée.

II.2-5 mémoire morte - ROM.

c'est une mémoire à lecture seulement dans laquelle les instructions sont écrites une fois pour toute et qui ne seront pas perdues même si la mémoire n'est pas alimentée.

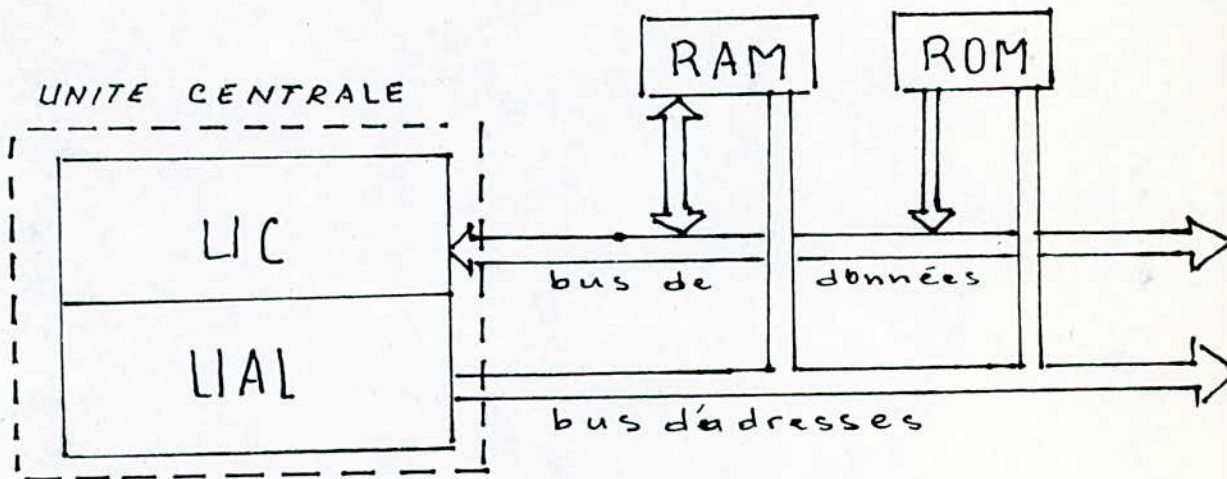
II-2-6. bus de données

Il est constitué par un ensemble de fils par lesquels transitent les données, et les résultats de calculs et les caractères à imprimer.

II-2-7. bus d'adresses.

C'est par ce bus que l'unité centrale de traitement et de contrôle donnera l'adresse de la position mémoire dont elle peut lire le contenu.

La figure ci-dessous représente le mode de communication entre l'unité centrale de traitement et de contrôle et les différentes mémoires par l'intermédiaire des bus.



II-3 les convertisseurs .

II-3.1 capteur.

c'est un potentiometre monte sur l'arbre du moteur qui delivre une tension proportionnelle à la position de l'arbre .

II-3.2. but de la conversion.

les grandeurs physiques qui nous interessent dans cette realisation sont à notre echelle analogiques . pour les prelever on se sert de capteurs dont le role consiste à traduire la position par un signal electrique exploitable .

ce signal de nature analogique sera transmis au calculateur qui ne traite que des nombres , d'où la necessité de la conversion numerique analogique et numerique analogique pour assurer le langage entre le systeme à commander et l'organe de commande .

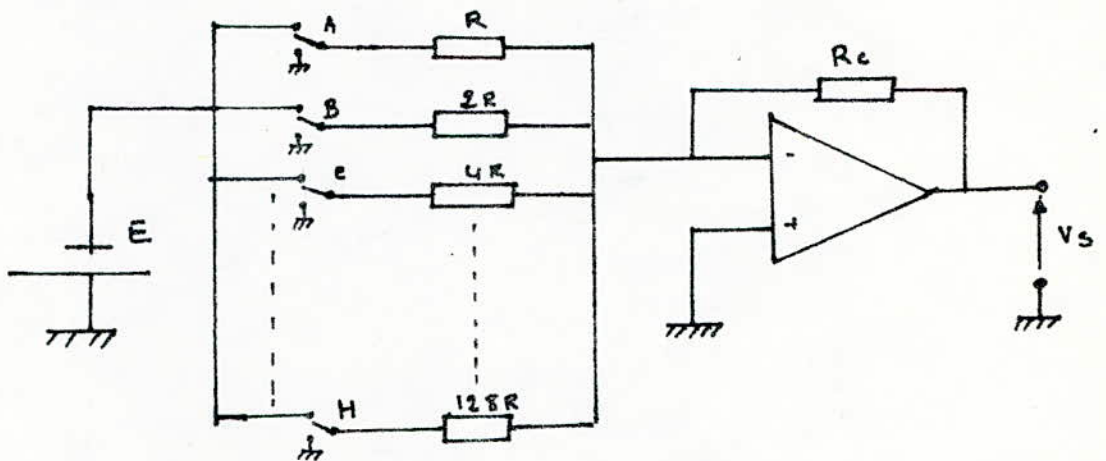
II 3.3. convertisseurs numerique analogique -(CNA)-

le CNA est un organe qui transforme une information numerique en un signal analogique - tension - qui sera proportionnelle à la valeur analogique - quantum - attribué au poids 2^0 .

Principe de la conversion N-A

la constitution d'un CNA est basée sur un organe souvent utilisé dans l'électronique linéaire c'est l'amplificateur opérationnel qui joue le rôle d'un sommateur de courant

Par exemple un CNA possédant 8 entrées A, B, ..., H sous forme de case qui peuvent prendre la valeurs 0 ou 1 en code binaire selon les bits qu'elle représente. Ces entrées être connectées par un commutateur soit à la masse soit à +E.



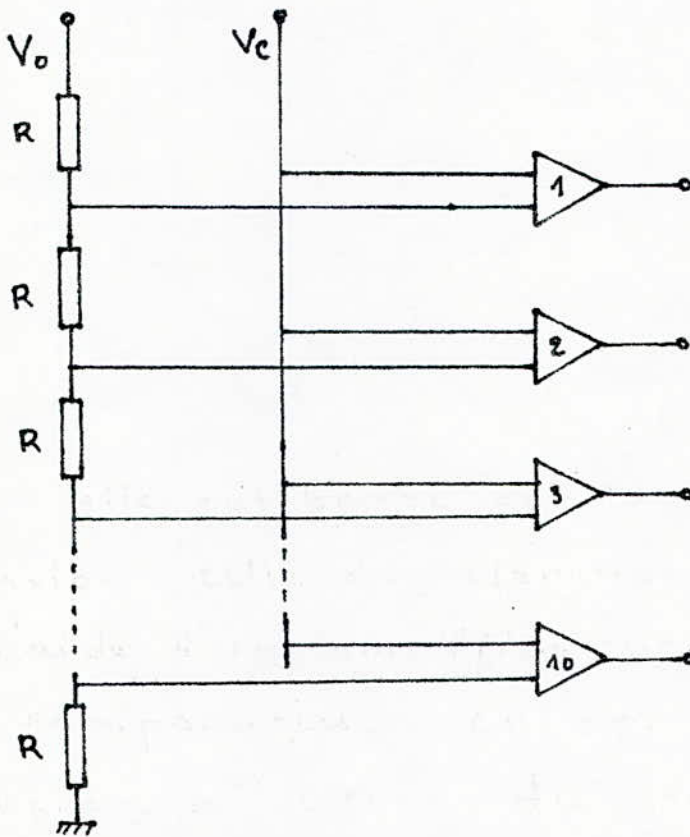
pour le nombre binaire 01100000 on aura à la sortie une tension correspondant à 192 fois le quantum.

$$V_s = -E \left(\frac{R_f}{2R} + \frac{R_f}{4R} \right).$$

II.3.4. convertisseur Analogique numérique.

c'est une opération destinée à transformer une grandeur électrique variable d'une manière continue dans le temps en code binaire

elle est basée sur la comparaison de deux tensions : celle de référence et celle à convertir à l'aide d'un amplificateur opérationnel monté en comparateur. en appliquant ces deux tensions à l'entrée du comparateur et l'état de sortie est considéré comme 0 ou 1.



V_0 : est la tension de référence

V_c : est la tension à convertir

la figure ci-dessus représente un codage d'une tension sur une plage de 0 à 10 volts en utilisant 10 comparateurs.

selon la sortie possible du comparateur qui sera 0 ou 1 indiquera si la tension à convertir V_c et au dessus ou au dessous de la tension de référence V_0 .

CHAPITRE . III .

ANALYSE DE LA COMMANDE .

Le fonctionnement du système réel est basé sur des moteurs à courant continu à flux constant assurée par aimant permanent . et qui présentent des performances du point de vue souplesse d'utilisation pour la production . du mouvement du système présentant 3 parties mobiles soit 3 mouvements :

- translation de tout le système
- rotation de la plate forme (Tour)
- montée et descente du bras .

Le contrôle de fonctionnement de ces moteurs nécessite une précision qui sera assurée par un micro ordinateur qui permet une commande performante de la ou l'angle de rotation . dans un sens ou dans l'autre .

tenant compte de la précision , un programme de la position d'arrêt du système est vital pour éviter toute instabilité c'est à dire les oscillations autour de la position de consigne .

grâce au relais qui donne l'ordre par tout ou rien les moteurs fonctionnent en mode - marche - arrêt selon une commande qui dépend essentiellement de la position de l'objet à un certain temps donné .

la position de l'objet est définie par ces coordonnées cartésiennes, qui doivent appartenir au domaine d'action du système chargeur.

le contrôle précis des moteurs nécessite donc la connaissance de la distance (angle) qu'il faut parcourir sous l'influence du moment d'inertie des masses tournantes, à partir du moment du freinage.

cette distance (angle) sera prévu pour qu'à l'arrêt le chargeur se trouve dans la position la plus proche possible de la consigne.

III-1. mise en équations.

les trois moteurs sont identiques. l'étude sera donc consacrée à un seul.

cependant les paramètres de fonctionnement seront attribués à chaque moteur séparément.

- équation électrique.

$$U = E + L \frac{dI}{dt} + RI \quad (1)$$

L étant très petit devant R, l'équation 1 donc devient :

$$U = E + RI \quad (2)$$

- equation mecanique

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \Gamma_m - \Gamma_R \quad (3)$$

le couple de frottement étant négligé

J : moment d'inertie

Γ_m : couple moteur

Γ_R : couple résistant.

$$\Gamma_m = K_m I.$$

$$E = K_E \Omega.$$

de l'équation 2 on tire :

$$I = \frac{U - E}{R} = \frac{U}{R} - \frac{K_E \Omega}{R} \quad (4)$$

en tenant compte de l'équation 4, l'équation 2 devient :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + \frac{K_m K_E}{R} \Omega = \frac{K_m U}{R} - \Gamma_R \quad (5)$$

posons : $\frac{K_m \cdot K_E}{R} = f$.

$$\frac{K_m \cdot U}{R} - \Gamma_R = \Gamma.$$

l'équation 5 s'écrit alors :

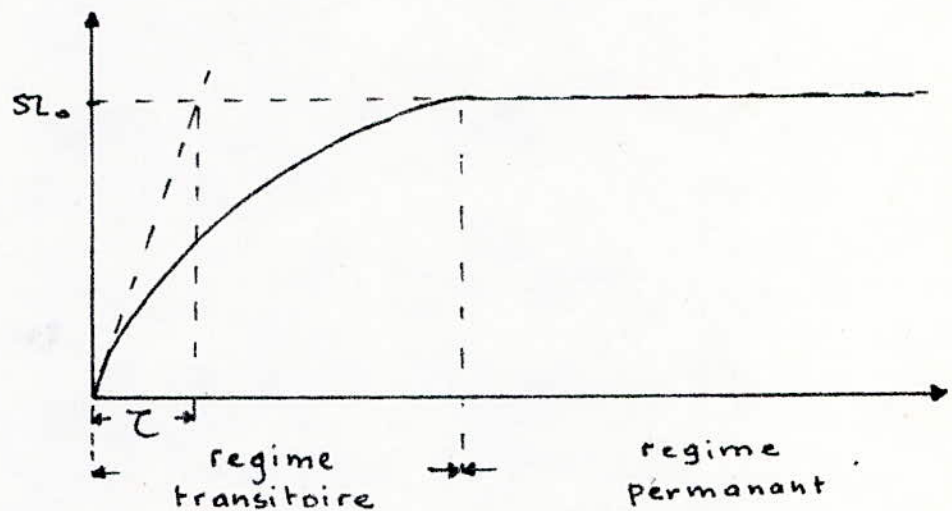
$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega = \Gamma \quad (6)$$

cette équation 6 admet pour solution avec des conditions initiales nulles :

$$\Omega_1(t) = \Omega_0 \left(1 - e^{-t/\tau} \right).$$

$\tau = \frac{J}{f}$: constante de temps mécanique.

$\Omega_0 = \frac{\Gamma}{f}$: amplitude de la vitesse maximale pour une tension donnée -U-



la figure ci-dessus représente la variation de la vitesse en régime transitoire pendant le démarrage et en régime permanent.

III - 2. freinage :

le type de freinage adopté et le freinage par simple coupure de l'alimentation. ou freinage par inertie.

si à un instant donné on coupe l'alimentation la vitesse va décroître à partir de la valeur de $\Omega_1(t)$ au même instant pour s'annuler sous l'action du couple résistant.

on note $\Omega_2(t)$ comme la vitesse instantanée de la phase du freinage.

après la coupure de l'alimentation. l'équation de la vitesse devient :

$$J \frac{d\Omega_2}{dt} + f \Omega_2 = -\Gamma_R$$

la solution de cette équation est de la forme :

$$\Omega_2(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - \frac{\Gamma_R}{f}$$

A est une constante qui dépend de conditions initiales.

on commence à dater pour la deuxième phase à partir de T le temps de freinage qui sera pris comme origine.

soit :

$$\text{à } t=0 \quad \Omega_2(0) = \Omega_1(T)$$

$\Omega_2(0)$ sera l'amplitude maximale de $\Omega_2(t)$.

on en déduit :

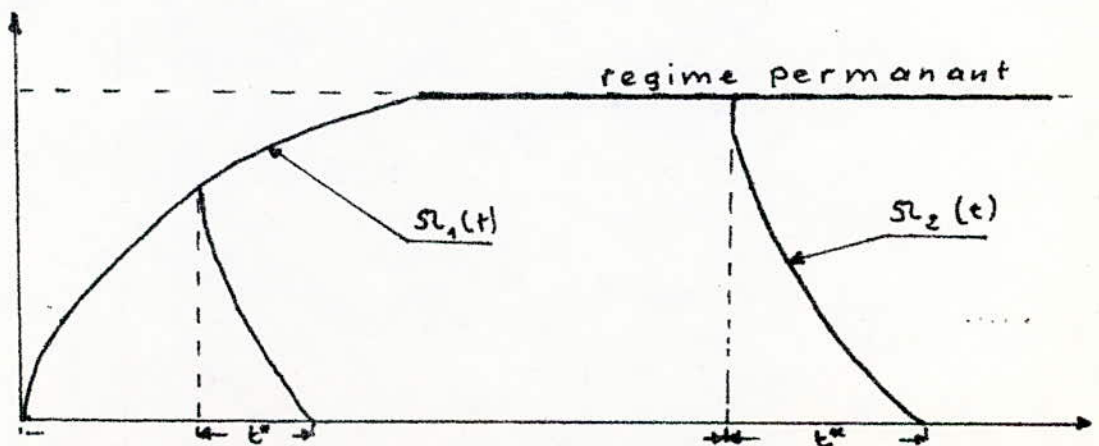
$$A = \Omega_0 \left(1 - e^{-T/\tau}\right) + \frac{\Gamma}{f}$$

d'où l'expression définitive de $\Omega_2(t)$.

$$\Omega_2(t) = \left(\frac{\Gamma + \Gamma_R}{f} - \Omega_0 e^{-T/\tau}\right) \cdot e^{-t/\tau} - \frac{\Gamma_R}{f}$$

cette vitesse est nulle à temps $T + t^*$

$$\text{où : } t^* = \tau \ln \left[\frac{f}{\Gamma_R} \left(\frac{\Gamma + \Gamma_R}{f} - \Omega_0 e^{-T/\tau} \right) \right]$$



du moment du démarrage jusqu'à l'arrêt le moteur a dû passer par deux phases :

- la phase démarrage avec la vitesse $\Omega_1(t)$ dans laquelle il effectue un angle θ_1 , tel que

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \Omega_1(t).$$

sur un intervalle de temps $[0, T]$.

$$\theta_1(t) = \Omega_0 \left(T + \tau \exp(-T/\tau) - 1 \right) \text{ rd.}$$

- la phase du freinage à la vitesse $\Omega_2(t)$ et dans ce cas il effectue l'angle θ_2 , égale à l'intégrale de $\Omega_2(t)$ sur l'intervalle $[0, t^*]$.

soit :

$$\theta_2(t) = \tau \left(\frac{\Omega_1 + \Omega_2}{f} \right) \left(1 - e^{-t^*/\tau} \right) - \tau \Omega_0 e^{-T/\tau} \left(1 - e^{-t^*/\tau} \right) - \frac{\Omega_2 t^*}{f}$$

et l'angle totale qu'il a dû faire dans les 2 phases est :

$$\theta(t) = \theta_1(t) + \theta_2(t).$$

Connaissant les expressions analytiques de θ_1 , θ_2 et θ qui sont respectivement, la position avant le début du freinage, la position que doit parcourir le système pendant le freinage après la coupure de l'alimentation, et la position en fin du trajet effectuée dans les deux phases.

il est nécessaire donc d'établir un programme de calcul pour le contrôle de l'évolution instantanée de la position du chargeur.

le problème posé est de faire amener le chargeur à un certain point déterminé par ces coordonnées cartésiennes, ce qui revient à dire à faire tourner les moteurs d'un angle θ_i attribué à chacun de ces moteurs cet angle diffère d'un moteur à l'autre suivant le point de destination.

on va raisonner sur un seul moteur car c'est le même procédé qu'on applique aux deux autres.

supposons qu'un moteur subit l'ordre de tourner d'un angle θ_0 désigné par la position consigne, qu'on fixe au départ.

$$\theta_0 = \theta_1 + \theta_2.$$

l'ordre de marche donné au moteur doit être maintenu. jusqu'au parcours de l'angle θ_1 telle que :

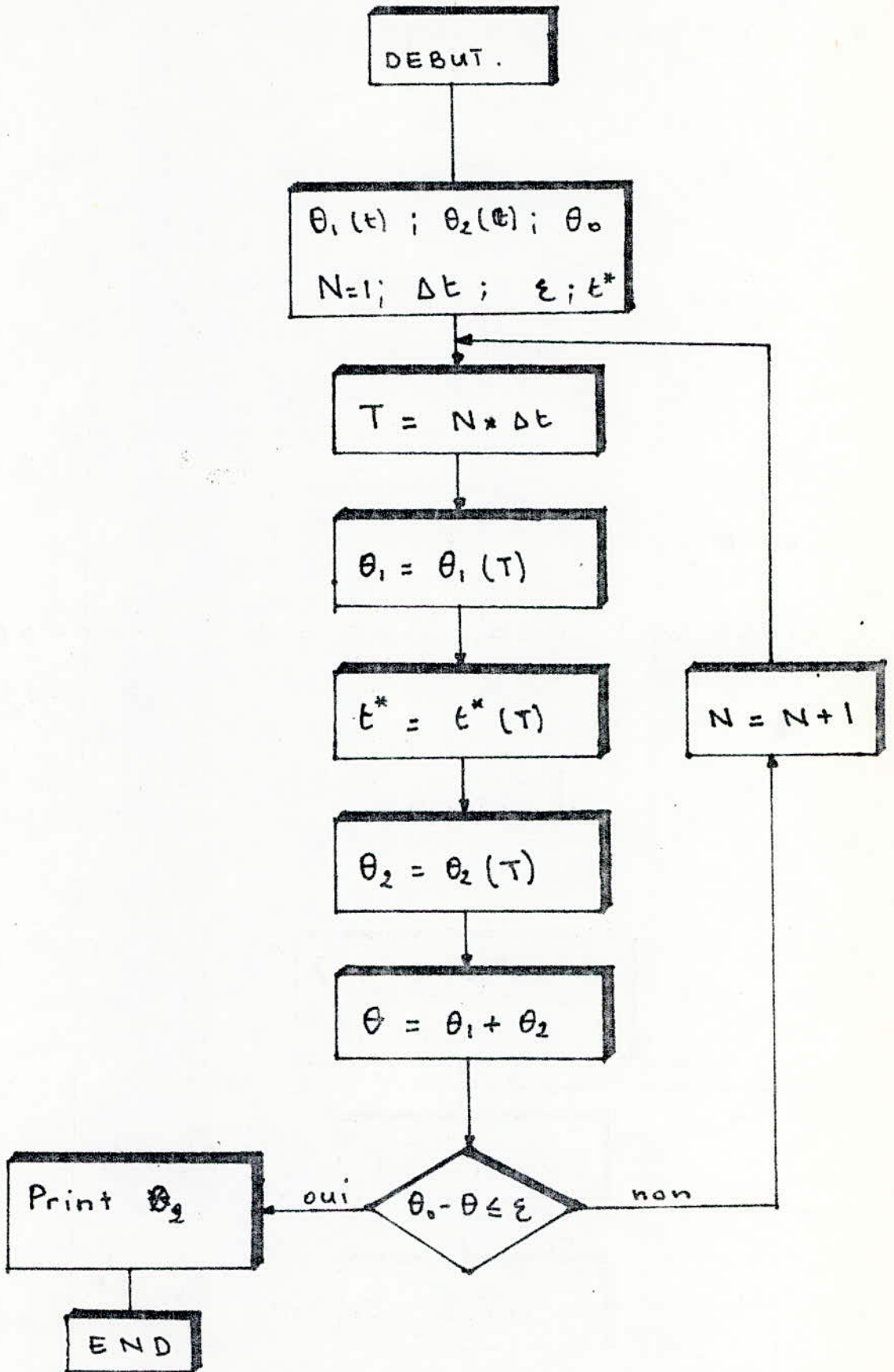
$$\theta_1 + \theta_2 = \theta \quad \text{et} \quad \theta = \theta_0.$$

cela exige la connaissance θ_1 à chaque instant, et savoir si à partir de cette date la consigne sera atteinte après le parcours fait pendant le freinage.

l'organigramme suivant permet de calculer $\theta_2(t)$ à chaque instant.

la position $\theta_2(t)$ est donnée directement par le capteur (potentiomètre).

la somme $\theta = \theta_1 + \theta_2$ doit être égale à la consigne θ_0 .



remarques:

- pour le moteur assurant la translation du chargeur l'angle effectué pendant la rotation est convertit en distance linéaire

en tenant compte des reducteur mécanique et du diamètre des roues. on peut écrire:

$$X_1 = \frac{d}{2} \cdot K_r \cdot \theta_1 \quad [\text{cm}]$$

$$X_2 = \frac{d}{2} \cdot K_r \cdot \theta_2 \quad [\text{cm}].$$

- le ε introduit dans l'organigramme précédent pour tester la différence entre l'angle de consigne et l'angle effectué est égal au quantum.

$$\varepsilon = \frac{5}{255} \text{ en volts.}$$

ou

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{255} \text{ rd. pour le bras et la tour}$$

$$\varepsilon = \frac{20\pi}{255} \text{ rd. pour la translation du chariot.}$$

III-3. Remarque: sur la rapidité d'exécution

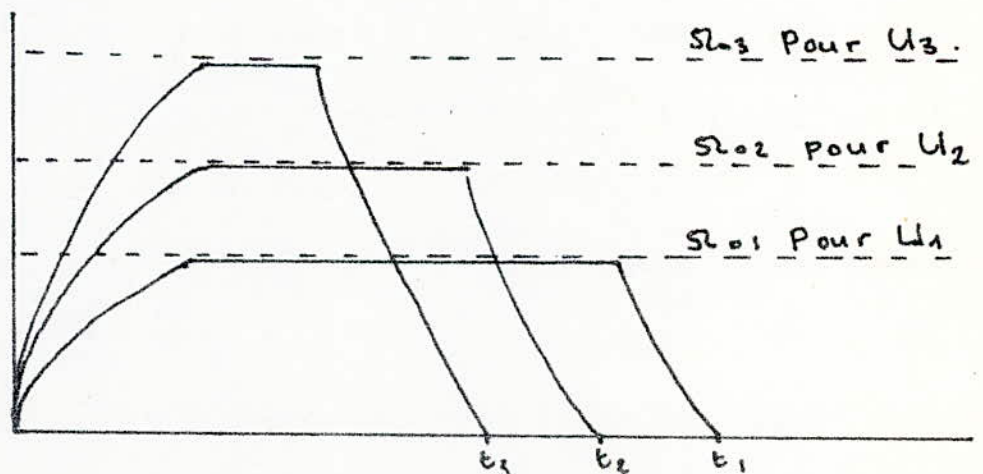
le système - chargeur - est destiné à exécuter ces différents mouvements qui sont liés à la tâche demandée, dans des intervalles de temps bien déterminés.

il est donc très avantageux de minimiser ce temps, qui est d'autant plus petit que la vitesse est grande.

de sa part la vitesse est liée à la tension d'alimentation des moteurs.

dans le cas d'une commande par relais qui donne tout ou rien, on est censé donc d'agir sur ce "tout" qui n'est autre que la tension d'alimentation.

la figure ci-dessous montre l'influence de la tension sur la rapidité d'exécution d'une même distance (ou angle).



l'air à l'intérieur de chaque courbe est conservé et constitue l'angle (ou distance) de consigne, il est effectué en un temps minime pour une tension grande.

- CHAPITRE IV -
- PARTIE PRATIQUE -

IV - 1 - Préliminaires

calculateur :

le calculateur est du type - SINCLAIRE ZX spectrum - dont le microprocesseur est le ZX80.
et la fréquence d'horloge 25 MHz.
le langage utilisé est le basic.

moteurs :

3 moteurs identiques à courant continu
à flux constant assuré par un aimant permanent
Puissance 40 WAts
1 paire de pôles. ($2P = 2$).
reducteur à vis incorporé de rapport $K_R = \frac{1}{49}$

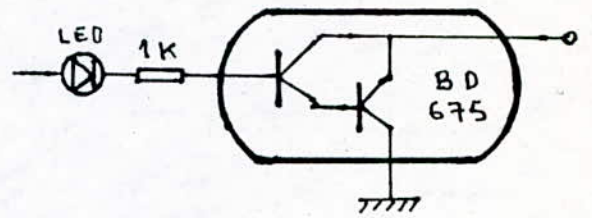
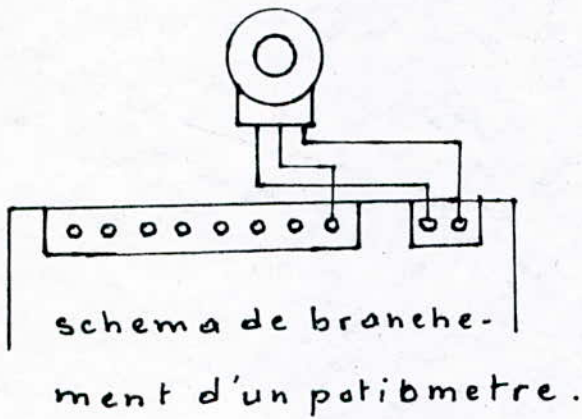
Capteurs :

3 potentiomètres dont :
2 de 1 tour de gain : $K_P = \frac{5}{2\pi}$.
et 1 multitours - 10 tours - $K_P = \frac{5}{20\pi}$.

Interfaces :

- cartes du type - SPEA - 8 entrées analogiques
dont la tension est comprise entre 0 et 5 Volts
en provenance des capteurs avec la précision de
0,7% et comporte une alimentation stabilisée pour capteurs

- carte de sortie - SPES - a 8 sortie binaires dont l'etat "1" correspond à l'ordre de fonctionnement .



schema d'une sortie

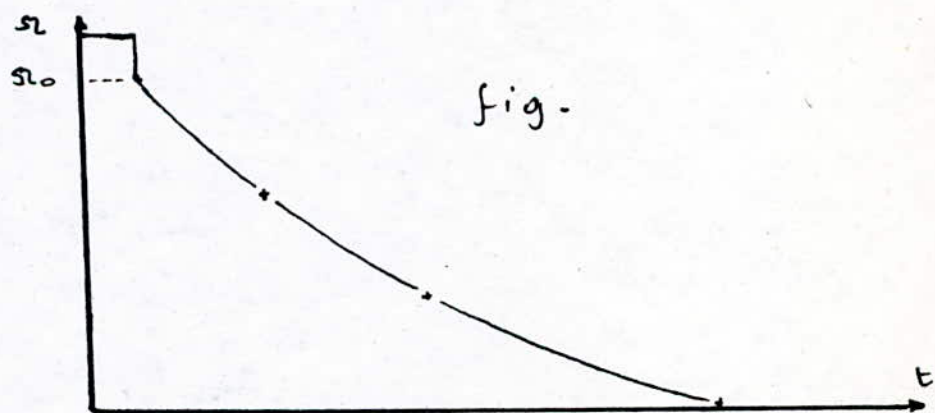
- Reducteurs :

2 reducteurs de vitesse constitués par des roues dentées de rapport :

$$\frac{1}{N_1} = 0,79 .$$

$$\frac{1}{N_2} = 0,56 .$$

IV-2 - Identification des machines :



La figure ei-dessus represente l'allure de la vitesse pendant le freinage deduite de la variation de la F.e.m - $E = K\omega$ - visualisée sur oscilloscope .

on en déduit :

$$\tau = 0,12 \text{ s.}$$

et par essais : $K_E = 1,67 \text{ Wb. rad}^{-1}$

: $K_M = 1,67 \text{ Wb. rad}^{-1}$

: $R = 1 \Omega$

$$f = \frac{K_E \cdot K_M}{R} = 2,79. \text{ Kg. M}^2. \text{ S}^{-1}.$$

$$J = \tau f = 0,33. \text{ Kg. M}^2.$$

IV-3. Nomenclature des différents paramètres géométriques du chargeur.

$R = 49,5 \text{ cm}$: longueur du Bras :

$H = 38,5 \text{ cm}$: hauteur de l'articulation du bras par rapport au sol.

$h = 17,0 \text{ cm}$: longueur de la Pince.

$X_{\max} = 191 \text{ cm}$: distance maximum que peut parcourir le chargeur suivant l'axe Ox .

$Z_{\max} = 70,2 \text{ cm}$: hauteur maximum du bout de la pince par rapport au sol.

$Y_{\max} = \pm 49,5$ portée maximum sur l'axe Oy .

(X_c, Y_c, Z_c) : coordonnées du point de charge

(X_D, Y_D, Z_D) : coordonnées " " " de charge

$C_C \phi, C_T \phi, C_B \phi$: consignes en binaire de la tâche de charge

$(D_C \phi, D_T \phi, D_B \phi)$ consignes en binaire de la tâche de decharge.

IV - 4 fonctionnement du chargeur

Le chargeur est conçu pour exécuter deux tâches distinctes : charge et décharge.

- la charge est d'aller chercher un objet se trouvant en un point donné par des coordonnées cartésiennes dans l'espace. (X_c, Y_c, Z_c) .

- la décharge c'est de déposer cet objet en un autre point dans le même repère mais de coordonnées (X_D, Y_D, Z_D)

Vu les contraintes imposées par les capteurs sur le domaine d'évolution du chargeur, les coordonnées de chaque tâche doivent donc appartenir à ce domaine. dont la représentation détaillée a donné par la figure IV - 4.

Il s'avère nécessaire donc d'établir un programme qui permet de rejeter les points se trouvant au-delà de la portée du chargeur

Ce programme est donné au paragraphe IV - 4.

Une fois les coordonnées sont acceptées les ordres commencent à être exécutés. suivant un programme en BASIC dont le principe est le suivant :

il s'agit de relever la position du chargeur donnée par les capteurs et de la comparer à une valeur de consigne qui a été convertie

en binaire à l'aide du Programme IV-4:

le résultat de la comparaison est l'erreur

$$E = \text{CONSIGNE} - \text{MESURE}.$$

le signe de l'erreur impose le sens de marche

Pour donner l'ordre de marche, on adresse à travers la carte de sorties "63" l'instruction : `OUT 63, X`

où X est le poids du bit choisit pour cet ordre .

Pour mesurer on adresse à la carte d'entrées "31" les 2 instructions :

`OUT 31, X`

`LET M = IN31.`

où M est la mesure relevée de l'entrée X .

IV - 9 Programme d'acceptation des coordonnées et leur conversion en binaire.

```
10 PRINT " donner les coordonnees en cm" :  
   Pause 100 : cls  
20 INPUT " Xc = " ; Xc : PRINT " attention Xc ≤  
   240.5 "  
30 INPUT " Yc = " ; Yc : PRINT " attention Yc ≤ 49.5 "  
40 INPUT " Zc = " ; Zc : PRINT " attention Zc ≤ 70,2 "  
50 LET R = 49,5  
60 LET H = 38,5  
70 LET Xmax = 191  
80 LET T = acos((Zc - H)/R)  
90 LET S = Xc↑2 + Yc↑2  
100 LET Q = R↑2 * (SINT)↑2.  
110 IF Xc ≤ R THEN GOTO 130  
120 IF Xc >= Xmax THEN GOTO 150  
130 IF S >= Q THEN GOTO 165 : LET n=1  
140 PRINT " augmenter X ou Y ou bien diminuer Z "  
   : Pause 100 : CLS : GOTO 10  
150 IF S <= Q THEN GOTO 165 : LET n=1  
160 PRINT " augmenter Z ou bien diminuer X ou  
   Y " : PAUSE 100 : CLS : GOTO 10  
165 PRINT " coordonnées acceptées " : PAUSE  
   100 : CLS  
170 LET Xd = Xc  
180 LET Yd = Yc
```

```

180 LET ZD = ZC : LET n = 0 : GOTO 10
190 IF n = 0 THEN GOTO 10
200 GOTO 300
300 REM *** CONVERSION en binaire ***
310 LET CC0 = ((XC - (R*SINT)) * SQRT(1 - YC / (R *
SINT))) * 255 / (20 * (3.14)12 * 6.1)) * 0.78
320 LET CT0 = ((YC / (R * SINT)) * 255) / (2 * 3.14)
330 LET CB0 = (T * 255) / (2 * 3.14)
340 LET TD = ACOS((ZD - H) / R) .
350 LET DC0 = ((XD + R * SIN TD * SQRT(1 - YD / (R *
SINTD))) * 255 / (20 * (3.14)12 * 6.1)) * 0.78
360 LET DB0 = (T * 255) / (2 * 3.14)
370 LET DT0 = ((YD / (R * SINT)) * 255) / (2 * 3.14)
380 GOTO 500
500 REM *** PROGRAMME D'EXECUTION
DES ORDRES ***

```

IV - 5 - PROGRAMME DE LA COMMANDE -

```

510 GOSUB 600
600 OUT 31, 0
610 LET XM = IN 31
620 LET E = CC0 - XM
630 PRINT XM; " "; CC0; " "; "dech chariot"
640 IF E > 5 THEN OUT 63, 1 : LET m = 1
650 IF E < -5 THEN OUT 63, 4 : LET m = 4
660 IF ABS E <= 5 THEN OUT 63, 0 : LET m = 0
670 IF m <> 0 THEN GOTO 510
680 IF m = 0 THEN GOTO 700
690 RETURN
700 GOSUB 710
710 OUT 31, 1
720 LET YM = IN 31
730 LET E = CT0 - YM
740 PRINT YM; " "; CC0; " "; "charge Tour"
750 IF E > 5 THEN OUT 63, 128 : LET m = 128
760 IF E < -5 THEN OUT 63, 2 : LET m = 2
770 IF ABS E <= 5 THEN OUT 63, 0 : LET m = 0
780 IF m <> 0 THEN GOTO 700
790 IF m = 0 THEN GOTO 810
800 RETURN
810 GOSUB 820
820 OUT 31, 2
830 LET ZM = IN 31

```

```

840 LET E = CBO - ZM
850 PRINT ZM; " "; CBO; " "; " charge bras"
860 IF E > 5 THEN OUT 63, 16 : LET m = 16
870 IF E < -5 THEN OUT 63, 64 : LET m = 64
880 IF ABS E <= 5 THEN OUT 63, 0 : LET m = 0
890 IF m <> 0 THEN GOTO 920
895 IF m = 0 THEN GOTO 910
900 RETURN
910 GOSUB 920
920 OUT 63, 32 : PAUSE 50 : GOTO 940
930 RETURN
940 GOSUB 950
950 OUT 31, 2
960 LET ZM = IN 31.
970 LET E = +(3.14/2)*255 + ZM
980 PRINT ZM; " "; " bras repos"
985 IF E > 5 THEN OUT 63, 48 : LET m = 48
990 IF E < -5 THEN OUT 63, 96 : LET m = 96
1000 IF ABS E <= 5 THEN OUT 63, 32 : LET m = 32
1010 IF m <> 32 THEN GOTO 940
1020 IF m = 32 THEN GOTO 1040.
1030 RETURN
1040 GOSUB 1050
1050 OUT 31, 1
1060 LET YM = IN 31
1070 LET E = 64 - YM
1080 PRINT YM; " "; " Tour repos"

```

```

1090 IF E > 5 THEN OUT 63, 160 : LET m = 160
1100 IF E < -5 THEN OUT 63, 34 : LET m = 34
1110 IF ABS E <= 5 THEN OUT 63, 32 : LET m = 32
1120 IF m <> 32 THEN GOTO 1040
1130 IF m = 32 THEN GOTO 1150
1140 RETURN
1150 GOSUB 1160
1160 OUT 31, 0
1170 LET XM = IN31
1180 LET E = DC0 - XM
1190 PRINT XM; " "; DC0; " "; " decharge chariot"
1195 IF E > 5 THEN OUT 63, 33 : LET M = 33
1200 IF E < -5 THEN OUT 63, 36 : LET M = 36
1210 IF ABS E <= 5 THEN OUT 63, 32 : LET M = 32
1220 IF M <> 32 THEN GOTO 1150
1230 IF M = 0 THEN GOTO 1250
1240 RETURN
1250 GOSUB 1260
1260 OUT 31, 1
1270 LET YM = IN31
1280 LET E = DT0 - YM
1285 PRINT YM; " "; DT0; " "; " decharge Tour"
1290 IF E > 5 THEN OUT 63, 160 : LET m = 160
1295 IF E < -5 THEN OUT 63, 34 : LET m = 34
1300 IF ABS E <= 5 THEN OUT 63, 32 : LET m = 32
1310 IF m <> 32 THEN GOTO 1250
1320 IF m = 32 THEN GOTO 1350

```

```

1330 | | RETURN .
1340 REMGOSUB 1450
1350 | | GOSUB 1360
1360 | | OUT 31, 2
1370 | | LET ZM = IN 31
1380 | | LET E = DB0 - ZM
1390 | | PRINT DB0; " "; ZM; " "; " decharge bras"
1395 | | IF E > 5 THEN OUT 63, 48 : LET m = 48
1400 | | IF E < -5 THEN OUT 63, 96 : LET m = 96
1410 | | IF ABS E <= 5 THEN OUT 63, 0 : LET m = 0
1420 | | IF m <> 0 THEN GOTO 1340
1430 | | IF m = 0 THEN GOTO 1450
1440 | | RETURN .
1450 | | GOSUB 1460
1460 | | OUT 31, 2
1470 | | LET Zm = IN 31
1480 | | LET E = ((17 * 3.14 * 0.57) * 255 / 36) - Zm
1485 | | IF E > 5 THEN OUT 63, 16 : LET m = 16
1490 | | IF E < -5 THEN OUT 63, 64 : LET m = 64
1500 | | IF ABS E <= 5 THEN OUT 63, 0 : LET m = 0
1510 | | PRINT Zm; " "; " "; " bras au repos"
1520 | | IF m <> 0 THEN GOTO
1530 | | IF m = 0 THEN GOTO 1550
1540 | | RETURN .
1550 | | GOSUB 1560
1560 | | OUT 31, 1.
1570 | | LET YM = IN 31

```

```

1575 | LET E = 64 - Ym.
1580 | PRINT Ym; " "; "64"; " "; "Tour au repos"
1590 | IF E > 5 THEN OUT 63, 128 : LET m = 128
1600 | IF E < -5 THEN OUT 63, 2 : LET m = 2
1700 | IF ABS E <= 5 THEN OUT 63, 0 : LET m = 0
1800 | IF m <> 0 THEN GOTO 1550
1900 | IF m = 0 THEN GOTO 1986
1950 | RETURN
1886 | PRINT "mission accomplie"
2000 | STOP.

```


50

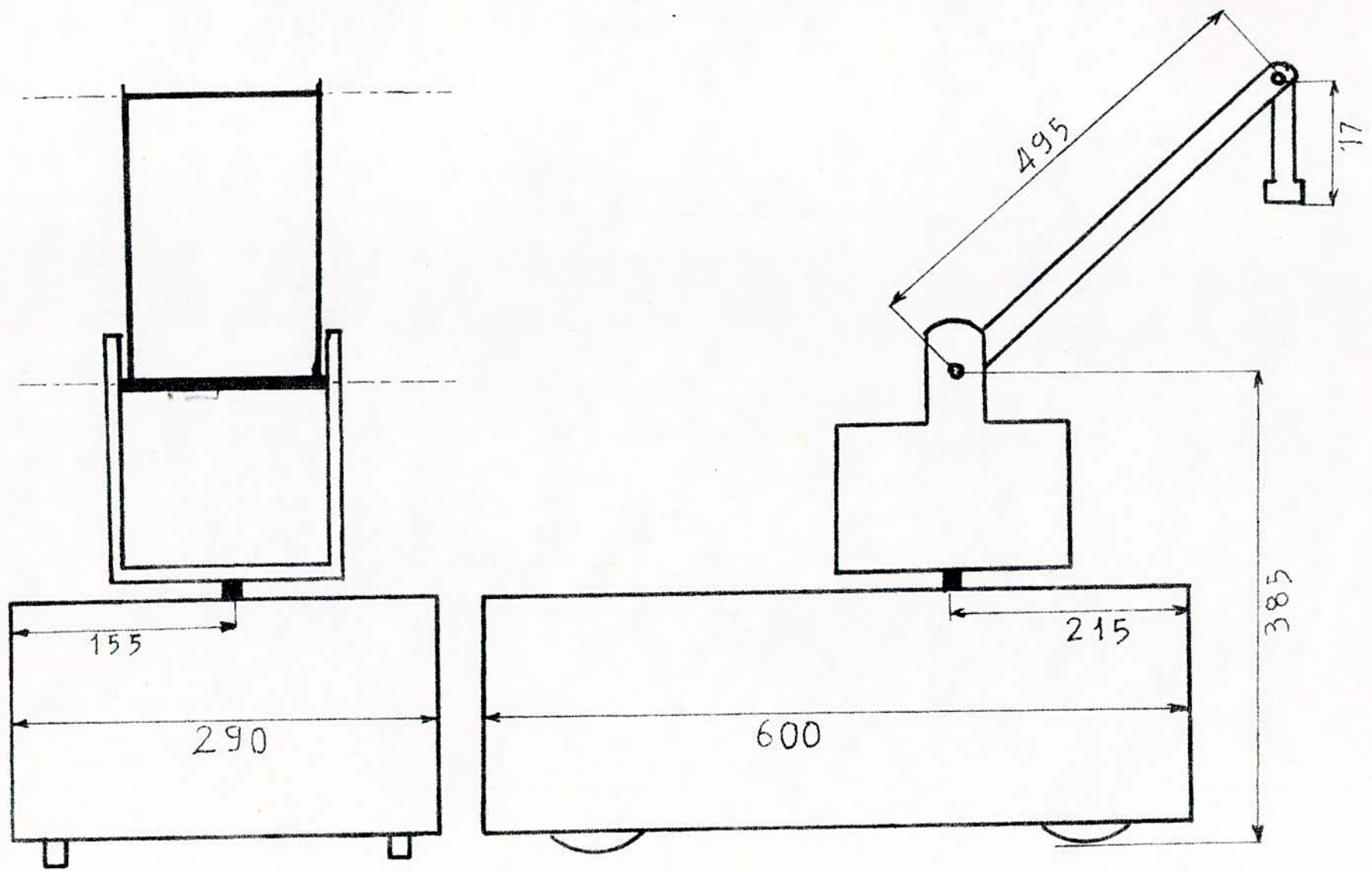
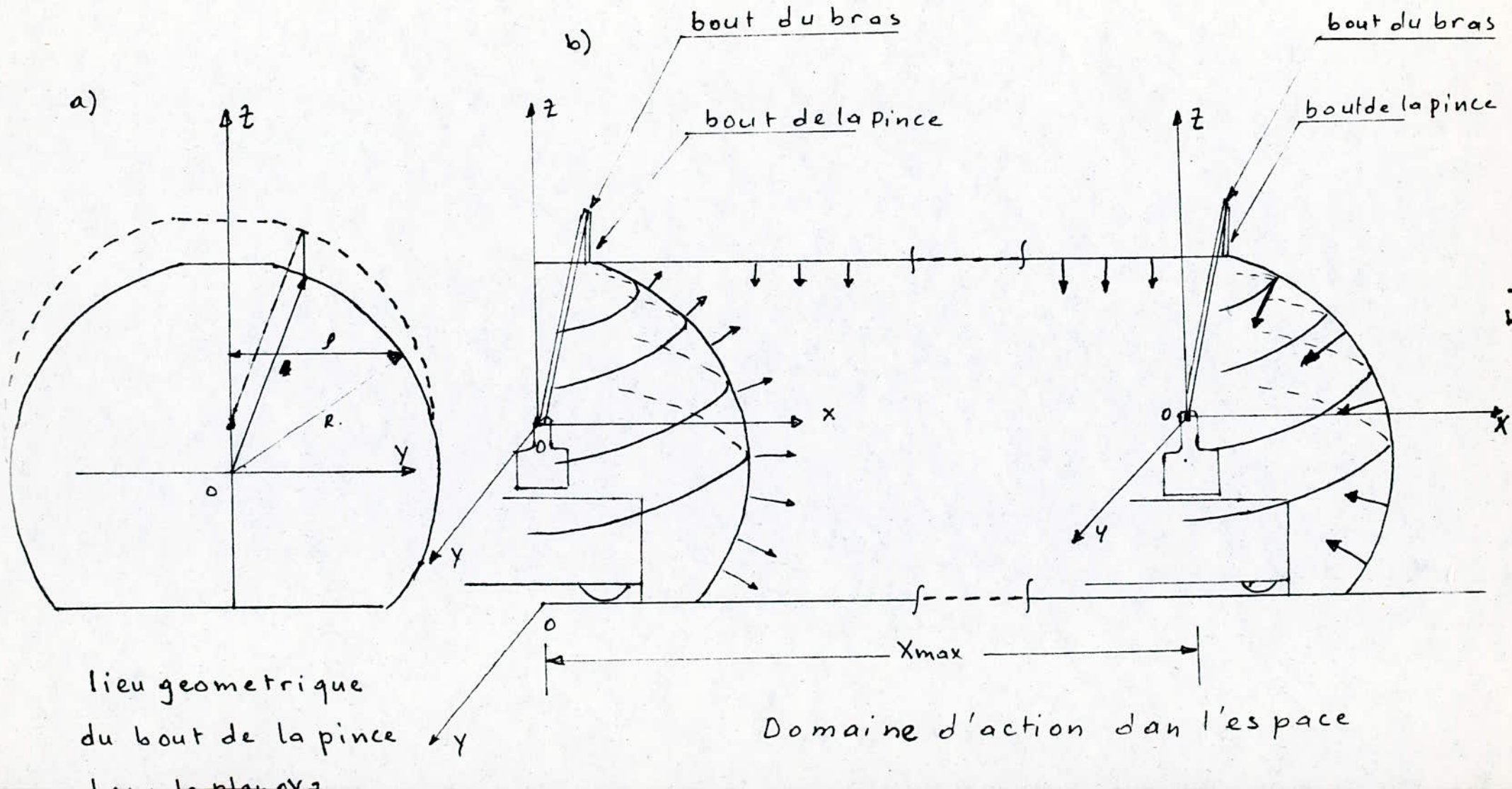
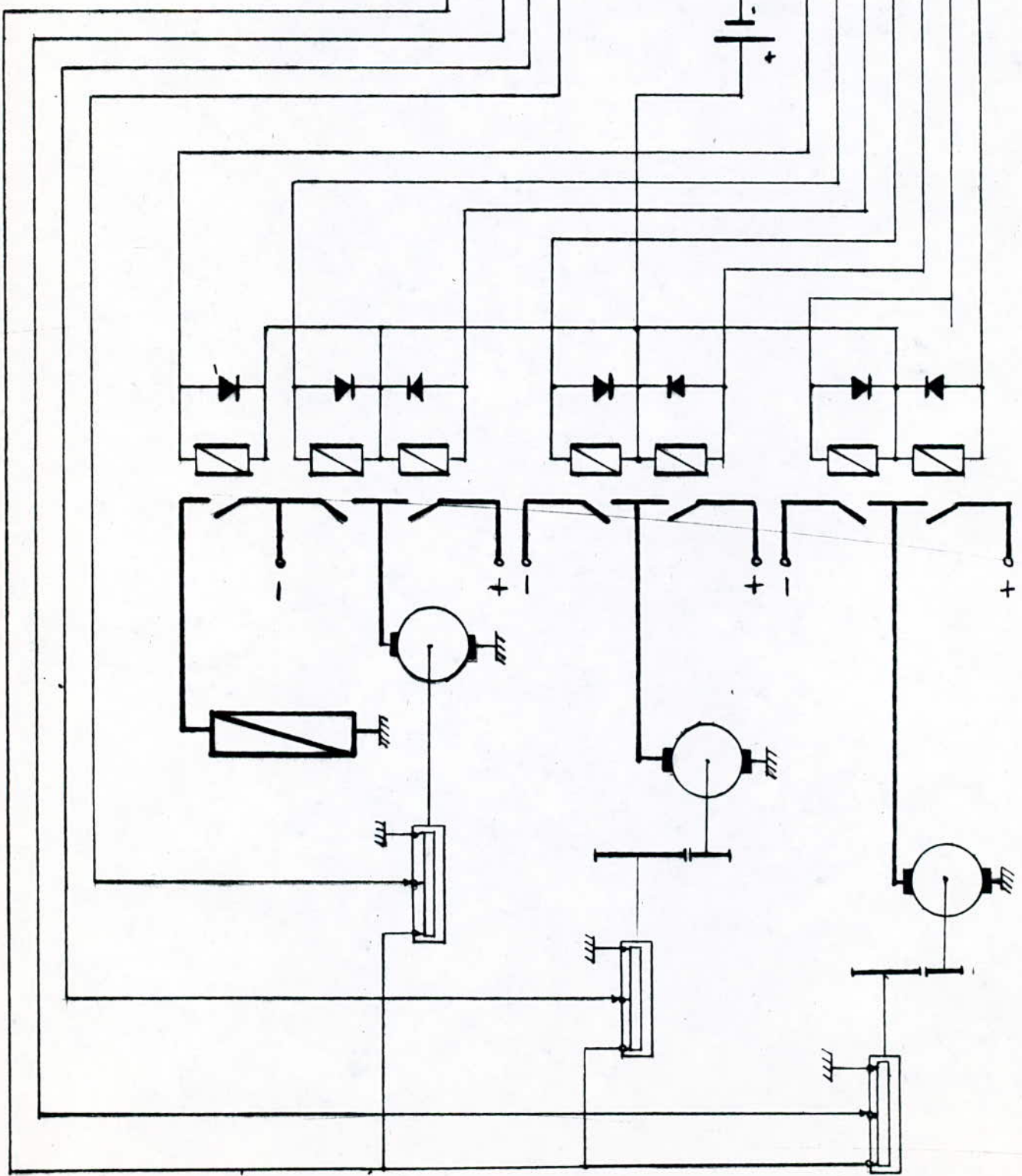
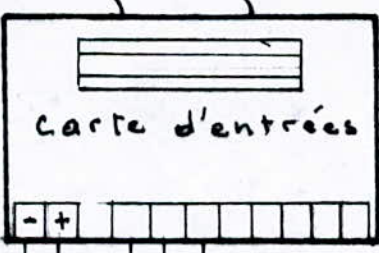
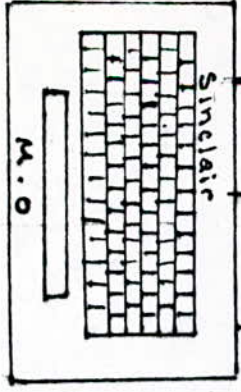


fig N° IV - 4 -



BUS D'ENTREES / SORTIES



- SCHEMA ELECTRIQUE -

. CONCLUSIONS .

- la réalisation de notre chargeur dont la commande est assistée par micro ordinateur nous a montré la capacité du calculateur dans le domaine de la commande automatique, et les avantages qu'il peut présenter

- l'utilisation des μ -ordinateurs ouvre l'accès aux domaines techniques de la robotique et les automates programmables et aux techniques de dialogue informatique.

- dans cette réalisation nous avons mis en évidence des programmes structurés régissant le contrôle de chaque mouvement du chargeur dans son domaine d'action. Ainsi nous avons établi un dialogue entre l'homme et le système par l'intermédiaire d'un micro ordinateur

- dans ce sens nous souhaitons une continuité de ce travail, vue son importante application dans les divers domaines techniques

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - Th. Maurin et M Robin
"les Systemes micr programmés"
DUNOD 1979.
- 2 - P. de Moribel
"Principe des ordinateurs"
DUNOD 1975
- 3 - M. Meerov et V. Freidman
"Principe de la commande automatique"
MIR 1976
- 4 - C. M. GILMOR -
"Introduction aux microprocesseurs"
McGRAW - HILL 1982
- 5 - "REGULATEUR PAS A PAS à 3 Positions"
projet de Fin d'études
ENP juin 1976.
- 6 - J. Ch. Gille , P. Decaulne
"Systemes asservis non lineaires"
DUNOD 1967

