

12/95
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT

GENIE CHIMIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE D'UN REGULATEUR DE TEMPERATURE
ET PROGRAMMATION
DES REGULATEURS STANDARDS

Proposé par :
Mr. T. AHMED ZAID

Etudié par :
Mr. M.R. FAID
Mr B. BENYAHIA

Dirigé par :
Mr. T. AHMED ZAID
Mr. F. BENGUERINE

PROMOTION
JULLET 1995

Errata

| Page | Fautes | Corrections | Page | Fautes | Corrections |
|------|--|---|------|--------|-------------|
| 31 | • immunité' ... • Intégration... | immunité aux bruits du signal de mesure Intégration des dispositifs de conditionnement | | | |
| 35 | Répétition des deux dernières lignes | à éliminer. | | | |
| 37 | Assez de celles (4 ^{ème} ligne) | Assez différentes de celles... | | | |
| 39 | 2 ^{ème} colonne du tableau (IV.3) 3 ^{ème} colonne 4 ^{ème} colonne | Correspond au régulateur PI PD PID | | | |
| 40 | 7 ^{ème} ligne | à supprimer | | | |
| 68 | 10 ^{ème} ligne "... du et vers..." | ... de et vers | | | |
| 69 | Absence du titre avant la première ligne | titre: VI-1.8 Le CAN | | | |
| 74 | 29 ^{ème} ligne ... cas période ... 36 ^{ème} ligne Nous allons supprimer | ... cas la période d'une seconde ... Nous avons supprimés | | | |
| | | | | | |

M E N B R E S D U J U R Y

| | | |
|-------------------------|---------------------------|--|
| <i>Mme. R. DERRICHE</i> | <i>PRESIDENTE DU JURY</i> | <i>(CHARGEE DE COURS A L'ENP).</i> |
| <i>M. A. ZERGUERRAS</i> | <i>EXAMINATEUR</i> | <i>(MAITRE DE CONFERENCE A L'ENP).</i> |
| <i>M. T. AHMED-ZAID</i> | <i>RAPPORTEUR</i> | <i>(MAITRE ASSISTANT A L'ENP).</i> |
| <i>M. F. BENGUERINE</i> | | <i>(INGENIEUR DE L'ENP).</i> |

DEDICACE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

*Je dédie ce travail à mes parents,
à ma soeur CLELIA,
à mon ami B. CRUSSON,*

et, par dessus tout à mon pays, l'ALGERIE.

M-R. FAID.

DEDICACE

- A mes parents
- A mes frères et soeurs
et à tout ce^{eux} qui me sont chers.
- A la mémoire de celui qui m'a dit un jour « Fait de la foi la lumière qui guide tes pas, et tu ne connaîtra point le désespoir »

B. BENYAHIA

REMERCIEMENTS



Ce travail n'aurait jamais pu voir le jour sans l'aide et la précieuse collaboration de plusieurs personnes qui, nous l'espérons, trouverons ici notre profonde gratitude.

Nous remercions:

LE C.I.A.R.A. et toute son équipe, qui ont veillé au bon déroulement de nos expériences et qui sont à l'origine de l'idée même de ce projet,

Mr AHMED-ZAID, qui a dirigé notre travail et nous a permis ainsi de mener notre projet dans les meilleures conditions possibles,

Mme R. DERRICHE, pour ses précieux conseils qui nous ont éclairés et guidés dans les moments les plus délicats,

TOUTE L'EQUIPE DE GALAXY INFORMATIQUE, qui nous a permis de donner forme à ce travail si important pour nous,

Nous aimerions, par ailleurs, remercier

Melle S. CHAIB-EDDOUR de l'O.N.S dont le concours et l'abnégation nous ont permis de présenter notre travail dans les temps,

MERCI à TOUS.

Mr. M-R FAID.

Mr. B. BENYAHIA.

SOMMAIRE

- ◆ Résumé
- ◆ Introduction

PARTIE THEORIQUE:

| | |
|---|-----------|
| Chapitre I: Introduction aux signaux et systèmes. | 1 |
| I - 1 : Les signaux | 1 |
| I - 2 : Les systèmes | 3 |
| I - 3 : Modélisation mathématique des systèmes | 5 |
| Chapitre II : La régulation | 9 |
| II - 1 : Description de la boucle de régulation | 9 |
| II - 2 : Les performances des systèmes régulés | 10 |
| II - 3 : Les principales méthodes de commande | 13 |
| II - 4 : Les différentes lois de commande | 15 |
| II - 5 : Les régulateurs standards | 16 |
| II - 6 : Les méthodes empiriques de synthèse des régulateurs standards. | 19 |
| Chapitre III - Les capteurs de température | 20 |
| III - 1 : Les capteurs | 20 |
| III - 2 : Les capteurs de température. | 24 |
| Chapitre IV : La régulation échantillonnée | 32 |
| IV - 1 : La régulation par ordinateur. Introduction à la régulation par ordinateur. | 32 |
| IV - 2 : Régulation analogique pilotée par ordinateur. | 33 |
| IV - 3 : Commande numérique par ordinateur. | 36 |

PARTIE EXPERIMENTALE:

| | |
|--|-----------|
| Chapitre V : LA REGULATION PAR TOUT OU RIEN | 41 |
| ◆ But de l'expérience | 41 |
| V - 1 : Généralités | 42 |
| V - 2 : Rappel théorique | 43 |
| V - 3 : Matériel utilisé | 47 |
| V - 4 : Description du montage | 47 |
| V - 5 : Conduite de l'expérience | 47 |
| V - 6 : Conclusion | 66 |

| | |
|--|-----------|
| Chapitre VI : APPLICACION DE LA REGULACION ECHANTILLONNEE SUR UN BAIN-MARIE -PROGRAMMATION DES REGULATEURS- | 67 |
| VI - 1 : Description générale | 67 |
| VI - 2 : Synthèse des régulateurs numériques | 69 |
| VI - 3 : Algorithmes et programmation | 72 |
| VI - 4 : Conclusion | 74 |
| ♦ Annexe | 75 |

RESUME

Notre travail a pour objectif l'étude d'un régulateur de température «Tout ou Rien » ainsi que l'élaboration d'un programme qui jouera le rôle d'un régulateur standard TOR, P, PI, ou encore PID.

La première partie de ce travail a été effectuée dans le département de Génie-Chimique à l'Ecole Nationale Polytechnique.

La deuxième partie, concernant la régulation numérique, n'a été rendue possible que grâce à la précieuse collaboration du C.I.A.R.A (Centre d'Initiation à des Activités en Recherche Appliquée) qui nous a fourni les cartes électronique d'acquisition (Interfaces) permettant la liaison entre le système à réguler et l'ordinateur .

SUMMARY

Our work has as a purpose, the study of a regulator of temperature "All or Nothing". Therefore the élaboration of a program which plays a rol of a standard regulator. A O N, P, PI or PID.

The first part of this work has been done in Chemical Engeneering at the National School of Polytechnics.

The second part, concerns the numerical regulation, has been possible owing to the collaboration of Initiation Center of Activities in Applied Research(Interface) that provided us with Electronic Maps of Acquisition.

INTRODUCTION

Le progrès technologique dans le monde de l'industrie et de la recherche nous permet de constater que l'efficacité de toute activité repose sur deux facteurs, à savoir la rapidité et la précision.

A cet effet, et grâce aux études pertinentes des automaticiens, la notion d'automatisme a été introduite dans toutes les structures de la vie.

Au niveau de la recherche et de l'industrie, les dispositifs de commandes et de contrôle des procédés sont devenus des outils de base pour toute opération.

Dans notre travail, nous nous efforceront d'utiliser au mieux cet outil afin de contrôler la température d'un bain marie.

Ce dernier, jouera le rôle du milieu ambiant de toute réaction chimique ou opération produite en son sein.

En effet, afin que les opérations Chimiques et Pétrochimiques, laboratoires, se produisent dans les meilleures conditions possible, il faut assurer une température ambiante stable. Ceci ne sera possible qu'en utilisant un bain thermostaté.

A cet effet nous avons envisagé l'utilisation d'un régulateur de température « tout ou Rien », appliqué à un bain marie, afin d'étudier les différents paramètres pouvant influencer sur cette régulation, ainsi que l'élaboration d'un programme informatique qui permettrait le contrôle à partir d'un ordinateur.

La régulation numérique, déjà très largement employée grâce au développement de la micro-informatique, permet d'améliorer les performances de la régulation.

Notre programme permettra à ces utilisateurs, et ce après avoir introduit les différents paramètres concernant le système, d'assurer un contrôle permanent, efficace et rapide à partir d'un simple Ordinateur.

Nos parties expérimentales seront présentées respectivement dans des chapitres V et VI les premiers étant destinés à la présentation des notions de bases qui nous permettront d'aboutir aux résultats recherchés.

CHAPITRE I

CHAPITRE I: INTRODUCTION AUX SIGNAUX ET SYSTEMES [1], [2]

I-1- LES SIGNAUX

Un signal est une grandeur mesurable dont une ou plusieurs caractéristiques sont porteuses d'une information relative à une ou plusieurs autres grandeurs que le signal présente.

L'énergie d'un signal $u(t)$ sur un intervalle de temps $[t_1, t_2]$ sera proportionnelle à:

$$\int_{t_1}^{t_2} u^2(t) \cdot dt$$

I-1-1: Le Signal Continu:

Le signal continu $U(t)$ est un signal fonction d'une variable de temps t continue. Ainsi, il est présent à tout instant. (fig. I.1). Cependant, il peut présenter une certaine discontinuité quant à son allure.

Les signaux continus peuvent avoir plusieurs allures, mais dont la construction de base se fait à partir de:

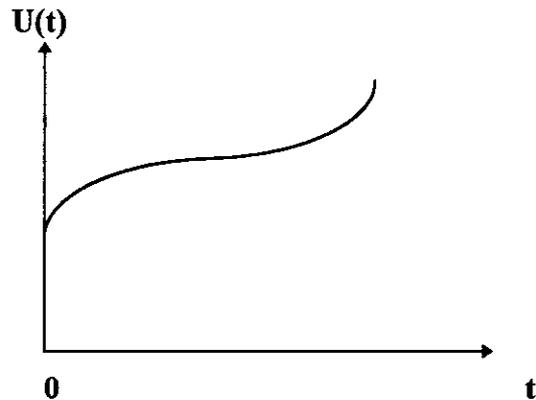


fig . I-1 signal continu

- La rampe unitaire causale
- L'échelon unitaire ou Fonction d'Heaviside
- L'impulsion unitaire ou impulsion de Dirac
- Le signal Harmonique ou Sinusoïdal

Ces quatre signaux de base sont décrits dans le Tableau I-2

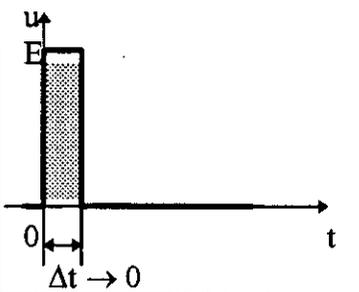
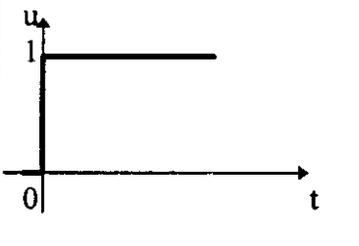
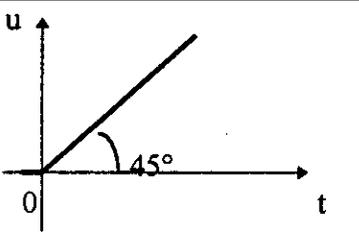
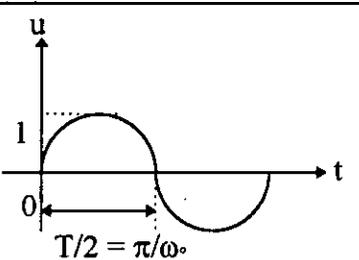
| Désignation | Graphe | $u(t)$ pour $t > 0$ | $U(s)$ |
|--|---|--|---|
| Percussion - unité ou impulsion de Dirac |  | $\delta(t)$ $\Delta t \rightarrow 0$ $E = (1 / \Delta t) \rightarrow \infty$ $E \Delta t = 1$ | 1 |
| Echelon - unité ou Echelon de Heaviside |  | $\varepsilon(t)$ $= 0$ pour $t < 0^-$ $= 1$ pour $t > 0^+$ | $1 / s$ |
| Rampe uniré ou Echelon de vitesse |  | $\nu(t)$ $= \varepsilon(t) t$ | $1 / s^2$ |
| sinusoïde - unité |  | $\mu(t)$ $= \varepsilon(t) \sin \omega \cdot t$ | $\omega \cdot / (s^2 + \omega \cdot^2)$ |

Tableau (I-2) Signaux à Temps Continu

I-1-2: Le signal Echantillonné:

Le signal échantillonné $U'(t)$ est appelé aussi signal pulsé ou discret dans le temps. Ce signal est composé d'une série d'impulsions de Dirac (Fig I-3), qui apparaissent suivant un intervalle de temps constant Δ dit période d'échantillonnage.

Etant donné que l'énergie d'une impulsion de Dirac est finie, la somme d'une série d'impulsions de Dirac, représentant le signal échantillonné, ne peut alors avoir qu'une énergie finie.

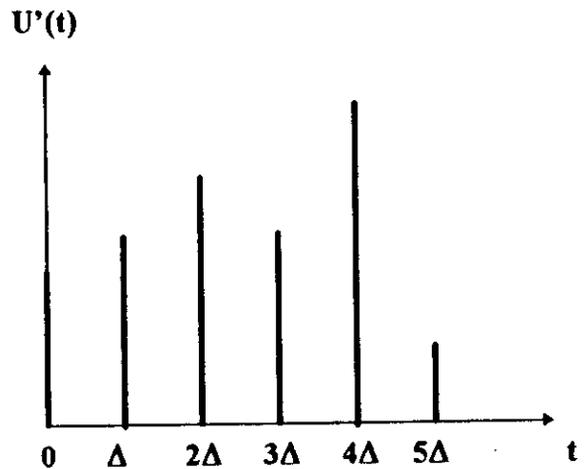


fig I-3 signal échantillonné.

I-1-3: Le signal Numérique:

Le signal numérique $U^*(t)$ est appelé aussi signal numéral ou discret dans le temps et en amplitude.

Ce signal consiste en une séquence de valeurs discrètes (numériques), qui ne sont définies qu'aux instants d'échantillonnage (fig I.4).

L'énergie d'un tel signal est nulle puisque la surface d'un point est nulle.

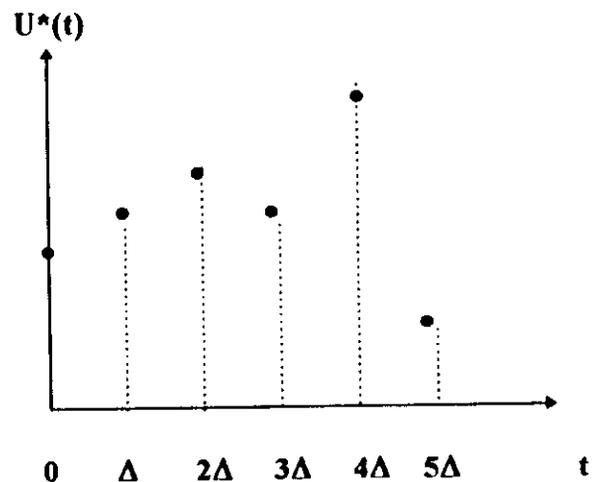


fig I-4 signal échantillonné.

I-2- Les Systèmes:

Un système est un ensemble d'éléments associés qui a pour objectif l'atteinte d'un but déterminé au moyen d'un fonctionnement spécifique.

Il comporte des signaux d'entrées qui agissent en tant que causes, et des signaux de sorties qui décrivent les effets observés.

Les systèmes rencontrés peuvent avoir plusieurs appellations suivant leurs signaux d'entrée et de sortie, et leur comportement.

I-2-1: Système Simple:

Un système simple est un système qui comporte une variable $u(t)$ délivrée par un système extérieur, une variable $v(t)$ perturbatrice provenant du milieu ambiant et une variable $y(t)$ dirigée vers l'extérieur. (fig I-5)

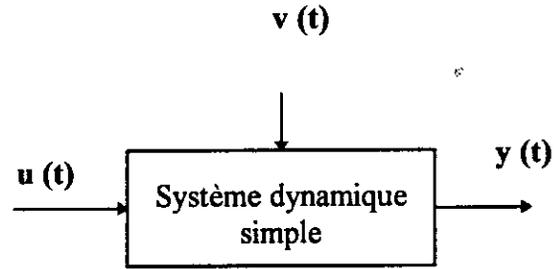


fig. I.5 : système dynamique simple

I-2-2: Système Multiple:

Un système multiple est un système qui comporte plusieurs grandeurs d'entrée et une ou plusieurs grandeurs de sortie (fig. I-6).

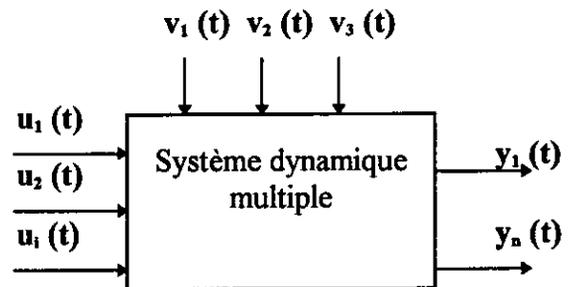


fig. I-6 : système dynamique multiple

I-2-3: Système Causal (non Anticipatif):

Un système causal est un système qui ne répond pas avant d'être excité. Si le signal d'entrée qui est une cause n'apparaît pas, alors le système ne réagit pas. C'est la raison pour laquelle on le qualifie de causal. Ce comportement est illustré dans la fig. I-7.

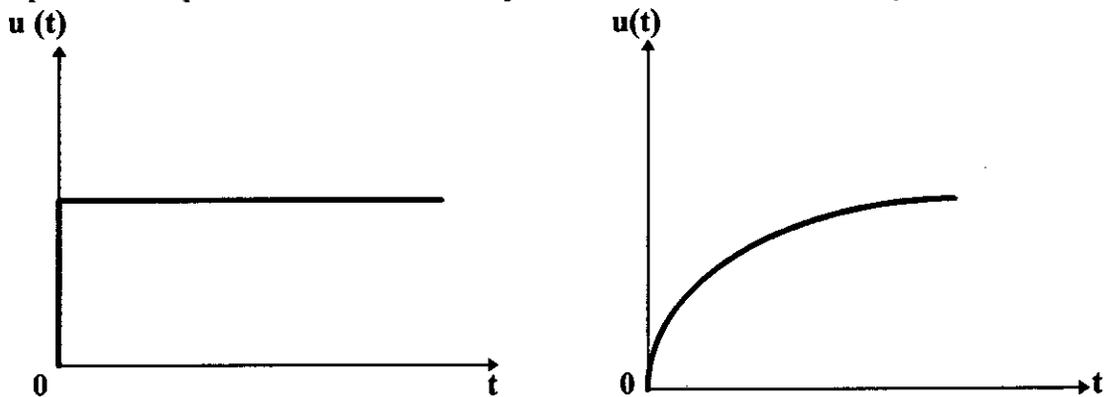


Fig. I-7 : Comportement d'un système causal.

I-2-4: Système Stationnaire:

Un système est dit stationnaire si à un instant précis sa sortie ne dépend que de l'excitation à cet instant. En d'autres termes, si $y(t)$ est la réponse à l'excitation $u(t)$, alors $y(t - \Delta t)$ est la réponse à $u(t - \Delta t)$.

I-2-5: Système Dynamique:

Lorsqu'un système n'est pas stationnaire, alors il est dit à mémoire ou dynamique.

I-2-6: Système linéaire:

Un système linéaire est un système qui obéit au principe de superposition, défini par les propriétés d'additivité et d'homogénéité.[2]

L'additivité:

Si $y_1(t)$ est la réponse à $u_1(t)$,
et $y_2(t)$ est la réponse à $u_2(t)$,

alors :

$(y_1(t) + y_2(t))$ sera la réponse à $(u_1(t) + u_2(t))$

L'homogénéité:

Si $y(t)$ est la réponse à un signal $u(t)$, alors la réponse à un signal $\lambda \cdot u(t)$ sera $\lambda \cdot y(t)$, telle que λ soit un facteur constant.

Tous les systèmes qui ne répondent pas au principe de superposition sont dit non-linéaires.

I-2-7: Système Dynamique Linéaire:

Un système dynamique linéaire est un système qui peut être décrit par un système d'équations différentielles linéaires à coefficients constants, où la variable indépendante est le temps.

I-3 Modélisation Mathématique des Systèmes:

L'analyse et la synthèse d'un système dynamique exigent la connaissance parfaite des relations qui lient les grandeurs d'entrées au sein du système à ses grandeurs de sortie.

L'ensemble de ces relations constituent le modèle mathématique du système.

La mise en équation d'un système dynamique consiste, après formulation d'hypothèses simplificatrices, à lui appliquer les lois physiques qui le régissent .

Cette mise en équation, qui est considérée comme étant l'étape la plus délicate pour l'ingénieur, conduit au modèle mathématique du système.

Lorsqu'il s'agira d'un système linéaire, à priori nous obtiendrons des équations différentielles qu'il faudra résoudre.

Les transformées de Laplace seront alors un outil pertinent qui nous permettra d'atteindre notre but.

Les équations différentielles $[f(t)]$, grâce aux transformées de Laplace, sont alors transformées en équations algébriques $[F(t)]$, faciles à résoudre. La transformée inverse de Laplace nous permettra alors d'obtenir le résultat définitif.

La fonction qui lie la grandeur de sortie à la grandeur d'entrée est dite fonction de transfert ou encore transmittance.

Les modèles les plus simples et les plus fréquents s'avèrent être du premier et du second ordre.

Leur transmittance est donnée, respectivement, par:

$$G(s) = \frac{K}{1 + \Gamma s} \quad (\text{pour le premier ordre}).$$

K: Gain constant qui traduit la proportionnalité de la sortie à l'entrée en régime permanent statique et sur une plage de linéarité limitée et spécifiée.

Γ : constante de temps du système.

$$G(s) = \frac{K}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + \frac{s^2}{\omega_n^2}} \quad (\text{pour le second ordre}).$$

ξ : Coefficient appelé facteur d'amortissement.

ω_n : Pulsation propre non amortie du système.

Dans certains cas, il s'avère assez difficile de décrire le système par des équations mathématiques à cause de la complexité des phénomènes provenant du milieu ambiant.

On fait alors appel à des méthodes empiriques d'identification telles que les méthodes de Ziegler-Nicols ou encore celle de Strejc.

La modélisation est souvent suivie par l'identification qui consiste à vérifier la validité du modèle établi face à un comportement réel du processus.

REMARQUE:

Afin de vérifier la linéarité du système, il est nécessaire de prélever sa caractéristique entrée-sortie qui possède l'allure présentée sur la figure I.8.

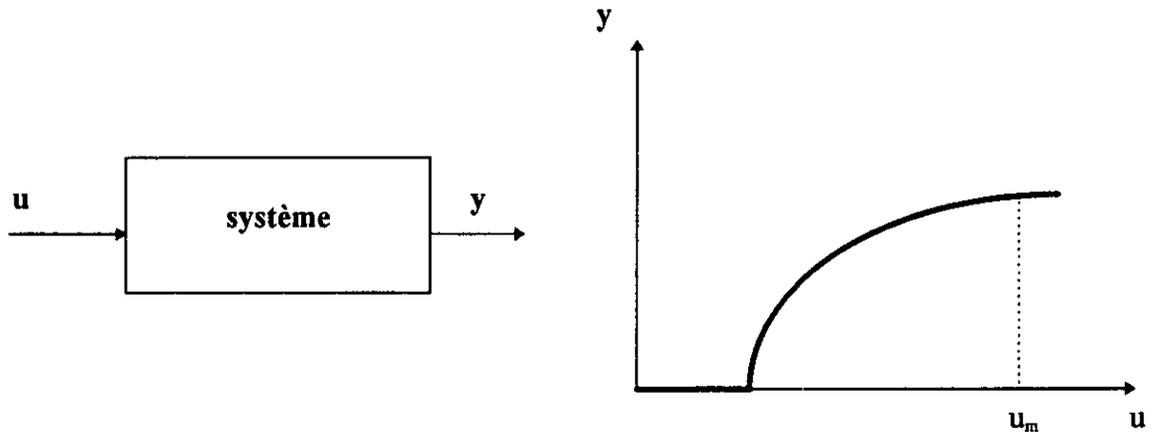


fig. I-8: Courbe caractéristique

La courbe de la figure I-8, montre que le système ne réagit pas à de faibles entrées, et qu'à partir d'un certain seuil la réponse devient linéaire jusqu'à une certaine valeur d'entrée.

A cette dernière valeur, les ordonnées ne varient plus. Ce phénomène est dit saturation.

Une telle caractéristique statique n'est pas linéaire, cependant il est possible d'entreprendre une étude dans la partie linéaire (fig I-9).

Le point de coordonnées (u_0, y_0) est dit point de repos.

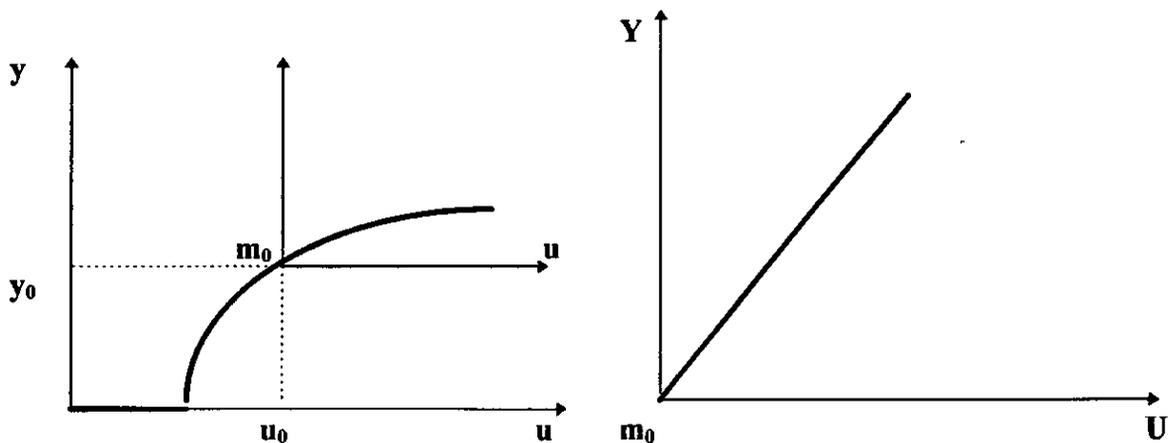


Fig. I-9 : Variables d'écart

Les variables d'écart sont définies comme étant:

$$Y = y - y_0 \quad \text{et} \quad U = u - u_0$$

L'étude est établie alors autour du point de repos choisi en considérant les variations de Y en fonction de U .

La caractéristique $Y = f(U)$ est alors une droite passant par l'origine et dont la pente représente le gain statique du système .

Ainsi , l'étude de la régulation qui se fait en général pour des systèmes linéaires, peut être faite autour du point de repos de tout système présentant une forme de linéarité .

CHAPITRE II

II - 1 DESCRIPTION DE LA BOUCLE DE REGULATION:

Le principe de la régulation peut être décrit de la manière la plus simple possible en explicitant le mode de fonctionnement du régulateur tout ou rien.

Celui-ci se contente d'établir ou de couper le chauffage en fonction d'une température mesurée et comparée à une consigne affichée.

En aval d'une enceinte thermique, un élément sensible, dit capteur, mesure la température afin de la comparer à une consigne.

Suivant que l'écart établi soit positif ou négatif, un relais mettra en service ou coupera l'alimentation des éléments chauffants de façon à ce que la température de l'enceinte soit la plus proche possible de la consigne.

Ce principe définit la boucle de régulation qui est le fondement même de toute régulation, et qui comporte les éléments suivants (voir figure II-1):

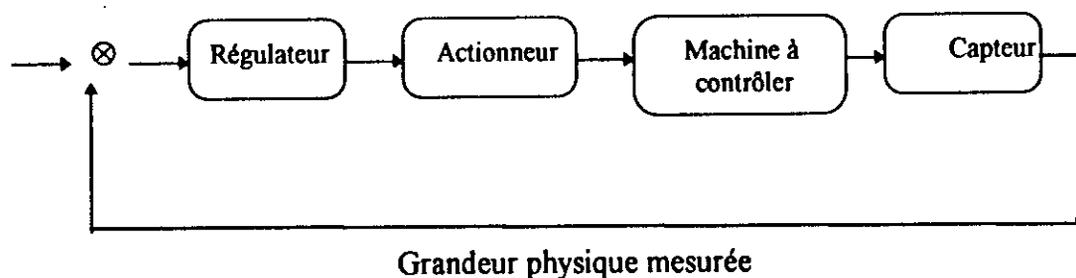


Fig. II-1 Boucle de régulation de base

- * Le processus à régler
- * Un capteur
- * Un comparateur délivrant un signal d'écart avec la consigne
- * Un actionneur

L'analyse du fonctionnement de la régulation tout ou rien montre que la température de consigne n'est atteinte qu'après un certain temps dû à l'inertie thermique de l'enceinte.

L'alimentation des éléments chauffants coupée, la température de l'enceinte croit en passant par un maximum avant de passer à une phase de refroidissement, cause de déperdition de chaleur vers l'extérieur.

Ainsi, une oscillation s'établit autour du point de consigne. Son amplitude est fonction de la température extérieure, de la puissance de chauffe et de bien d'autres paramètres.

Ceci met en évidence les critères qui caractérisent toute boucle de régulation et auxquels doivent répondre les régulateurs, à savoir: la stabilité, la précision et la rapidité de la réponse.

II - 2 LES PERFORMANCES DES SYSTEMES REGULES:

II - 2 - 1 La stabilité:

Excité par une impulsion de Dirac, un système initialement au repos est dit stable s'il revient à sa position de repos. La stabilité est, en général, étudiée dans un plan fréquentiel.

Ainsi, la réponse à une impulsion du Dirac serait, dans le plan de Laplace:

$Y(p) = M(p) \cdot 1$. Si l'on considère la figure II - 2.

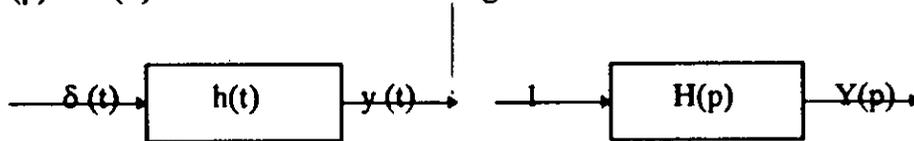


Fig. II - 2 Réponse d'un système dans le plan de Laplace

Si la fonction de transfert du système n'admet pas de pôles multiples, nous pouvons alors écrire:

$$Y(p) = \sum_i \frac{A_i}{p - p_i} \quad p_i \text{ étant des réels ou des complexes conjugués.}$$

La réponse $y(t)$ sera donc:

$$y(t) = \sum_i A_i e^{p_i t}$$

Ainsi $y(t)$ ne tendra vers zéro que si la partie réelle des p_i est strictement négative.

Théorème: [4]:

Un système n'est stable que si tous les pôles de sa fonction de transfert sont strictement à gauche de l'axe imaginaire du plan complexe dédié à p .

L'étude dans le plan fréquentiel se fait en présentant la fonction de transfert sur un diagramme de Bode.

Dans ce dernier, on porte la courbe de gain en décibel en fonction de la fréquence, et la courbe de phase en fonction de la fréquence (fig II-3).

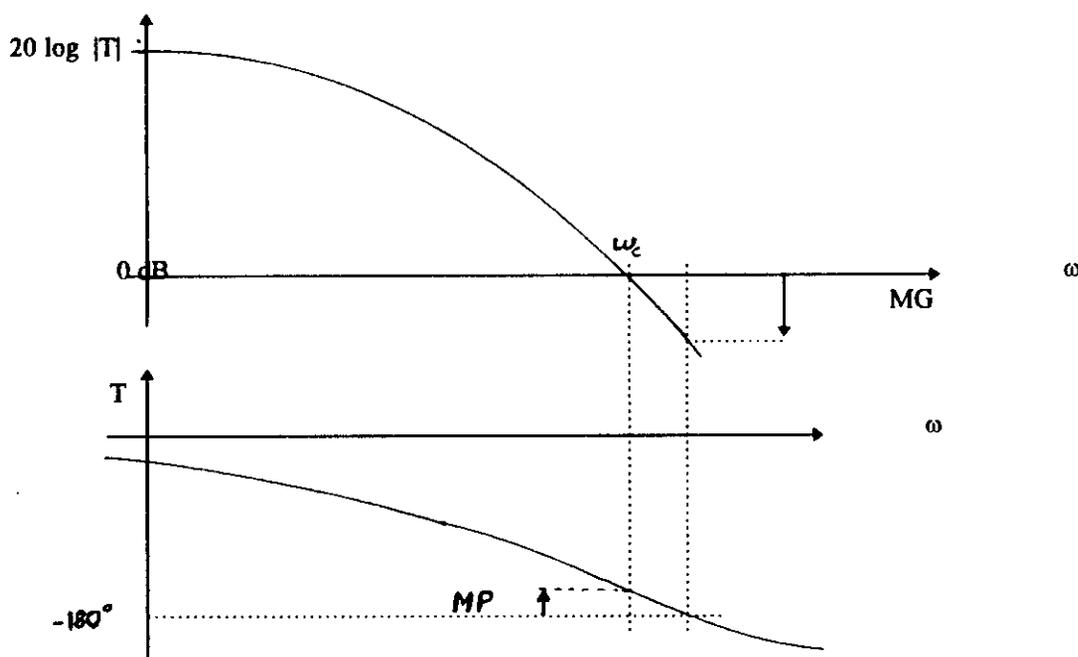


Fig. II-3. Diagramme de Bode

Sur ces courbes, on définit:

- La marge de gain (M.G) comme étant la valeur du gain pour une phase de -180° .
- La marge de phase (M.P) comme étant le déphasage par rapport à une phase de -180° lorsque le gain est de 0 dB .

La stabilité industrielle exige que la sortie converge vers la consigne avec le moins d'oscillations possibles. Celles-ci doivent s'amortir très rapidement.

La stabilité est caractérisée industriellement par:

- Une marge de gain supérieure à -10 dB .
- Une marge de phase supérieure à 45° . [3].

Certains ouvrages proposent que la marge de phase soit comprise entre 40° et 45° , et que la marge de gain soit comprise entre -15 et -8 dB .

II - 2 - 2 La précision:

La précision d'un système linéaire, en valeur relative par rapport à la grandeur de consigne, est définie par son signal d'erreur $\epsilon(t)$.

Dans la pratique, on remarque que la stabilité diminue lorsque la précision augmente.

L'amélioration de l'une des deux performances se fait, en général, au détriment de l'autre.

II - 2 - 3 La rapidité:

La rapidité d'un système linéaire est définie par la durée de son régime transitoire dit temps de réponse, lorsque le système est soumis à une grandeur de référence qui peut être un échelon unité ou une impulsion unitaire.

II - 2 - 4 Les critères de régulation optimale:

Une autre possibilité d'estimation de la qualité de la régulation peut être recherchée en ayant pour objectif la minimisation de l'erreur $\epsilon(t)$.

Pour ce, il faut connaître l'évolution de l'erreur $\epsilon(t)$ en régime transitoire pour une réponse indicielle. Minimiser l'erreur reviendra, alors, à minimiser l'air hachuré de la fig. II-4.

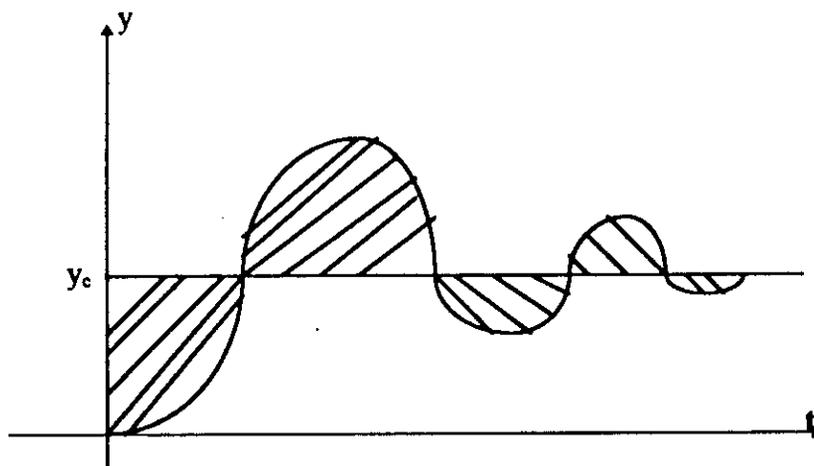


Fig. II-4 Erreur d'une réponse indicielle en régime transitoire

A cette fin, on définit une grandeur J dite indice de performance, ou fonction de coût, qui s'exprime de différentes façons.

Les plus connues sont:

IAE: Intégral absolute Error $J = \int_0^{\infty} |\epsilon(t)| dt$

ISE: Intégral square Error $J = \int_0^{\infty} \epsilon^2(t) dt.$

Où l'aire hachurée dans la figure (II-4) est représentée par les intégrales de $|\epsilon^2(t)|$ ou de $\epsilon^2(t)$ afin d'éviter les compensations d'aires positives par aires négatives.

Le premier quart de l'oscillation étant important, d'autres indices de performance ont été définis dans le but d'adoucir cette contribution qui est parfois prépondérante, et ce, en multipliant le terme à intégrer par un terme de pondération faible au début de l'opération.

On définit ainsi:

I.T.S.E.: Integral of time multiplied square Error:

$$J = \int_0^{\infty} t \mathcal{E}^2(t) dt.$$

et, I.T.A.E.: Integral of time multiplied absolute value of Error:

$$J = \int_0^{\infty} t |\mathcal{E}(t)| dt.$$

Ces derniers présentent l'avantage d'être calculable par ordinateur. L'intégrale, calculée en temps réel et en permanence, permet, en commande adaptative (Paragraphe II-3-4) L'ajustage des paramètres du correcteur afin de minimiser la valeur de J.

II - 3 LES PRINCIPALES METHODES DE COMMANDE OU DE REGULATION:

II - 3 - 1 La commande par rétroaction (feedback control):

En régulation par rétroaction, la valeur de la grandeur mesurée est continuellement comparée à la valeur de consigne affichée.

Ce type de boucle, implique davantage les conditions de contrôle que les appareils utilisés.

Si la commande par rétroaction permet de faire face à n'importe quelle perturbation, il va sans dire que l'action de correction ne peut être établie qu'après l'apparition de l'erreur dans le système à contrôler.

Ainsi, l'action de correction ne s'établit qu'avec un certain retard. Ce qui serait désastreux pour des systèmes à faible inertie ou à évolution rapide.

Un autre inconvénient réside dans le fait qu'il apparaît une oscillation au niveau du point de consigne si l'action est trop importante. La diminution de cette dernière rétablirait la stabilité du système mais avec une certaine lenteur. Ce qui est beaucoup plus tolérable au niveau de toute régulation.

La correction de l'erreur ne s'effectuant qu'après son apparition, un autre type de régulation a été mis au point pour y remédier. Il s'agit de la régulation par action anticipée.

II - 3 - 2 La commande par action anticipée (feed forward control):

La régulation par action anticipée a l'avantage, par rapport à la commande par rétroaction, de détecter les perturbations et essayer de les corriger dans le système avant que l'erreur ne puisse se développer.

Afin que cela puisse être réalisable, il faudrait:

- 1- Avoir une connaissance parfaite des fonctions de transfert des éléments de perturbations.
- 2- Identifier toutes les perturbations susceptibles d'agir sur le système à commander.
- 3- Vérifier la réalisation des correcteurs car un retard dans le procédé pourrait faire apparaître des termes du type e^{+3s} dans la fonction de transfert, ce qui voudrait dire que le régulateur devra prévoir l'avenir. Ce qui n'est pas possible.

Pour certains systèmes, théoriquement, la régulation, dans ce cas, pourrait être parfaite. Mais pour cela, il faudrait détecter toutes les perturbations et prévoir autant de régulateurs. Ce qui serait assez onéreux.

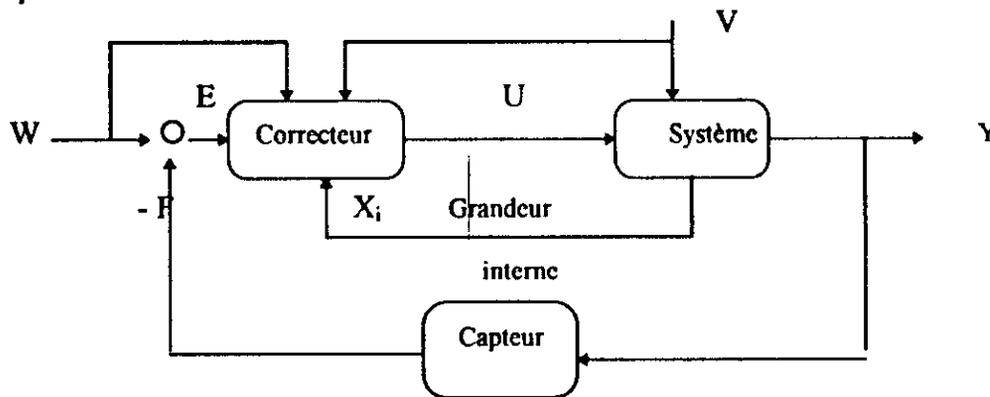


Fig. II-5 Représentation schématique de la correction mixte

La façon, la plus efficace, de remédier à ce problème, est d'utiliser une régulation mixte en utilisant les deux boucles- rétroaction et action anticipée - où la deuxième serait utilisée afin d'atténuer la perturbation la plus importante (fig II-5). La stabilité n'en sera qu'accrue.

II - 3 - 3 La régulation en cascade:

Dans le domaine des systèmes continus, on fait souvent appel à des circuits de réglage en cascade. On utilise une ou plusieurs grandeurs à régler intermédiaires inhérentes au système à régler, et on les traite au moyen de régulateurs séparés. Plusieurs régulateurs se trouvent ainsi mis en cascade.

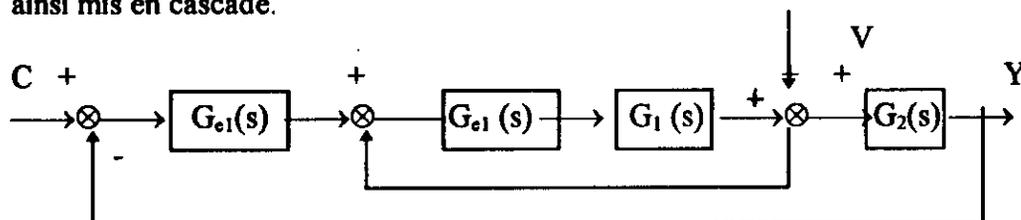


Fig. II-6 Régulation en cascade

La fig. (II-6) présente l'exemple de deux régulateurs mis en cascade où le premier est affecté à la boucle interne et le second à la boucle externe.

II - 3 - 4 La régulation adaptative:

La régulation adaptative permet de déceler les variations qui affectent la dynamique du système et d'ajuster les paramètres des régulateurs en conséquence.

II - 4 LES DIFFERENTES LOIS DE COMMANDE:

II - 4 - 1 La loi de commande proportionnelle:

Etant loin du but poursuivi, il est pertinent d'envoyer toute la puissance, comme il convient de la réduire lorsqu'on s'approche de celui-ci.

L'action u est alors dosée proportionnellement à l'écart

$$\varepsilon = (y_c - y)$$

Le facteur de proportionnalité étant K_p , l'action $u(t)$ s'écrira:

$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) \quad [K_p \text{ est donc la transmittance de l'action proportionnelle].$$

Si K_p est grand, la correction sera rapide mais avec un grand risque de dépassement. Si K_p est petit, la correction sera alors lente mais avec des risques d'oscillation.

II - 4 - 2 La loi de commande intégrale:

Au début de toute régulation, l'écart a tendance à être assez important. De ce fait, l'action proportionnelle serait à son maximum au début de l'opération.

L'utilisation d'une commande à action intégrale, permet de réagir calmement aux variations brusques de l'erreur, et assure un rattrapage progressif de la consigne.

Définie comme étant l'intégrale du signal d'erreur $\varepsilon(t)$, l'équation du correcteur intégral est:

$$u(t) = \frac{1}{\Gamma_i} \int_0^t \varepsilon(x) dx \quad (\Gamma_i = 1 / K_i : \text{constante de temps d'intégration}).$$

Son utilité réside dans le fait que sa commande est progressive mais persévérante car tant que subsiste une erreur, elle agit dans le sens à l'annuler.

Le correcteur à action exclusivement intégrale n'est pratiquement jamais utilisé, en raison de sa lenteur. Cependant, on fait appel à l'action intégrale à chaque fois qu'une erreur permanente doit être annulée.

II - 4 - 3 La loi de commande dérivée:

La commande dérivée tient compte du sens de l'erreur. Ainsi, si ε est positive, elle viendra s'ajouter afin de l'annuler.

Si, par contre, ε est négative, cela signifierait que l'on a dépassé la consigne, et dans ce cas l'action viendra se retrancher à l'action en court afin de rétablir la consigne.

Ainsi, l'action dérivée ne peut jamais être utilisée seule. Elle est définie comme étant la dérivée du signal d'erreur.

Son équation est :

$$u(t) = \Gamma_d \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad \Gamma_d = K_0 \quad : \quad \text{Constante de temps de dérivation.}$$

Cette action permet une correction rapide de l'erreur sans encourir le risque de dépassement de consigne. Elle permet d'améliorer la stabilité et la rapidité du système régulé.

La combinaison entre ces trois types de commande a donné lieu à des correcteurs à action proportionnelle et intégrale (PI), proportionnelle et dérivée (PD), proportionnelle, intégrale et dérivée (PID).

II - 5 LES REGULATEURS STANDARDS:

II - 5 - 1 Le régulateur à action proportionnelle:

Ce correcteur agit suivant la commande proportionnelle décrite dans le paragraphe (II-4-1).

II - 5 - 2 Le régulateur à action proportionnelle et intégrale:

L'équation de l'action proportionnelle et intégrale est donnée par la somme des deux actions, à savoir :

$$u(t) = K_p \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{\Gamma_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt \right]$$

La transformation de Laplace de cette équation donne:

$$U(s) = K_c \left[\varepsilon(s) + \frac{1}{\Gamma_i} \frac{\varepsilon(s)}{s} \right]$$

d'où la transmittance du correcteur:

$$G(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{s\Gamma_i} \right)$$

où: K_c est le gain statique du correcteur, et Γ_i sa constante de temps d'intégration.

La fig. (II-7) qui représente la réponse indicielle du correcteur PI, montre qu'un correcteur à action proportionnelle et intégrale assure une transmission instantanée du signal d'erreur $\epsilon(t)$, suivi d'une intégration de ce signal.

Ce correcteur sera utilisé à chaque fois qu'une erreur permanente doit être annulée.

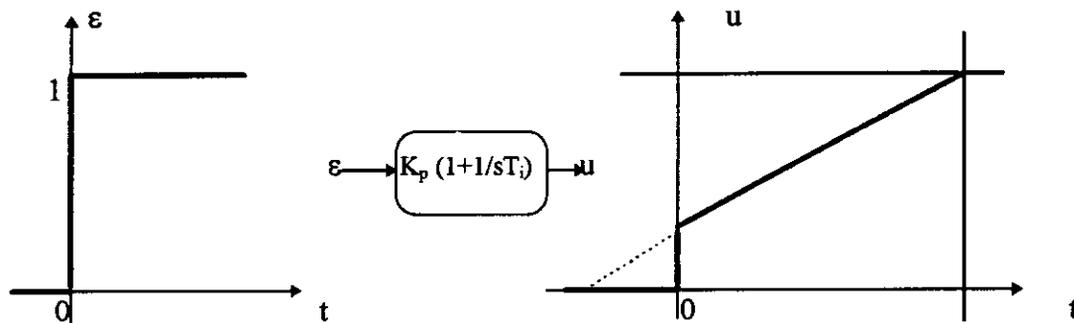


Fig. II-7 Correcteur PI.

II - 5 - 3 Le régulateur à action proportionnelle et dérivée:

La somme des effets proportionnel et dérivateur donne une correction PD dont l'équation est:

$$u(t) = K_c \left(\epsilon(t) + \Gamma_d \frac{d\epsilon(t)}{dt} \right)$$

où K_c est le gain statique du correcteur, et Γ_d sa constante de temps de dérivation. Sa transmittance est:

$$G_c(s) = K_c (1 + s \cdot \Gamma_d)$$

La réponse indicielle, représenté sur la figure II-8, montre qu'un correcteur PD transmet instantanément le signal d'erreur $\epsilon(t)$ augmenté de sa dérivée. Ce correcteur est, en général, utilisé à chaque fois que le système à réguler doit être plus rapide.

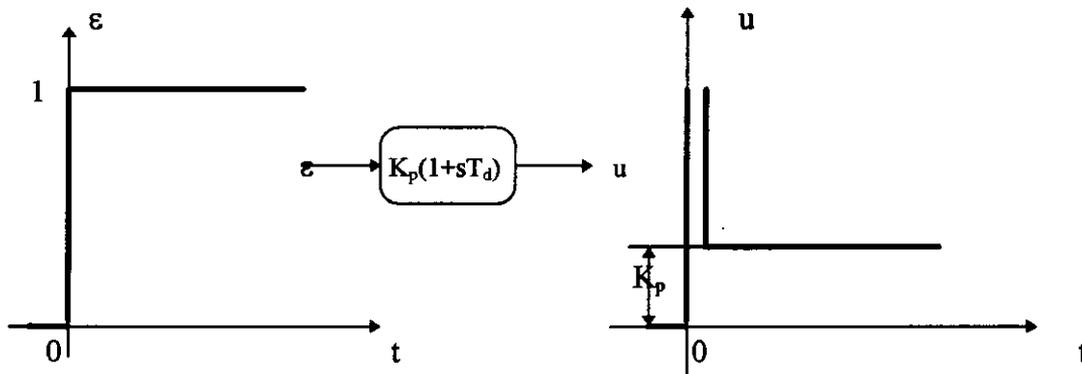


Fig II-8 Correcteur PD.

II - 5 - 4 Le régulateur à action proportionnelle, intégrale et dérivée (PID):

L'action mixte des trois lois de commande définies précédemment donne naissance à une action proportionnelle, intégrale et dérivée dont l'équation est :

$$u(t) = K_c \left(\epsilon(t) + \frac{1}{\Gamma_i} \int_0^t \epsilon(t) dt + \Gamma_d \frac{d\epsilon(t)}{dt} \right)$$

La fonction de transfert de cette action est:

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{s\Gamma_i} + s\Gamma_d \right)$$

La réponse indicielle de la figure II-9, montre que le signal d'erreur est transmis instantanément augmenté de sa dérivée et de son intégrale.

L'action du régulateur PID permet d'annuler l'erreur statique et d'avoir une réponse relativement rapide. C'est le régulateur le plus utilisé actuellement, vu ces performances.

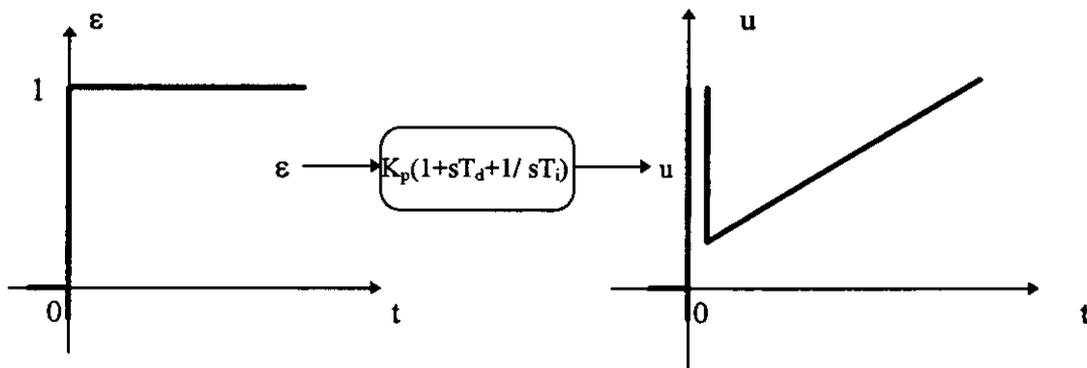


Fig II-9 . Correcteur PID.

II - 6 LES METHODES EMPIRIQUES DE SYNTHESE DES REGULATEURS STANDARDS (Méthode de Ziegler et Nichols).

Il existe plusieurs méthodes permettant la synthèse de régulateur P, Pi ou encore PID. Ces méthodes sont appelées à des essais indiciaires et sont basées sur la ^{minimisation} de l'indice de performance J (voir paragraphe II - 2- 4). On cite, ainsi, les méthodes de Ziegler- Nichols, de Chien - Hrones - Reswick, des diagrammes de Bode et de Strejc.

Grâce à la simulation de divers modèles de systèmes physiques, Ziegler et Nichols ont réussi à déterminer les paramètres du régulateur minimisant l'indice de performance J selon I.A.E, et ce dans le cas de l'essai indiciaire en boucle ouverte (fig II-10).

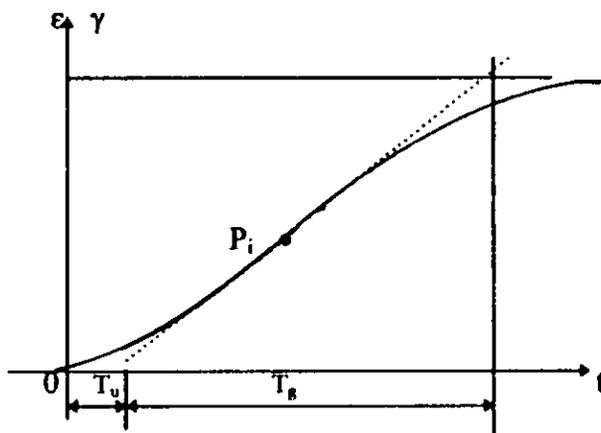


Fig. II-10 Réponse indiciaire

Supposons que la transmittance de la réponse indiciaire représentée par la figure (II.10) est $G(s)$.

L'allure de la réponse suggère une transmittance de la forme de Strejc

$$G(s) = \frac{e^{-sT_u}}{(1 + s\Gamma_1)^n} \quad [6] \text{ citée par [2].}$$

Où Γ_1 , Γ_i et n sont des variables tabulées.

La transmittance d'un système simple, représenté en pointillé est:

$$G(s) = \frac{1}{s\Gamma_g} e^{-sT_d}$$

car $\Gamma_g = 1 / (\tan \alpha)$ où $\tan \alpha$ est la tangente au point d'inflexion P_i .

Les paramètres des régulateurs à réaliser seront alors donnés par le tableau (II-11) qui définit K_p , Γ_i et Γ_d .

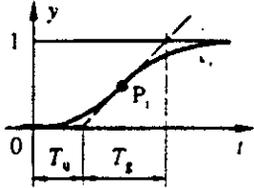
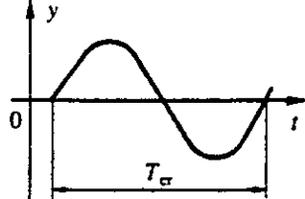
| Transmittance du régulateur | | Valeurs des paramètres du régulateur selon Ziegler-Nichols | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|--|--|----------------|--|--|---------------------|
| | | Essai indiciel (T_g, T_u) | | | Limite de pompage (K_{cr}, T_{cr}) | | |
| P | $G_c(s) = K_p$ | $K_p = T_g T_u$ |  | | $K_p = 0,5K_{cr}$ |  | |
| PI | $G_c(s) = K_p(1 + 1/sT_i)$ | $K_p = 0,9T_g T_u$ | $T_i = 3,3T_u$ | — | $K_p = 0,45K_{cr}$ | $T_i = 0,83T_{cr}$ | — |
| PID | $G_c(s) = K_p(1 + 1/sT_i + sT_d)$ | $K_p = 1,2T_g T_u$ | $T_i = 2T_u$ | $T_d = 0,5T_u$ | $K_p = 0,6K_{cr}$ | $T_i = 0,5T_{cr}$ | $T_d = 0,125T_{cr}$ |

Tableau II-11 Méthode de Ziegler et Nichols.

Lorsque l'ouverture de la boucle s'avère délicate, Ziegler et Nichols proposent un essai en boucle fermée qui permet de déterminer la limite de pompage.

Cette dernière exprime l'existence d'oscillations périodiques entretenues et généralement indésirables. Pour ce, il faut augmenter la valeur de K_p d'un régulateur P jusqu'à ce que le système bouclé atteigne la limite de stabilité.

La valeur de K_p nous donne alors K_{cr} .

Après avoir estimé la période de l'oscillation T_{cr} , il est alors possible d'estimer les paramètres du régulateur, à savoir K_p , T_i , et T_d en revenant au tableau (II-11).

La méthode de Chien - Hrones - Reswick est basée sur le même principe, alors que celle des diagrammes de Bode permet l'amélioration de la rapidité des systèmes en éliminant les plus grandes constantes de temps, par compensation des pôles par des zéros [2].

CHAPITRE III

III-1 - LES CAPTEURS:

III-1-1 Introduction:

L'organisation d'ensemble d'un système d'automatisation ne peut se faire sans la détermination de l'état du système commandé.

A cet effet, l'informatique industrielle fait appel aux capteurs qui sont les seuls points d'accès du système informatique au système commandé, et par leurs caractéristiques seront déterminées les performances qu'il est possible d'obtenir.

Ainsi, le choix d'un capteur exige une connaissance parfaite de ces caractéristiques ainsi que les différents paramètres pouvant intervenir lors de son utilisation, à savoir :

- L'intervalle de la grandeur physique à mesurer.
- La précision souhaité.
- Le temps de réponse désiré.
- Les conditions liées à l'accessibilité et à l'environnement.

III - 1 - 2 - Caractéristiques générales des capteurs:

III - 1 - 2 - 1 Chaîne instrumentale:

La détermination de l'état d'un système réglé par un système informatique se fait par l'intermédiaire de capteurs placés au sein-même du système commandé.

Avant que l'utilisateur de l'ordinateur ne puisse avoir des informations (chiffrees) sur l'état du système à réguler, le signal dérivé du paramètre physique mesuré doit traverser une suite d'éléments qui constituent la chaîne instrumentale. (Fig III-1)

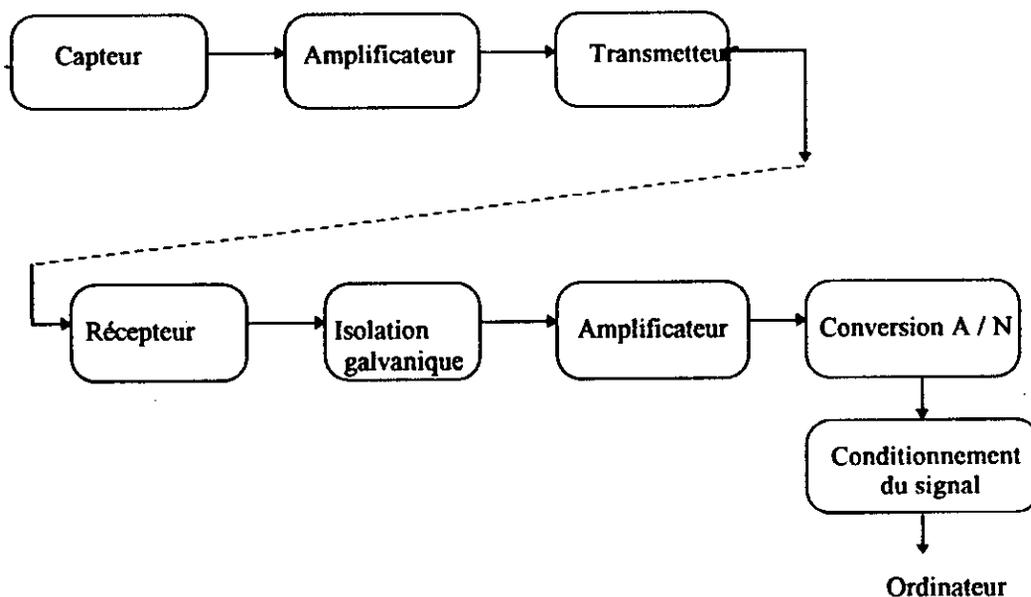


fig. III-1 Chaîne instrumentale

La tête de la chaîne est constituée d'un capteur qui mesure la grandeur physique qu'il traduit en un signal électrique. Afin d'assurer la liaison avec l'ordinateur, ce dernier est souvent suivi d'un amplificateur et d'un transmetteur.

Au niveau de l'ordinateur, la chaîne de mesure peut être constituée par un récepteur, une isolation galvanique par mesure de sécurité, un amplificateur de cadrage d'échelle, un C.A.N (convertisseur analogique-numérique) et enfin des dispositifs de conditionnement du signal.

Ces derniers éléments, dans le cas d'ordinateurs destinés à l'automatisation et à la conduite d'un processus, sont rassemblés dans des coupleurs standards qui font partie des interfaces de processus. L'ordinateur est ainsi utilisé en contrôle commande qui exploite les données en provenance des capteurs afin d'agir sur le système commandé à l'aide d'actionneurs.

Les capteurs, ainsi, assurent la conversion d'un paramètre physique en signal électrique par l'intermédiaire d'un transducteur.

On distingue deux types de capteurs :

- Les capteurs dits actifs qui génèrent un signal électrique fonction du paramètre mesuré.
- Les capteurs dits passifs qui travaillent par variation d'une impédance en fonction du paramètre mesuré et qui doivent être alimentés par une source extérieure.

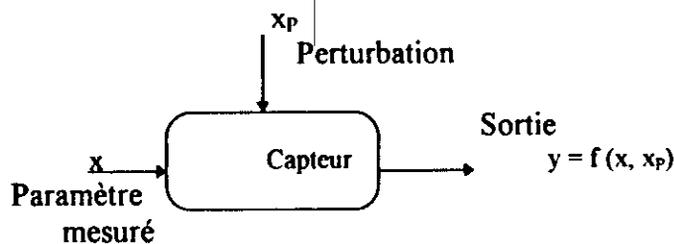


Fig III-2 Modèle simplifié d'un capteur

Le capteur peut ainsi être représenté par un modèle simplifié (fig III-2) qui comporte une grandeur d'entrée x appelée mesurande, une perturbation x_p qui pourrait parvenir de champs électromagnétiques parasites et enfin d'une fonction de transfert du capteur qui peut varier sous l'influence de grandeurs modifiantes x_m .

La sortie sera alors $y = f(x, x_p)$ où $f(x, x_p)$ variera en fonction des grandeurs modifiantes.

III - 1 - 2 - 2 Caractéristiques statiques:

Une courbe de réponse, liant la sortie y au paramètre mesuré x , peut être établie lors du régime permanent du capteur (fig. III-3)

Cette courbe va nous permettre de mesurer la sensibilité du capteur au voisinage de tout point x_i du mesurande et cela en calculant la pente de la tangente en ce point.

$$\text{Donc: } S_i = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_i}$$

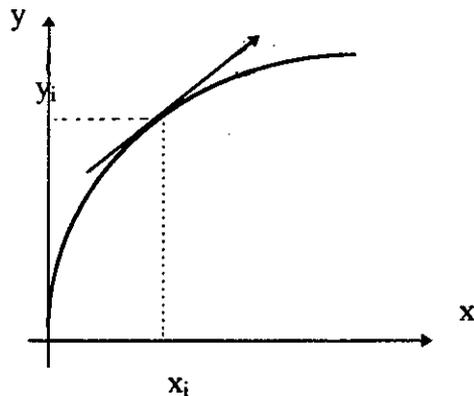


Fig III-3 Réponse d'un capteur en régime établi

Vue la complexité de l'exploitation des résultats et de l'étalonnage, les capteurs sont le plus souvent réalisés de façon à avoir une réponse linéaire dont l'équation serait :

$$y = Sx + x_0$$

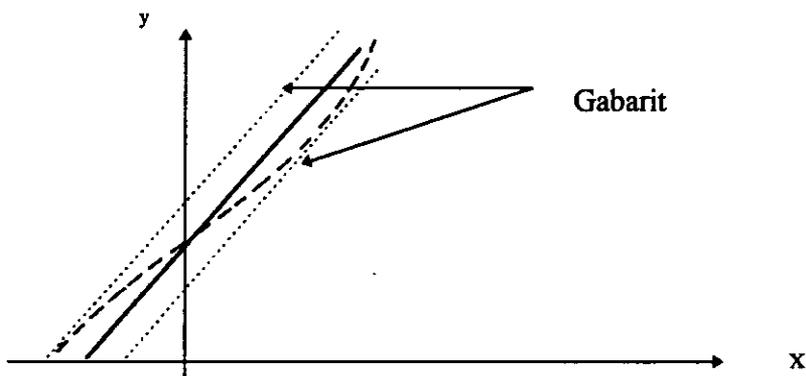


Fig. III-4 Réponse d'un capteur linéaire

Où S représente la sensibilité, et $-x_0 / S$ le décalage de zéro (fig III.4)

- La linéarité du capteur ne peut être qu'approximative et il est alors caractérisé par une marge d'erreur dite gabarit.

- La réponse du capteur peut être affectée par un phénomène d'hystérésis qui se traduit par une variation de la réponse par une même valeur de mesurande, suivant que celle-ci soit atteinte par des valeurs croissante ou décroissante.

- Le plus petit incrément Δx_i du mesurande au voisinage de la valeur x_i qui provoquerait une variation de la sortie est dit résolution. A l'origine Δx_0 est appelée seuil et lorsqu'il n'y a pas de décalage de zéro, la dynamique ou l'étendue de mesure peut être exprimée en décibels par l'équation suivante :

Dynamique = $20 \log (x_{\max} / \Delta x_0)$. Où x_{\max} est la limite supérieure du mesurande à utiliser sans provoquer la détérioration du capteur.

- A cet effet, le constructeur doit préciser le domaine de non-destruction ainsi que le domaine de non-détérioration pour lequel la courbe d'étalonnage reste crédible. Si l'utilisateur sort de ce dernier domaine sans pour cela provoquer la destruction du capteur, il doit alors réétalonner son appareil.

III - 1 - 2 - 3 - Caractéristiques dynamiques:

La réponse dynamique d'un capteur peut être représentée par un modèle mathématique. Mais pour beaucoup d'applications, il suffit d'avoir une indication globale telles que la fréquence de coupure ou la rapidité de réponse afin de déterminer les conditions d'emploi qui garantissent une mesure précise.

Le capteur peut, en particulier, être caractérisé par son temps de réponse $t_r(\varepsilon \%)$ qui est défini comme étant le temps nécessaire pour que le signal de sortie s'approche de la valeur en régime établi avec un écart $\varepsilon\%$ lorsque la mesurande subit une variation en échelon.

III - 1 - 2 - 4 Conditionnement du signal:

Le conditionnement du signal a pour but l'adaptation du signal de sortie du capteur à l'outil informatique.

A ce niveau, plusieurs fonctions sont assurées, à savoir:

- Alimentation des capteurs passifs.
- Amplification.
- Conversion des signaux.
- Filtrage.
- Compensation des grandeurs d'influence .
- Linéarisation.
- Réduction de la tension en mode commun.
- détection de l'information.

Ces différentes opérations appartiennent au domaine technique propre à l'électronique et à l'automatique. Et pour ce, nous éviterons toute aventure qui nous pousserait à essayer d'expliquer ces différentes fonctions qui font partie d'un domaine d'étude que nous ne maîtrisons pas.

III - 2 LES CAPTEURS DE TEMPERATURE:

III - 2 - 1 Introduction:

La température est une grandeur physique qui intervient dans la plupart des phénomènes physiques, chimiques, biologiques, et dont la mesure est la plus fréquente, tant en recherche que dans l'industrie.

Cependant, ce n'est pas une grandeur directement mesurable, mais repérable grâce à d'autres phénomènes associés tels que la variation de résistance d'un conducteur électrique ou la dilatation d'un fluide tel que le mercure.

III - 2 - 2 Echelle internationale pratique de température:

Ayant une étendue de mesure limitée, les capteurs de température ont des caractéristiques non linéaires qui exigent la disponibilité de moyens d'étalonnage commodes dans leur domaine d'utilisation.

A cet effet, en 1968, une échelle internationale pratique de température EIPT (International Practical Temperature Scale, IPTS) a été adoptée au niveau international afin de définir un certains nombres de points de référence dans une gamme qui s'étend de $-259,34^{\circ}\text{C}$ à $1064,43^{\circ}\text{C}$. (Voir Tableau III-5).

| Point d'équilibre | Tempé rature | |
|---|---------------------------------|---------|
| | θ ($^{\circ}\text{C}$) | T (K) |
| Point triple de l'hydrogène | -259,34 | 13,81 |
| Equilibre liquide-vapeur de H_2 à la pression 33360,6 N / m ² | -256,108 | 17,042 |
| Point d'ébullition de l'hydrogène | - 252,87 | 20,28 |
| Point d'ébullition du néon | - 246,048 | 27,102 |
| Point triple de l'oxygène | - 218,789 | 54,361 |
| Point de l'ébullition de l'oxygène | - 182,962 | 90,188 |
| Point triple de l'eau | 0,01 | 273,16 |
| Point d'ébullition de l'eau | 100 | 373,15 |
| Point de congélation du zinc | 419,58 | 692,73 |
| Point de congélation de l'argent | 961,93 | 1235,08 |
| Point de congélation de l'or | 1064,43 | 1337,58 |

Tableau (III-5) Echelle internationale pratique de température IPTS-68

III - 2 - 3 - Modèle simplifié de la réponse d'un capteur de température:

Disposé au sein du milieu à étudier dont la température est T_x , le capteur atteint une température T_c liée à la puissance thermique P échangée entre le milieu et le capteur par la loi d'Ohm thermique:

$$P = G_x (T_x - T_c)$$

G_x étant la conductance thermique entre le milieu et le capteur ($\text{W} / ^{\circ}\text{C}$). La puissance P est égale à la quantité de chaleur Q échangée entre le milieu et le capteur par unité de temps. Ainsi, la loi de Fourier nous permet d'obtenir une relation entre la température T_c et la quantité de chaleur reçue par le capteur et qui se traduit par l'équation:

$$\frac{dQ}{dt} = C_c \frac{dT_c}{dt}$$

C_c : Capacité calorifique du capteur:

La quantité de chaleur absorbée par le capteur doit être, nécessairement, égale à la quantité de chaleur cédée à ce dernier par le milieu. Ce qui nous amène à l'équation différentielle:

$$C_c \cdot \frac{dT_c}{dt} = G_x(T_x - T_c).$$

Cette dernière équation ne correspond guère à la réalité car le capteur, dans la pratique, subit des échanges thermiques avec l'extérieur du dispositif dont la température est T_e . Ceci nous pousse à modifier nos équations de la façon suivante:

$$P = G_x(T_x - T_c) + G_e(T_c - T_e)$$

d'où:

$$C_c \frac{dT_c}{dt} = G_x(T_x - T_c) + G_e(T_e - T_c)$$

G_e étant la conductance thermique entre le capteur et l'extérieur du dispositif.

Si nous considérons T_x et T_e constantes, nous obtenons la température du capteur en fonction du temps suivant la relation:

$$T_c(t) = \frac{G_x T_x + G_e T_e}{G_x + G_e} - \frac{G_x(T_x - T_{c_0}) + G_e(T_e - T_{c_0})}{G_x + G_e} e^{-t/\tau}$$

Avec:

T_{c_0} : La température du capteur à l'instant $t = 0$

$$\tau = \frac{C_c}{G_x + G_e} \quad \text{constante de temps.}$$

Après le régime transitoire, le capteur atteint une température:

$$T_c(\infty) = \frac{G_x T_x + G_e T_e}{G_x + G_e}$$

L'erreur de mesure due aux échanges thermiques parasites entre le capteur et l'extérieur du dispositif est : (voir fig III-6)

$$T_x - T_c(\infty) = \frac{G_e(T_x - T_e)}{G_x + G_e}$$

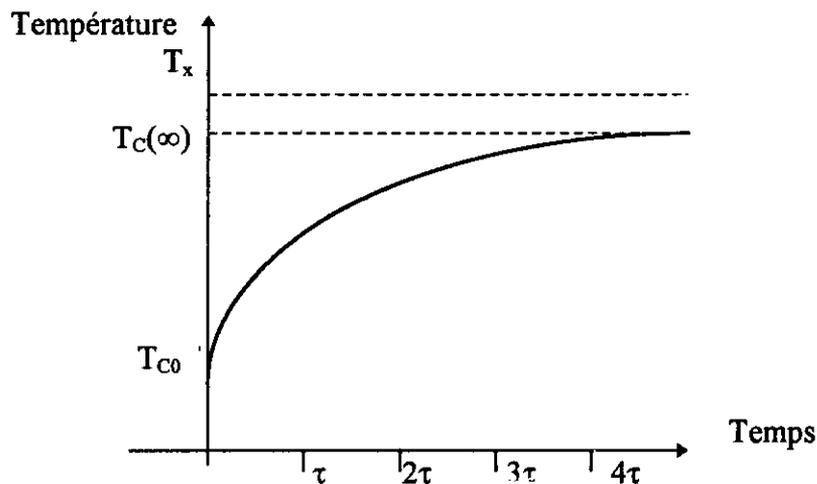


Fig. III-6 Réponse d'un capteur de température à un échelon de température

Afin que cette erreur soit la plus petite possible, il faut favoriser les échanges thermiques entre le milieu et le capteur tout en réduisant les échanges thermiques entre le capteur et l'extérieur du dispositif.

Cela revient à prendre $G_x \gg G_e$ de sorte que la constante de temps se réduise à:

$$\tau = C_C / G_e$$

Cette dernière égalité nous traduit l'intérêt d'une réduction de la capacité calorifique C_C du capteur afin de diminuer le temps de réponse.

III - 2 - 4 Les principaux capteurs de température:

III - 2 - 4 - 1 Les thermocouples:

Un thermocouple et un circuit électrique constitue par deux Jonctions reliant deux conducteurs différents. La Jonction placée au point de mesure est dite soudure chaude. L'autre Jonction, dont la température sert de point de référence est dite source froide.

Etant à des températures différentes, le thermocouple est le siège d'une force électromotrice V_s , fonction de la nature des deux conducteurs et de la différence de température.

Ainsi, le principe des thermocouples fonctionne suivant l'effet Seebeck où la force électromotrice s'annule pour des conducteurs de même ou lorsque les deux jonctions sont à la même température (fig III-7).

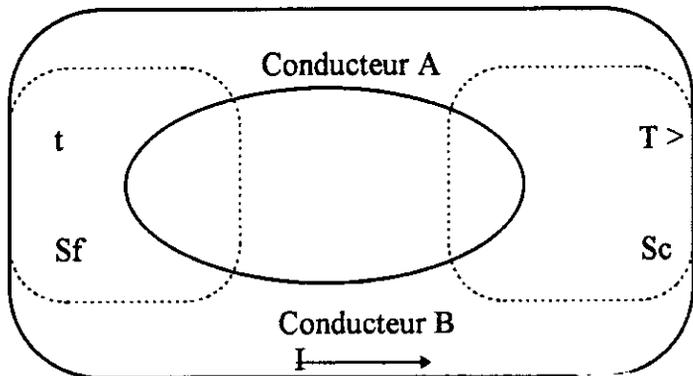


Fig. (III-7) Principe thermocouple

Les principaux thermocouples sont cités dans le tableaux (III-8)

| Couple thermoélectrique [élément (+) / élément (-)]* | Gamme de température (°C) | Sensibilité moyenne ($\mu V / ^\circ C$) | Symbole selon norme NF E 18001 | Symbole selon norme NF C 42321 |
|--|---------------------------|--|--------------------------------|--------------------------------|
| Cuivre / Constantin** | - 270 / 400 | 50 | T | T |
| Fer / Constantin** | - 210 / 1200 | 55 | J | |
| Chromel / Constantin** | - 270 / 100 | 78 | | E |
| Chromel / alumel** | - 270 / 1370 | 41 | N | K |
| Platine-Rhodium 10% / Platine | - 50 / 1760 | 10,5 | S | S |
| Platine-Rhodium 13% / Platine | - 50 / 1760 | 12 | | R |
| Platine-Rhodium 30% / Platine-Rhodium 6% | 0 / 1820 | 7 | | B |

(*) La source froide étant à 0 °C, une température supérieure à 0 °C mesurée par la soudure chaude donnera une température positive si le premier matériau est branché au pôle + de l'instrument de mesure.

(**) Composition des alliage de nickel: Constantin: 55 % Cu - 45 % Ni; Chromel: 90% Ni - 10% Cr; Alumel 95% Ni - 2% Mn - 2 % Al.

Tableaux (III-8). Principaux couples thermoélectrique pour températures courantes.

III - 2 - 4 - 2 Les thermistances:

les thermistances sont des résistances fabriquées par frittage d'oxyde semi-conducteurs de fer, de cobalt, de nickel, de chrome et de manganèse. plusieurs types de thermistances sont utilisées, à savoir :

III - 2 - 4 - 2 - 1 Thermistances au Silicium:

Elles permettent de réaliser des compensation en température

III - 2 - 4 - 2 - 2 CTR: Thermistance à coefficient de température négatif à variation brusque:

Leur constituant de base est un oxyde de vanadium.

III - 2 - 4 - 2 - 3 CTP : Thermistance à coefficient de température positif:

Elles sont souvent utilisées comme élément chauffants et sont des céramiques à base de baryum.

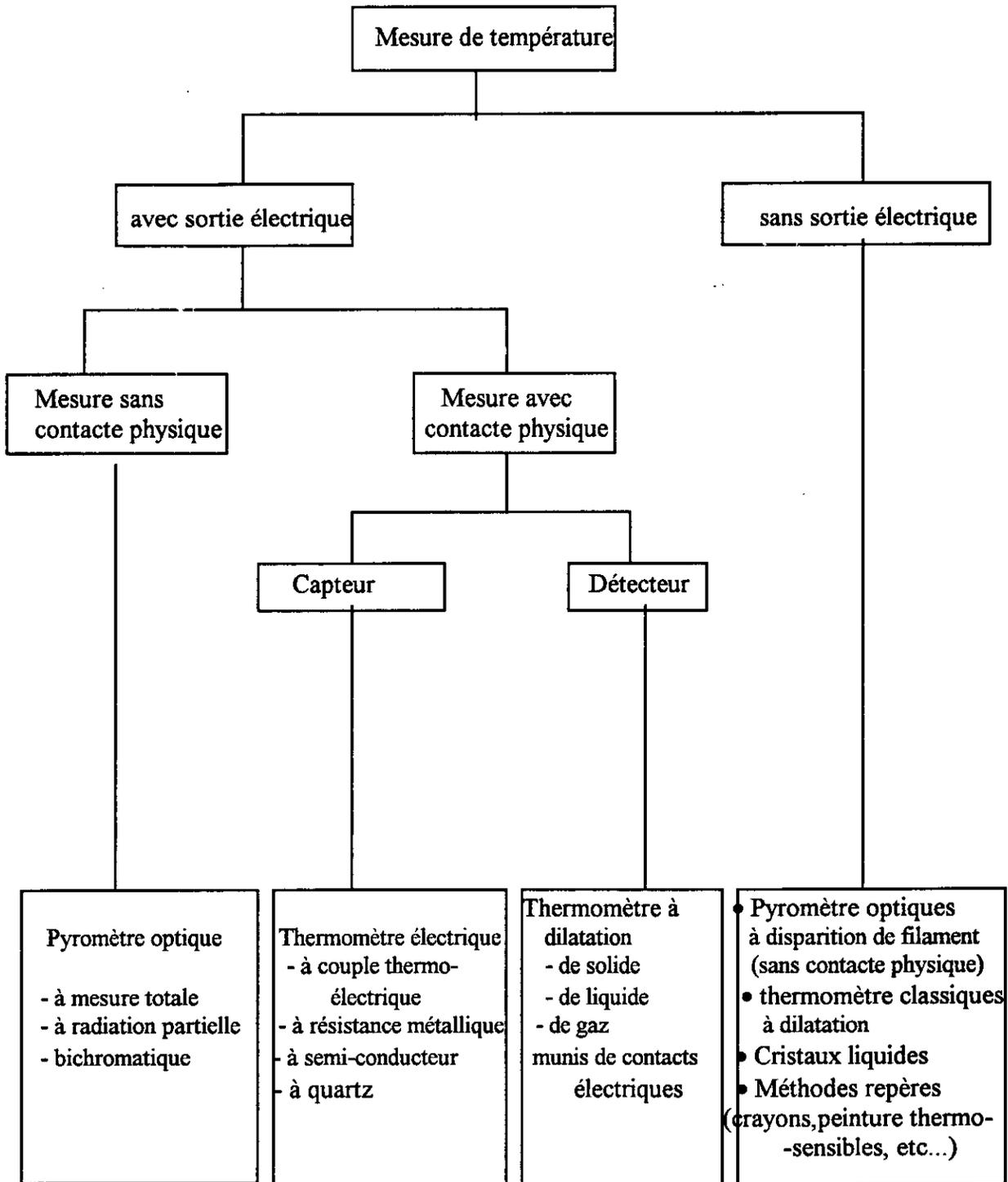
III - 2 - 4 - 2 - 4 CTN : Thermistance à coefficient de température négatif:

Ce sont des céramiques composées d'oxydes semi-conducteur à base de silicium, germanium, carbone ainsi les oxydes semi-conducteurs citées précédemment.

III - 2 - 5 Critères de choix d'un capteur de température:

Voir tableaux III-9, III-10, III-11.

Tableau III-9 Présélection d'un capteur de température



Pyromètre optique
 - à mesure totale
 - à radiation partielle
 - bichromatique

Thermomètre électrique
 - à couple thermo-électrique
 - à résistance métallique
 - à semi-conducteur
 - à quartz

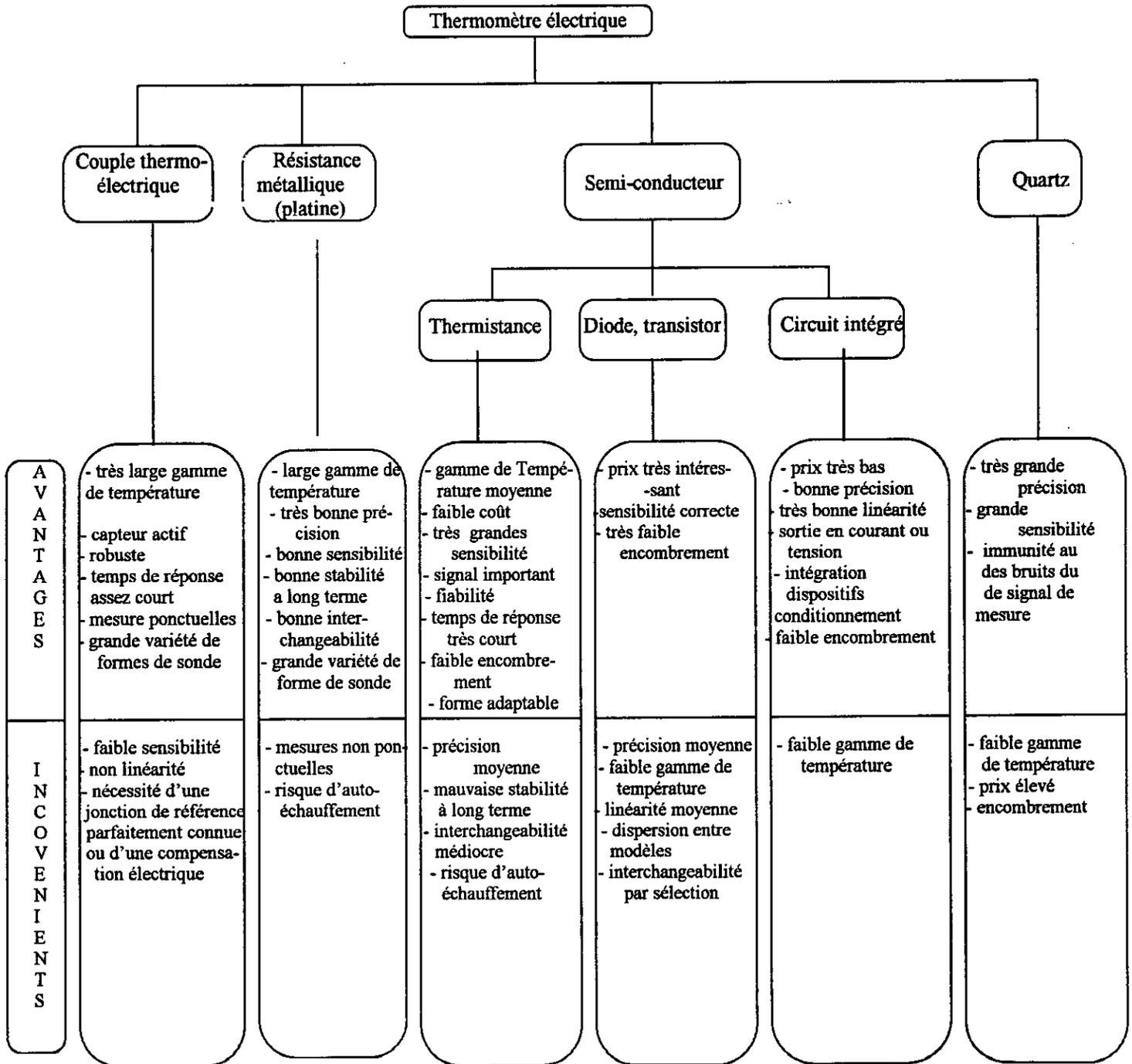
Thermomètre à dilatation
 - de solide
 - de liquide
 - de gaz
 munis de contacts électriques

- Pyromètre optiques à disparition de filament (sans contacte physique)
- thermomètre classiques à dilatation
- Cristaux liquides
- Méthodes repères (crayons, peinture thermo-sensibles, etc...)

Tableaux III-10 Gamme de température des principaux thermomètres

| TYPE | Gamme de température (en °C) | | | | |
|-------------------------------------|------------------------------|-----|------|------|------|
| | -300 | 0 | 1000 | 2000 | 3000 |
| Thermo couple | -270 | | | | 2700 |
| Résistance métallique | -260 | | | 1400 | |
| Thermistance | -100 | 450 | | | |
| Transistor | -50 | 150 | | | |
| Circuit intégré | -50 | 150 | | | |
| Quartz | -100 | 250 | | | |
| Pyromètre optique | | 300 | | | 3000 |
| Pyromètre à dilution de solide | -60 | 500 | | | |
| Pyromètre à dilution de liquide | -35 | 700 | | | |
| Pyromètre à dilution de gaz | -100 | 600 | | | |
| Thermomètre à dilatation de liquide | -55 | 600 | | | |
| Thermomètre à tension de vapeur | 0 | 400 | | | |
| Cristaux liquides | 0 | 200 | | | |
| Méthodes repères | | 30 | | | 2050 |

Tableau III-11 - Choix d'un thermomètre électrique



CHAPITRE IV

IV - 1 LA REGULATION PAR CALCULATEUR NUMERIQUE-INTRODUCTION A LA REGULATION PAR ORDINATEUR:

Les dispositifs ou les procédés commandés sont en général de nature analogique . Il en va de même pour les amplificateurs de puissance qui les commandent.

Les capteurs sont encore le plus souvent analogiques. On est alors amené à organiser la boucle de régulation comme indiqué sur la figure IV-1, ou la boucle est fermée par l'intermédiaire du calculateur, avec une interface d'entrée dite convertisseur analogique-numérique (C.A.N) au niveau de la sortie du capteur, et une interface de sortie dite convertisseur numérique-analogique (C.N.A) au niveau de l'entrée de l'amplificateur de puissance .

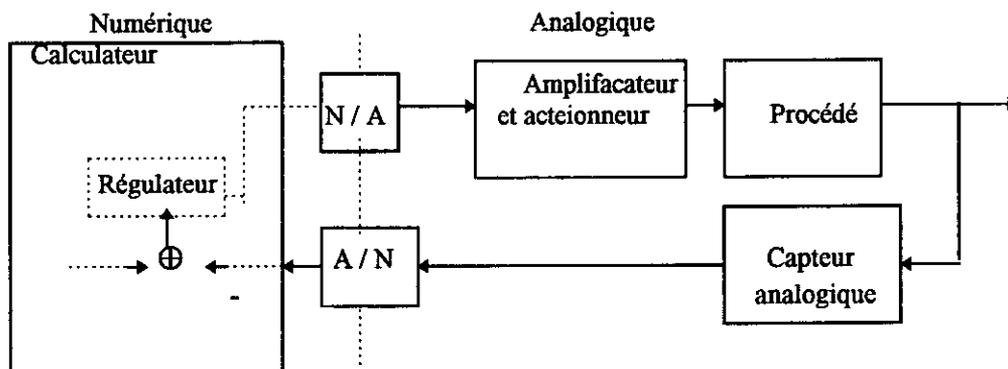


Fig. IV-1 Boucle de régulation numérique avec capteur analogique

NB:

Pour certaines applications , il existe des capteurs numériques qui délivrent directement un nombre proportionnel au paramètre mesuré. Dans ce cas le C.A.N est supprimé .

Lorsqu'on a affaire à un régulateur numérique, le système fonctionne de façon hybride: une partie du traitement se fait sous forme numérique au niveau du calculateur , l'autre s'effectuant sous forme analogique au niveau du procédé. (Fig. IV-1)

Lors de la conversion numérique-analogique , les échantillons provenant du calculateur doivent être transmis en un signal continu. Ce qui implique l'utilisation d'un bloqueur qui reconstruit le signal continu et qui agit d'une façon contraire à l'échantillonnage. Un signal en marche d'escalier est ainsi obtenu.

L'étude d'un système échantillonné s'effectue selon les mêmes principes généraux que celle d'un système continu, mais avec un certains nombres de problèmes spécifiques qui portent principalement sur la détermination de la fréquence d'échantillonnage et du domaine de représentation des échantillons.

Aussi peut-on distinguer deux sortes de régulation:

- Régulation analogique pilotée par ordinateur.
- Régulation numérique pilotée par ordinateur.

Selon le système lui-même , on peut aussi distinguer trois types de réglage:

- Réglage monovariable .
- Réglage multiple .
- Réglage multivariable .

Un réglage monovariable est caractérisé par le fait que l'ordinateur ne s'occupe que d'une seule grandeur à régler. Il est de ce fait mal utilisé puisqu'un ordinateur a la possibilité de traiter plusieurs grandeurs à régler en même temps.

Nous parlerons donc de réglage multiple lorsque les grandeurs à régler appartiennent à des systèmes indépendants, et de réglage multivariable lorsque celles-ci appartiennent au même système. Dans ce cas précis , il y a couplage entre les différentes grandeurs.

La régulation numérique par ordinateur est, en général , utilisée pour ces deux derniers types de réglage qui sont assez difficiles à établir autrement.

IV - 2 REGULATION ANALOGIQUE PILOTEE PAR ORDINATEUR:

Le correcteur analogique qui élabore le signal $u(t)$ à partir de l'erreur $\varepsilon(t)$ effectuée en quelque sorte un calcul permanent de la commande qu'il ajuste à tout instant. L'instrument de ce calcul est analogique. Il est en général formé par une électronique à base d'amplificateurs opérationnels .

La loi temporelle de commande est une somme pondérée de termes faisant intervenir les signaux , leurs dérivées et leurs intégrales.

Par exemple la lois de commande P.I.D s'écrit , comme nous l'avons déjà vu :

$$U(t) = K_p \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(x) dx + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right]$$

Le projet que nous avons consiste à discrétiser la loi de commande afin que les calculs de dérivation , d'intégration et de proportionnalisation soient effectuées par un calculateur numérique.

Pour permettre cela, nous poserons:

$t = k\Delta$, Δ étant une période d'échantillonnage à définir.

La démarche est la suivante:

- Discrétisation : le signal d'erreur est discrétisé; échantillonné au pas Δ grâce à un échantillonneur.
- Calcul numérique : numérisé à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique, l'échantillon est alors traité par l'ordinateur qui élabore la commande $U(k\Delta)$ à l'instant $k\Delta$.
- Reconstruction du signal : la commande $U(t)$ analogique est alors reconstruite avant d'être envoyée au système commandé.

La loi de commande, obtenue par l'une des méthodes connues pour les systèmes continus, sera d'autant mieux approchée par la discrétisation que Δ sera faible.

Il faut bien noter qu'il ne s'agit pas réellement de ce qu'on appelle une commande numérique, mais d'une manière purement technologique d'utiliser un ordinateur pour réaliser une commande analogique.

Signalons simplement que si Δ est de l'ordre du dixième ou du centième de la plus petite constante de temps du système à réguler, la différence entre le signal $U(t)$ calculé par l'ordinateur, puis reconstruit, et le signal $U(t)$ obtenu de manière purement analogique est alors insignifiante.

LA LOIS DE COMMANDE :

Nous avons précédemment dit que, pour des périodes d'échantillonnages assez petites, les paramètres du régulateur continu restent valables pour le même régulateur discret. L'essentielle de l'opération consiste à discrétiser la loi du régulateur continu.

Exemple :

La loi de commande P.I.D s'écrit :

$$U(t) = K_p \left[\mathcal{E}(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \mathcal{E}(x) dx + T_d \frac{d\mathcal{E}(t)}{dt} \right]$$

Nous allons discrétiser cette loi en procédant comme suit:

- On pose $t = k\Delta$.
- On choisit une approximation de la dérivée.
- On choisit une approximation cohérente pour le calcul de l'intégrale.

Si l'on appelle $I(k)$ la valeur approchée par la méthode des rectangles supérieurs de l'intégrale

$$\int_0^{k\Delta} \mathcal{E}(x) dx$$

on a:

$$I(k) = \sum_{i=1}^{i=k} \mathcal{E}(i) \cdot \Delta$$

Si l'on appelle $D(k)$ la valeur approchée de la dérivée $d\mathcal{E}(k\Delta) / dt$. on obtient alors:

$$D(k) = \frac{\mathcal{E}(k) - \mathcal{E}(k-1)}{\Delta}$$

L'erreur d'approximation est, dans les deux cas, de l'ordre de Δ .

En approchant l'intégrale par la méthode des trapèzes et la dérivée par

$\frac{\mathcal{E}(k) - \mathcal{E}(k-2)}{2\Delta}$.. nous aurions obtenu une erreur de l'ordre de Δ^2 . L'erreur sera donc d'autant plus faible que Δ sera petite.

Ainsi le P.I.D va pouvoir être programmé de la manière suivante :

$$U(k) = K_p \left(\mathcal{E}(k) + \frac{\Delta}{T_i} \sum_{i=1}^{i=k} \mathcal{E}(i) + \frac{T_d}{\Delta} \left(\mathcal{E}(k) - \mathcal{E}(k-1) \right) \right)$$

$$U(k-1) = K_p \left(\mathcal{E}(k-1) + \frac{\Delta}{T_i} \sum_{i=1}^{i=k} \mathcal{E}(i) + \frac{T_d}{\Delta} \left(\mathcal{E}(k-1) - \mathcal{E}(k-2) \right) \right)$$

En retranchant les deux expressions on obtient l'expression récurrente de $U(k)$:

$$U(k) = U(k-1) + K_p \left[\left(1 + \frac{\Delta}{T_i} + \frac{T_d}{\Delta} \right) \mathcal{E}(k) - \left(1 + 2 \frac{T_d}{\Delta} \right) \mathcal{E}(k-1) + \frac{T_d}{\Delta} \mathcal{E}(k-2) \right]$$

on pose:

$$K_i = \frac{\Delta}{T_i} K_p$$

$$K_d = \frac{T_d}{\Delta} K_p$$

on a donc:

$$U(k) = U(k-1) + (K_p + K_i + K_d) \mathcal{E}(k) - (K_p + 2K_d) \mathcal{E}(k-1) + K_d \mathcal{E}(k-2)$$

Nous allons voir, ultérieurement, que lors de la programmation, il est plus pratique d'introduire une variable auxiliaire et d'éviter ainsi de programmer la formule précédente, telle

Nous allons voir, ultérieurement, que lors de la programmation, il est plus pratique d'introduire une variable auxiliaire et d'éviter ainsi de programmer la formule précédente, telle qu'elle, dont la complexité relative est et la lenteur de son exécution serait tout à notre désavantage.

IV - 3 COMMANDE NUMERIQUE PAR ORDINATEUR:

Il s'agit dans ce cas d'allonger considérablement Δ sans pour cela perdre la qualité de la régulation.

La différence entre la correction analogique par calculateur et la correction numérique vraie est visualisée sur la figure IV-2.

Le second correcteur, qui utilise au mieux l'inertie du système, agit de façon précise et efficace de telle sorte qu'il atteint la même précision que le premier correcteur avec moins d'interventions .

Ainsi, il libère l'ordinateur pour effectuer d'autres tâches, sans pour cela nuire à la qualité de la régulation .

La figure IV-2 montre assez bien que la première correction , en fine marche d'escalier, peut être assimilée à la correction analogique (correction zéro sur la figure), alors que la deuxième correction, en large marches d'escalier , en est assez loin.

Dans ce cas il est nécessaire d'introduire la transformée en Z qui exprime une relation récurrente entre l'entrée et la sortie du système .

VI - 3 - 1 Transformée en Z:

La transformée en Z est relative aux suites numériques. Elle permet de ce fait un traitement des signaux et systèmes numériques et des systèmes échantillonnés, analogue à celui qui permet la transformée de Laplace pour les signaux à temps continu .

Elle s'écrit :

$$F(Z) = \sum_{k=0}^{\infty} f[k] Z^{-k}$$

avec $Z = e^{sT}$

En régulation échantillonnée , on fait souvent appel à la transformée en Z complète qui s'écrit :

$$F(Z, \varepsilon) = \sum_{k=0}^{\infty} f(k + \varepsilon) Z^{-k}$$

où ε est un paramètre compris entre 0 et 1 .

Pour $\varepsilon = 0$, la transformée complète se réduit à la première définition .

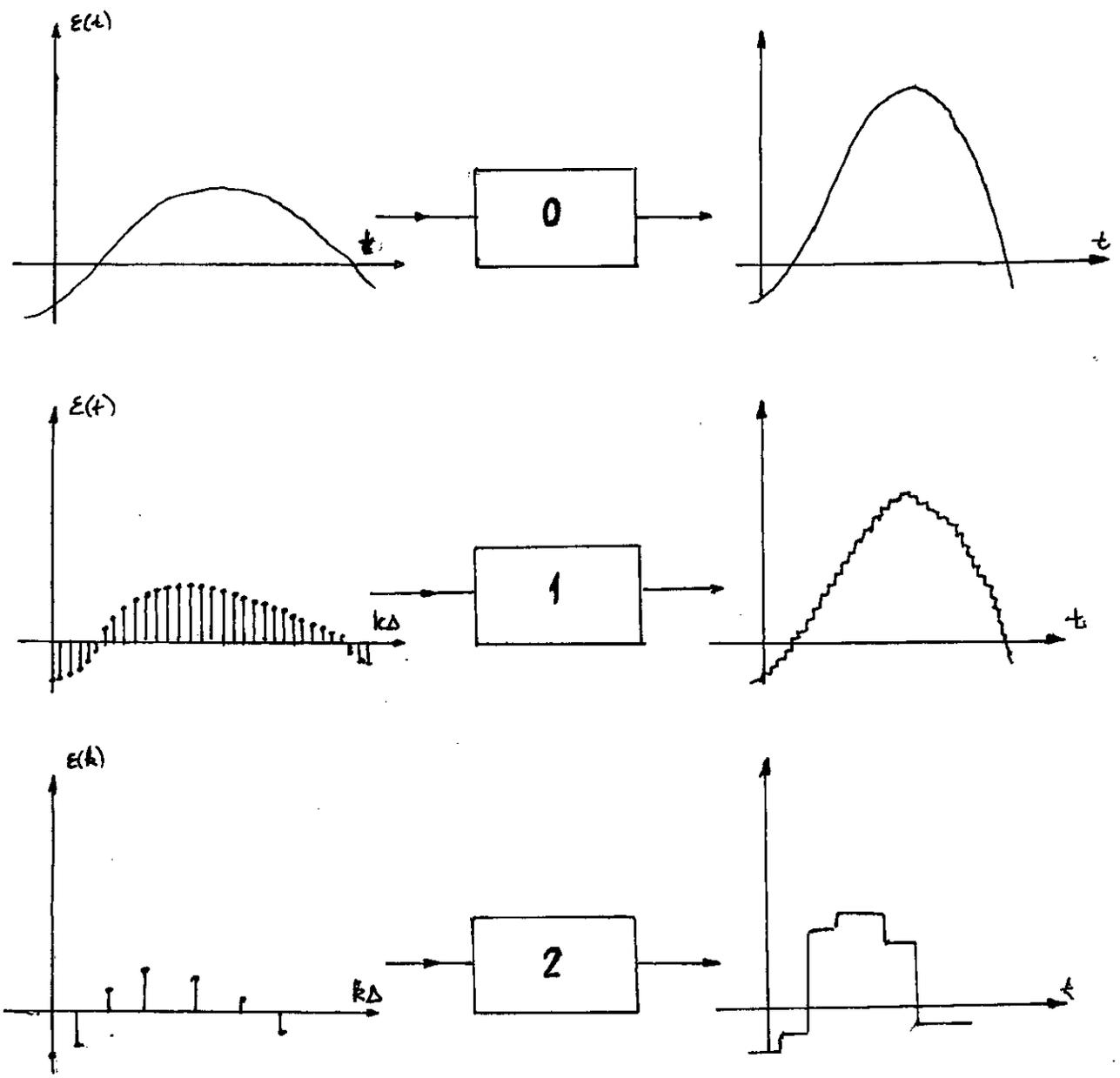


Fig IV. 2

IV - 3 - 2 Régulation discrète:

Dans ce cas, la fonction de transfert du régulateur, ainsi que celle du système s'écrivent en fonction de Z .

La synthèse des régulateurs dans ce cas fait appel à des méthodes assez de celles utilisées pour la synthèse des régulateurs continus. D'une façon générale, la synthèse des régulateurs discrets est basée sur la compensation des pôles de la fonction de transfert du système par les zéros de la fonction de transfert du régulateur.

NB :

Dans notre projet nous allons essayer d'exploiter au maximum nos connaissances des systèmes continus pour ne pas avoir à manipuler la transformée en Z ou tout autres méthodes relatives aux systèmes discret et dont nous ne maîtrisons pas l'outil.

IV - 3 - 3 Exemple de régulateurs standards discrets:

Afin d'illustrer notre exemple, nous nous référerons au régulateur P.I.D qui regroupe les performances et les propriétés de tous les régulateurs standards.

La transformée en Z de la relation entrée-sortie est:

$$U^*(Z) = \left(K_p + K_i \frac{Z}{Z-1} + K_d \frac{Z-1}{Z} \right) \mathcal{E}^*(Z)$$

d'où la fonction de transfert discrète du PID:

$$D(Z) = K_p + K_i \frac{Z}{Z-1} + K_d \frac{Z-1}{Z} \quad [10]$$

Les termes de cette expression représentent respectivement les composantes proportionnelle, intégrale et dérivée.

IV - 3 - 4 Relation entre le régulateur P.I.D discret et le régulateur P.I.D continu:

lorsque la période d'échantillonnage Δ est relativement petite, il est souvent admis de traiter un système échantillonné approximativement comme un système continu (voir paragraphe IV-2).

Une nouvelle approche consiste à utiliser l'approximation de Padé:

$$Z = e^{sT} \approx \frac{1+sT/2}{1-sT/2} \quad [10].$$

qui est valable pour Δ assez petit.

On remplace donc Z par sa valeur dans la fonction de transfert.

$$D(Z) \equiv K_p + K_i \frac{1+s\Delta/2}{s\Delta} + K_d \frac{s\Delta}{1+s\Delta/2}$$

En effectuant un calcul assez simple nous obtenons:

$$D(Z) = \frac{1+s \left(\frac{K_p + K_i}{K_i} \right) \cdot \Delta + S^2 \cdot \frac{K_d + K_p/2 + K_i/4}{K_i} \cdot \Delta^2}{s \frac{\Delta}{K_i} (1+s\Delta/2)} \quad (*)$$

La fonction de transfert d'un régulateur P.I.D étant:

$$R(Z) = K \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right)$$

d'où:

$$R(Z) = \frac{T_d T_i S^2 + T_i S + 1}{\frac{T_i}{K} s}$$

Par identification on obtient:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta}{K_i} = \frac{T_i}{K} \\ \frac{K_p + K_i}{K_i} \Delta = T_i \\ \frac{K_d + K_p/2 + K_i/4}{K_i} \Delta^2 = T_d \cdot T_i \end{array} \right. \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} K_i = K \frac{\Delta}{T_i} \\ K_p = \frac{T_i - \Delta}{T_i} K \\ K_d = \left[\frac{T_d T_i}{T^2} - \frac{1}{4} - \frac{T_i - \Delta}{2T} \right] K_i = \left[\frac{T_d}{\Delta} - \frac{2T_i - \Delta}{4T_i} \right] K \end{array} \right.$$

Les régulateurs P.D et P.I sont approchés de la même façon.

Il est à noter que la fonction de transfert d'un régulateur discret introduit, selon la relation (*) une petite constante de temps ($\Delta/2$) égale à la moitié de la période d'échantillonnage.

NB:

Il est important de tenir compte de cette petite constante de temps lors de l'analyse de la stabilité du système continu équivalent.

En appliquant , de la même façon, l'approximation de Padé à des régulateurs P.D et P.I discrets nous obtenons le tableau IV-3:

| | | | |
|----------|----------------------------------|--|--|
| K_p | $\frac{(2T_i - \Delta) K}{2T_i}$ | K | $\frac{T_i - \Delta}{T_i} K$ |
| K_i | $\frac{\Delta K}{T_i}$ | -- | $\frac{\Delta K}{T_i}$ |
| K_d | -- | $\frac{2T_d - \Delta}{2T} K$ | $\frac{(T_d - 2T_i - \Delta) K}{\Delta 4 T_i}$ |
| remarque | -- | Introduction d'une constante de temps = $\Delta / 2$ | Introduction une constante de temps = $\Delta / 2$ |

IV - 3 - 5 Période d'échantillonnage:

La période d'échantillonnage est un paramètre très important dans le réglage échantillonné, en effet elle influe d'une façon direct sur les qualités du réglage et sur le mode de celui-ci (analogique ou numérique comme nous avons déjà vu).

En général, la période d'échantillonnage T (D) prend les valeurs suivantes pour le réglage de:

- Machine électrique 1 à 20 ms
- Processus thermique métallurgique, chimiques :
 - Débit, pression, puissance, quantité : 5s
 - Pression, température : 30s
 - Température niveau : 60s
- Réglage des réseaux électrique 5 à 15 min [10].

A noter que ces dernières valeurs ne donnent qu'un ordre de grandeurs, et la période T est souvent déterminer par l'étude du comportement dynamique du système à régler qui donne une valeur pour lesquelles on évalue la qualité de réglage, on répète les mêmes opérations pour une valeur de T plus petites (par exemple la moitié de la valeur précédente) on constate en général qu'à partir d'une certaine valeur de la période d'échantillonnage la qualité de réglage ne varie plus de manière importante, on obtient ainsi, une valeur "optimal" pour la période d'échantillonnage cependant, on ne peut pas diminuer à volonté la valeur de la période d'échantillonnage. En effet si cette dernière devient trop petite, le calculateur de processus (l'ordinateur) peut être surchargé pour l'élaboration des algorithmes de réglage . En aucun cas, la période d'échantillonnage peut-être inférieur au temps de calcul nécessaire .

LANGAGE DE PROGRAMMATION:

Il existe des langages spécifiques à la régularisation automatique appliqués à ce qu'on appelle les automates programmables on cite le " ADA " le MODULA -2 (1) " ADA " est un langage normalisé développé à la demande du DOD (dépt of défense) des Etats-Unis.

MODELA 2 a été créé par WIRTH et il est considéré comme un descendant direct du PASCAL (langage structure).

(1) P.DESCHIZEAU " langage de programmation industriel " T.I.

On utilise aussi les langages évolués, souvent le PASCAL et le BASIC qui sont plus généraux et plus connus du fait de leur utilisation multiples.

CHAPITRE V

BUT DE L'EXPERIENCE:

Cette expérience a pour but la constatation du comportement du régulateur tout ou rien, ainsi que la bonne marche de la régulation et ce en fonction de:

- La position de l'élément de chauffe par rapport au capteur.
- La puissance fournie au système régulé.

V - 1 GENERALITES:

V - 1 - 1 PRINCIPE DE LA REGULATION THERMIQUE [12]:

Dans une enceinte, il peut y avoir trois types d'échanges calorifiques susceptibles de modifier sa température:

- 1- Les échanges calorifiques entre l'enceinte et le milieu ambiant.
- 2- Libération ou absorption de chaleur qui pourrait se produire en son sein et due à des réactions chimiques ou des changements d'états.
- 3- Variation de l'énergie due à l'alimentation.

Ainsi, pour maintenir la température de l'enceinte constante, il faut diminuer ces échanges calorifiques, et cela en procédant de trois façons différentes:

- a- Maintenir les échanges calorifiques entre l'enceinte et le milieu ambiant constants et assurer une alimentation de chauffe à puissance constante (un four par exemple)
- b- Maintenir la température ambiante constante en réalisant des bains thermostatiques qui utiliseraient la chaleur dégagée par l'enceinte afin d'obtenir un changement d'état de la composition du bain.
Ainsi, la composition du bain se modifie à température constante (la fusion de la glace et la vaporisation de la carboglace en sont des exemples).
- c- Maintenir la température de l'enceinte constante en compensant la quantité de chaleur apportée ou cédée par celle-ci.

A cet effet, on fait appel aux régulateurs de température constitués suivant les règles des asservissement (voir fig V-1).

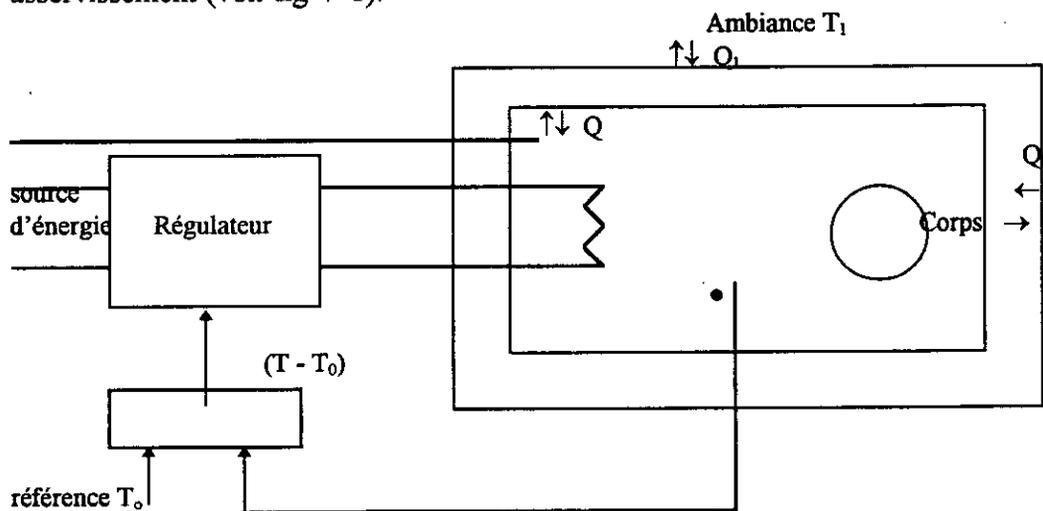


Fig V-1 Principe d'un thermostat

V - 1 - 2 PRINCIPE DU REGULATEUR DE TEMPERATURE [13]:

Il est assez difficile de traduire, mathématiquement, l'état de l'enceinte si nous prenons en considération tous les échanges calorifiques pouvant s'y produire.

Ainsi, pour simplifier les différents paramètres pouvant exister, nous admettrons que l'enceinte contient des corps calorifiquement inertes ($Q_0 = 0$) et en équilibre thermique avec elle.

Nous supposerons aussi, que la température du milieu ambiant reste toujours inférieure à la température de l'enceinte de façon à ce que les échanges se fassent dans un même sens.

Ainsi, l'enceinte placée dans un milieu ambiant à la température T_A et à laquelle on fournit, par unité de temps, une quantité de chaleur Q , prend une température d'équilibre T telle qu'elle cède au milieu ambiant une quantité de chaleur Q_A égale à Q .

Dans ces conditions, pour maintenir la température de l'enceinte à une valeur T_0 , il faut ajuster l'apport énergétique Q en fonction de l'écart ($T - T_0$).

Pour cela, il faut mesurer la température de l'enceinte T et la comparer à une température de consigne T_0 . L'organe régulateur, sensible à l'écart ($T - T_0$), va actionner l'élément de chauffe, de façon à ce que la valeur absolue de ($T - T_0$) diminue, et ce jusqu'à l'obtention d'une température T égale à T_0 .

De ce fait, il apparaît que la boucle de régulation doit comporter différents éléments qui assurent:

- La mesure de la température T (un thermomètre ou un capteur de température)
- La comparaison avec la température de consigne (un détecteur d'écart)
 - Un actionneur modulant l'énergie fournie à l'enceinte en fonction de ($T - T_0$) (un régulateur)
- Et enfin une source d'énergie qui va agir sur le système à réguler.

V - 2 RAPPEL THEORIQUE

La régulation par tout ou rien consiste à chauffer l'enceinte, précédemment décrite, par une résistance électrique, tant que sa température n'a pas atteint la température de consigne T_0 . Une fois atteinte, le régulateur coupe le courant de chauffe jusqu'à ce que celle-ci atteigne une température T_1 , légèrement inférieure à T_0 .

Ainsi, on chauffe le milieu à réguler (l'enceinte) tant que celle-ci n'a pas atteint la température de consigne. Coupée, la chauffe ne se réenclanche que lorsque la température de l'enceinte franchit le seuil inférieur de la température de consigne.

La température de la résistance, initialement à la température T_A , s'élève pour tendre vers une température de régime T_R .

Le thermomètre, placé dans l'enceinte, suit l'évolution de la température de la résistance avec un certain retard dû au temps que met la chaleur pour passer de l'un à l'autre.

Ainsi, lorsque le thermomètre est en T_0 , la résistance est à une température plus élevée T'_0 . Le courant coupé, le thermomètre, au cours du refroidissement, suit l'évolution avec le même retard de sorte que, lorsqu'il est en T_1 la résistance est en T'_1 . (voir fig. V-2).

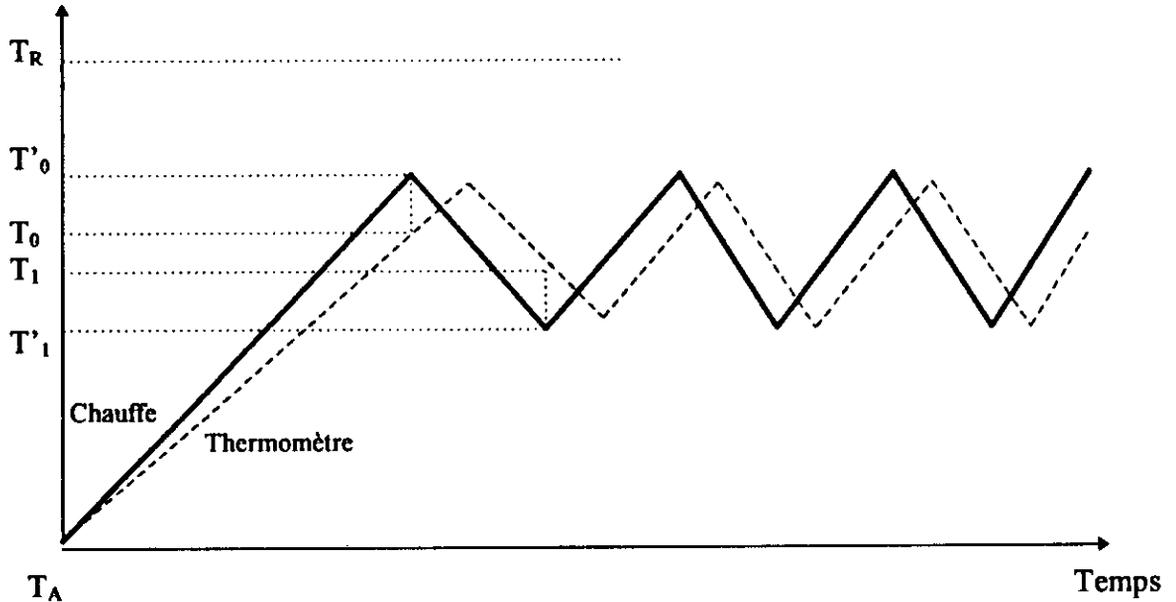


Fig. V-2 Régulation par tout ou rien

Le courant est alors envoyé de nouveau à la résistance et le cycle se poursuit.

La (fig. V-3) qui représente une période d'oscillation, nous permet de calculer la période Γ et l'amplitude des oscillations $(T'_0 - T'_1) = A$.

- 1- Le retard des indications du thermomètre sur la température de la résistance est constant égal à δ .
- 2- La vitesse d'échauffement V_c est constante ($^{\circ}\text{C}/\text{S}$).
- 3- La vitesse de refroidissement V_r est constante ($^{\circ}\text{C}/\text{S}$).

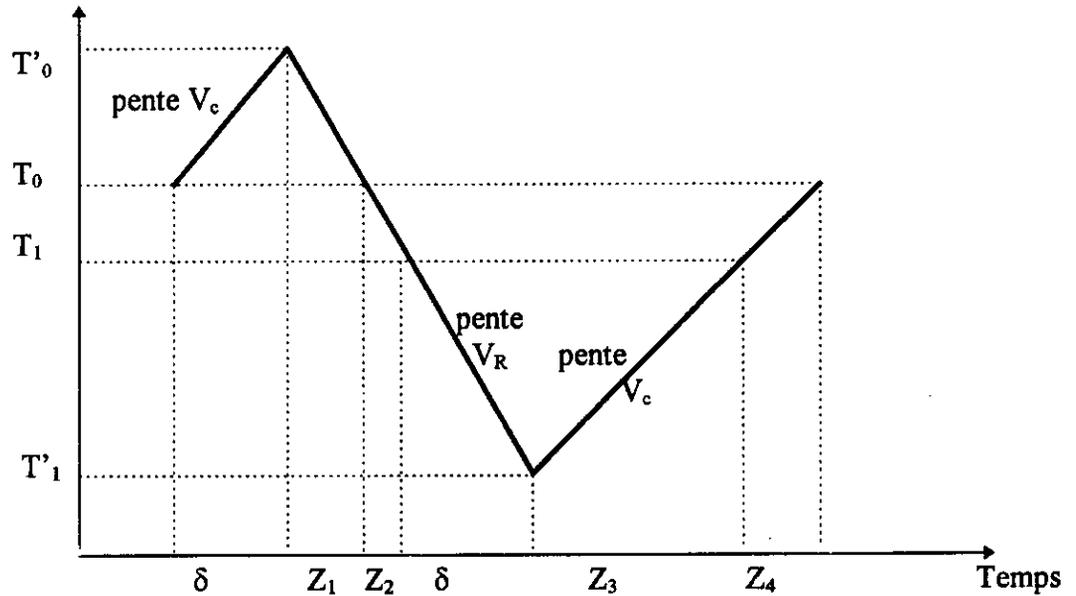


Fig. V-3 Régulation par tout ou rien (amplitude et période)

En partageant le domaine d'oscillation d'une seule période, nous obtenons les tranches suivantes:

$$\delta = \frac{1}{V_c} (T'_0 - T_0) = \frac{1}{V_R} (T_1 - T'_1)$$

$$Z_1 = \frac{1}{V_R} (T'_0 - T_0) = \frac{V_c}{V_R} \delta$$

$$Z_2 = \frac{1}{V_R} (T_0 - T_1)$$

$$Z_3 = \frac{1}{V_c} (T_1 - T'_1) = \frac{V_R}{V_c} \delta$$

$$Z_4 = \frac{1}{V_c} (T_0 - T'_1)$$

Ainsi, nous pouvons calculer la période en sommant les différentes tranches précédemment obtenues, soit:

La période

$$\Gamma = \delta \left(2 + \frac{V_c}{V_R} + \frac{V_R}{V_c} \right) + (T_0 - T_1) \left(\frac{1}{V_R} + \frac{1}{V_c} \right)$$

Pour obtenir l'amplitude, il suffit de calculer la somme :

$$(T'_0 - T'_1) = (T'_0 - T_0) + (T_0 - T_1) + (T_1 - T'_1)$$

$$\text{Or: } (T'_0 - T_0) = \delta V_c$$

$$\text{Et: } (T_1 - T'_1) = \delta V_R$$

L'amplitude $(T'_0 - T'_1) = \delta (V_c + V_R) + (T_0 - T_1)$

De bonnes conditions expérimentales correspondraient à $V_R = V_c$, ce qui conduirait à une période minimale de :

$$\Gamma = 4 \delta + \frac{2}{V_c} (T_0 - T_1)$$

Dans ces conditions, si la plage de régulation est réduite à zéro ($T_0 = T_1$), il existera toujours une oscillation d'amplitude $2 V_c \delta$ et de période 4δ , ce qui permet de conclure que :

"Le facteur le plus important d'un régulateur par tout ou rien est le retard thermique de l'élément sensible sur l'élément chauffant ". [12]

L'expérience a montré qu'il était possible de réduire ce facteur en procédant comme suit: [13]

- 1- Placer l'élément de contrôle thermique le plus près possible de l'élément chauffant.
- 2- S'assurer d'une bonne agitation du gaz ou du liquide contenu dans l'enceinte afin d'assurer un maximum d'échanges thermiques entre les deux éléments.
- 3- Faire éventuellement remplir les fonctions de contrôle thermiques et de chauffe par un seul et même appareil.

V - 3 MATERIEL UTILISE:

- Une enceinte thermique de 30 cm de diamètre contenant un volume de 14 litres d'eau
- Un agitateur IKA - RW 15 (Jake and Kunkel).
- Un thermomètre à contact
- Un voltmètre de classe 1,5
- Un autotransformateur préalablement étalonné.
- Un thermomètre digital qui nous permettra de suivre avec précision l'évolution de la température de la masse thermique.
- Un chronomètre SEIKO .
- Un thermoplongeur de résistance $R = 52,5 \text{ Ohms}$
- Un régulateur tout ou rien

V - 4 DESCRIPTION DU MONTAGE:

- Placer l'agitation au centre de la masse thermique .
- Placer le thermomètre à contact ainsi que le thermoplongeur au sein de l'enceinte thermique, au niveau des parois internes.
- Brancher le thermomètre à contact sur le régulateur au niveau de l'entrée " contact "
- Relier la sortie du courant du régulateur à l'alimentation de autotransformateur (son entrée étant reliée à une alimentation externe de 220 V) .
- Brancher le thermoplongeur au niveau de la sortie de courant de autotransformateur

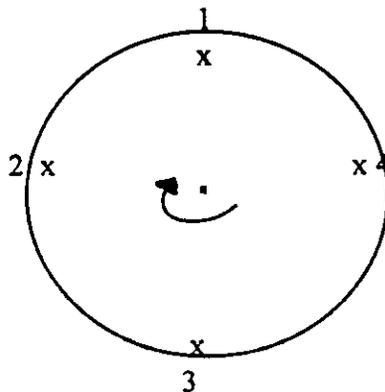
V-5- CONDUITE DE L'EXPERIENCE

V - 5 - 1 CONDITIONS OPERATOIRES:

Afin d'aller dans le sens du but établi de cette expérimentation, nous avons fixé certaines conditions opératoires afin d'avoir une reproductibilité de nos résultats.
Ces conditions peuvent être résumées dans ce qui suit :

L'ENCEINTE THERMIQUE

L'enceinte a été marquée par quatre positions géométriquement symétriques



LA TEMPERATURE DE CONSIGNE

$T_c = 38,9 \text{ }^\circ\text{C}$

LA MASSE THERMIQUE

Le volume d'eau utilisé a toujours été de 14 litres .

LE THERMOMETRE A CONTACT

Le thermomètre à contact a toujours été placé à la position 1 indiquée sur l'enceinte .

L'AGITATION

Positionnée sur 3.5, l'agitation ne changera pas, et ira dans le sens des aiguilles d'une montre. (de 1 vers 4, par rapport à l'enceinte)

V - 5 - 2 DESCRIPTION DES EXPERIENCES :

En faisant varier la tension délivrée au thermoplongeur, la puissance de chauffe varie .
Ayant une résistance $R = 52,5 \text{ Ohms}$, le thermoplongeur délivre une puissance P donnée par :

$$P = U^2 / R$$

U étant la tension délivrée en Volts.

Nous avons effectué trois séries d'expériences décrites comme suit :

PREMIERE SERIE D'EXPERIENCES

- Le thermoplongeur est placé au niveau de la position 3 .
- Nous effectuons une première expérience avec $U = 180 \text{ V}$, soit : $P = 617,14 \text{ W}$.
Nous obtenons les résultats du tableau (V-1).
- La deuxième expérience est établie avec $U = 200 \text{ V}$, soit : $P = 761,90 \text{ W}$. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau (V -2).
- La troisième expérience est menée avec $U = 220 \text{ V}$ soit une puissance $P = 921,90 \text{ W}$. Nous obtenons les résultats du tableau (V-3) .

DEUXIEME SERIE D'EXPERIENCES:

Dans cette deuxième série d'expériences, nous reprenons les mêmes étapes de la première série d'expériences et ce, en plaçant le thermoplongeur au niveau de la position 2.
Ainsi pour $U =$ à 180 V , 200 V et 220 V nous obtenons respectivement les tableaux V-4, V-5 et V-6.

TROISIEME SERIE D'EXPERIENCES :

Cette dernière série d'expériences est assez délicate car nous plaçons le thermoplongeur au niveau de la position 1 .

-La septième expérience consiste à placer le thermoplongeur après le thermomètre à contact, dans le sens de l'agitation, avec $U = 180 \text{ V}$.

Nous obtenons les résultats du tableau V-7.

-La huitième expérience est similaire à la septième avec $U = 220 \text{ V}$.

Nous obtenons les résultats du tableau V-8.

-La dernière et neuvième expérience consiste à placer l'élément de chauffe avant l'élément sensible dans le sens de l'agitation .

Cette expérience c'est avérée un échec total dont les détails seront donnés au paragraphe V-4.

Tableau V-1 :
P= 617.14 W T_{ambiante} = 23.4 °C

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temps (min) | 0 | 0.583 | 1.250 | 1.917 | 2.567 | 3.167 | 3.850 | 4.417 | 5.117 | 5.760 |
| T (°C) | 32 | 32.5 | 33 | 33.5 | 34 | 34.5 | 35 | 35.5 | 36 | 36.5 |
| P (%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 6.417 | 7.017 | 7.700 | 8.367 | 8.833 | 8.967 | 11.167 | 11.333 | 11.567 | 13.250 |
| T (°C) | 37 | 37.5 | 38 | 38.5 | 38.9 | 39 | 38.8 | 38.9 | 39 | 38.8 |
| P (%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 13.417 | 13.717 | 15.300 | 15.500 | 15.833 | 17.300 | 17.500 | 17.750 | 19.383 | 19.600 |
| T (°C) | 38.9 | 39 | 38.8 | 38.9 | 39 | 38.8 | 38.9 | 39 | 38.8 | 38.9 |
| P (%) | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 |

| | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 19.850 | 21.617 | 21.817 | 22.033 | 23.817 | 24.033 | 27.283 |
| T (°C) | 39 | 38.8 | 38.9 | 39 | 38.8 | 38.9 | 39 |
| P (%) | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 |

Tableau V-2 :
P= 761.90 W T_{ambiante} = 25.6 °C

| | | | | | | | | | | |
|-------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temps (min) | 0 | 0.583 | 1.033 | 1.583 | 2.083 | 2.650 | 3.217 | 3.717 | 4.217 | 4.800 |
| T (°C) | 31.5 | 32 | 32.5 | 33 | 33.5 | 34 | 34.5 | 35 | 35.5 | 36 |
| P (%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 5.333 | 5.867 | 6.367 | 6.900 | 7.417 | 7.900 | 8.183 | 10.467 | 10.700 | 11.000 |
| T (°C) | 36.5 | 37 | 37.5 | 38 | 38.5 | 38.9 | 39.1 | 38.8 | 38.9 | 39 |
| P (%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 13.950 | 14.133 | 14.333 | 15.483 | 15.683 | 15.900 | 18.050 | 18.267 | 18.467 | 20.767 |
| T (°C) | 38.8 | 38.9 | 39 | 38.8 | 38.9 | 39 | 38.8 | 38.9 | 39 | 38.8 |
| P (%) | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 20.883 | 21.167 | 23.267 | 23.467 | 23.650 | 25.900 | 26.117 | 26.367 | 28.233 | 28.583 |
| T (°C) | 38.9 | 39 | 38.8 | 38.9 | 39 | 38.8 | 38.9 | 39 | 38.8 | 38.9 |
| P (%) | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 |

| | |
|-------------|--------|
| Temps (min) | 28.833 |
| T (°C) | 39 |
| P (%) | 0 |

Tableau V-3 :
P= 921.90 W T_{ambiante} = 26.3 °C

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temps (min) | 0 | 0.400 | 0.800 | 1.250 | 1.733 | 2.167 | 2.550 | 3.033 | 3.450 | 3.900 |
| T (°C) | 31 | 31.5 | 32 | 32.5 | 33 | 33.5 | 34 | 34.5 | 35 | 35.5 |
| P (%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Temps (min) | 4.283 | 4.717 | 5.167 | 5.567 | 6.100 | 6.567 | 6.900 | 7.133 | 10.283 | 10.367 |
| T (°C) | 36 | 36.5 | 37 | 37.5 | 38 | 38.5 | 38.9 | 39.1 | 38.8 | 38.9 |
| P (%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 10.600 | 13.133 | 13.300 | 13.450 | 15.933 | 16.100 | 16.267 | 18.833 | 19.000 | 19.183 |
| T (°C) | 39 | 38.8 | 38.9 | 39 | 38.8 | 38.9 | 39 | 38.8 | 38.9 | 39 |
| P (%) | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 |

| | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 21.617 | 21.783 | 21.933 | 24.417 | 24.583 | 24.750 | 27.150 | 27.333 | 27.500 |
| T (°C) | 38.8 | 38.9 | 39 | 38.8 | 38.9 | 39 | 38.8 | 38.9 | 39 |
| P (%) | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 |

Tableau V-4 :
P= 617.4 W T_{ambiante} = 24 °C

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temps (min) | 0 | 0.650 | 1.333 | 1.967 | 2.683 | 3.367 | 4.017 | 4.700 | 5.383 | 6.033 |
| T (°C) | 32 | 32.5 | 33 | 33.5 | 34 | 34.5 | 35 | 35.5 | 36 | 36.5 |
| P (%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 6.700 | 7.417 | 8.017 | 8.717 | 9.233 | 9.367 | 11.617 | 11.833 | 12.050 | 13.683 |
| T (°C) | 37 | 37.5 | 38 | 38.5 | 38.8 | 38.9 | 38.7 | 38.8 | 38.9 | 38.7 |
| P (%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 13.900 | 14.100 | 15.883 | 16.100 | 16.283 | 18.067 | 18.300 | 18.467 | 20.283 | 20.500 |
| T (°C) | 38.8 | 38.9 | 38.7 | 38.8 | 38.9 | 38.7 | 38.8 | 38.9 | 38.7 | 38.8 |
| P (%) | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 20.683 | 22.567 | 22.783 | 22.967 | 24.700 | 24.917 | 25.083 | 26.867 | 27.083 | 27.267 |
| T (°C) | 38.9 | 38.7 | 38.8 | 38.9 | 38.7 | 38.8 | 38.9 | 38.7 | 38.8 | 38.9 |
| P (%) | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 |

| | | | |
|-------------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 29.117 | 29.333 | 29.517 |
| T (°C) | 38.7 | 38.8 | 38.9 |
| P (%) | 100 | 0 | 0 |

Tableau V-5 :
P= 761.90 W T_{ambiante} = 23.3 °C

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temps (min) | 0 | 0.717 | 1.217 | 1.717 | 2.283 | 2.783 | 3.300 | 3.833 | 4.333 | 4.917 |
| T (°C) | 30 | 30.5 | 31 | 31.5 | 32 | 32.5 | 33 | 33.5 | 34 | 34.5 |
| P (%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Temps (min) | 5.417 | 6.000 | 6.533 | 7.067 | 7.617 | 8.233 | 8.750 | 9.333 | 9.750 | 10.167 |
| T (°C) | 35 | 35.5 | 36 | 36.5 | 37 | 37.5 | 38 | 38.5 | 38.8 | 39 |
| P (%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 12.750 | 12.883 | 13.083 | 15.300 | 15.517 | 15.700 | 17.867 | 18.083 | 18.250 | 20.517 |
| T (°C) | 38.7 | 38.8 | 38.9 | 38.7 | 38.8 | 38.9 | 38.7 | 38.8 | 38.9 | 38.7 |
| P (%) | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 20.717 | 20.900 | 23.000 | 23.217 | 23.367 | 25.417 | 25.633 | 28.800 | 27.900 | 28.117 |
| T (°C) | 38.8 | 38.9 | 38.7 | 38.8 | 38.9 | 38.7 | 38.8 | 38.9 | 38.7 | 38.8 |
| P (%) | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 |

Tableau V-6 :
P= 921.90 W T_{ambiante} = 24 °C

| | | | | | | | | | | |
|-------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temps (min) | 0 | 0.450 | 0.900 | 1.350 | 1.783 | 2.233 | 2.683 | 3.083 | 3.533 | 3.983 |
| T (°C) | 31.5 | 32 | 32.5 | 33 | 33.5 | 34 | 34.5 | 35 | 35.5 | 36 |
| P (%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Temps (min) | 4.417 | 4.833 | 5.250 | 5.717 | 6.133 | 6.533 | 6.733 | 9.967 | 10.133 | 10.400 |
| T (°C) | 36.5 | 37 | 37.5 | 38 | 38.5 | 38.9 | 39.1 | 38.8 | 38.9 | 39 |
| P (%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 12.700 | 12.883 | 13.033 | 15.517 | 15.700 | 15.867 | 18.233 | 18.417 | 18.583 | 20.983 |
| T (°C) | 38.7 | 38.8 | 39 | 38.7 | 38.8 | 39 | 38.7 | 38.8 | 39 | 38.7 |
| P (%) | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 21.167 | 21.350 | 23.717 | 23.900 | 24.117 | 26.617 | 26.800 | 26.950 | 29.467 | 29.633 |
| T (°C) | 38.8 | 39 | 38.7 | 38.8 | 39 | 38.7 | 38.8 | 39 | 38.7 | 38.8 |
| P (%) | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 |

| | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 29.817 | 32.300 | 32.483 | 32.633 |
| T (°C) | 39 | 38.7 | 38.8 | 39 |
| P (%) | 0 | 100 | 0 | 0 |

Tableau V-7 :
P= 617.14 W T_{ambiante} = 24 °C

| | | | | | | | | | | |
|-------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temps (min) | 0 | 0.617 | 1.400 | 2.067 | 2.867 | 3.467 | 4.133 | 4.867 | 5.633 | 6.300 |
| T (°C) | 31.5 | 32 | 32.5 | 33 | 33.5 | 34 | 34.5 | 35 | 35.5 | 36 |
| P (%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 7.117 | 7.950 | 8.517 | 9.183 | 9.917 | 10.350 | 10.583 | 12.683 | 12.950 | 13.183 |
| T (°C) | 36.5 | 37 | 37.5 | 38 | 38.5 | 38.9 | 39.1 | 38.8 | 38.9 | 39 |
| P (%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 14.967 | 15.217 | 15.433 | 17.200 | 17.433 | 17.667 | 19.383 | 19.650 | 19.883 | 21.667 |
| T (°C) | 38.6 | 38.7 | 38.8 | 38.6 | 38.7 | 38.8 | 38.6 | 38.7 | 38.8 | 38.6 |
| P (%) | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 |

| | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 21.917 | 22.183 | 23.983 | 24.233 | 24.450 | 26.283 | 26.533 | 26.733 |
| T (°C) | 38.7 | 38.8 | 38.6 | 38.7 | 38.8 | 38.6 | 38.7 | 38.8 |
| P (%) | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 |

Tableau V-8 :
P= 921.90 W T_{ambiante} = 24 °C

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temps (min) | 0 | 0.517 | 0.933 | 1.383 | 1.800 | 2.233 | 2.717 | 3.167 | 3.583 | 4.017 |
| T (°C) | 32 | 32.5 | 33 | 33.5 | 34 | 34.5 | 35 | 35.5 | 36 | 36.5 |
| P (%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 4.500 | 4.933 | 5.383 | 5.817 | 6.117 | 6.283 | 9.883 | 10.117 | 10.400 | 13.100 |
| T (°C) | 37 | 37.5 | 38 | 38.5 | 38.7 | 39 | 38.6 | 38.7 | 38.9 | 38.6 |
| P (%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 13.317 | 13.517 | 16.217 | 16.433 | 16.633 | 19.467 | 19.683 | 19.833 | 23.750 | 23.967 |
| T (°C) | 38.7 | 38.9 | 38.6 | 38.7 | 38.9 | 38.6 | 38.7 | 38.9 | 38.6 | 38.7 |
| P (%) | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Temps (min) | 24.133 | 26.033 | 26.250 | 26.417 | 29.333 | 29.550 | 29.717 | 32.333 | 32.550 | 32.717 |
| T (°C) | 38.7 | 38.6 | 38.7 | 38.9 | 38.6 | 38.7 | 38.9 | 38.6 | 38.7 | 38.9 |
| P (%) | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 |

V - 4 Discussion des résultats:

V - 5 - 1 Exploitation des résultats:

V- 5 -1 -1 Evolution de la température jusqu'à 38.5°C:

Afin d'exploiter au mieux nos résultats, nous avons suivi avec intérêt l'évolution de la température de notre système jusqu'à 38.5°C afin de mettre en évidence le lien qui existe entre la puissance de chauffe et la rapidité de la réponse du système. Nous donnons, ci-dessous, des équations obtenues par corrélation qui permettraient, au futurs usagers de notre montage, la meilleur exploitation possible de leur temps.

A cet effet, nous présenterons pour chaque position, une équation du type :

$$T = a t + b$$

où :

b : est la température initiale.

t : exprime le temps écoulé en minutes.

T : la température de la masse thermique (14 litres d'eau) en °C .

a : la vitesse de chauffe en °C / min.

L'erreur commise par rapport à la température réelle est donnée par :

$$\text{erreur} = \left(\frac{|T_{\text{réelle}} - T_{\text{calculée}}|}{T_{\text{réelle}}} \right) \otimes 100 \quad \text{en (\%)}$$

L'erreur moyenne sera :

$$\bar{e} = \frac{\sum_i^N (\text{erreur})_i}{N}$$

où N est le nombre de points exploités

Expérience 1:

$$T = 0.777 t + 32.025$$

| Temps(min) | Tréelle (°C) | Tcalculée (°C) | erreur (%) |
|------------|--------------|----------------|----------------------|
| 0 | 32 | 32.025 | 0.078 |
| 0.583 | 32.5 | 32.478 | 0.068 |
| 1.250 | 33 | 32.996 | 0.012 |
| 1.917 | 33.5 | 33.514 | 0.042 |
| 2.567 | 34 | 34.019 | 0.056 |
| 3.167 | 34.5 | 34.485 | 0.043 |
| 3.850 | 35 | 35.015 | 0.043 |
| 4.417 | 35.5 | 35.456 | 0.124 |
| 5.117 | 36 | 36.000 | 0.000 |
| 5.760 | 36.5 | 36.499 | 0.003 |
| 6.417 | 37 | 37.009 | 0.024 |
| 7.017 | 37.5 | 37.475 | 0.067 |
| 7.700 | 38 | 38.006 | 0.016 |
| 8.367 | 38.5 | 38.524 | 0.062 |
| | | | $\bar{e} = 0.046 \%$ |

tableau V-9

Expérience 2:

$$T = 0.942 t + 31.500$$

| Temps (min) | Tréelle (°C) | Tcalculée (°C) | Erreur (%) |
|-------------|--------------|----------------|----------------------|
| 0 | 31.5 | 31.500 | 0.000 |
| 0.583 | 32 | 32.048 | 0.150 |
| 1.033 | 32.5 | 32.472 | 0.086 |
| 1.583 | 33 | 32.990 | 0.030 |
| 2.083 | 33.5 | 33.461 | 0.116 |
| 2.650 | 34 | 33.995 | 0.015 |
| 3.217 | 34.5 | 34.528 | 0.081 |
| 3.717 | 35 | 34.999 | 0.003 |
| 4.217 | 35.5 | 35.470 | 0.085 |
| 4.800 | 36 | 36.019 | 0.053 |
| 5.333 | 36.5 | 36.521 | 0.058 |
| 5.867 | 37 | 37.024 | 0.065 |
| 6.367 | 37.5 | 37.494 | 0.016 |
| 6.900 | 38 | 37.996 | 0.011 |
| 7.417 | 38.5 | 38.483 | 0.044 |
| | | | $\bar{e} = 0.054 \%$ |

tableau V-10

Expérience 3:

$$T = 1.147 t + 31.044$$

| Temps (min) | Tréelle (°C) | Tcalculée (°C) | Erreur (%) |
|-------------|--------------|----------------|----------------------|
| 0 | 31 | 31.044 | 0.142 |
| 0.400 | 31.5 | 31.503 | 0.010 |
| 0.800 | 32 | 31.961 | 0.122 |
| 1.250 | 32.5 | 32.478 | 0.068 |
| 1.733 | 33 | 33.032 | 0.097 |
| 2.167 | 33.5 | 33.530 | 0.090 |
| 2.550 | 34 | 33.969 | 0.091 |
| 3.033 | 34.5 | 34.524 | 0.070 |
| 3.450 | 35 | 35.022 | 0.063 |
| 3.900 | 35.5 | 35.518 | 0.051 |
| 4.283 | 36 | 35.958 | 0.117 |
| 4.717 | 36.5 | 36.456 | 0.121 |
| 5.167 | 37 | 36.972 | 0.076 |
| 5.567 | 37.5 | 37.431 | 0.184 |
| 6.100 | 38 | 38.043 | 0.113 |
| 6.567 | 38.5 | 38.579 | 0.205 |
| | | | $\bar{e} = 0.101 \%$ |

tableau V-11

Expérience 4 :

$$T = 0.744 t + 32.009$$

| Temps (min) | Tréelle (°C) | Tcalculée (°C) | Erreur (%) |
|-------------|--------------|----------------|----------------------|
| 0 | 32 | 32.009 | 0.028 |
| 0.650 | 32.5 | 32.492 | 0.025 |
| 1.333 | 33 | 33.001 | 0.003 |
| 1.967 | 33.5 | 33.472 | 0.084 |
| 2.683 | 34 | 34.005 | 0.015 |
| 3.367 | 34.5 | 34.514 | 0.041 |
| 4.017 | 35 | 34.998 | 0.006 |
| 4.700 | 35.5 | 35.506 | 0.017 |
| 5.383 | 36 | 36.014 | 0.039 |
| 6.033 | 36.5 | 36.498 | 0.005 |
| 6.700 | 37 | 36.994 | 0.016 |
| 7.417 | 37.5 | 37.528 | 0.075 |
| 8.017 | 38 | 37.974 | 0.068 |
| 8.717 | 38.5 | 38.495 | 0.013 |
| | | | $\bar{e} = 0.031 \%$ |

tableau V-12

Expérience 5:

$$T = 0.925 t + 29.929$$

| Temps (min) | Tréelle (°C) | Tcalculée (°C) | Erreur (%) |
|-------------|--------------|----------------|----------------------|
| 0 | 30 | 29.929 | 0.237 |
| 0.717 | 30.5 | 30.592 | 0.302 |
| 1.217 | 31 | 31.055 | 0.177 |
| 1.717 | 31.5 | 31.518 | 0.057 |
| 2.283 | 32 | 32.042 | 0.131 |
| 2.783 | 32.5 | 32.504 | 0.012 |
| 3.300 | 33 | 32.983 | 0.052 |
| 3.833 | 33.5 | 33.476 | 0.072 |
| 4.333 | 34 | 33.939 | 0.179 |
| 4.917 | 34.5 | 34.479 | 0.061 |
| 5.417 | 35 | 34.942 | 0.166 |
| 6.000 | 35.5 | 35.481 | 0.054 |
| 6.533 | 36 | 35.975 | 0.069 |
| 7.067 | 36.5 | 36.469 | 0.085 |
| 7.617 | 37 | 36.978 | 0.059 |
| 8.233 | 37.5 | 37.548 | 0.128 |
| 8.750 | 38 | 38.026 | 0.068 |
| 9.333 | 38.5 | 38.566 | 0.171 |
| | | | $\bar{e} = 0.116 \%$ |

tableau V-13

Expérience 6:

$$T = 1.147 t + 31.468$$

| Temps (min) | Tréelle (°C) | Tcalculée (°C) | Erreur (%) |
|-------------|--------------|----------------|----------------------|
| 0 | 31.5 | 31.468 | 0.102 |
| 0.450 | 32 | 31.982 | 0.056 |
| 0.900 | 32.5 | 32.497 | 0.009 |
| 1.350 | 33 | 33.011 | 0.033 |
| 1.783 | 33.5 | 33.506 | 0.018 |
| 2.233 | 34 | 34.021 | 0.062 |
| 2.683 | 34.5 | 34.535 | 0.101 |
| 3.083 | 35 | 34.992 | 0.023 |
| 3.533 | 35.5 | 35.507 | 0.020 |
| 3.983 | 36 | 36.021 | 0.058 |
| 4.417 | 36.5 | 36.517 | 0.047 |
| 4.833 | 37 | 36.993 | 0.019 |
| 5.250 | 37.5 | 37.469 | 0.083 |
| 5.717 | 38 | 38.003 | 0.008 |
| 6.133 | 38.5 | 38.479 | 0.055 |
| | | | $\bar{e} = 0.046 \%$ |

tableau V-14

Expérience 7:

$$T = 0.700 t + 31.544$$

| Temps (min) | Tréelle (°C) | Tcalculée (°C) | Erreur (%) |
|-------------|--------------|----------------|----------------------|
| 0 | 31.5 | 31.544 | 0.140 |
| 0.617 | 32 | 31.976 | 0.075 |
| 1.400 | 32.5 | 32.524 | 0.074 |
| 2.067 | 33 | 32.991 | 0.027 |
| 2.867 | 33.5 | 33.551 | 0.152 |
| 3.467 | 34 | 33.972 | 0.082 |
| 4.133 | 34.5 | 34.438 | 0.180 |
| 4.867 | 35 | 34.952 | 0.137 |
| 5.633 | 35.5 | 35.488 | 0.034 |
| 6.300 | 36 | 35.955 | 0.125 |
| 7.117 | 36.5 | 36.527 | 0.074 |
| 7.950 | 37 | 37.111 | 0.300 |
| 8.517 | 37.5 | 37.508 | 0.021 |
| 9.183 | 38 | 37.974 | 0.068 |
| 9.917 | 38.5 | 38.488 | 0.031 |
| | | | $\bar{e} = 0.101 \%$ |

tableau V-15

Expérience 8:

$$T = 1.123 t + 31.963$$

| Temps (min) | Tréelle (°C) | Tcalculée (°C) | Erreur (%) |
|-------------|--------------|----------------|----------------------|
| 0 | 32 | 31.963 | 0.116 |
| 0.517 | 32.5 | 32.544 | 0.135 |
| 0.933 | 33 | 33.011 | 0.033 |
| 1.383 | 33.5 | 33.516 | 0.048 |
| 1.800 | 34 | 33.984 | 0.047 |
| 2.233 | 34.5 | 34.470 | 0.087 |
| 2.717 | 35 | 35.014 | 0.040 |
| 3.167 | 35.5 | 35.519 | 0.054 |
| 3.583 | 36 | 35.986 | 0.039 |
| 4.017 | 36.5 | 36.474 | 0.071 |
| 4.500 | 37 | 37.016 | 0.043 |
| 4.933 | 37.5 | 37.502 | 0.005 |
| 5.383 | 38 | 38.008 | 0.021 |
| 5.817 | 38.5 | 38.495 | 0.013 |
| | | | $\bar{e} = 0.054 \%$ |

tableau V-16

V - 5 - 1 - 2 Calcul des périodes et des amplitudes:

Expérience 1:

Oscillation autour de 38.9 °C.

| Période | Période (min) | Amplitude (°C) | T max (°C) |
|---------|---------------|----------------|------------|
| 1 | 2.500 | 0.2 | 39.0 |
| 2 | 2.084 | 0.2 | 39.0 |
| 3 | 2.083 | 0.2 | 39.0 |
| 4 | 2.000 | 0.2 | 39.0 |
| 5 | 2.100 | 0.2 | 39.0 |
| 6 | 2.217 | 0.2 | 39.0 |
| 7 | 2.216 | 0.2 | 39.0 |

tableau V-17

Expérience 2:

Oscillation autour de 38.9 °C.

| Période | Période (min) | Amplitude (°C) | T max (°C) |
|---------|---------------|----------------|------------|
| 1 | 2.800 | 0.3 | 39.1 |
| 2 | 3.433 | 0.2 | 39.0 |
| 3 | 1.550 | 0.2 | 39.0 |
| 4 | 2.584 | 0.2 | 39.0 |
| 5 | 2.616 | 0.2 | 39.0 |
| 6 | 2.584 | 0.2 | 39.0 |
| 7 | 2.650 | 0.2 | 39.0 |
| 8 | 2.466 | 0.2 | 39.0 |

tableau V-18

Expérience 3:

Oscillation autour de 38.9 °C.

| Période | Période (min) | Amplitude (°C) | T max (°C) |
|---------|---------------|----------------|------------|
| 1 | 3.467 | 0.3 | 39.1 |
| 2 | 2.933 | 0.2 | 39.0 |
| 3 | 2.800 | 0.2 | 39.0 |
| 4 | 2.900 | 0.2 | 39.0 |
| 5 | 2.783 | 0.2 | 39.0 |
| 6 | 2.800 | 0.2 | 39.0 |
| 7 | 2.750 | 0.2 | 39.0 |

tableau V-19

Expérience 4:

Oscillation autour de 38.8 °C.

| Période | Période (min) | Amplitude (°C) | T max (°C) |
|---------|---------------|----------------|------------|
| 1 | 2.600 | 0.2 | 38.9 |
| 2 | 2.067 | 0.2 | 38.9 |
| 3 | 2.200 | 0.2 | 38.9 |
| 4 | 2.200 | 0.2 | 38.9 |
| 5 | 2.200 | 0.2 | 38.9 |
| 6 | 2.283 | 0.2 | 38.9 |
| 7 | 2.134 | 0.2 | 38.9 |
| 8 | 2.166 | 0.2 | 38.9 |

tableau V-20

Expérience 5:

Oscillation autour de 38.8 °C.

| Période | Période (min) | Amplitude (°C) | T max (°C) |
|---------|---------------|----------------|------------|
| 1 | 3.133 | 0.3 | 39 |
| 2 | 2.634 | 0.2 | 38.9 |
| 3 | 2.566 | 0.2 | 38.9 |
| 4 | 2.634 | 0.2 | 38.9 |
| 5 | 2.500 | 0.2 | 38.9 |
| 6 | 2.416 | 0.2 | 38.9 |
| 7 | 2.484 | 0.2 | 38.9 |

tableau V-21

Expérience 6:

Oscillation autour de 38.8 °C.

| Période | Période (min) | Amplitude (°C) | T max (°C) |
|---------|---------------|----------------|------------|
| 1 | 3.600 | 0.3 | |
| 2 | 2.750 | 0.3 | |
| 3 | 2.817 | 0.3 | |
| 4 | 2.717 | 0.3 | |
| 5 | 2.750 | 0.3 | |
| 6 | 2.733 | 0.3 | |
| 7 | 2.900 | 0.3 | |
| 8 | 2.833 | 0.3 | |
| 9 | 2.850 | 0.3 | |

tableau V-22

Expérience 7:

Oscillation autour de 38.7 °C.

| Période | Période (min) | Amplitude (°C) | T max (°C) |
|---------|---------------|----------------|------------|
| 1 | 2.600 | 0.3 | 38.9 |
| 2 | 2.267 | 0.2 | 38.8 |
| 3 | 2.216 | 0.2 | 38.8 |
| 4 | 2.217 | 0.2 | 38.8 |
| 5 | 2.267 | 0.2 | 38.8 |
| 6 | 2.316 | 0.2 | 38.8 |
| 7 | 2.300 | 0.2 | 38.8 |

tableau V-23

Expérience 8:

| Période | Période (min) | Amplitude (°C) | T max (°C) |
|---------|---------------|----------------|------------|
| 1 | 3.200 | 0.3 | 38.9 |
| 2 | 3.116 | 0.3 | 38.9 |
| 3 | 3.250 | 0.3 | 38.9 |
| 4 | 4.284 | 0.3 | 38.9 |
| 5 | 2.283 | 0.3 | 38.9 |
| 6 | 3.300 | 0.3 | 38.9 |
| 7 | 3.000 | 0.3 | 38.9 |

tableau V-24

Expérience 9:

La température oscille autour de 38.4 °C .

Les périodes d'oscillations ainsi que leurs amplitudes varient à une vitesse prodigieuse. Ce qui nous a interdit de noter les températures et ainsi, l'évolution du système.

V - 5 - 2 Discussion des résultats:

- L'exploitation des résultats obtenus nous montre que la rapidité de l'évolution du système croît avec la puissance .
- Mis à part la huitième expérience, les premières périodes d'oscillations sont relativement grandes à cause du dépassement initial dû à la quantité de chaleur emmagasinée dans la masse thermique pendant la montée en température .
- La deuxième et troisième série d'expérience donnent des résultats qui oscillent, respectivement, autour de 38.8 °C et 38.7°C.

Ceci peut être interprété par le rapprochement de l'élément de chauffe et l'élément sensible.

L'influence de ce rapprochement montre bien que lorsque la température de l'enceinte est à une valeur inférieure à 38.9 °C , le thermomètre à contact indique 38.9 °C.

D'où l'interruption du contact.

La neuvième expérience nous montre bien cet effet avec un écart de 0.5°C par rapport à la température de consigne.

- Les amplitudes croissent avec, la puissance fournie, le rapprochement entre l'élément de chauffe et l'élément sensible. Ce qui traduit une légère instabilité.

V - 6 CONCLUSION:

Les résultats obtenus ainsi que les observations effectuées durant ce travail, nous ont permis de suivre l'évolution du système (bain-marie) en fonction de deux paramètres, à savoir:

- L'Apport énergétique au système.
- La position de l'élément de chauffe par rapport à l'élément sensible (le thermomètre à contact).

Afin d'obtenir la meilleure régulation possible d'un bain marie, et à l'appui du travail effectué, nous suggérons, ce qui suit.

- 1- L'élément chauffant doit être le plus loin possible de l'élément sensible, le but étant de contrôler la température du bain-marie, quel que soit son volume, et non pas seulement celle du volume se trouvant à proximité de l'élément de chauffe.
- 2- Afin que le transfert énergétique se fasse le plus rapidement possible, au sein de la masse thermique, l'agitation doit être efficace et placée au centre du système, si ce dernier est cylindrique.
- 3- L'utilisation d'une puissance maximale augmente la rapidité de l'évolution du système. Cependant, afin d'obtenir la meilleure précision possible, sa réduction est indispensable. L'utilisation d'une puissance maximale au début de l'opération puis sa réduction à l'approche de la consigne est à conseiller fortement.
- 4- Un système de refroidissement par circulation d'eau froide atténuerait les amplitudes et augmenterait ainsi les performances de la régulation thermique d'un bain-marie.

CHAPITRE VI

**APPLICATION DE LA REGULATION
ECHANTILLONNEES SUR UN BAIN-MARIE-
PROGRAMMATION DES REGULATEURS**

[13], [14], [15],.....,[25]

VI-1 - DESCRIPTIONS GENERALES:

Régulateur de température contrôlé par ordinateur

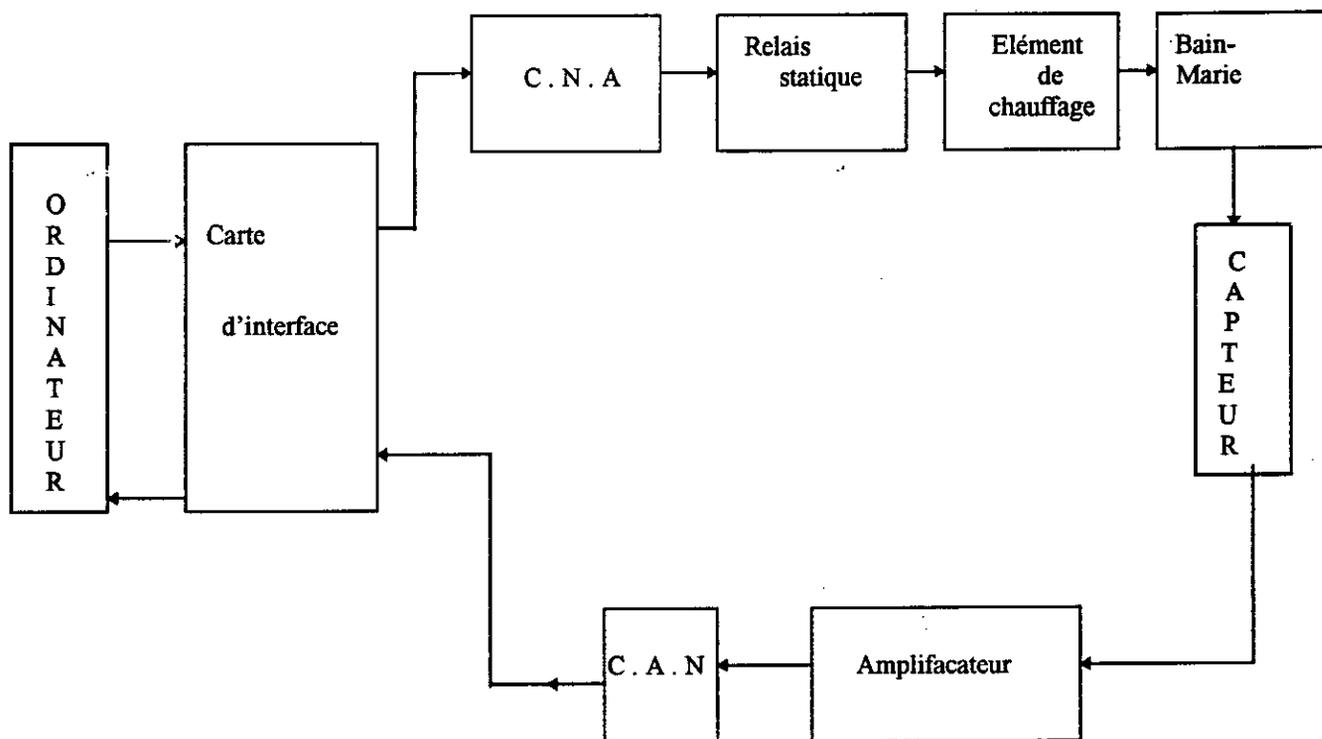


Fig. VI-1 Schéma synoptique du régulateur de température contrôlé par ordinateur

La fig (VI-1) représente un schéma synoptique du montage de régulation de la température par ordinateur. Examinons de plus près chaque bloc.

VI - 1 - 1 - Le Micro-ordinateur :

C'est le calculateur de process. Assez performant, dont la capacité et la vitesse de traitement des informations se développe de jour en jour, le rendant ainsi plus adapté à notre mode de régulation (régulation numérique). L'ordinateur a pour rôle la synthèse de la loi de commande selon des conditions et des performances prédéfinies et écrites sous forme d'un programme en langage évolué (Pascal-Basic etc...).

VI - 1 - 2 - La carte d'interface:

La carte d'interface permet la transmissions des informations du et vers l'ordinateur en permettant la conversion serie-parallèle des informations. Ainsi les informations reçues par la carte en parallèle sont converties en série pour être émises vers l'ordinateur à travers le port série, et vis versa.

VI - 1 - 3 - Le Convertisseur Numérique-Analogique (C.N.A) :

Le C.N.A permet comme son nom l'indique, de convertir un signal numérique généré par la loi de commande en un signal analogique.

VI - 1 - 4 - Le Relais Statique :

Il permet selon le type de régulation d'alimenter la résistance chauffante par une tension électrique équivalente à la puissance exigée par la loi de commande.

VI - 1 - 5 - La Résistance chauffante:

C'est un élément de chauffe alimenté par le relais statique, et plongé dans la masse d'eau ($R=60 \Omega$).

VI - 1 - 6 - Capteur (Le Capteur) :

Le capteur est un circuit intégré qui polarisé permet d'émettre une tension variable en fonction de la température. Notre choix s'est porté sur le LM 35 qui donne 10 m V par degré. celui-ci se présente comme tout capteur intégré une facilité d'étalonnage et de mise au point.

Le LM35 existe en plusieurs versions. Le LM35DZ est donné de 0°C à 100°C avec une précision de $0,6^{\circ}\text{C}$. C'est le moins cher et il fonctionne aussi pour les températures négatives, mais avec une faible précision.

Le LM35 C,Z va de -40°C à 110°C à $0,4^{\circ}\text{C}$ près et le LM35 AH, en boîtier métallique, va de -55°C à 150°C mais, c'est le plus cher.

VI - 1 - 7 - L'Amplificateur:

Le courant délivré par le capteur étant faible (en mV), il est nécessaire de l'amplifier afin de le rendre plus significatif.

Il fait le travail inverse du C.N.A et permet donc de faire accéder les informations (numérique) à l'ordinateur après un passage par la carte d'interface.

VI - 2 SYNTHÈSE DES REGULATEURS NUMÉRIQUES:

Avant toute régulation il est nécessaire de connaître le comportement du système qui est souvent exprimé en modèle mathématique, appelé dans notre cas fonction de transfert; cette dernière est obtenue à partir des équations différentielles qui expriment les différentes équations de bilan.

VI - 2 - 1 - Modélisation du bain-marie:

Le bilan énergétique (thermique) du bain-marie pendant un temps t s'écrit:

$$Pdt = Q_s + Q_p$$

où Pdt : est l'énergie électrique fournie au système à travers la résistance, sous forme de chaleur ($P = U^2 / R$)

Q_s : l'énergie stockée par la capacité calorifique de l'eau sous forme d'élévation de température.

Q_p : L'énergie perdue par convection (et probablement par conduction ou rayonnement)

$$Q_s = \rho_e \cdot V \cdot C_e \cdot dT$$

ρ_e : Masse volumique de l'eau.

V : Volume d'eau contenu dans le bain.

C_e : Capacité calorifique de l'eau.

En admettant que les parois soient parfaitement adiabatiques, les pertes de chaleur ne se font que par convection au niveau de la surface libre de l'eau. Ceci nous permet d'écrire:

$$Q_p = h S (T - T_0)$$

h : coefficient de convection thermique de l'air ($W / m^2 \cdot K$).

S : Surface libre de l'eau.

T_0 : Température ambiante (supposée constante).

On pose $\theta = T - T_0$

θ : étant l'écart de température entre l'eau et l'air. (on supposera par la suite que la température initiale de l'eau est presque identique à celle de l'air).

Nous pouvons donc écrire:

$$\rho_e \cdot V \cdot C_e \cdot \frac{d\theta}{dt} + h S \cdot \theta = P$$

C'est une équation différentielle du premier ordre linéaire et à coefficient constant (C_e et h ne varient pas au cours du temps).

Remarque:

l'hypothèse faite sur les pertes de chaleur n'est pas toujours vérifiée. Il est plus adéquat dans ce cas, d'introduire le terme de conduction et de rayonnement qui s'exprime comme suit:

$$Q'_p = \frac{K.A}{e} (T - T_s)$$

K : conductivité thermique des parois.

A : Surface totale des parois.

e : épaisseur des parois.

T_s : Température de surface (pouvant s'exprimer en fonction de θ).

$$Q''_p = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_0^4)$$

qui peut s'exprimer sous la forme

$$Q''_p = h_r A (T_s - T_0)$$

où $h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_0) (T_s^2 + T_0^2)$

En prenant (h_r)_{moyen} l'équation reste toujours linéaire.

VI - 2 - 2 La caractéristique statique du système: (fig VI-2 voir annexe)

La caractéristique statique du système permet, comme nous l'avons déjà vu dans le chap. II, de vérifier la linéarité du système et de déterminer le gain statique.

La caractéristique statique n'est pas linéaire dans notre cas (fig VI-2). Néanmoins on peut étudier le système dans son domaine de linéarité ce qui réduit la plage de chauffe et donc l'utilisation du bain à des températures de consigne nettement inférieures à 50°C (d'après la courbe). En dehors de cette limite, les pertes de chaleur s'accroissent à cause de l'évaporation de l'eau.

Le gain statique obtenu d'après la courbe est : K_s = 0,28 °C / W.

VI - 2 - 3- Synthèse des régulateurs - Méthode de Takahashi:

La méthode de Takahashi permet de déterminer les paramètres des régulateurs discrets standards (P,PI,PID) dans le cas d'une régulation analogique pilotée par ordinateur. Elle est analogue à la méthode de Ziegler-Nichols dont l'application est basée sur la réponse indicielle ou la limite de pompage.

Takahashi propose des valeurs qui sont en fait celles de Ziegler- Nichols. Toutefois il tient compte du retard d'un demi pas Δ (demi période) apporté au signal de commande par le BOZ (bloqueur d'ordre zéro) et qui aurait donc tendance à déstabiliser le système en diminuant le gain du correcteur.

Pour une réponse indicielle analogue à la forme de la figure II-10, Takahashi propose:

$$PID: K_p = \frac{1,2 \times T_g}{T_u + \Delta} - 0,5K_i$$

$$K_i = \frac{0,6 \times T_g \Delta}{(T_u + 0,5\Delta)^2}$$

$$K_d = \frac{0,6 \times T_g}{\Delta}$$

$$PI: K_p = \frac{0,9 \times T_g}{T_u + 0,5\Delta} - 0,5K_i$$

$$K_i = \frac{0,9 \times T_g \Delta}{3,3(T_u + 0,5\Delta)^2}$$

$$P: K_p = \frac{T_g}{\tau + \Delta}$$

Application:

La modélisation du bain-marie s'est faite à partir d'un essai indiciel à différentes puissances. On a obtenu dans notre cas, des courbes conformes au modèle théorique: c'est à dire un SL1.

* Pour l'essai indiciel P = 60 W et U = 60 volts (voir fig VI-3 à l'annexe)
L'équation de la courbe est donc:

$$\theta / K_s P = 1 - e^{-0,000249 t}$$

L'équation générale de la réponse indicielle pour un SL1 est:

$$\theta / K_s P = 1 - e^{-t/T}$$

où $\theta_\infty = K_s P$ est la valeur limite de θ .

$$\begin{aligned} \text{d'où } T &= 4016,06 \text{ s} \\ K_s &= 0,32 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W} \end{aligned}$$

* Pour l'essai indiciel P = 106,6 W et U = 80 V (voir fig. VI-4 à l'annexe).

L'équation de la courbe étant:

$$\theta / K_s P = 1 - e^{-0,000256 t}$$

nous obtenons donc: $T = 3906 \text{ s}$

$$K_s = 0,3 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$$

Les valeurs moyennes de T et K, sont dans ce cas:

$$\begin{aligned} T &= 3961s \\ K_s &= 0,31 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W} \end{aligned}$$

VI - 3. ALGORITHMES ET PROGRAMMATION:

On reprend la relation du chapitre IV

$$P(k) = K_p \varepsilon(k) + K_i \sum_{i=0}^k \varepsilon(i) + K_d [\varepsilon(k) - \varepsilon(k-1)]$$

Avec les approximations nécessaires on obtient:

$$P(k) = K_i \sum_{i=0}^{k-1} \varepsilon(i) + (K_p + K_i + K_d) \varepsilon(k) - K_d \varepsilon(k-1).$$

On va d'abord donner le coeur de chaque algorithme de régulation. On se contentera ainsi de donner la loi de commande. Seul l'algorithme du régulateur PID sera donné en détail.

Régulateur PID:

Pour faciliter le déroulement du programme on introduira une grandeur auxiliaire x

$$\text{où } x(k-1) = K_i \sum_{i=0}^{k-1} \varepsilon(i)$$

On pose par ailleurs $K_{pid} = K_p + K_i + K_d$

Algorithme:

lire la température,
calculer l'erreur $e := T_c - T$,
 $P := x + K_{pid} \varepsilon - K_d \varepsilon_1$,
sortir P,
 $x := x + K_i \varepsilon$.
 $\varepsilon_1 := \varepsilon$

Pour l'exécution de l'algorithme de réglage, on respectera la séquence prescrite. Tout de suite après le calcul de la grandeur de commande P, l'ordinateur (calculateur de processus) peut appliquer cette nouvelle valeur au système à régler. L'incrément de x par $K_i \varepsilon$, et ensuite l'échange de ε par ε_1 peuvent se faire dans l'intervalle jusqu'au prochain échantillonnage. Cependant, on doit imposer une valeur initiale adéquate à la grandeur auxiliaire et à l'erreur ε_1 . En général on choisira au début $x = 0$ et $\varepsilon_1 = 0$

Lors de grandes variations, il est éventuellement nécessaire de limiter P à une valeur P_{lim} . Dans un tel cas il n'est pas admis d'incrémenter x. Autrement, on risquerait une dérive de cette grandeur. Il faut plutôt remplacer l'affectation correspondante par:

$$x := P_{lim} - K_{pid} \varepsilon + K_i \varepsilon_1$$

Ainsi, il est garanti que la grandeur de commande U quitte la limitation sans retard lorsque l'écart de réglage est devenu plus petit. A noter, que cette mesure doit aussi être appliquée dans le cas d'un régulateur PI.

Autre Algorithmes:

Les algorithmes de régulation pour les régulateurs P, PI sont similaires à celui du PID, avec un simple changement de la loi de commande $P: = x + K_{pi} \varepsilon$ pour le PI (avec $K_{pi} = K_p + K_i$).

$P: = K_p \varepsilon$ pour le P.

Dans le cas du régulateur tout ou rien on introduit un test qui compare la consigne avec la température lue. Ainsi, dans le cas du dépassement il coupe le chauffage.

Algorithme:

```

┌ Entrez T
├ P := Pdonnée
├ Si T ≥ Tc couper le chauffage (P := 0)
├ Si non poursuivre
└ Sortir P

```

VI - 3 - 1 Algorithme PID:

Programme de régulation de température:

- Déclaration préalable des variables et procédures employées.
- ◆ Début:
 - Configuration de l'ordinateur (mode: graphique + texte).
 - Initialisations nécessaire.
 - Entrée au clavier:
 - Les paramètres du PID (K_i, K_d, K_p)
 - La consigne.
 - Déclaration de la fenêtre graphique.
 - Ouverture de la voie de communication .
 - Calculer: $K_{PID} := K_i + K_p + K_d$
 - Initialiser les variables du PID.
 - $x: = 0$ et $\varepsilon_1 := 0$
- ◆ Répéter
 - Lancer l'horloge (période d'échantillonnage)
 - Lire la température T sur le CAN.
 - Calculer $\varepsilon = T_c - T$.
 - Calculer l'action de commande
 - $P: = x + K_{PID} \varepsilon - K_d \varepsilon_1$
- ◆ Si P est trop grand ($P > P_{lim}$) alors $P := P_{lim}$
 - (* limiter la valeur de p à une valeur compatible avec le CNA et le système*)
 - $x := P_{lim} - K_{PID} \varepsilon + K_d \varepsilon_1$

- ◆ Fin Si
 - Envoyer P à l'aide du CNA

$$x_i = x + K_i \varepsilon$$
 - Afficher les valeurs de P, T et temps jusqu'à l'appui d'une touche déterminée (ESC).
- ◆ FIN.

VI - 3 - 2 . Programmation:

Le programme est écrit en langage évolué "QBasic". Le choix à été dicté par les avantages offerts par ce dernier. Autrement dit :

- facilité de conception et de compréhension.
- Rapidité de traitement (plus rapide que le Basic classique et le G Basic).
- Un mode graphique combiné à un mode texte assez appréciable (SCREEN 9)

Notre programme permet de sélectionner à partir du menu, le régulateur désiré (P, PI, PID, TOR ou P modifié) et de modifier les paramètres des régulateurs quand il le faut. Ceci permet d'utiliser le même programme pour d'autres systèmes simples avec quelques modifications. Le programme permet entre autre de tracer l'évolution de la température en fonction du temps, à l'aide d'une fenêtre graphique permettant ainsi de visualiser le régime transitoire. D'ou les performances et donc les qualités de la régulation en cours. Le programme permet en même temps d'afficher une sorte de compteur des variables du système (puissance, température, temps) ce qui permet de lire ou de prélever leur valeur à tout moment.

VI - 4 CONCLUSIONS:

Le programme établit peut être appliqué à d'autres systèmes thermiques simples sans les moindres modifications (étuve par exemple). Il suffira d'introduire les nouveaux paramètres des régulateurs. Dans le cas de la régulation d'un four il est impératif de changer notre capteur de température par un thermocouple permettant une plage de mesure plus grande.

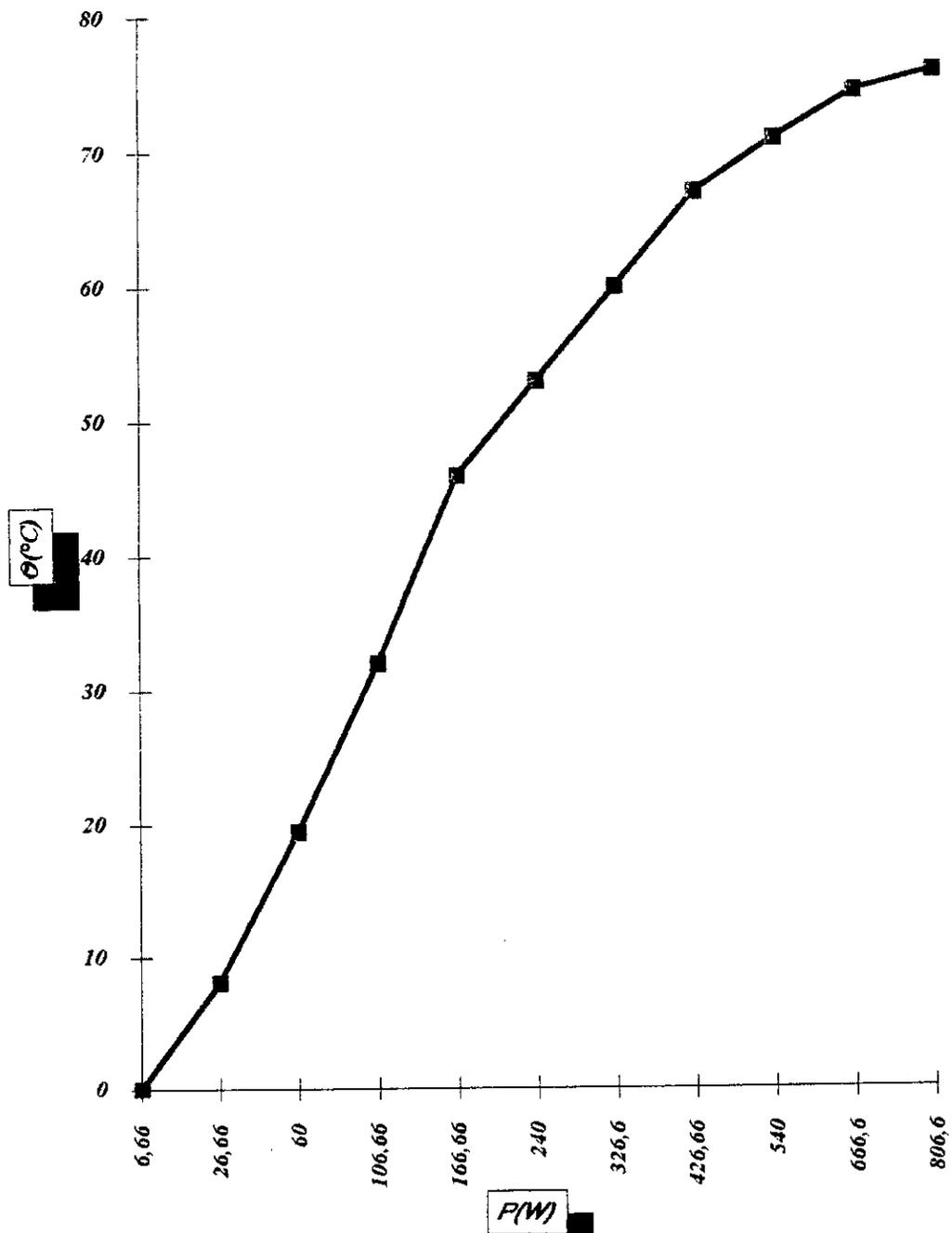
1 - Un système de régulation continue donne presque toujours une meilleur qualité que celle offerte par la régulation échantillonnée. En effet, celle-ci diminue à cause de l'échantillonnage: ce qui nous pousse à choisir une période d'échantillonnage aussi petite que possible. Dans notre cas période d'une seconde s'adapte bien à la régulation de la température qui présente une grande inertie et des constantes de temps assez élevées.

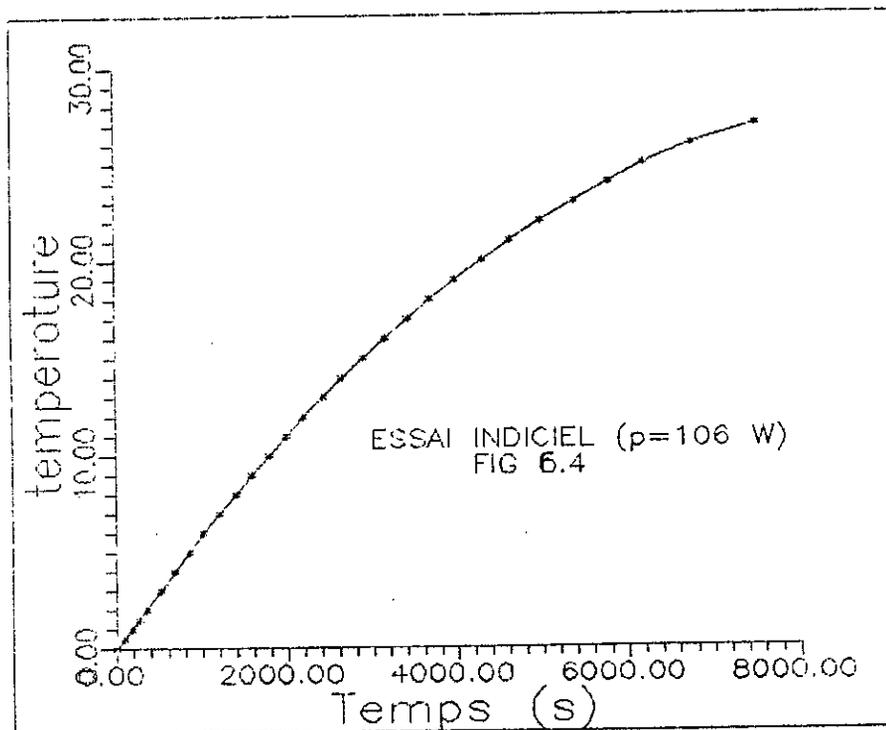
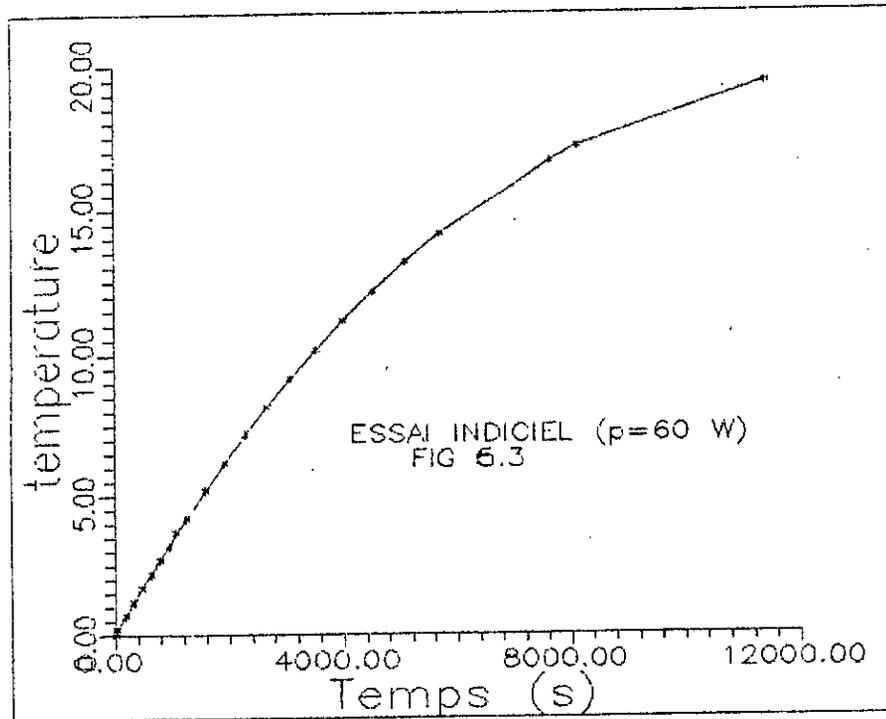
2 - La température est un paramètre à la fois important et difficile à contrôler en raison des changements de température ambiante, des variations de charge du système et des pertes de chaleur. Ces phénomènes ajoutées à la faible précision (relative) de notre capteur expliquent une partie des fluctuations observées lors de la régulation.

3 - Dans notre travail, nous n'avons pas pris en considération les fonction de transfert des différents éléments (capteur, élément de chauffe...). Nous allons supposés que ces derniers possèdent des fonctions de transfert unitaires et n'influencent donc pas la régulation. Ceci n'est pas toujours valable et souvent, les différents éléments cités (présentent un retard pur qui peut être négligé dans le cas qui nous préoccupe.

ANNEXE PROGRAMME

Fig. VI-2 Caractéristique statique





BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1]- M. RIVOIRE, J-L. FERRIER
Cours d'automatique. Vol. 1: Signaux et Systèmes.
Ed Chihab- Eyrolles, Alger (1994).
- [2]- L .MARET
Régulation automatique.
Ed. Presses polytechniques Romandes, lausanne (1987).
- [3]- C.E.T.I.M
Les régulateurs industriels.
Ed. CETIM Paris (1991).
- [4]- M. RIVOIRE? J-L. FRRIER
Cours d'automatique. Vol.2: Asservissement- Régulation
Ed. Chihab-Eyrolles, Alger (1994).
- [5]- T.W.WEBER
An introduction to process dynamics and control
Ed. JOHN WILEY & sans, New-York (1993).
- [6]- K. OGATTA
Modern control Engineering
Ed. Prentice -Hall Book Company, Englewood Cliffs, New Yrk (1970).
- [7]- M.NUSBAUMER

Informatique Industrielle . Vol.3.
Ed. Presses Polytechnique Romandes, Lausanne (1987).
- [8]- J.RIOUT
Capteurs Industrielles, Technologie et Méthodes de Choix.
Ed. CETIM, Paris (1986).
- [9] - M.RIVOIRE, J-L FERRIER
Cours d'Automatique. Vol.3. Commande par Calculateur- Identification.
Ed. Chihab-Egrolles, Alger (1994).
- [10] - M.BUHLER
Reglage Echantilloné. Vol.1.
Ed. Presses Plytechniques Romandes, Lausanne (1986).
- [11] - P. NASLIN
Technologie et calcul Pratique des Systèmes Asservis
Ed. DUNOD, Paris (1988).
- [12] - J. SURUGE
Techniques Générales du Laboratoire de Physique. Vol.2.
Ed. CNRS, Paris (1962).

- [13] - ASTROM
Computer- Controlled Systemes: Theory and Design
Ed. Prentice Hall International Editions, New York (1990).
- [14] - O.I.N DELEUX
Technique de la Régulation Industrielle
Ed. Eyrolles, Paris (1983).
- [15] - J.W. COOPER
The Mnicomputer in The Laboratory
Ed. John Wiley & Sons, New York (1983).
- [16] - N.M. CEAGLSKE
Automatic Process Control for Chemical Engineers.
Ed. John Wiley & Sons, New York (1963).
- [17] - William L.LUYBEN «Process Modeling Simulation and Control For Chemical Engineers ».
Ed. Mc Graw-Hill, USA.(1990).
- [18] - G.Michel « Les API Architecture et Applications des Automates Programmable Industriel ».
Ed. DUNOD, Paris (1988).
- [19] - Francis Saguez-C. Anderleux. « Maitrisez les Interfaces de Votre Micro-Ordinateur »
Ed. EYROLLES, Paris (1984).
- [20] - Pierre Vidal « Aide Memoire d'Automatique »
Ed DUNOD, Paris (1985).

TECHNIQUES DE L'INGENIEUR

- [21] - Claude. Foulard «Algorithmique de la Commande par Calculateur» R7562.
- [22] - PIERRE DESCHIZEAUX « Langage de Programmation Industrielle» R 565.
- [23] - CLAUDE BOZZO « Correcteurs Numériques» R 7420

INFORMATIQUE

- [24] - Benmiloud «Logiciel d'Aide à la Conception de Mobile Linéaire en Automatique»
Ed. OPU, Alger (1990).
- [25] - C.Delannoy « Les Fichiers en Basic sur Micro-Ordinateur».
Ed. EYROLLES, Paris.(1985).
- [26] - B. Hudault «Informatique Turbo Basic»
Ed. PSI, Paris (1988).