

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

8/96

وزارة التربية الوطنية

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT

GENIE CHIMIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

REGULATION DE TEMPERATURE
ET PROGRAMMATION
DES REGULATEURS STANDARDS

Proposé par :

Mr T. AHMED ZAID

Etudié par :

Mr S. SIAD
Mr K. ZIANE

Dirigé par :

Mr T. AHMED ZAID
Mr F. BENGUERINE

PROMOTION

1995/96

DEDICACE

Nous tenons à dédier ce modeste travail à la mémoire de notre ami et camarade de promotion EL MEZOUAR MISSOUM.

Nous prions Dieu tout puissant, de l'accueillir dans son vaste paradis.

DEDICACES

A ma douce mere .

A mon cher père .

A mes deux soeurs adorées Hayette et Samia .

A mon frère et ami Farouk .

A tous mes amis .

S. SIAD

DEDICACES

A la mémoire de mon ami Bélaïd Farid et de ma grand mère Djouher

A mes grands pères Slimane et Kaci

A ma grand mère Yamina

A mes très chers et précieux parents

A mes adorables frères et soeurs

A tous mes oncles et tantes et à leurs enfants

A mes très chers amis et frères Ahmed et Mahdi

A tous mes amis

KARIM.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à Mr M.T. AHMED ZAID qui a proposé et dirigé ce sujet, et nous a permis ainsi de mener notre projet dans les meilleurs conditions possibles.

Nos sincères remerciements vont aussi envers toute l'équipe du C.I.A.R.A qui ont mis tout le matériel possible, afin que nous puissions concrétiser les buts fixés pour ce projet, cette équipe qui est à l'origine même de l'idée de ce projet.

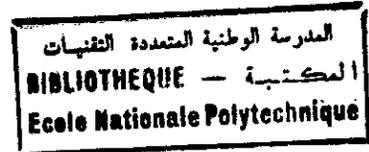
A celui qui a dévouée sa vie entière pour ce pays, et qui continue maintenant à aider les jeunes étudiants et diplômés, nous saluons en lui son courage et son obstination à vouloir faire changer les choses.

Nous tenons à remercier plus particulièrement Mr K.TRAHI pour lequel nous garderons le souvenir d'un monsieur très disponible.

Mr S. SIAD.

Mr K. ZIANE.

SOMMAIRE



INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : DYNAMIQUE DES SYSTEMES	
I-1 Définition et objectifs de la dynamique des systèmes.....	3
I-2 Etude des systèmes en chaîne ouverte.....	3
I-3 Identification des systèmes.....	6
Chapitre II : COMMANDE AUTOMATIQUE	
II-1 Introduction.....	8
II-2 Les différents types de commandes.....	8
II-3 Les différents types de régulateurs.....	9
II-4 Fonction de transfert en boucle fermée.....	11
II-5 Stabilité d'un système.....	13
Chapitre III : REGULATION DE TEMPERATURE	
III-1 Introduction.....	17
III-2 Principe de la régulation thermique.....	17
III-3 Les différents modes de régulation thermique.....	19
III-4 Règles à respecter dans la construction d'un régulateur.....	26
III-5 L'isolation.....	27
Chapitre IV : LES BASES DE LE REGULATION ECHANTILLONNEE	
IV-1 Introduction.....	31
IV-2 Structure d'un réglage par ordinateur de processus.....	31
IV-3 Définition et désignations.....	38
IV-4 Echantillonnage et quantification.....	42
IV-5 Structure des systèmes échantillonnés.....	45
Chapitre V: Régulation analogique pilotée par ordinateur.....	48
V-1 Introduction.....	48
V-2 Schéma de la boucle de régulation.....	49
V-3 La programmation de l'ordinateur.....	51
V-4 Algorithme du Tout ou Rien.....	56
V-5 Méthodes expérimentales de synthèse du PID.....	56
V-6 Tableau de réglage.....	59
V-7 Synthèse des régulateurs par la méthode de Takahashi.....	60
Chapitre VI : ETUDE DES FOURS A RESISTANCES.....	62
VI-1 Généralités.....	63
VI-2 Principe.....	64
VI-3 Transfert de chaleur par rayonnement.....	66

VI-4 Répartition du flux thermique dans un four à résistances.....	68
VI-5 Elements constitutifs d'un four.....	69
Chapitre VII : PARTIE EXPERIMENTALE.....	75
VII-1 Identification et modélisation du système.....	77
VII-1-1 Introduction.....	77
VII-1-2 Identification en boucle ouverte des systèmes apériodiques.....	78
VII-1-3 Détermination des paramètres de régulation numérique.....	86
VII-1-3-1 Les paramètres du système du four.....	86
VII-1-3-2 Les paramètres du système du bain-marie.....	87
VII-2 La régulation de la température du four par Tout ou Rien.....	88
VII-2-1 But de l'expérience.....	88
VII-2-2 Matériel utilisé.....	88
VII-2-3 Description du montage.....	88
VII-2-4 Conduite de l'expérience.....	88
VII-4 Application de la régulation échantillonnée sur un bain-marie.....	132
VII-4-1 Descriptions générales.....	132
VII-4-2 Régulation par Tout ou Rien.....	134
VII-4-3 Régulation proportionnelle.....	140
 CONCLUSION GENERALE.....	 147

ملخص

عملنا هنا يتمثل في دراسة ضابط حرارة " كل أو لا شيء " . كذلك إنجاز برنامج معلوماتي الذي سيلعب دور أربعة أنواع من الضوابط .
الجزء الأول من هذا العمل قمنا بإنجازه في دائرة الهندسة الكيميائية بالمدرسة المتعددة التقنيات .
الجزء الثاني المتمثل في الضبط العددي ، لم يكن ممكن إنجازه بدون مساعدة مركز البحث التطبيقي الذي قام بمساعدتنا في الحصول على البطاقات الرقمية الإلكترونية .

RESUME :

Notre travail a pour objectif l'étude d'un régulateur de température de type tout ou rien .

Ainsi que l'élaboration d'un programme qui jouera le rôle d'un régulateur standard TOR , P , PI ou PID .

La première partie de ce travail à été effectué dans le département de génie chimique à l'Ecole Nationale Polytechnique .

La deuxième partie, concernant la régulation numérique , n'a été rendu 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 électroniques d'acquisition (interfaces) permettant la liaison entre le système à réguler et l'ordinateur

ABSTRACT :

Our work has as a purpose, the study of a regulator of temperature all or nothing . therefore the elaboration of a program which plays a rol of a standard regulator AON , P , PI or PID .

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

The second part , concerns the numerical regulation , has been possible owing to the collaboration of Initiation Center of Activites in Applied Research (Interface) that provided us with electronics maps of acquisition .

INTRODUCTION :

Presque tous les phénomènes de physique , de chimie ou de biologie sont fonction de la température .

De là résulte la nécessité de stabiliser les conditions thermiques qui définissent , pour une large part l'ambiance dans laquelle se font les expériences .La régulation de température peut être appliquée à des mesures,des essais ou des préparations très variables .

Il en résulte qu'elle va se présenter sous des aspects très différents suivant les conditions expérimentales et les exigences de l'expérimentateur .

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

Notre partie théorique comprend les chapitres allant de un à six .

Dans la partie expérimentale nous allons effectués : une régulation par tout ou rien du four . On étudiera aussi le comportement d'un régulateur de type PROLABO pour la régulation du four.

Après l'identification des deux systèmes à étudier (four et bain) ,on va élaborer un programme qui nous permettra d'effectuer deux types de régulations pilotées par ordinateur : une régulation numérique tout ou rien et numérique proportionnelle du bain .

CHAPITRE I

*DYNAMIQUE DES
SYSTEMES*

I-1 DEFINITION ET OBJECTIFS DE LA DYNAMIQUE DES SYSTEMES:

Elle peut être définie comme la discipline qui traite de l'évolution des systèmes dans le temps en fonction des actions qu'ils subissent, ses objectifs sont les suivants :

- Etude de la stabilité d'un système (prévoir les variations des variables de sortie).
- La commande des systèmes : c'est à dire la régulation ou l'asservissement qui consiste à imposer aux variables de sortie une évolution bien précise.
- Construction d'un modèle mathématique représentatif du comportement du système.

I-2 ETUDE DES SYSTEMES EN CHAINE OUVERTE :

I-2-1 Analyse transitoire :

I-2-1-1 Le système linéaire du premier ordre (SL1) :

Un système linéaire du premier ordre est un système décrit par une équation différentielle du premier ordre (l'équation relie la variable d'entrée x à celle de sortie y) :

$$\tau_p \frac{dY(t)}{dt} + Y(t) = K_p X(t) \quad (I-1)$$

telque τ_p : constante de temps du système , [τ_p] = seconde .

K_p : coefficient de proportionnalité , (sans dimension).

En passant au laplacien I-1 devient :

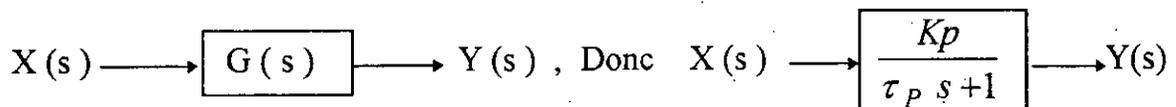
$$\Rightarrow \tau_p s Y(s) + Y(s) = K_p X(s)$$

$$\Rightarrow \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K_p}{\tau_p s + 1}$$

On définit la fonction de transfert comme : $G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$

Pour un système en série : $G = \prod_{i=1}^n G_i$

Donc pour le SL1 :



I-2-1-2 Le système linéaire du deuxième ordre (SL2) :

L'équation différentielle est de la forme :

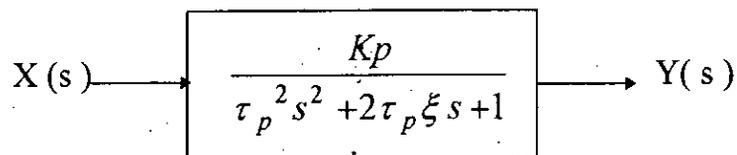
$$\tau_p^2 \frac{d^2 Y(t)}{dt^2} + 2 \tau_p \xi \frac{dY(t)}{dt} + Y(t) = K_p X(t)$$

ξ : coefficient d'amortissement (sans dimension).

En passant au laplacien, on aura :

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K_p}{\tau_p^2 s^2 + 2\tau_p \xi s + 1}$$

Donc pour le SL2:



On a : $\xi = 1$ le système est à amortissement critique.

$\xi < 1$ ou $\xi > 1$ le système est sous ou sur amorti.

I-2-1-3 Le retard pur :

La relation entre y et x est : $Y(t) = X(t - \tau)$

Le laplacien nous donne : $Y(s) = e^{-\tau s} X(s)$

Donc la fonction de transfert est : $G(s) = e^{-\tau s}$

I-2-1-4 L' amplificateur :

La fonction de transfert d'un amplificateur est : $G(s) = K_P$

I-2-2 L' analyse harmonique :

C'est une méthode qui consiste à représenter la dynamique des systèmes linéaires par l'intermédiaire de leurs comportements en régime permanent sinusoïdale. Le choix du signal sinusoïdale est dû à ce que ce dernier conserve sa forme en traversant un système linéaire (seul l'amplitude et la fréquence se trouvent modifiées).

Si : $X(t) = A \sin(\omega t)$

On aura : $Y_\infty(t) = B \sin(\omega t + \varphi)$

En faisant une substitution de : $s = j\omega$ dans la fonction de transfert, on obtient $G(j\omega)$ qui a les propriétés suivantes :

$$M = \frac{B}{A} = \| G(j\omega) \| \quad M : \text{gain statique}$$

$$\varphi = \arg G(j\omega) \quad \varphi : \text{dephasage}$$

Si on cherche à identifier un système, il suffira de connaître l'allure des courbes φ et b/a en fonction de ω (courbes des gains et des phases), étant donnée que ces courbes sont une caractéristique du système.

I-3 IDENTIFICATION DES SYSTEMES :

On entend par identification d'un procédé : la connaissance de sa fonction de transfert, ainsi on pourra connaître sa nature (SL1, SL2, ... etc.).

Il existe plusieurs méthodes d'identification, nous citerons ici les plus utilisées :

I-3-1 A partir des lieux de transfert :

Il suffira pour cela, de tracer les différents points de M et de φ en fonction de ω . De la courbe des gains on pourra : connaître l'ordre de linéarité du système. Et de la courbe des phases : savoir s'il y'a présence d'un retard.

sachant que : - Pour ω tendant vers ∞ , on a : $\varphi = n(-90)$ (où n est l'ordre).

- Pour $\omega = 1/\tau_p$, on a $\varphi = n(-45)$, sinon il existe un retard.

I-3-2 Méthode de Broïda :

Tout système est assimilé à un SL1 :

On a : $\tau = 5,5 (t_2 - t_1)$

$$\tau_p = 2,8 t_1 - 1,8 t_2$$

t_1 et t_2 sont définies et calculées dans la partie expérimentale chapitre VII.

I-3-3 Méthode de STREJE :

Pour un système quelconque, on a : $G(s) = \frac{K_p e^{-\tau s}}{(1 + \tau_p s)^n}$

Pour chaque valeur de n (l'ordre), STREJE a établi un tableau donnant les

valeurs de $\frac{T_a}{\tau_p}$, $\frac{T_u}{\tau_p}$, $\frac{T_u}{T_a}$, Φ_i , $\frac{T_m}{\tau_p}$, $\frac{T_m}{T_a}$ (T_a , T_u , T_m , Φ_i sont des paramètres

définis dans la courbe du signal $r(t)$ en fonction du temps), qui permet ainsi de calculer τ , τ_p et n.

CHAPITRE II

COMMANDE AUTOMATIQUE

II-1 INTRODUCTION :

Le terme commande désigne l'action qu'il faut exercer sur le système ou sur ses variables d'entrée de façon que les variables de sortie satisfassent à des objectifs désignés. On définira la régulation comme le maintien des variables d'entrée et de sortie constantes. Pour l'asservissement : il s'agit d'imposer aux variables des variations bien déterminées.

II-2 LES DIFFERENTES TYPES DE COMMANDES:

II-2-1 Commande par rétroaction :

C'est la commande la plus répandue. Son avantage majeur est qu'elle permet de faire face à n'importe quelle perturbation, même non prévue. Mais le système de régulation ne réagit que quand l'effet de la perturbation a déjà traversé le procédé (d'où le nom rétroaction).

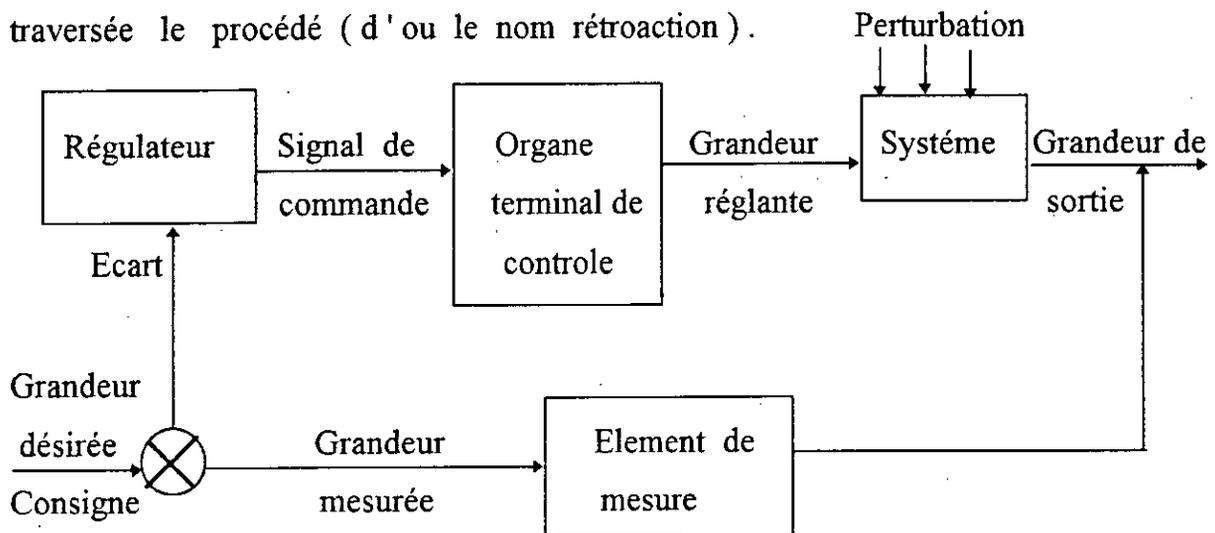


Figure II-2 Boucle de régulation par rétroaction

II-2-2 Commande anticipée :

Il s'agit d'anticiper sur les réactions du système, en le corrigeant à l'avance pour annuler l'effet d'une perturbation de la variable d'entrée que l'on détecte. Elle est surtout utilisée pour les perturbations prévues.

II-2-3 Commande adaptative :

La fonction de régulation est double : En premier lieu, il s'agit d'une unité d'identification qui déce les variations dans la dynamique du procédé.

- Deuxièmement, l'unité d'adaptation ajuste les paramètres du système de régulation en conséquence.

II-2-4 Commande en boucle ouverte :

Dans ce type de commande, on se borne à assurer la constance de toutes les variables de réglage d'entrée à l'aide de boucles de régulation locales cette commande ne permet pas de compenser des perturbations ou des modifications dans les caractéristiques du procédé.

II-3 LES DIFFERENTS TYPES DE REGULATEURS :

On distinguera deux types de régulateurs : les régulateurs à action directe et les régulateurs à fluide auxiliaire qui peut être : électricité, eau, huile, ...etc.

II-3-1 Régulateurs à fluide auxiliaire :

Ces régulateurs sont utilisés lorsque la force motrice est importante, alors on est obligé de recourir à une source d'énergie extérieur c'est à dire à un fluide auxiliaire.

II-3-1-1 Régulateurs à action proportionnelle :

On a : $P(t) = \bar{p} + Kc \varepsilon(t)$

En passant au laplacien : $P(s) = \varepsilon(s) Kc$

Comme $G_R(s) = \frac{P(s)}{\varepsilon(s)}$

Donc pour le RAP : $G_R(s) = Kc$

II-3-1-2 Régulateurs à action proportionnelle et intégrale :

On a : $P(t) = \bar{p} + Kc \varepsilon(t) + \frac{Kc}{\tau_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt$

En passant au laplacien : $P(s) = Kc\varepsilon(s) + \frac{Kc}{\tau_i} \frac{\varepsilon(s)}{s}$

Donc pour le RAPI : $G_R(s) = Kc \left(1 + \frac{1}{\tau_i s}\right)$

II-3-1-3 Régulateurs à action proportionnelle et dérivée :

On a : $P(t) = \bar{p} + Kc \varepsilon(t) + Kc\tau_D \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$

Donc : $P(s) = Kc \varepsilon(s) + Kc \tau_D s \varepsilon(s)$

Donc pour le RAPD : $G_R(s) = Kc(1 + \tau_D s)$

II-3-1-4 Régulateurs à action proportionnelle intégrale et dérivée :

On a : $P(t) = \bar{p} + Kc \varepsilon(t) + Kc\tau_D \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + \frac{Kc}{\tau_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt$

Donc : $P(s) = Kc\varepsilon(s) + \frac{Kc}{\tau_i} \frac{\varepsilon(s)}{s} + Kc \tau_D s \varepsilon(s)$

Donc pour le RAPID : $G_R(s) = Kc(1 + \tau_D s + \frac{1}{\tau_i s})$

II-3-1-5 Régulateurs tout ou rien (et tout ou peu) :

Qui sont utilisés pour la régulation de la température . Nous détaillerons ce type de régulateurs dans les chapitres suivants .

II-4 FONCTION DE TRANSFERT EN BOUCLE FERME :

Soit la boucle suivante :

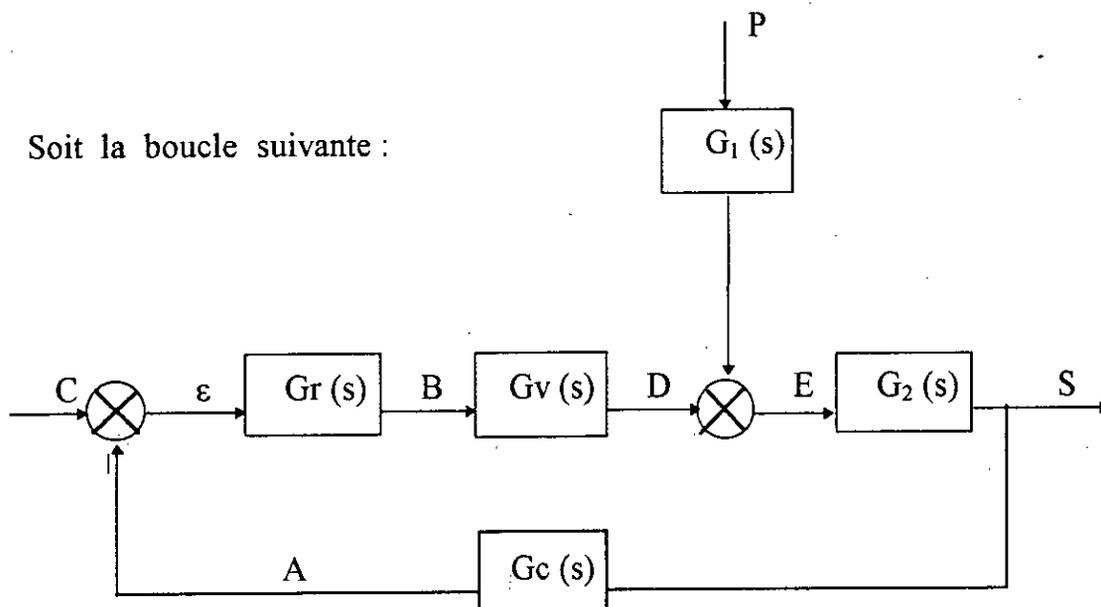


Figure II -3 Boucle fermée

$$\text{On a : } S = G_2(s) [p \cdot G_1(s) + D]$$

$$D = G_v(s) \cdot G_r(s) (C - A)$$

$$A = G_c(s) \cdot S$$

$$\text{Donc : } S = G_2(s) \cdot G_1(s) \cdot p + G_2(s) \cdot G_v(s) \cdot G_r(s) [C - G_c(s) \cdot S]$$

$$\text{Donc : } S = \frac{G_2 G_1}{1 + G_2 G_v G_r G_c} P + \frac{G_v G_r G_2}{1 + G_2 G_v G_r G_c} C$$

Donc en général :

- Le dénominateur est $1 + \prod_{i=1}^n G_i$ de toute la boucle .
- Le numérateur est le produit des fonctions de transfert en allant de l'entrée vers la sortie .

On peut distinguer 2 cas :

1- Régulation : où C (la consigne) est une constante $C = C_0$. Par convention $C_0 = 0$. Donc p est l'entrée principale .

2-Asservissement : ou le servomécanisme où C varie en fonction du temps ($C \neq 0$) .
Mais comme : $p = \varepsilon \times Gr$, $\varepsilon = 0$ donc $p = 0$. Alors C est l'entrée principale .

- Définition de l'erreur statique

Pour le schéma précédant , l'erreur statique est défini comme :

$$E_s = C(\infty) - S(\infty)$$

Si on a une régulation , c'est à dire $C = 0$, donc :

$$E_s = - S(\infty) = - \lim_{s \rightarrow 0} [s S(s)]$$

Remarques :

- Dans la régulation , il y'a deux actions :

1- L'action intégrale : permet d'éliminer l'erreur ($E_s = 0$) .

2- L'action dérivée : permet d'avoir une réponse rapide .

- Le régulateur proportionnelle intégrale et dérivé annule l'erreur statique mais modifie la stabilité du système .

- Le choix entre un tel ou tel régulateur est souvent dicté par des considérations économiques .

II-5 STABILITE D' UN SYSTEME :

Comme on l'a démontré auparavant : S s'écrit en fonction de p et de C. On dira que si un système est stable par rapport à la perturbation , il est stable par rapport à la consigne parce que l'ensemble des pôles sont inclus dans l'ensemble de celui de la consigne . on parlera de deux critères de stabilité essentiels:

le critère de RUTH (en boucle fermé) et le critère de BODE (en boucle ouverte).

II-5-1 Critère de stabilité de RUTH :

Ce critère est appliqué pour tout système dont l'équation caractéristique s'écrit sous forme polynomiale .

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0 = 0$$

$$A_1 = \frac{-a_n a_{n-3} + a_{n-1} a_{n-2}}{a_{n-1}}$$

$$A_2 = \frac{-a_n a_{n-5} + a_{n-1} a_{n-4}}{a_{n-1}}$$

$$B_1 = \frac{A_1 a_{n-3} - A_2 a_{n-1}}{A_1}$$

$$B_2 = \frac{A_1 a_{n-5} - A_3 a_{n-1}}{A_1}$$

a_n	a_{n-2}	a_{n-4}
a_{n-1}	a_{n-3}	a_{n-5}
A_1	A_2	A_3
B_1	B_2

Au départ les coefficients doivent être positifs ou nuls. On observe la première colonne du tableau et le nombre de changement de signe qui est égal au nombre de racines à parties réelles positifs de l'équation caractéristique. Le système est stable si les racines sont à parties réelles négatives .

II-5-2 Critère de stabilité de BODE :

Pour une boucle ouverte BODE énonce :

Un système contrôlé automatiquement est instable , si la réponse en fréquence du système en boucle ouverte présente un gain supérieur à un (1) , lorsque $\varphi = - 180^\circ$.

Les avantages de ce critère sont :

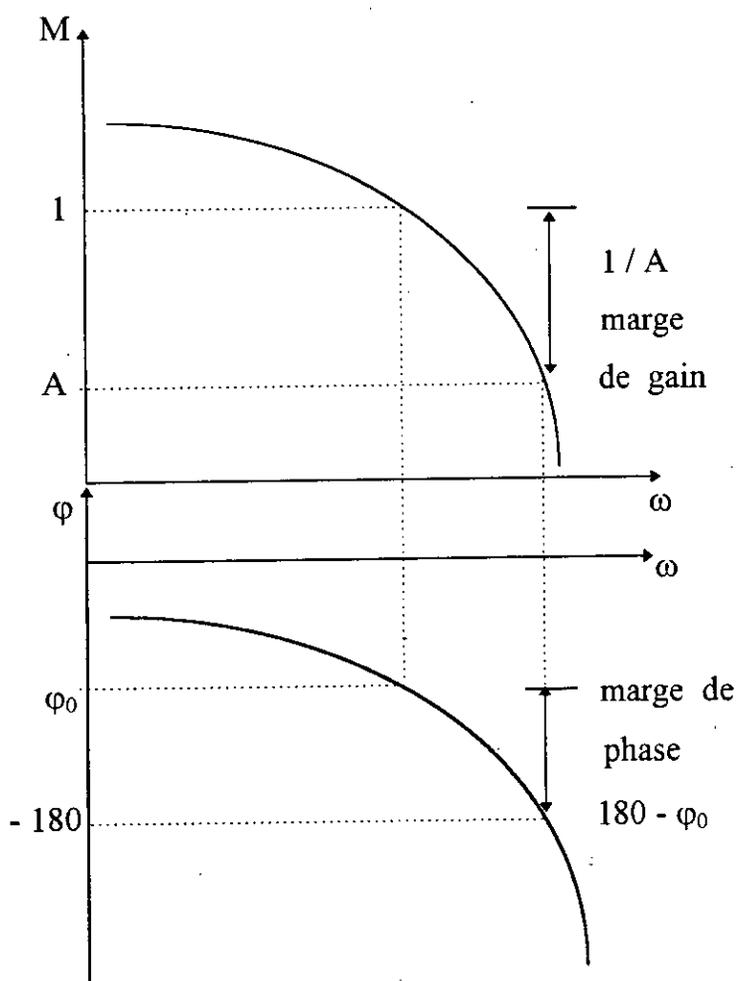
- Traiter tous les systèmes .
- La réponse en fréquence du système est obtenue expérimentalement .
- Avoir une idée si on est proche ou loin de la stabilité d'un système .

-Définition de la marge de gain et de phase:

Marge de gain : c'est le gain ajouté au système sans le déstabiliser $M < 1$.

Si $A \ll 1$ donc le système est très stable .

Si $A \approx 1$: Système très proche de l'instabilité .



FigureII-4 Marge de gain et marge de phase

CHAPITRE III

*REGULATION DE
TEMPERATURE*

III-1 INTRODUCTION :

Les régulateurs de températures utilisés à l'origine au laboratoire. Se rencontrent de plus en plus fréquemment dans l'industrie (traitements thermiques des métaux , conservation des aliments , banques de sang , ...). La régulation de température peut être appliquée à des mesures , des essais ou à des préparations très variables . Il en résulte qu'elle va se présenter sous des aspects très différents , suivant les conditions expérimentales et les exigences de l'expérimentateur .

III-2 PRINCIPE DE LA REGULATION THERMIQUE :

III-2-1 Principe de base :

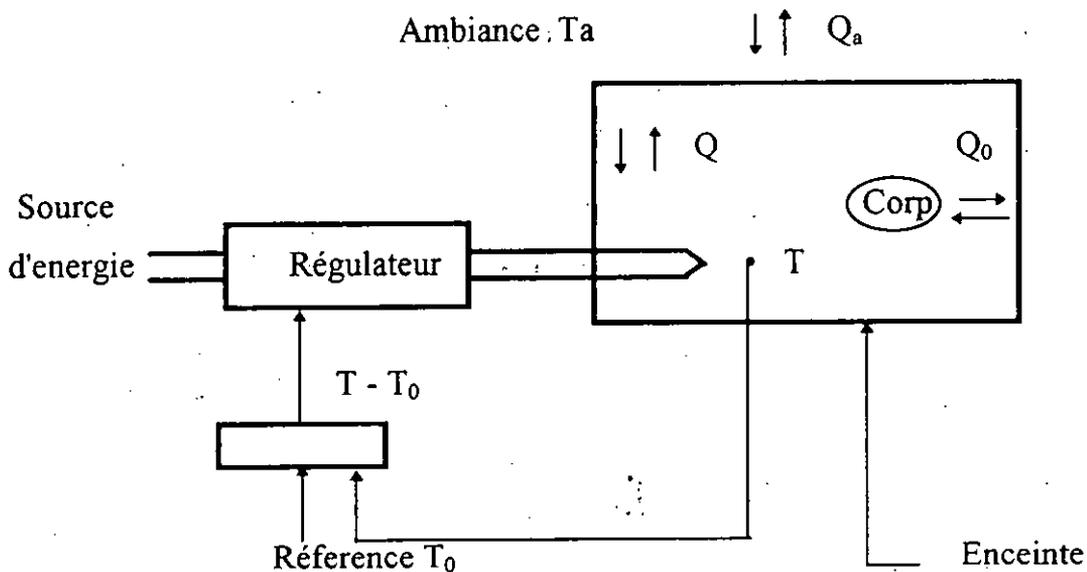


Figure III-1 Principe d'un thermostat

Pour maintenir la température constante , on va procéder à cela de trois manières:

1- Il suffira par exemple de maintenir les échanges constants , c'est à dire que la température ambiante reste fixe et cela en assurant une puissance d'alimentation constante pour l'enceinte .

2- On pourra aussi s'arranger à ce que les échanges calorifiques ne modifient pas la température du milieu ou l'enceinte est placée .

3- Ou bien encore utiliser un régulateur de température qui permettra de compenser à chaque instant la quantité de chaleur apportée avec celle cédée au milieu ambiant.

III-2-2 Principe d'un régulateur de température :

Pour simplifier , nous admettrons que l'enceinte est vide , ou contient un corps calorifiquement inerte ($Q_0 = 0$) . Aussi , que la température de l'enceinte soit supérieur à celle de l'ambiance . Pour avoir une température T_0 dans l'enceinte, il faudra que Q_a soit égal à Q ($Q_a = Q$) , et cela en ajustant Q en fonction de la différence ($T - T_0$) .

Pour cela il faudra procéder comme suit :

1- Mesurer la température T et la comparer à T_0 .

2- Un organe régulateur sensible à ($T - T_0$)devra provoquer une variation de la quantité de chaleur fournie .

3-L'action devra se poursuivre , c'est à dire que $|T - T_0|$ diminuera jusqu'à ce que $T = T_0$.

De tout cela , nous pouvons conclure que tout régulateur devra comprendre :

-Un organe de mesure (un thermomètre) .

-Une référence de température (T_0) .

-Un détecteur d'écart ($T - T_0$) .

-Et enfin , une source d'énergie .

III-3 LES DIFFERENTS MODES DE REGULATION THERMIQUE :

III-3- 1 Régulation par tout ou rien :

Dans ce type de régulation , le régulateur coupe le courant dès que la température du thermomètre de l'enceinte atteint la valeur de réglage T_0 .Après ça , l'enceinte refroidit . le courant sera rétabli lorsque T devient égal à T_1 ,ou T_1 est une valeur légèrement inférieur à T_0 .

Pour un four (comme on le voit sur le schéma) :

- Initialement le four est à la température ambiante T_a .
- Sa température augmente jusqu' à atteindre la température T_r .

La température du thermomètre suit la température du four avec un certain retard (retard que met la chaleur pour arriver de l'élément chauffant au thermomètre) Mais lorsque le thermomètre est à T_0 :

- Le courant est coupé .
 - Le four est alors à une température T'_0 supérieur à T_0 .
- On constatera le même retard dans le refroidissement .

Pour mieux comprendre ce phénomène de retard ,essayons de bien l'analyser.
On supposera pour l'étude que :

- Le retard est constant et égal à δ .
- La vitesse d'échauffement V_c ($^{\circ}\text{C} / \text{s}$) est constante .
- La vitesse de refroidissement V_R est constante aussi .

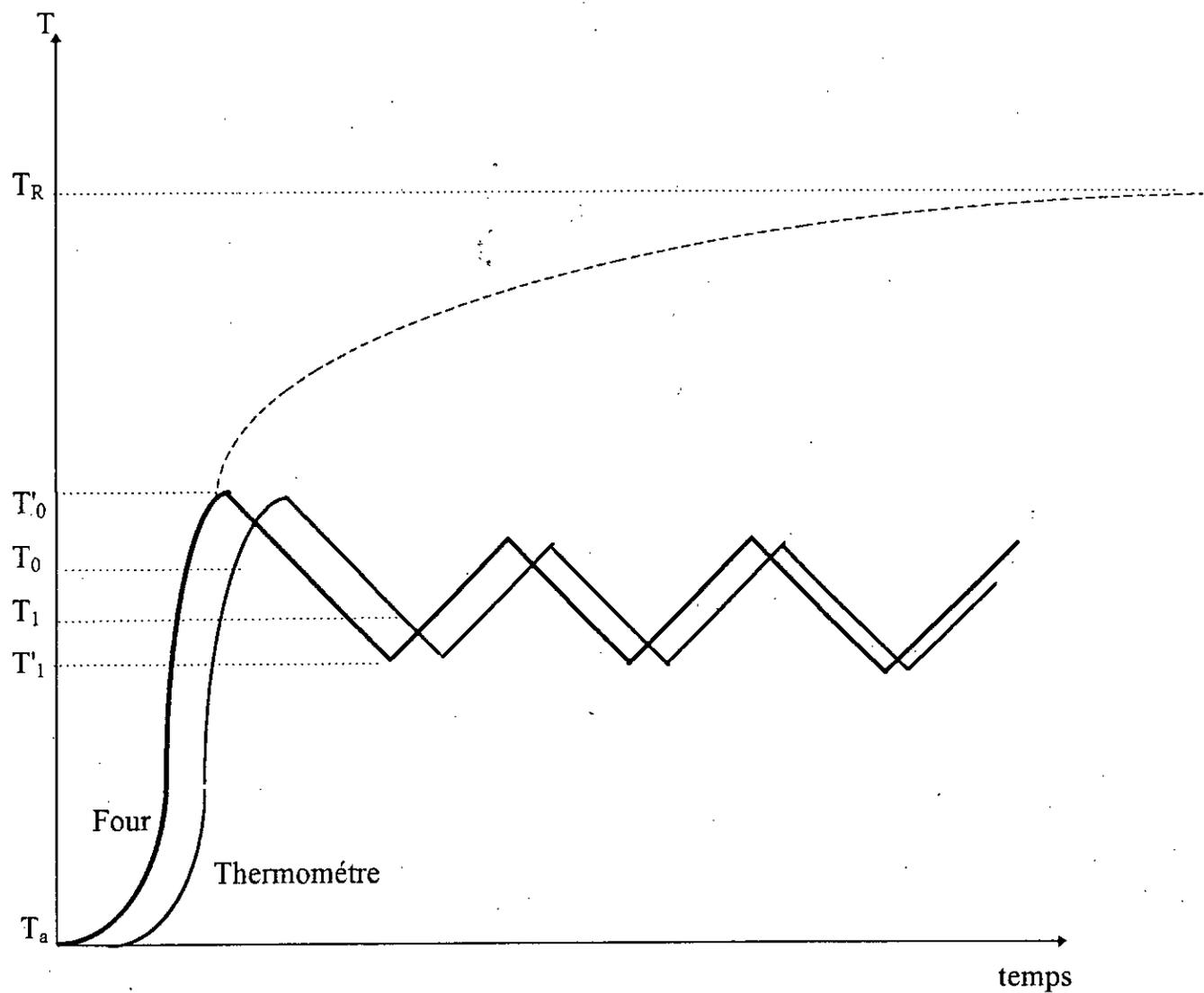


Figure III-1 Régulation par tout ou rien

Essayons de calculer la période τ et l'amplitude des oscillations de température $T_0 - T_1$ D'après le schéma III-2 :

- La période τ est égal à :

$$\tau = \delta + Z_1 + Z_2 + \delta + Z_3 + Z_4$$

$$\tau = 2\delta + Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4$$

$$\text{On a aussi : } \delta = \frac{1}{V_C} (T'_0 - T_0) = \frac{1}{V_R} (T_1 - T'_1)$$

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

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

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

$$Z_4 = \frac{1}{V_C} (T_0 - T_1)$$

De ces quatre equations, on a :

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

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

L'amplitude sera : $T'_0 - T'_1 = V_R (Z_1 + Z_2 + \delta) = V_C \delta + (T_0 - T_1) + V_R \delta$

$$\text{Donc : } T'_0 - T'_1 = \delta (V_C + V_R) + T_0 - T_1$$

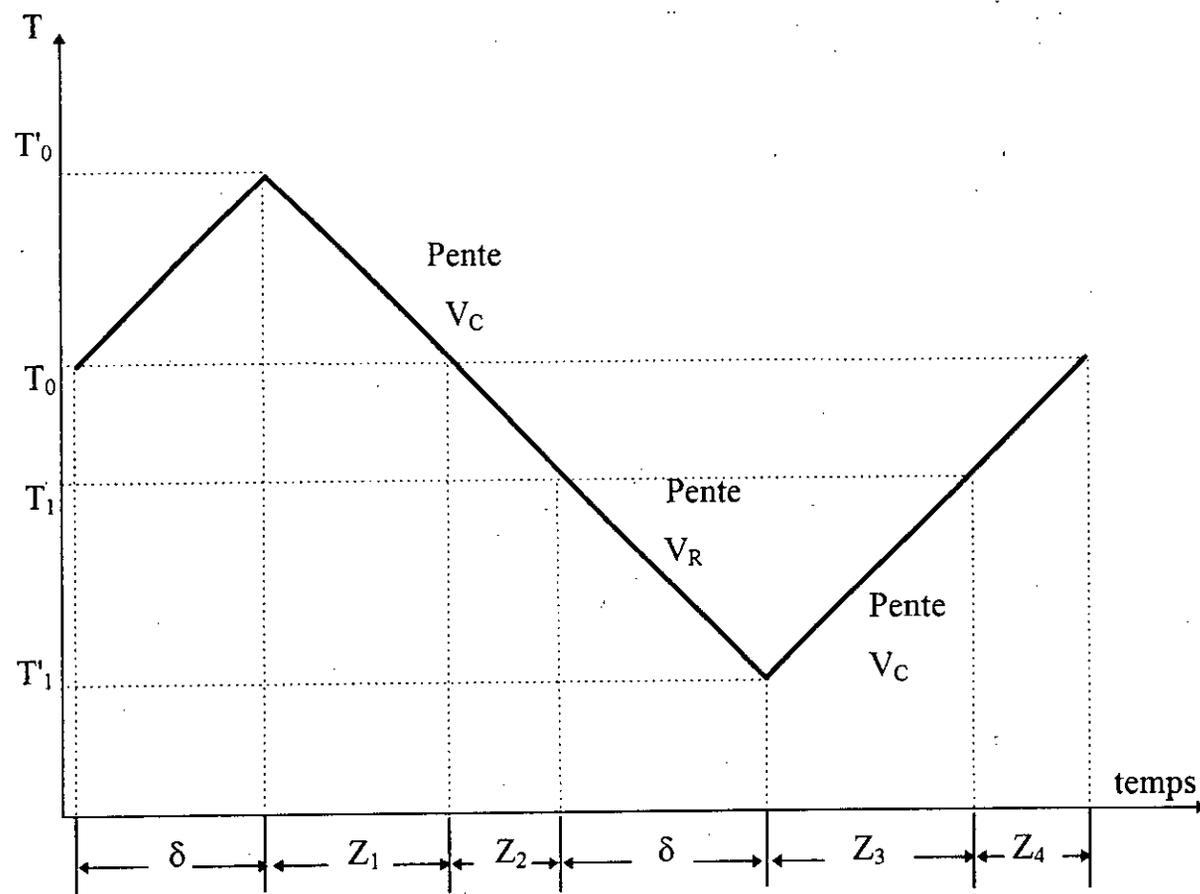


Figure III-2 Régulation par tout ou rien (Amplitude et periode)

De bonnes conditions expérimentales correspondent à $V_c = V_R$, donc la période minimum est égal à :

$$\tau_{\min} = 4\delta + \frac{2}{V_R} (T_0 - T_1)$$

Remarques :

-Si $T_0 = T_1$, donc l'amplitude sera égal a : $T_0 - T_1 = \delta (V_C + V_R)$. Et on

aura: $\tau = 4 \delta$

- Ce qu'on peut remarquer c'est que le facteur important dans une régulation par tout ou rien est δ (le retard thermique de l'élément sensible sur l'élément chauffant).

- Ce retard δ devra être diminué. On parviendra à cela en :

1- Plaçant le thermomètre près de l'élément chauffant, mais pas du corps .

2- Assurant une agitation, et cela pour le maximum d'échange entre le thermomètre et l'élément chauffant .

3- Faisant remplir par un seul appareil : les fonctions de chauffage et de contrôle thermique, si cela est possible .

III-3-2 Régulation par tout ou peu :

Comme on l'a vu précédemment (calcul de τ_{\min}), il y'a intérêt à réduire V_C ou V_R . Donc dans ce type de régulation, on fera en sorte de diminuer le courant de chauffage sans le couper et cela lorsque $T = T_0$.

Pour le traçage de la courbe, il suffira de prendre a la place de la température ambiante, la température de régime avec courant réduit. Les températures limites peuvent alors être rapprochées, les pentes des courbes deviendront très petites et l'amplitude des oscillations plus faibles .

III-3-3 Régulation par paliers successifs :

Elle consiste en un réglage par tout ou peu entre plusieurs paliers successifs judicieusement répartis, de façon à ajuster au mieux les courbes de chauffage et de refroidissement .

III-3-4 Régulation proportionnelle :

Dans ce mode de régulation, l'action est proportionnelle à l'écart $T - T_0$. Elle est nulle pour $T = T_0$ (voir figure III-3), c'est à dire que le chauffage s'ajuste précisément aux pertes subies par l'enceinte lorsque elle est à la température désirée. Comme pour la régulation tout ou rien, le thermomètre s'aperçoit de la température de l'élément chauffant avec un certain retard δ . On écrira donc l'apport de chaleur à l'instant t .

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_t = h (T_0 - T)_{t-\delta}, \text{ comme : } dQ = c dt$$

$$\text{Donc } \frac{c}{h} \left(\frac{dT}{dt}\right)_t + T_{t-\delta} = T_0$$

En utilisant le développement de TAYLOR :

$$T_{t-\delta} = T_t - \delta T'_t + \frac{\delta^2}{2!} T''_t - \frac{\delta^3}{3!} T'''_t + \dots$$

$$\text{Donc } T + \left(\frac{c}{h} - \delta\right) \frac{dT}{dt} + \frac{\delta^2}{2!} \frac{d^2T}{dt^2} - \frac{\delta^3}{3!} \frac{d^3T}{dt^3} + \dots = T_0$$

Si on s'arrête au second ordre, on a l'équation classique d'un système pendulaire avec: (la pulsation) $\omega = \frac{\sqrt{2}}{\delta}$, (la période) $P = \sqrt{2}\pi\delta$, Le facteur

$$\text{d'amortissement } \xi \text{ est égal à : } \xi = \frac{1}{\sqrt{2}\delta} \left(\frac{c}{h} - \delta\right) \Rightarrow \xi = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{c}{\delta h} - \frac{1}{\sqrt{2}}$$

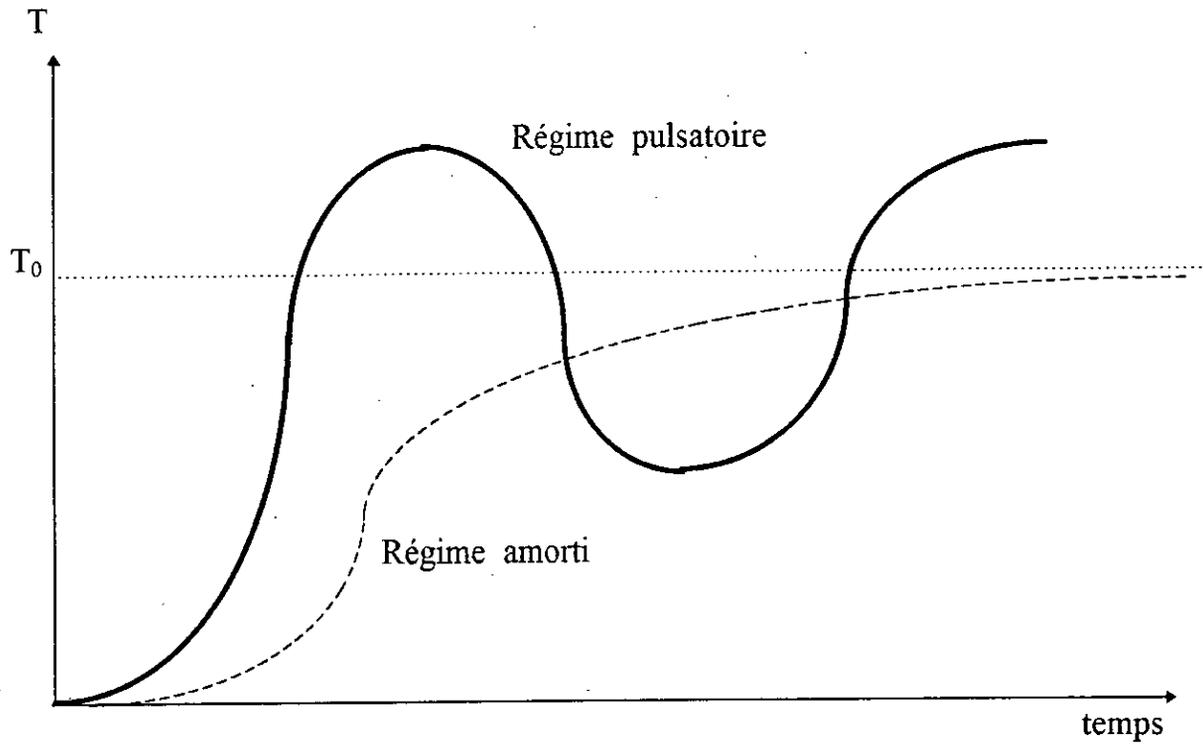


Figure III-3 Régulation proportionnelle

- Le régime sera périodique si ξ est assez petit, c'est à dire que ξ ne sera pas négligeable (δ grand).

- Le régime sera apériodique si $\xi > 1$, c'est à dire $\frac{c}{h\delta} > 1 + \sqrt{2}$.

Remarques :

-Comme pour la régulation par tout ou rien , on a intérêt de diminuer δ . Donc

il faudra choisir $\frac{h}{c}$ petit .

-Dans le cas de la régulation proportionnelle , on peut obtenir un régime stable sans oscillations en faisant un choix convenable des grandeurs en jeu . On peut

aussi la favoriser par addition d'un signal dérivé $\frac{d(T - T_0)}{dt}$.

III-4 REGLES A RESPECTER DANS LA CONSTRUCTION D' UN REGULATEUR :

Quelque soit le régulateur utilisé , on devra respecter les règles suivantes :

1) Maintenir constantes les sources d' alimentations pour éviter de corriger les variations de température dues à la variation de la source .

2) La brièveté du cycle thermique est un critère du bon fonctionnement de la régulation , c' est à dire un cycle à période minimum . Et cela est réalisé en rendant égal la pente d' échauffement et de refroidissement .

3) Réduire le retard entre l' organe chauffant et le thermomètre , en assurant l' agitation et une bonne position du thermomètre .

4) On choisira (si les raisons économiques le permettent) , un régulateur proportionnelle à un régulateur par tout ou rien .

5) Il faut augmenter la chaleur spécifique ainsi que la capacité calorifique de l' enceinte , qui peut être fonction de :

L^0 pour l'alimentation, L^2 pour l'ambiance et L^3 pour l'élévation de la température qui est inversement proportionnelle au volume. Donc il suffira d'avoir une enceinte très vaste.

6) Réduire la pente de la courbe d'échauffement en réglant la puissance de chauffe. Pour la pente de la courbe de refroidissement, il faudra évacuer l'énergie apportée à l'enceinte très vite.

III-5 L'ISOLATION :

Pour une enceinte, une régulation doit permettre que $(Q + Q_0)$ soit écoulée vers l'extérieur même dans les conditions les plus défavorables. C'est à dire pour Q_{maximum} quand la tension d'alimentation est maximum et la température ambiante T_a soit la plus élevée.

III-5-1 Calcul de l'isolement :

III-5-1-1 Surface plane infinie :

L'énergie fournie par la régulation est $W = J \times Q$.

$$\text{Aussi : } W = \lambda \frac{S}{e} (T_0 - T_S)$$

Ou : T_0 : température de la paroi intérieur de l'isolant.

T_S : température de la surface externe de l'isolant.

Connaissant T_0 , T_S , λ ; on pourra calculer l'épaisseur maximum d'isolant compatible avec l'évacuation de $W = J \times Q$.

III-5-1-2 Four cylindrique:

$$W = \frac{2,73 l}{\log_{10} \frac{r_1}{r_2}} \lambda (T_0 - T_S)$$

r_1 , r_2 et l sont respectivement le rayon interne , le rayon externe et la longueur du four .

III-5-1-3 Sphère :

$$W = \frac{4 \pi}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} \lambda (T_0 - T_S)$$

r_1 , r_2 : rayons internes et externes .

Remarques :

- Pour un cylindre court , on utilisera les relations de la sphère .

- En pratique l'épaisseur e est égal à 20 % des dimensions du thermostat pour des températures proches de l'ambiante . Et égal à 100 - 150 % pour un four .

- Pour l'air entre 0 et 40°C $W_{convection} = 10^{-3} (T_S - T_a)$

- Pour une grande différence de température , on admettra que :

$$W = \frac{k}{0.45} (T_S - T_a) \quad (\text{Les valeurs de } k \text{ sont données dans le tableau III-1})$$

Tableau III-1 Valeurs de k et de T_s (pour une grande difference de temperature)

T_s (°K)	k (joule /°K)
0	0.00000
100	0.00098
200	0.00401
300	0.00924
400	0.01600
500	0.02430
700	0.04510
900	0.07090
1100	0.10170
1300	0.13760
1500	0.17760
1700	0.22200
1900	0.27100
2100	0.32500
2300	0.38400
2500	0.44700

CHAPITRE IV

*REGULATION
ECHANTILLONNEE*

BASES GENERALES DES SYSTEMES DE REGLAGE ECHANTILLONNES .

IV-1- INTRODUCTION :

L'utilisation des calculateurs de processus est aujourd'hui très répandue, particulièrement après l'apparition des microprocesseurs .

Un calculateur de processus est un mini- ou micro-ordinateur avec des interfaces pour le couplage avec un processus . Il permet l'exécution d'algorithmes de réglage et peut ainsi remplacer les régulateurs classiques .

Ces systèmes fonctionnent d'une manière discontinue en fonction du temps; on parle alors de systèmes de réglage échantillonnés .

IV-2 STRUCTURE D'UN REGLAGE PAR CALCULATEUR DE PROCESSUS :

Dans le cas d'un réglage par calculateur de processus, on peut distinguer plusieurs configurations, à savoir :

- Réglage monovariabte ;
- Réglage multiple ;
- Réglage multivariable .

IV-2-1 Réglage monovariabile :

C'est la configuration qui correspond au système étudié dans le présent travail .

Un réglage monovariabile (réglage simple) est caractérisé par le fait que le calculateur ne s'occupe que d'une seule grandeur à régler . Il est donc mal utilisé puisqu'un ordinateur a la possibilité de traiter plusieurs grandeurs en même temps .

La figure IV-1 montre schématiquement la structure d'un réglage monovariabile . Le système à régler possède une entrée (grandeur de commande : u) et une sortie (grandeur à régler : y) .

L'entrée est influencée par un organe de commande qui, en général, a la tâche d'amplification en puissance . La sortie du système à régler est amenée à un organe de mesure . On obtient ainsi un signal sous forme d'une tension continue qui est une mesure pour la grandeur physique . Ce signal est converti périodiquement dans l'entrée analogique au moyen d'un convertisseur : analogique / numérique (CAN) en un signal numérique avec lequel le calculateur peut travailler .

Les flèches doubles représentent des signaux numériques, convenablement codifiés .

Le calculateur de processus élabore l'algorithme de réglage à l'aide d'un programme en déterminant la nouvelle valeur pour la grandeur de commande u . La sortie analogique sert à l'aide d'un convertisseur : numérique / analogique (CNA) à la conversion de ce signal en une grandeur analogique qui est amplifiée dans l'organe de commande . En plus, la sortie analogique mémorise le signal jusqu'à la prochaine émission d'une nouvelle valeur par le calculateur de processus .

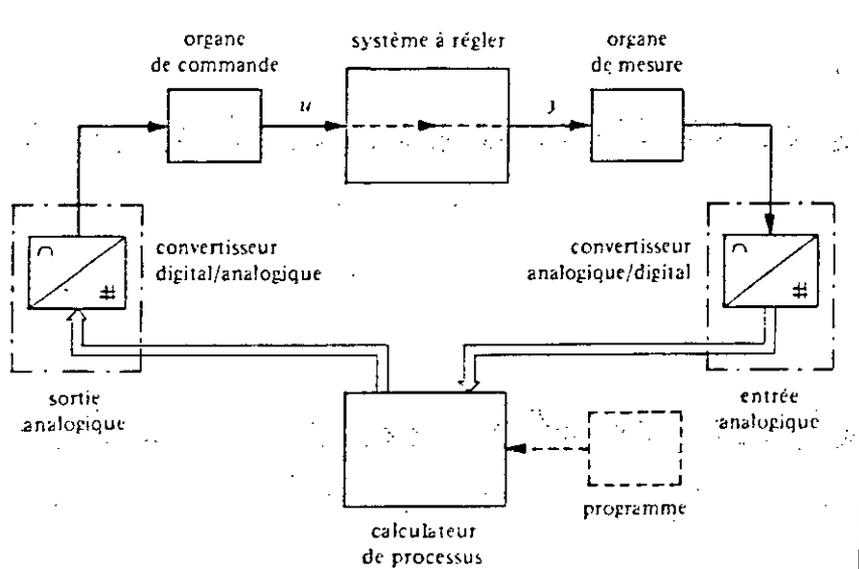


Figure IV-1. - Structure d'un réglage monovariante .

La figure IV-2 représente l'allure temporelle de la grandeur à régler : y et de la grandeur de commande : u . Au bas de cette figure , on a aussi indiqué l'occupation du calculateur de processus pour l'élaboration de l'algorithme de réglage .

A l'instant t_0 l'entrée analogique saisit la valeur instantanée de y . L'élaboration de l'algorithme de réglage exige le temps de traitement : t .

A l'instant : t_1 la sortie analogique applique la nouvelle valeur de la grandeur de commande . Ceci se répète en général périodiquement avec la période T .

Le calculateur de processus utilise donc seulement des échantillons de la valeur instantanée de la grandeur à régler y .

Par conséquent , pour la période T , on parle de période d'échantillonnage .

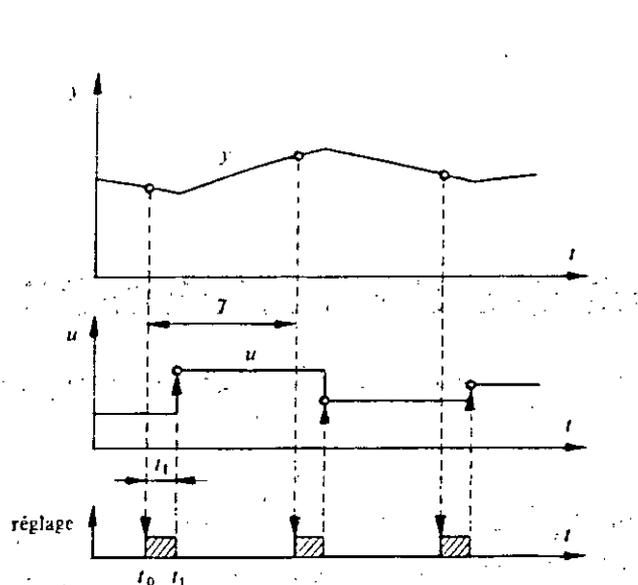


Figure IV-2. - Fonctionnement échantillonné d'un réglage monovariabile .

IV-2-2 Réglage multiple :

La structure d'un réglage multiple est représentée schématiquement à la figure IV-3 . Le calculateur de processus s'occupe du réglage de plusieurs grandeurs à régler , dont les systèmes à régler sont indépendants .

L'entrée analogique est complétée par un concentrateur (multiplexeur) permettant de sélectionner l'organe de mesure d'une certaine grandeur à régler .

La sortie analogique possède un convertisseur numérique/analogique avec mémorisation pour chacune des grandeurs de commande . Un distributeur permet d'appliquer le signal élaboré à la sortie correspondante de la grandeur de commande en question . Le calculateur de processus élabore alternativement les algorithmes de réglage .

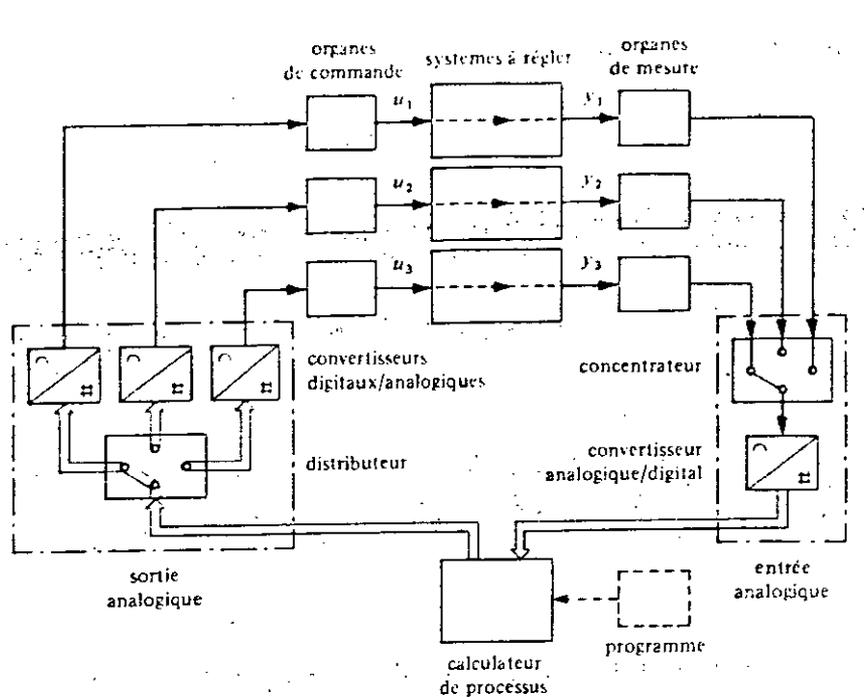


Figure IV-3. - Structure d'un réglage multiple .

La figure IV-4 montre les phénomènes correspondants d'une manière schématique . Puisque les réglage sont indépendants , il est possible de choisir des périodes d'échantillonnage différentes .

Etant donné que le temps de calcul est en général très inférieur par rapport à la période d'échantillonnage , cette répartition des tâches du calculateur de processus sur plusieurs réglages ne pose pas de problèmes .

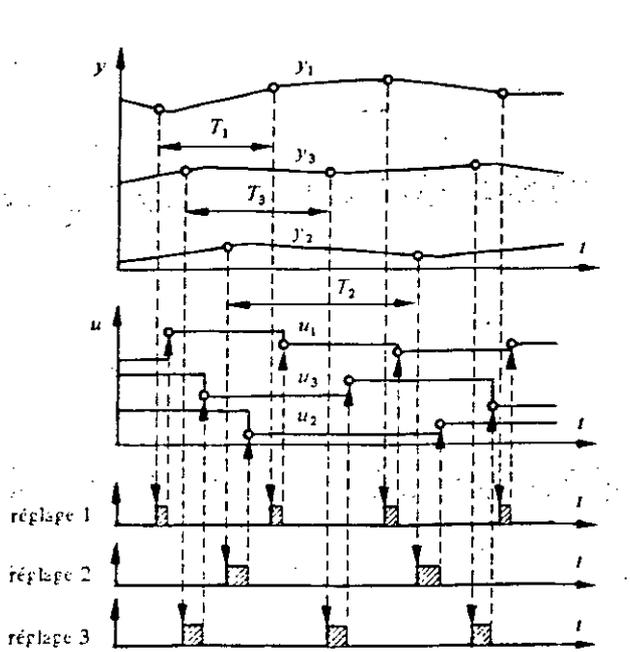


Figure IV-4. - Fonctionnement échantillonné d'un réglage multiple .

IV-2-3 Réglage multivariable :

La figure IV-5 donne la représentation schématique d'un réglage mutivariable .
 La structure est pratiquement la même que celle de la figure IV-3 à l'exception que les grandeurs à régler appartiennent au même système à régler qui présente des couplages mutuels .

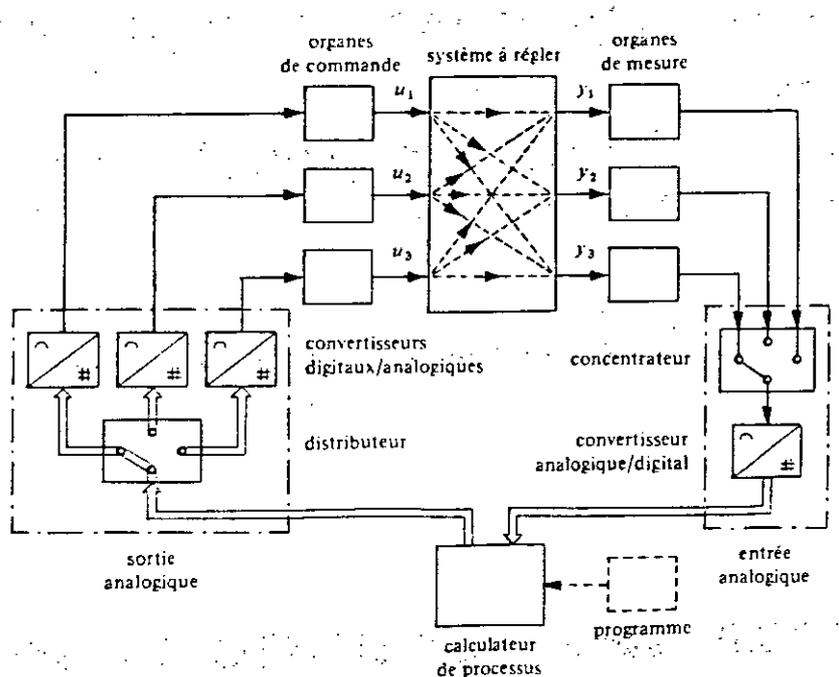


Figure IV-5. - Structure d'un réglage multivariable .

La figure IV-6 montre que les grandeurs à régler ne peuvent pas être traitées indépendamment . On doit lire consécutivement par l'entrée analogique les grandeurs à régler .

Le calculateur de processus élabore l'algorithme de réglage et détermine les grandeurs de commande qui seront appliquées consécutivement aux organes de commande par l'intermédiaire de la sortie analogique .

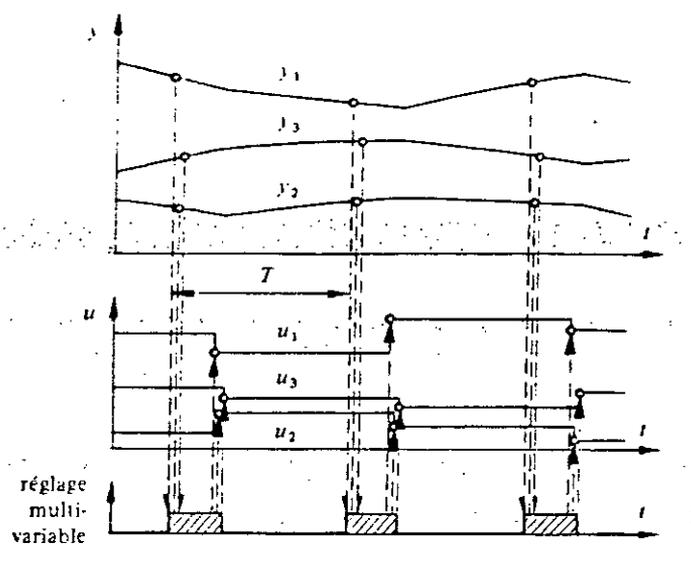


Figure IV-6. - Fonctionnement échantillonné d'un réglage multivariable .

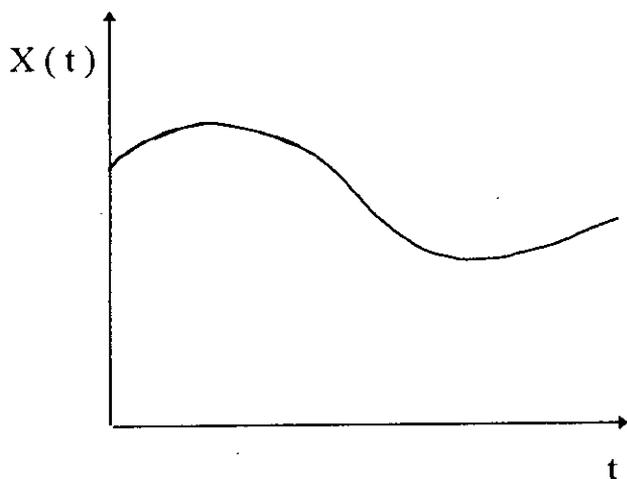
NB : La régulation numérique par ordinateur est , en général , utilisée pour les deux derniers types de réglage qui sont assez difficiles à établir autrement.

IV-3 DEFINITIONS ET DESIGNATIONS :

IV-3-1 Le signal continu :

C'est un signal qui est présent à tout instant, comme le montre la figure IV-7.

L'énergie d'un signal continu est finie . Comme énergie d'un signal , on entend la surface *signal temps* , c'est à dire l'intégrale du signal sur un laps de temps fini .



FigureIV-7. - Signal continu .

IV-3-2 Le signal échantillonné :

Un signal échantillonné est composé d'une série d'impulsions de DIRAC , comme le montre la figure IV-8 . L'instant de l'apparition d'une impulsion de DIRAC correspond à l'instant d'échantillonnage .

L'énergie d'un signal échantillonné est finie , grâce à la propriété de l'impulsion de DIRAC .

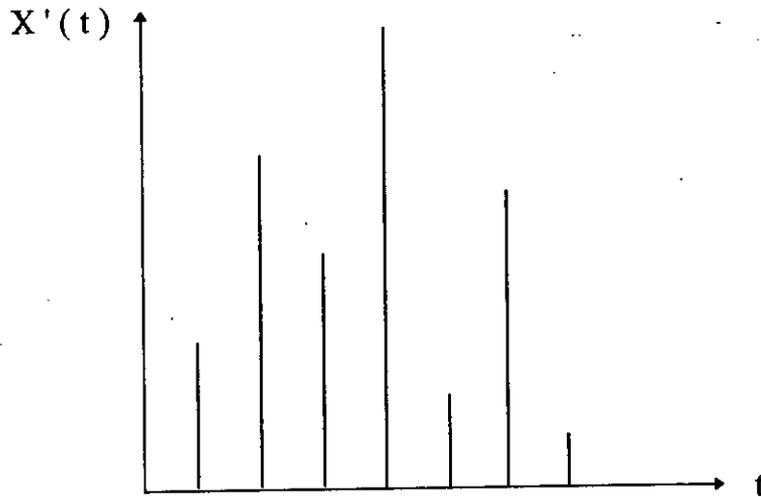


Figure IV-8. - Signal échantillonné .

IV-3-3 Le signal discret :

Un signal discret consiste en une séquence de valeurs distinctes (valeurs numériques) qui ne sont définies qu'aux instants d'échantillonnage .

En dehors des instants d'échantillonnage , le signal discret n'existe pas , comme le montre la figure IV-9 .

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

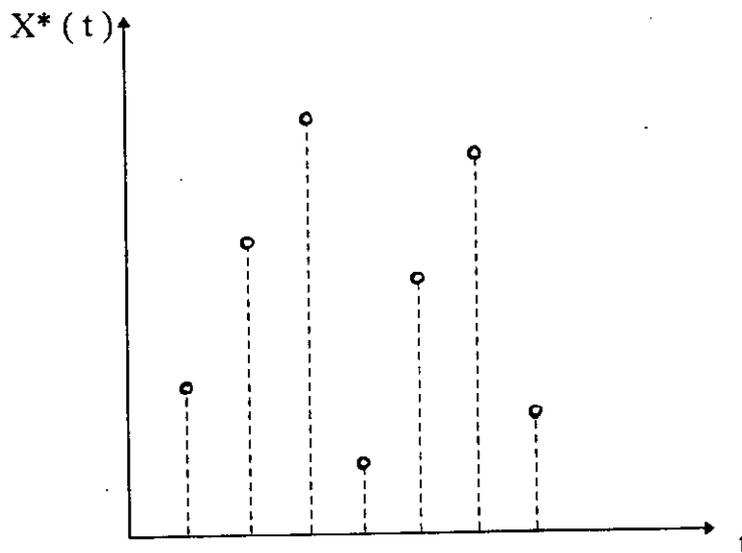


figure IV-9. - Signal discret .

IV-3-4 Système continu :

Un système continu est un système réel dont tous les signaux varient de manière continue, comme il est montré sur la figure IV-10.

Ce système est décrit par des équations différentielles ou par la fonction de transfert $G(s)$.

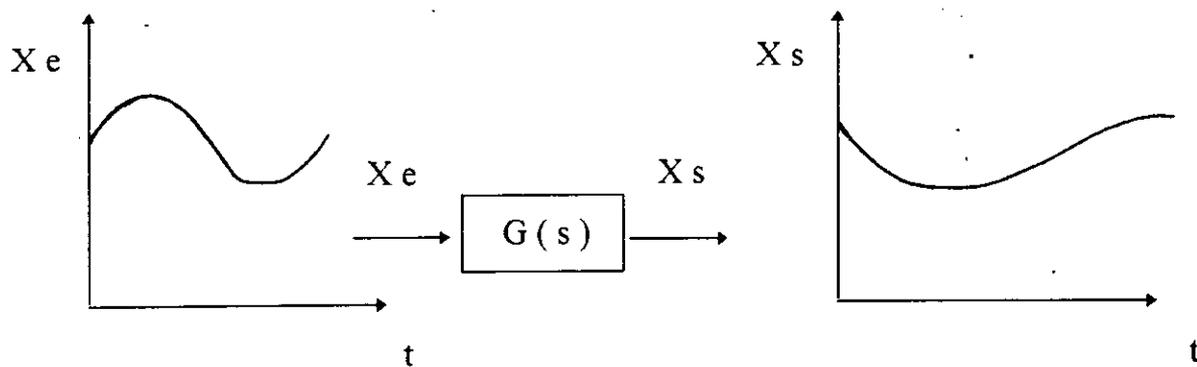


Figure IV-10. - Système continu.

IV-3-5 Système échantillonné :

Un système échantillonné est un système continu soumis à son entrée à un signal échantillonné $X'e$ comme le représente la figure IV-11.

Le signal de sortie d'un tel système est un signal continu : X_s .

Ce système est décrit par les équations différentielles et les équations aux différences.

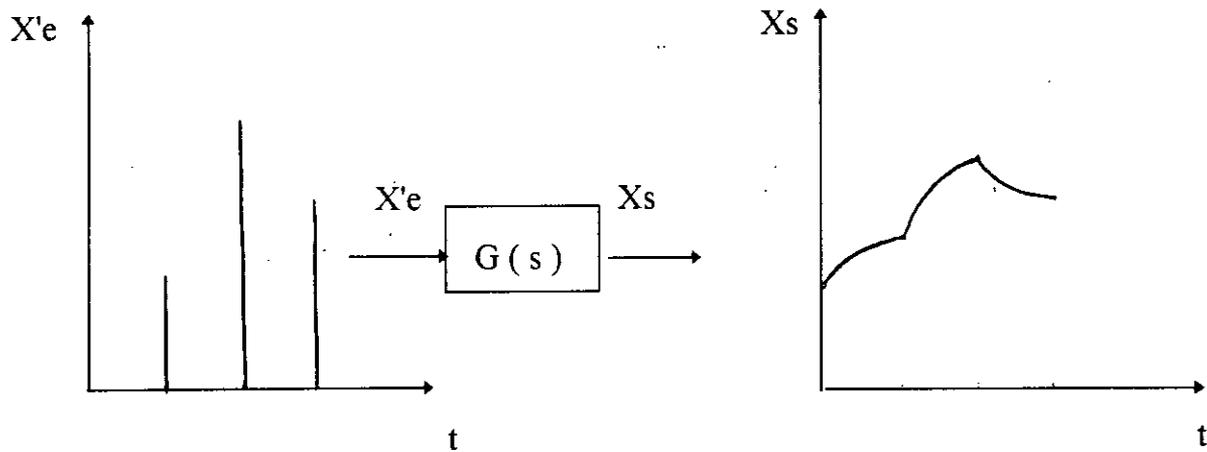


Figure IV-11. - Système échantillonné .

IV-3-6 Système discret :

Un système discret est un modèle mathématique qui donne une relation entre le signal discret : X^*e à l'entrée et le signal discret : X^*s à la sortie (figure IV-12) .

Ce système discret ne peut être décrit que par des équations aux différences ou par la fonction de transfert discrète .

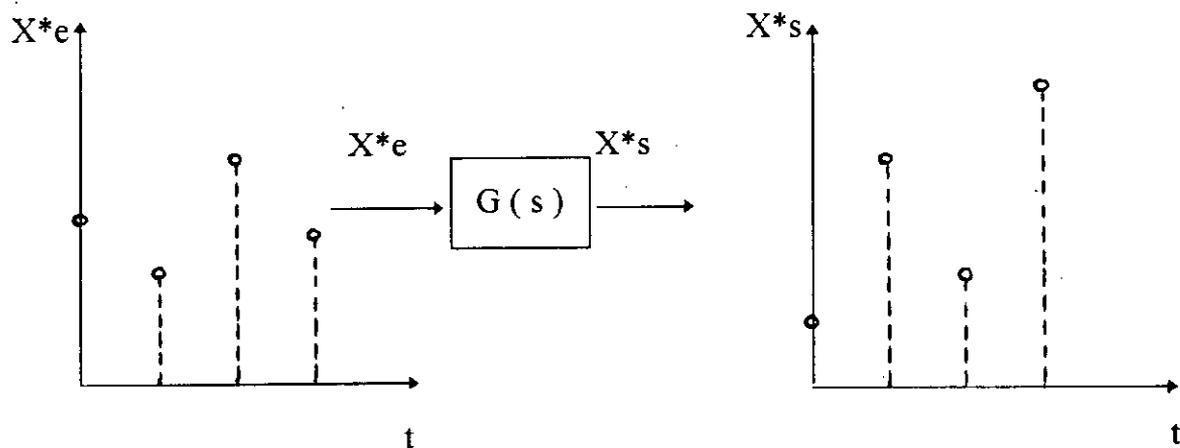


Figure IV-12. - Système discret .

IV-4 ECHANTILLONNAGE ET QUANTIFICATION :

IV-4-1 Echantillonnage :

L'échantillonnage d'un signal entraîne, sous sa forme la plus simple, une transformation d'un signal continu à l'instant d'échantillonnage.

Dans ce but on utilise comme échantillonneur un contact fermé pendant un bref laps de temps. Ce procédé est représenté à la figure IV-13

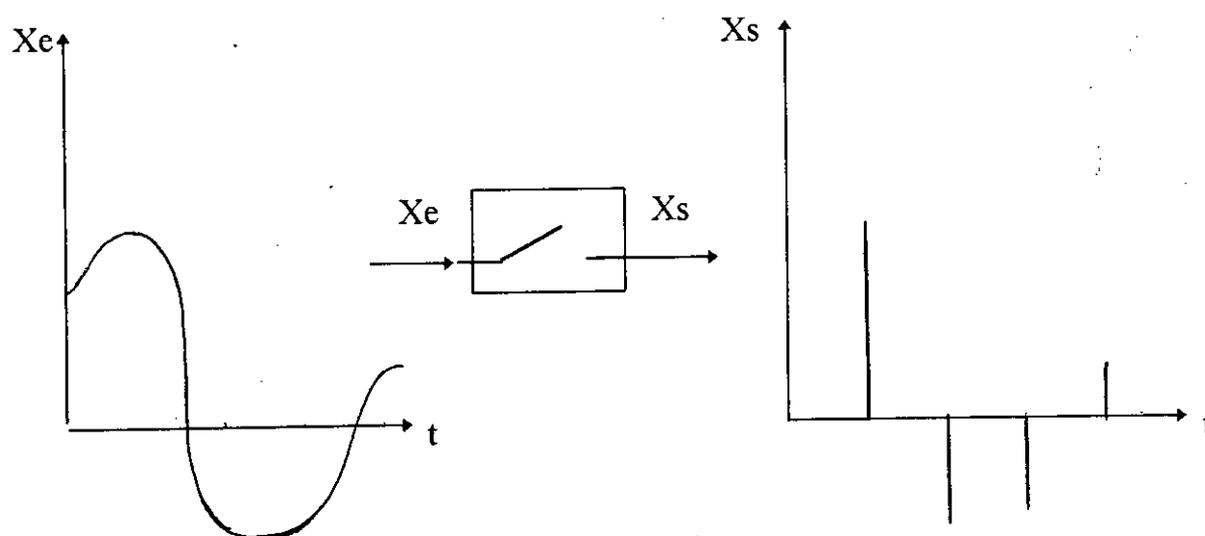


Figure IV-13. - L'échantillonnage .

IV-4-2 Quantification :

Les calculateurs de processus travaillent de manière numérique .

Un signal numérique, ne peut pas varier de manière continue, mais seulement par gradins .

L'effet dû à cette variation par gradins est appelé *quantification* et peut être représenté par une fonction non linéaire . (voir figure IV-14) .

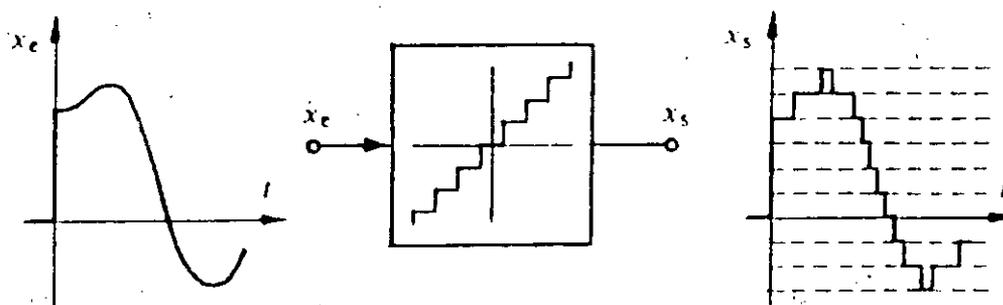


Figure IV-14. - Quantification .

IV-4-3 ECHANTILLONNEUR IDEAL :

La fermeture du contact a lieu dans un laps de temps infiniment court .
Le signal de sortie x_s^* est constitué d'une série de valeurs discrètes , comme le montre la figure IV-15 .

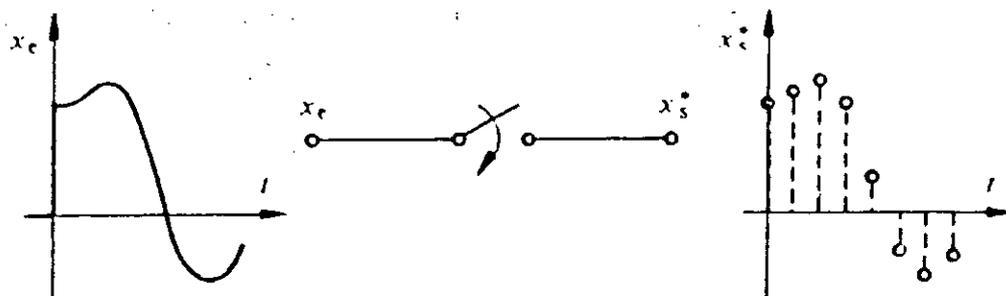


Figure IV-15. - Echantillonneur idéal .

IV-4-4 ECHANTILLONNEUR A PULSATIONS :

La figure IV-16 montre le symbole et la fonction de l'échantillonneur à pulsations . Son signal de sortie x_s peut être appliqué à l'entrée d'un système fonctionnant de manière continue .

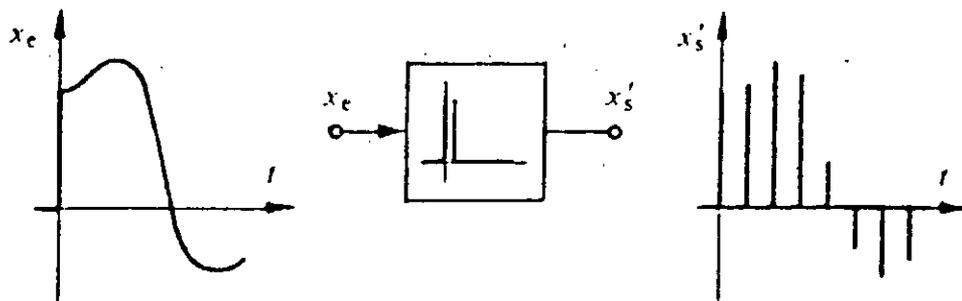


Figure IV-16. - Echantillonneur à pulsations .

IV-4-5 ELEMENT DE MAINTIEN :

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 , comme le montre la figure IV-17 .

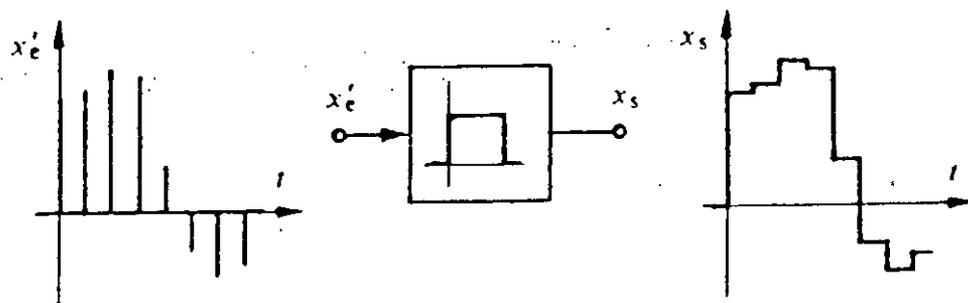


Figure IV-17. - Element de maintien .

IV-5 STRUCTURE DES SYSTEMES ECHANTILLONNES

IV-5-1 SYSTEMES OUVERTS :

La structure générale d'un système échantillonné ouvert est représentée sous forme de schéma bloc à la figure IV-18 .

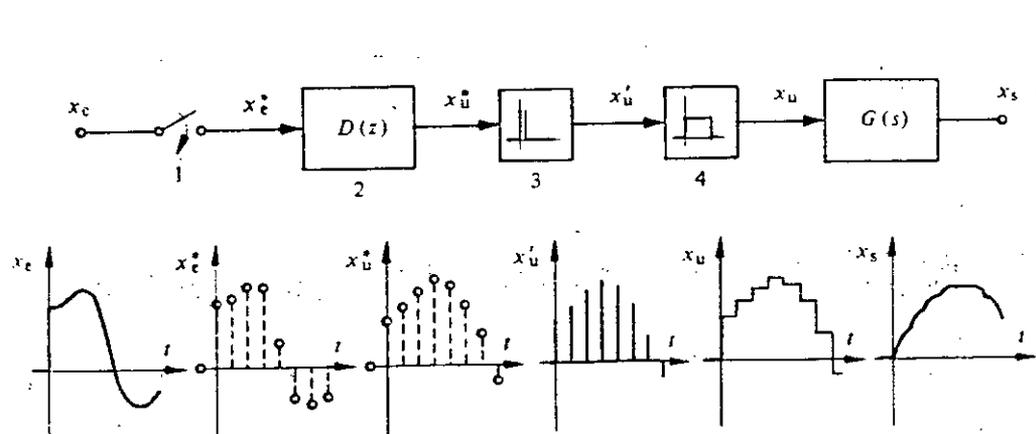


Figure IV-18. - Structure d'un système échantillonné ouvert .

IV-5-2 SYSTEMES BOUCLES (REGLAGES) :

La figure IV-19 montre la structure générale d'un système échantillonné bouclé à l'aide d'un schéma bloc .

A l'entrée il y'a deux échantillonneurs idéaux . L'un (1a) échantillonne la grandeur de consigne X_c , l'autre (1b) la grandeur à régler X_r .

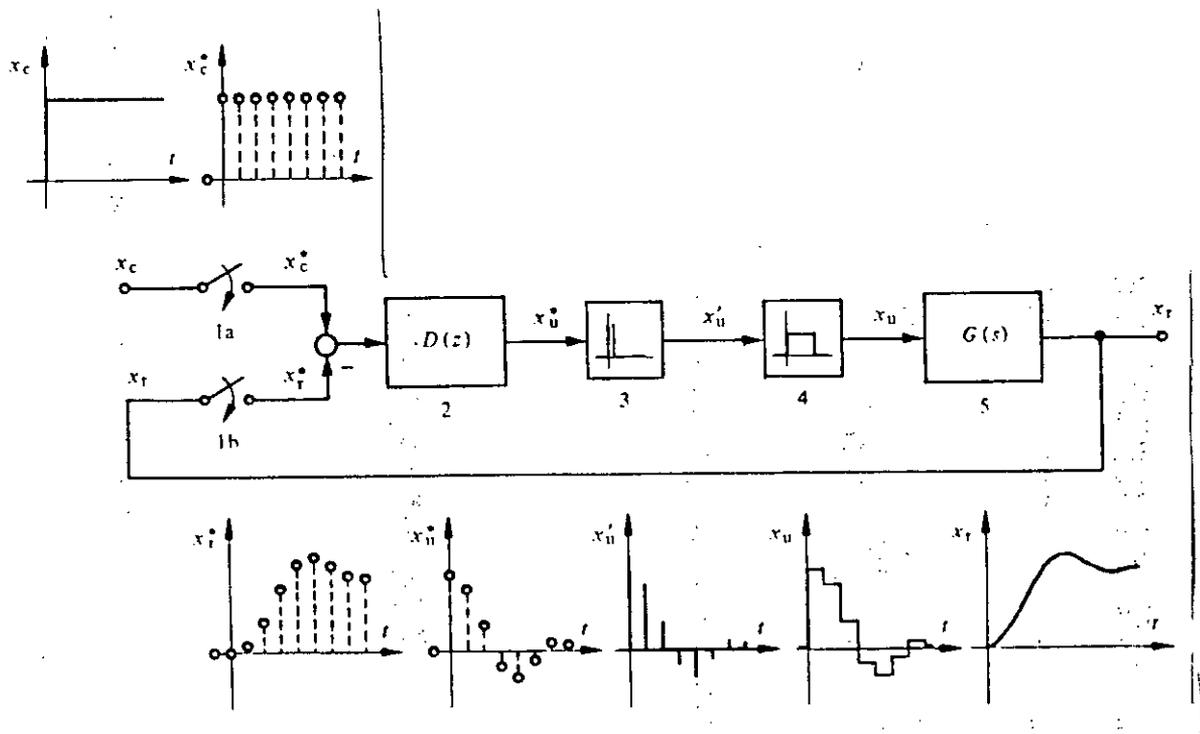


Figure IV-19. - Structure d'un système échantillonné bouclé .

CHAPITRE V

*REGULATION
ANALOGIQUE PILOTEE
PAR ORDINATEUR*

V-1 INTRODUCTION :

Le correcteur analogique qui élabore la commande $U(t)$ à partir de l'erreur $e(t)$ effectue 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 loi du PID est :

$$U(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

Afin de faire effectuer les calculs de dérivation, d'intégration... par un calculateur numérique, on discrétise la loi de commande en appliquant la démarche suivante :

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

a) Discrétisation :

Le signal d'erreur est discrétisé, c'est à dire échantillonné au pas Δ grâce à un échantillonneur.

b)- 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 $k\Delta$.

c)- Reconstruction du signal :

La commande $U(t)$ analogique est alors reconstruite avant d'être envoyée au processus. Le convertisseur numérique/analogique effectue alors la conversion.

Il faut bien comprendre 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.

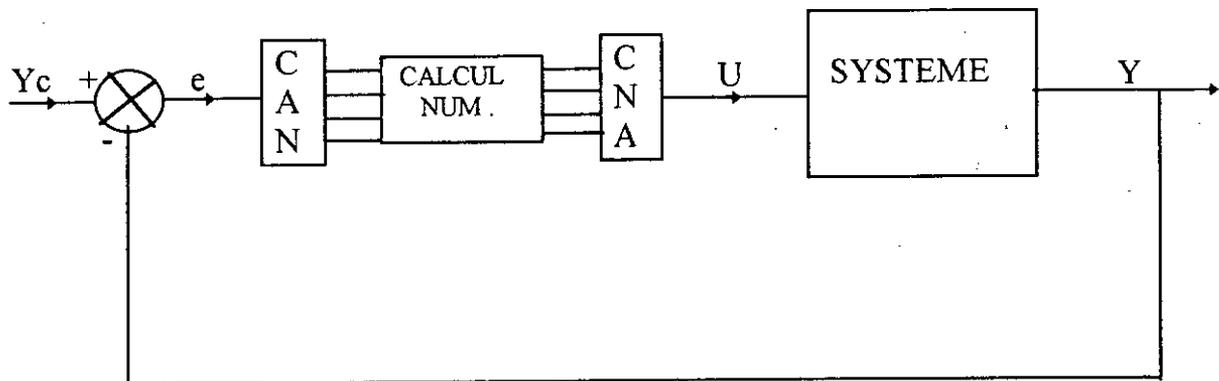
NB: Si Δ est petit, de l'ordre du dixième ou du centième de la plus petite constante de temps du système à réguler, la différence entre le signal $U(t)$ calculé par ordinateur puis reconstruit et le signal $U(t)$ obtenu de manière purement analogique est insignifiante.

V-2 LE SCHEMA DE LA BOUCLE DE REGULATION:

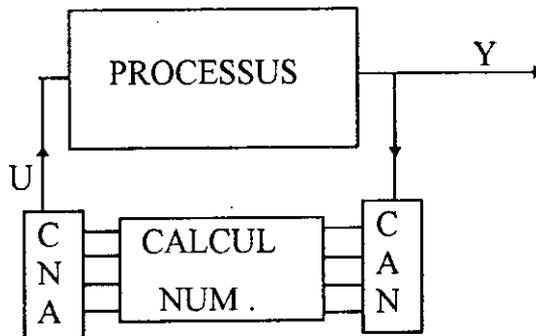
Le correcteur analogique est remplacé par un ordinateur encadré par des convertisseurs appropriés (figure V-1-a).

La consigne Y_c peut être directement discrétisée et tapée au clavier.

Le schéma se réduit alors à la figure V-1-b).



a)



b)

Figure V-1. Schéma de la boucle de régulation .

La figure V-1-b) n'est pas tout à fait exacte . Nous avons en effet représenté le calculateur numérique avec un bus (4 bits) d'entrée et un bus (4 bits aussi) de sortie.

En pratique il n'y'a qu'un seul bus que l'ordinateur gère tantôt en entrée , tantôt en sortie . Le CNA et le CAN sont regroupés dans une seule carte d'acquisition de données plus au moins sophistiquée . De la qualité de cette carte et notamment de la précision du CAN va dépendre la qualité de la régulation .

V-3 LA PROGRAMMATION DE L'ORDINATEUR :

Le programme sera exprimé en langage algorithmique afin de rester aussi général que possible, sa traduction dans le langage de programmation est faite en langage évolué "Qbasic".

Le choix a 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 GW Basic).
- Un mode graphique combiné à un mode texte assez appréciable (SCREEN 9).

Le programme permet de sélectionner à partir du menu, le régulateur désiré : (P, PI, PID, TOR ou Pmodifié), il permet aussi 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 en même temps d'afficher une sorte de compteur des variables du système (puissance, température et temps), ce qui permet de lire ou de prélever leur valeur à tout moment .

V-3-1 LA LOI DE COMMANDE :

La loi de commande a été trouvée par des *méthodes purement analogiques* .

Par exemple un PID a été envisagé et ses paramètres ont été déterminés dans le plan de Black à l'aide d'un logiciel d'aide , ou à partir des méthodes de Ziegler - Nichols .

La loi du PID s'écrit , comme nous l'avons déjà vu :

$$U(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

Nous allons discrétiser cette loi . Pour cela :

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

L'interpolation polynomiale ($e(t)$ est approximée par un polynôme) fournit une manière simple d'approximer $e(t)$, $\frac{de(t)}{dt}$ et $\int_0^t e(t) dt$ puisqu'en l'espèce la dérivée et l'intégrale des polynômes sont aussi des polynômes .

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

supérieurs de l'intégrale $\int_0^{k\Delta} e(t) dt$ on a :

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

Si l'on appelle $D(k)$ la valeur approchée de la dérivée $\frac{de(k\Delta)}{dt}$:

on obtient :
$$D(k) = \frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta}$$

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

Ainsi le PID va pouvoir être programmé de la manière suivante :

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

Formons $U(k-1)$, il vient :

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

En retranchant ces deux expressions il vient :

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

On pose :

$$K_i = \frac{\Delta}{T_i} K_p \quad \text{et} \quad K_d = \frac{T_d}{\Delta} K_p$$

On obtient :

$$U(k) = U(k-1) + (K_p + K_i + K_d) e(k) - (K_p + 2K_d) e(k-1) + K_d e(k-2)$$

Comme toute loi de commande s'exprime sous forme intégral-différentielle la méthode expliquée à propos du PID est générale.

V-3-2 PRINCIPE DE PROGRAMMATION :

Voici le programme de *Régulation de température* :

- Déclarations préalables des variables et procédures employées.

DEBUT

- Configuration de l'ordinateur
- Initialisation nécessaires

▪ Répétez

- Entrer au clavier

Les paramètres du PID (Δ , K_p , K_i , K_d)

La consigne T_c

- Lancer l'horloge (Δ)
- Choisir les voies du CAN et du CNA
- Initialiser les variables du PID

$U_1 := 0$; $e_1 := 0$; $e_2 := 0$ avec : $U_1 = U(k-1)$; $e_1 = e(k-1)$; $e_2 = e(k-2)$

▪ Répétez

- lire la température T sur le CAN

- calculer $e = T_c - T$

- calculer l'action de commande

$U := U_1 + (K_p + K_i + K_d) \cdot e - (K_p + 2K_d) e_1 + K_d \cdot e_1$

- si (U est trop grand) alors $U := U_{max}$

- envoyer la commande U sur le processus à l'aide du CAN

- écrire sur l'écran le suivi des opérations notamment la valeur de la consigne T_c et la valeur de la température T

- préparer le coup suivant : $U_1 := U$; $e_2 := e_1$; $e_1 := e$

- attendre la fin de Δ donnée par l'horloge (Δ)

↓ jusqu'à (appui sur Échap) (* pour permettre de changer de consigne *)

↓ jusqu'à (indéfiniment)

FIN .

V-3-3 Remarques sur la période d'échantillonnage :

La période d'échantillonnage est un paramètre très important dans le réglage échantillonné, en effet elle influe d'une façon directe 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 Δ prend les valeurs suivantes pour le réglage de :

- Machine électrique 1 à 30 ms .
- Processus thermiques, métallurgiques, chimiques :
 - Débit, pression, puissance : 5s
 - Température : 30s
 - Niveau : 60s
- Réglage des réseaux électriques : 5 à 15 min .

A noter que ces dernières valeurs ne donnent qu'un ordre de grandeurs, et la période Δ est souvent déterminée par l'étude du comportement dynamique du système à réguler qui donne une valeur pour laquelle on évalue la qualité de réglage, on répète les mêmes opérations pour une valeur de Δ plus petite (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 "optimale" pour 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 ne peut être inférieure au temps de calcul nécessaire.

V-4 ALGORITHME TOUT OU RIEN :

Entrer T

U := Udonnée

Si $T \geq T_c$: couper le chauffage (U := 0)

Sinon poursuivre

Sortir U

V-5 LES METHODES EXPERIMENTALES DE SYNTHESE DU PID :

Deux types d'essais sont recommandés par Ziegler et Nichols qui vont donner des renseignements sommaires mais suffisants pour la détermination des paramètres d'un correcteur PID. L'un s'effectue en boucle ouverte, l'autre en boucle fermée.

V-5-1 Essai en boucle ouverte :

Dans de nombreux cas, il est possible d'ouvrir la boucle de régulation. Nous supposons de plus que la réponse indicielle du processus est apériodique. On effectue alors l'essai indiciel du processus au besoin en réglant $K_p = 1$, $T_i = \infty$, $T_d = 0$ sans débrancher le correcteur.

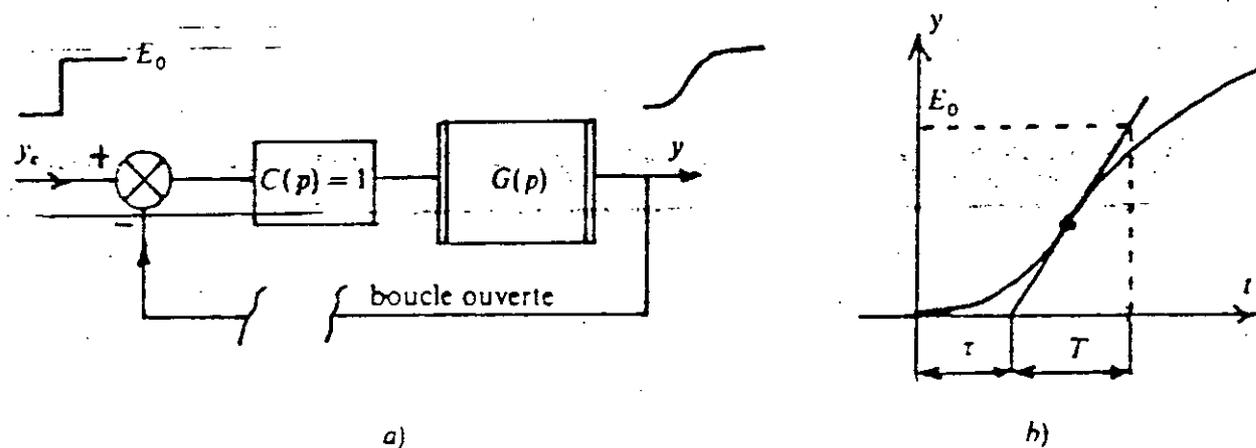


Figure V-2. Essai en boucle ouverte .

En traçant la tangente au point d'inflexion de la réponse indicielle, on mesure τ le retard et T la constante de temps .

Les études de Ziegler - Nichols, ont conduit à proposer les valeurs suivantes pour les paramètres du PID :

$$K_p = 1.2 \frac{T}{\tau} ,$$

$$T_i = 2 \tau ,$$

$$T_d = \frac{T_i}{4} = 0.5 \tau .$$

V-5-1 Essai en boucle fermée :

Lorsque le processus possède une intégration ou est intrinsèquement instable en boucle ouverte, il n'est pas possible d'ouvrir la boucle.

On réalise alors - avec prudence - un essai de pompage en boucle fermée.

Pour cela on fait $T_i = \infty$, $T_d = 0$ et on augmente K_p le gain jusqu'à sa valeur critique K_{osc} qui porte le système à l'oscillation. On note la période T_{osc} des oscillations ainsi que K_{osc} .

Ziegler et Nichols proposent de régler le PID chargé de la régulation de la boucle avec les valeurs suivantes :

$$K_p = 0.6 K_{osc} ,$$

$$T_i = 0.5 T_{osc} ,$$

$$T_d = \frac{T_i}{4} .$$

V-6 TABLEAU DES VALEURS DE REGLAGE :

Les valeurs indiquées dans le tableau V-1 permettent de fixer des valeurs de départ pour une régulation PID, PI, ou même P, et d'éviter les tâtonnements. Elles sont obtenues à partir d'essais simples à réaliser.

Tableau V-I. - Tableau des valeurs de réglage selon Ziegler-Nichols.

	Méthode de pompage Boucle fermée	Méthode aperiodique Boucle ouverte		
	Ziegler-Nichols	Ziegler-Nichols	Chien-Hrones-Reswick	
	Régulation ou Poursuite	Régulation ou Poursuite	Régulation Poursuite	
P.I.D.	$K = 0,6 K_{osc}$ $T_i = 0,5 T_{osc}$ $T_d = 0,125 T_{osc}$	$K = 1,2 \frac{T}{\tau}$ $T_i = 2\tau$ $T_d = 0,5\tau$	$K = 0,95 \frac{T}{\tau}$ $T_i = 2,4\tau$ $T_d = 0,4\tau$	$K = 0,6 \frac{T}{\tau}$ $T_i = T$ $T_d = 0,5\tau$
P.I.	$K = 0,45 K_{osc}$ $T_i = 0,83 T_{osc}$	$K = 0,9 \frac{T}{\tau}$ $T_i = 3,3\tau$	$K = 0,6 \frac{T}{\tau}$ $T_i = 4\tau$	$K = 0,35 \frac{T}{\tau}$ $T_i = 1,2 T$
P	$K = 0,5 K_{osc}$	$K = \frac{T}{\tau}$	$K = 0,3 \frac{T}{\tau}$	$K = 0,3 \frac{T}{\tau}$

V-7 SYNTHÈSE DES REGULATEURS PAR LA METHODE 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 celle de Ziegler-Nichols, Takahashi propose les valeurs du tableau suivant qu'on compare avec celui de Ziegler-Nichols.

Tableau V-II Tableau des valeurs de réglage selon Takahashi .

	Essai indiciel τ, T	Pompage K_{osc}, T_{osc}
PID	$K_p = \frac{1.2T}{(t + \Delta)} - 0.5K_i$ $K_i = \frac{0.6T\Delta}{(\tau + 0.5\Delta)^2}$ $K_d = \frac{0.6T}{\Delta} (*)$	$K_p = 0.6K_{osc} - 0.5K_i$ $K_i = 1.2 \frac{K_{osc}\Delta}{T_{osc}} (*)$ $K_d = 0.3 \frac{K_{osc}T_{osc}}{4\Delta} (*)$
PI Kd = 0	$K_p = \frac{0.9T}{\tau + 0.5\Delta} - 0.5K_i$ $K_i = \frac{0.9T\Delta}{3.3(\tau + 0.5\Delta)^2}$	$K_p = 0.45K_{osc} - 0.5K_i$ $K_i = 0.54 \frac{K_{osc}\Delta}{T_{osc}} (*)$
P Kd = 0, Ki = 0	$K = \frac{T}{\tau + \Delta}$	$K_p = 0.5K_{osc} (*)$

(*) : Ces valeurs sont identiques à celles de Ziegler-Nichols .

CHAPITR VI

*ETUDE DES FOURS A
RESISTANCES*

VI-1 GENERALITES :

Dans le chauffage par résistance , l'élément chauffant ou résistance , constitué d'un matériau conducteur de l'électricité , est le siège d'un dégagement de chaleur par effet Joule lorsqu'il est traversé par un courant électrique d'alimentation . Le processus de transfert de la chaleur de cet élément chauffant à la charge (produit à chauffer) se fait par l'un ou plusieurs des modes suivants : convection , conduction et rayonnement .

En plus des avantages liés aux techniques électriques de chauffage , les fours à résistances disposent d'atouts supplémentaires :

- simplicité de conception et de réalisation ,
- grande adaptabilité des éléments chauffants disponibles à toute opération de chauffage .

Cependant , leur utilisation dans un passé proche a été limitée du fait d'un certain nombre de difficultés , et , notamment , d'un manque de nervosité lié à une puissance surfacique réduite et à une mauvaise tenue des résistances aux chocs thermiques ou mécaniques aux températures élevées et à certaines atmosphères .

VI-2 PRINCIPE :

Un four à résistances est essentiellement constitué (figure VI-1) :

- d'une enceinte (laboratoire) réalisée à partir de matériaux à caractère isolant ou réfractaire ;
- de résistances électriques disposées en voûte , en sole ou sur les parois latérales (piédroits) du four .

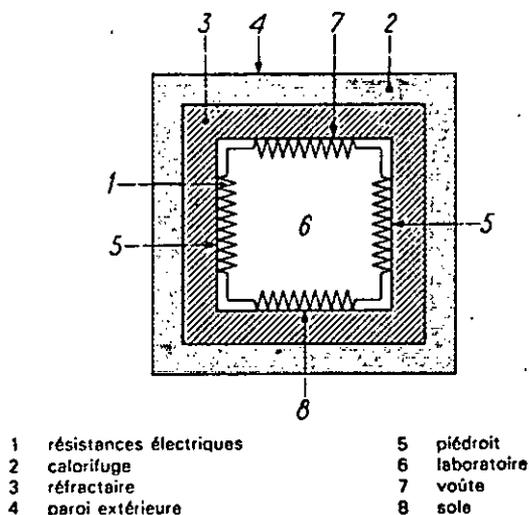


Figure VI-1. - Représentation schématique d'un four à résistances .

L'alimentation des résistances est assurée soit directement par le réseau , soit par l'intermédiaire d'un ou plusieurs transformateurs . Lui est associé un système de modulation de la puissance , pilotée par une régulation de température .

La puissance électrique P (W) dissipée dans l'élément chauffant de résistance R (Ω) et transformée en chaleur s'exprime par la loi de Joule :

$$P = U.I = R.I^2 = U^2/R$$

avec : U (V) et I (A) respectivement valeurs efficaces de la tension et du courant (figure VI-2) .

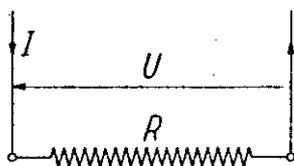


Figure VI-2. - Chauffage par effet JOULE .

Le processus de transfert de la chaleur des résistances à la charge du four s'effectue par convection et rayonnement . La " figure VI-3 " montre qu'à partir de 700 °C environ la majeure partie de l'échange se fait par rayonnement, cela dans le cas des fours à convection naturelle .

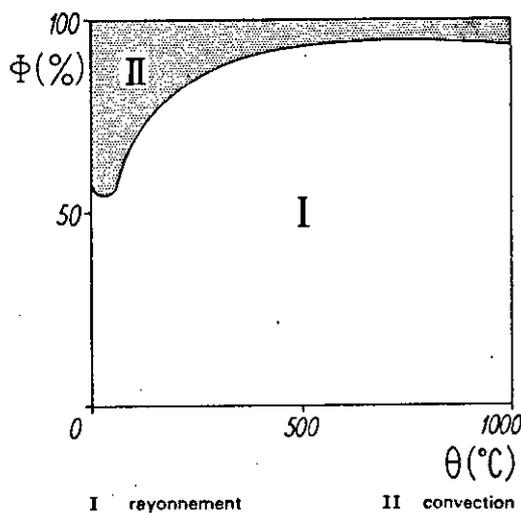


Figure VI-3. - Répartition, en pour-cent, du flux thermique Φ entre rayonnement et convection naturelle en fonction de la température Θ .

VI-3 TRANSFERT DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT :

La valeur (en Watts) du flux thermique Φ transmis de la résistance à la charge (figure VI-4) obéit à la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\Phi = \mu \cdot Fr \rightarrow c \cdot Sr \cdot \sigma \cdot (Tr^4 - Tc^4) \quad (1)$$

avec :

$Fr \rightarrow c$: facteur de forme entre la résistance et la charge ,

Sr : (m^2) aire de la surface émettrice ,

Tr et Tc (K) : températures absolues de la résistance et de la surface de la charge ,

μ : coefficient tenant compte des émissivités de la résistance et de la charge ,

σ : constante de Stefan = $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}^4$.

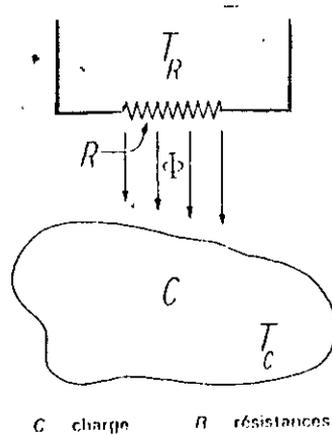


Figure VI-4. - Principe du chauffage par résistances .

L'expression du flux thermique donné par la relation (1) montre que , pour obtenir un échange efficace , il faut :

- Pouvoir disposer d'éléments chauffants travaillant à une température élevée ;
- Optimiser le facteur de forme $Fr \rightarrow c$ (compris entre 0 et 1) , fonction du type de résistance , du taux de garnissage du four , de la position relative des éléments chauffants et de la charge et enfin de l'effet bénéfique des parois réfléchissantes du four .

VI-4 REPARTITION DU FLUX THERMIQUE DANS UN FOUR A RESISTANCES :

La puissance totale rayonnée par les éléments chauffants est transmise, d'une part, à la charge et à son support et, d'une autre part, aux parois du four (figure VI-5). La puissance utile est celle reçue par la charge, l'autre partie constituant les pertes :

- pertes par accumulation dans les parois, le support de charge et les résistances ;
- pertes par transmission à travers les parois du four ;
- pertes diverses (ouverture du four, joints de porte ...) .

Les différents flux évoluent suivant la phase dans laquelle on se trouve (montée en température ou maintien) . En particulier, les pertes par accumulation s'annulent en régime continu où la puissance utile devient prépondérante ; elle peut alors atteindre 50 à 80 % de la puissance installée .

Ce très bon rendement, critère indiscutable du four économe en énergie, peut être obtenu à trois conditions :

- l'isoler au maximum pour minimiser les pertes et, si c'est un four discontinu, réduire au maximum la masse du four ; les fibres céramiques permettent d'atteindre cet objectif ;
- l'équiper de résistances pouvant travailler à haute température, et autorisant ainsi des flux thermiques intenses ;
- contrôler la puissance d'alimentation par une régulation fine .

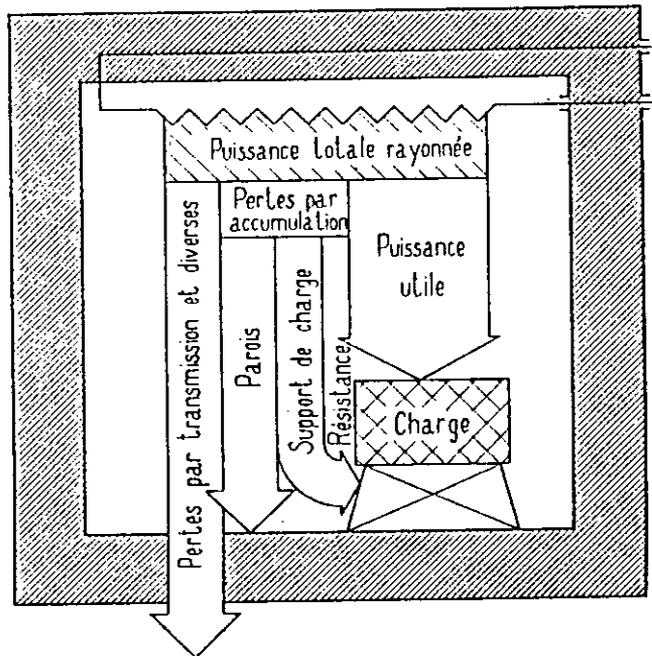


Figure VI-5. - Répartition du flux thermique dans un four .

VI-5 ELEMENTS CONSTITUTIFS D'UN FOUR :

VI-5-1 REFRACTAIRES ET ISOLANTS :

Un four est essentiellement un laboratoire , parallélépipédique le plus souvent , entouré de résistances et séparé de l'ambiance extérieure par une paroi composite dont le rôle est de réduire les pertes par transmission vers l'extérieur (figure VI-5).

Les couches internes sont faites de matériaux réfractaires (matériaux minéraux non métalliques dont le point de fusion est supérieur à 1500°C), tandis que l'on recherche avant tout les qualités d'isolation (faible conductivité thermique) pour la couche externe ; cette dernière se trouve le plus souvent constituée de matériaux à base de fibres minérales (amiante , laine de verre , laine de roche) , utilisées depuis longtemps , et quelles que soient les compositions des premières couches .

Donc , dans la pratique , c'est le matériau constituant la ou les premières couches réfractaires qui différencie une paroi d'une autre .

On distingue :

- les *matériaux compacts* ; de masse volumique 1000 à 3000 kg/m³ et de conductivité thermique voisine de 1.2 W/m.K à 1000 °C .

- les *matériaux réfractaires isolants* :

(ayant par définition une porosité supérieure à 45 %) , comprenant :

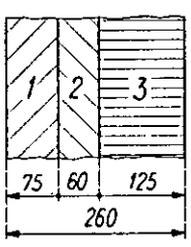
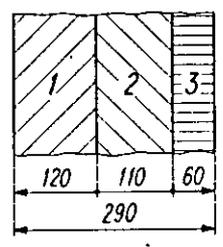
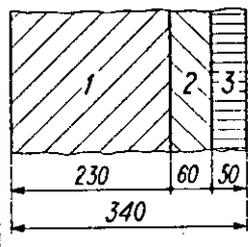
a)- les *matériaux façonnés* : briques et bétons isolants de composition silico-argileuse , de masse volumique 300 à 800 kg/m³ et de conductivité thermique 0.2 à 0.4 W/m.K à 500 °C et 0.5 W/m.K à 1000 °C .

b)- les *fibres céramiques* : de composition silico-alumineuse , de masse volumique 80 à 200 kg/m³ et de conductivité thermique inférieure à 0.1 W/m.k à 500 °C pour atteindre 0.2 à 0.3 W/m.K à 1000 °C .

C'est le développement , ces dernières années , de ces fibres céramiques , matériaux réfractaires isolants combinant une basse masse volumique apparente et une faible conductivité thermique , qui a représenté une innovation majeure .

Le tableau VI-1 présente un bilan comparatif , établi à partir d'un programme de calcul numérique , de trois parois industrielles de fours de traitement thermiques, appartenant chacune à l'une des familles citées précédemment .

Tableau VI-I. - Comparaison de trois parois de fours de traitements thermiques à 950 °C .

Coupe des parois Épaisseur (mm)	I: Fibres céramiques		II: Briques isolantes		III: Briques compactes	
	Nom	Masse volumique (kg/m ³)	Nom	Masse volumique (kg/m ³)	Nom	Masse volumique (kg/m ³)
			n° 1 n° 2 n° 3	Kerlane 45 (3) Kerinsul 30 (3) BX 353 (4)	JM 23 (5) Skamol (6) BX 353 (4)	Muller 35 PS 4 Skamol (6)
Masse surfacique (kg/m ²)	20,5		104,6		538,3	
Temps nécessaire à la chauffe (équilibre thermique à 950 °C)..... (h)	3		15		70	
Énergie surfacique accumulée à cet instant (kWh/m ²)	2,7		17,5		125	
Énergie surfacique accumulée après 10 h de chauffe (cycle court).... (kWh/m ²)	2,7		15,8		85,3	
Température de la paroi extérieure (°C)	68		68		106	
Pertes par transmission (W/m ²)	430		430		900	
Temps de refroidissement naturel à 300 °C à l'intérieur du four..... (h)	17		120		180	

(1) La première couche caractérise seule le type de paroi.
 (2) Ces briques compactes ne sont aujourd'hui que rarement utilisées.
 (3) Fibre silico-alumineuse.

(4) Laine de roche
 (5) Béton silico-argileux.
 (6) Silice diatomée

Les *fibres céramiques* constituent le matériau idéal pour la réalisation de parois internes des fours conduisant à des parois très légères et , par là même , peu voraces en énergie .

A cette énorme *économie d'énergie* , vient s'ajouter dans la pratique :

- d'abord , une *économie initiale de matière première* ; en effet la structure du four , plus léger , nécessitera moins de supports , armatures , etc..

Cette légèreté s'accompagnera aussi d'un volume plus réduit , et l'on sait que les mètres carrés couverts coûtent cher à l'industriel .

- le temps réduit de montée en température du four en fibres céramiques conduit à des *énergies de transmission* (produits des pertes par le temps de montée) , elles aussi , *réduites* .

L'intérêt des fibres céramiques ne réside pas uniquement au niveau des pertes mais aussi au niveau du *gain de temps* de mise en régime du four .

VI-5-2 ELEMENTS CHAUFFANTS :

Un matériau , pour pouvoir être utilisé comme élément chauffant , doit répondre à plusieurs conditions :

- La résistivité ρ doit être élevée afin de limiter l'intensité du courant et de réduire les dimensions du corps de chauffe .

- Les températures de solidus et de fusion doivent être très supérieures à la température maximale atteinte lors de la marche normale du four .

- La résistance mécanique de l'élément doit être suffisante à la pose , après une longue durée de service et à la température maximale : il ne doit pas y avoir de déformation sensible et l'élément doit résister aux chocs et aux vibrations .

- La substance doit être homogène , facile à obtenir identique à elle-même et à travailler ; sa structure doit être permanente jusqu'à la température d'utilisation .
- Le coefficient de dilatation doit être faible .
- La conductivité thermique et la capacité thermique doivent être peu élevées pour éviter les pertes de chaleur aux extrémités .
- La substance doit résister aux agents extérieurs et , éventuellement , ne pas s'évaporer dans le vide .
- Les éléments doivent avoir une longue durée de service et être d'un prix raisonnable .

VI-5-2-1 Matériaux disponibles et conditions d'utilisation :

On distingue trois grandes catégories de résistances :

- les résistances métalliques , nues ou protégées ;
- les cermets ;
- les résistances non métalliques .

Les caractéristiques essentielles de ces résistances sont données dans le tableau suivant :

Tableau VI-II. - Principales caractéristiques des éléments chauffants .

Familles	Nature des résistances	Composition	Température maximale d'emploi °C	Résistivité $\mu\Omega \cdot cm$	Tenue en atmosphère				Observations	Charges (1) W/cm^2
					Air	endothermique ou exothermique	H ₂	Vide		
Résistances métalliques	Nickel-chrome à très faible teneur	18 % Ni 12 % Cr 70 % Fe	600	70 à 80	Bonne	Assez bonne	Bonne	Bonne	Résistances les plus couramment utilisées dans l'industrie	1,5 à 4
	Nickel-chrome à teneur intermédiaire	60 % Ni 25 % Cr Fe	1100	100 à 110	Bonne	Passable	Bonne	Bonne		
	Nickel-chrome à forte teneur	70 à 80 % Ni 30 à 20 % Cr	1150 à 1200	110 à 120	Bonne	Déconseillée	Bonne	Bonne		
	Fer-chrome-aluminium	20 à 35 % Cr 2 à 6 % Al Fe	jusqu'à 1350	135 à 145	Bonne	Mauvaise	Médiocre à 1150 °C	Mauvaise		
	Molybdène	100 % Mo	1900	50	Mauvaise	Mauvaise	Bonne à 1800 °C	Bonne à 1800 °C	Résistivités variables en fonction de la température Pour le tantale, atmosphère neutre conseillée	15 à 25
	Tantale	100 % Ta	2200	70	Mauvaise	Mauvaise	Bonne	Bonne		
	Tungstène	100 % W	2400	50	Mauvaise	Mauvaise	Bonne	Bonne		
Cermets	Bisiliciure de molybdène	95 % MoSi ₂	1800	35 à 40	Bonne	Bonne à 1000 °C	Mauvaise	Mauvaise	Résistivité fortement variable avec la température: $\alpha \approx 80 \cdot 10^{-4}$ (2)	6 à 12
	Chromite de lanthane	LaCr ₂ O ₃	1850	10 ⁶	Bonne	Médiocre	Médiocre	Médiocre	En pré-développement industriel	5
Résistances non métalliques	Carbure de silicium	C Si ₃ 99%	1600	$\approx 10^5$	Bonne	Bonne jusqu'à 1300 °C	Bonne jusqu'à 1300 °C	Bonne	Résistivité variable avec la température et avec le vieillissement	10 à 20
	Graphite	C à 99%	2900	800 à 8000	Mauvaise	Mauvaise	Passable à 2400 °C	Bonne		20

(1) les valeurs de charge en W/cm^2 sont données à titre tout à fait indicatif; elles dépendent bien sûr des conditions dans lesquelles la résistance est utilisée: ambiance du four et température, charge, facteur de forme, etc.
 (2) α : coefficient de température à 1000°C.

CHAPITRE VII

*PARTIE
EXPERIMENTALE*

INTRODUCTION :

Le but de notre travail s'est porté sur la régulation de la température d'un four de marque PROLABO qu'on utilise au niveau du département : Génie-Chimique de l'Ecole Nationale Polytechnique .

Ce four est un four cylindrique décrit à la figure VII-1 .

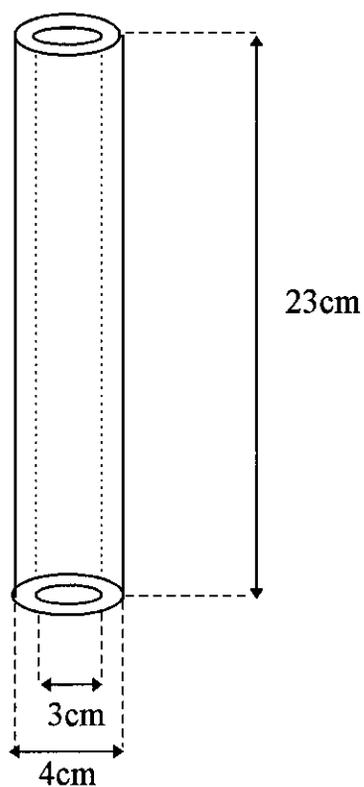


Figure VII-1. Description du four .

VII-1 PREMIERE PARTIE :**IDENTIFICATION ET MODELISATION DU SYSTEME .****VII-1-1 INTRODUCTION :**

L'idée directrice est qu'une réponse apériodique est peu différente d'une réponse du premier ordre de constante de temps T mais retardée d'un temps mort τ .

La fonction de transfert du système devient :
$$F(s) = \frac{K.e^{-\tau.s}}{1+T.s}$$

Cette approche est représentée graphiquement à la figure VII-2 .

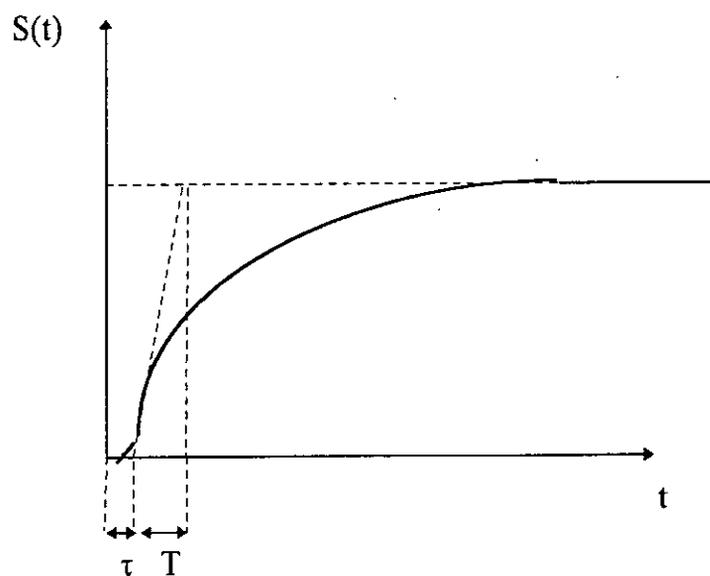


Figure VII-2. Méthode d'approche du système du premier ordre .

VII-1-2 IDENTIFICATION EN BOUCLE OUVERTE DES SYSTEMES STABLES APERIODIQUES :

Notre processus ayant une réponse aperiodique et un retard τ . Nous pouvons alors l'identifier par un modèle de Broïda qui consiste à approximer une fonction d'ordre n à une fonction du premier ordre affectée d'un retard pur.

VII-1-2-1 Identification par la méthode de Broïda :

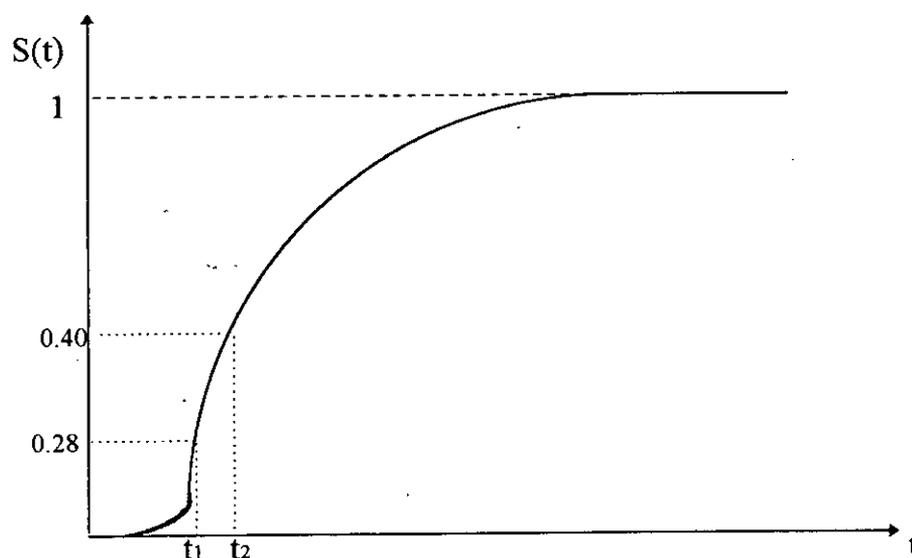


Figure VII-3 . Identification du système par la méthode de Broïda .

La courbe du premier ordre de la figure VII-3 passe par deux points , situés sur la courbe enregistrée , ayant pour ordonnées 28% et 40% de l'échelon . Ces deux points déterminent deux temps T_1 et T_2 .

On calcule facilement la constante de temps T et le retard pur τ par les formules suivantes :

$$T = 5.5(T_2 - T_1)$$

$$\tau = 2.8T_1 - 1.8T_2$$

VII-1-2-2 Application de la méthode de Broïda :

Nous réglons la tension d'alimentation à l'aide de l'autotransformateur à 10V ce qui correspond à 4.54% de la puissance maximale (La puissance maximale est fournie sous une tension $U = 220V$, elle est égale à $R I_{max}^2$, avec $I_{max} = 8.01 A$) .

Nous laissons le four chauffer sous la tension de 10V jusqu'à atteindre son régime permanent . A ce moment là nous augmentons la tension jusqu'à 30V ce qui correspond à l'application d'un échelon unité de 9.09% .

La réponse enregistrée est celle du tableau VII-1 dont la représentation graphique est celle de la figure VII-4 .

Nous , nous intéresserons à la Partie2 de la courbe enregistrée pour calculer la constante de temps T et le retard pur τ .

La Partie2 de la figure VII-4 est représentée par la figure VII-5 .

Cette réponse présente un point d'inflexion et un retard pur à l'origine .

Le temps T_1 correspondant à l'ordonnée 28% de l'échelon est égal à 7.85mn .

Le temps T_2 correspondant à l'ordonnée 40% de l'échelon est égal à 12mn .

Donc nous calculerons facilement la constante de temps T et le retard τ à l'aide des formules des formules données au paragraphe VII-1-2-1 .

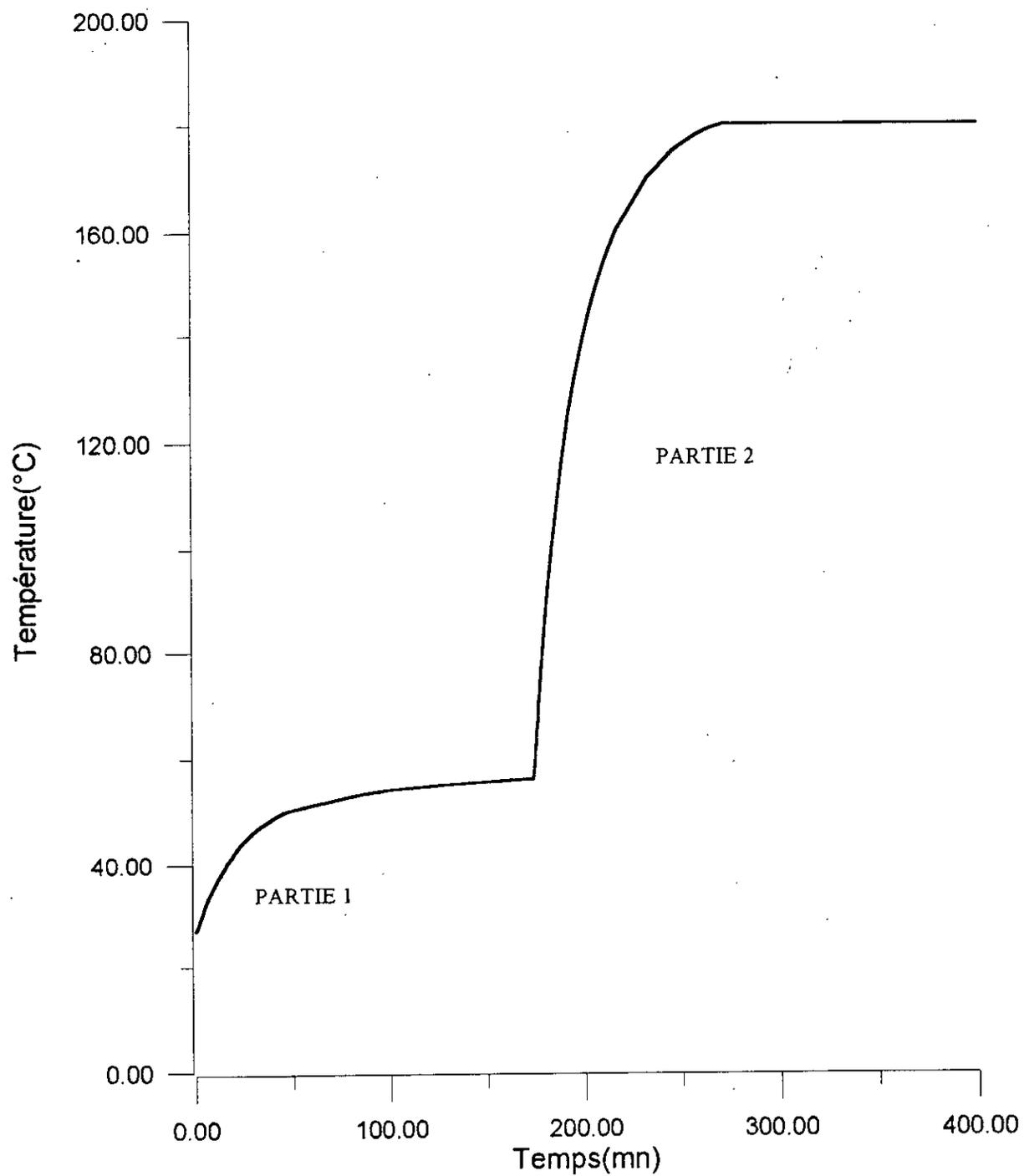
Nous trouvons :

$$T = 1369.5 \text{ s} = 22.825 \text{ mn}$$

$$\tau = 22.8 \text{ s} = 0.38 \text{ mn}$$

Tableau VII-1
Essai indiciel sur le four Tamb = 24 °C

T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)
27	0	69	176.40
28	1.37	70	176.53
29	2.33	71	176.77
30	3.23	72	176.95
31	4.12	73	177.18
32	5.08	74	177.33
33	6.08	75	177.53
34	7.18	76	177.53
35	8.55	80	178.58
36	9.97	85	179.68
37	11.27	90	180.85
38	12.78	95	182.13
39	14.32	100	183.53
40	15.85	105	185.02
41	17.62	110	186.68
42	19.53	115	188.47
43	21.47	120	190.35
44	23.62	125	192.38
45	26.13	130	194.77
46	29.20	135	197.43
47	32.53	140	200.25
48	36.92	145	203.70
49	41.17	150	207.43
50	46.27	155	211.72
51	57.65	160	217.00
52	70.17	165	224.97
53	82.22	170	233.03
54	100.60	175	246.08
55	131.50	176	250.07
56	173.70	177	253.98
57	174.00	178	258.42
58	174.25	179	264.00
59	174.47	180	271.67
60	174.68		
61	174.88		
62	175.12		
63	175.35		
64	175.43		
65	175.63		
66	175.82		
67	176.02		
68	176.20		



FigureVII-4 Identification du four

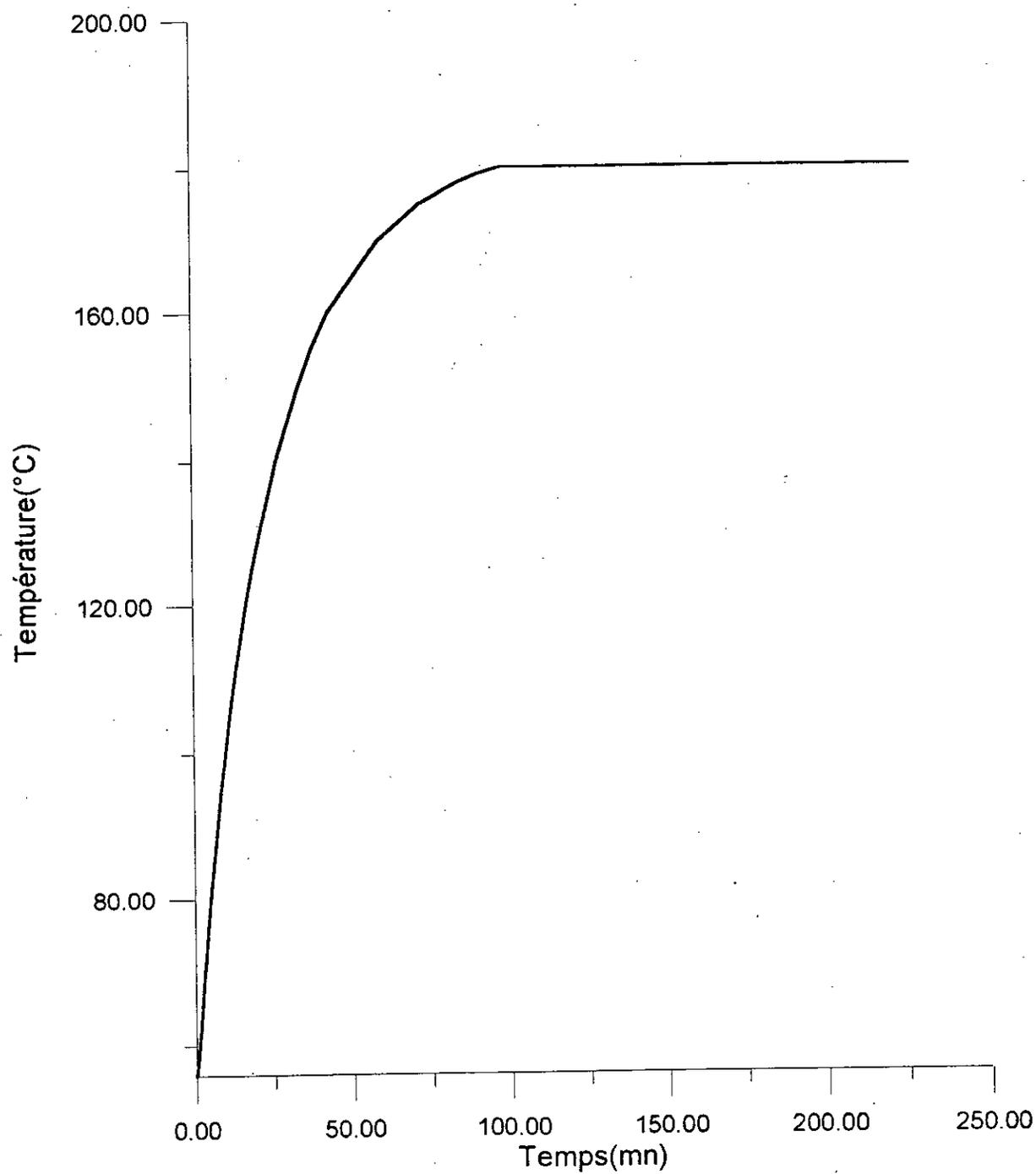


Figure VII-5 Identification du four (étude de la partie 2)

Nous calculons le gain statique $K = \frac{\text{sortie}}{\text{entré } e}$

$$\text{On a donc : } K = \frac{180}{32.77} = 5.49 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Watts} .$$

La fonction de transfert du système est donc la suivante :

$$F(s) = \frac{5.49e^{-22.8s}}{1+1369.5s}$$

En appliquant la même méthode , on a identifié un autre système constitué d'une enceinte thermique rectangulaire contenant 4 litres d'eau .

Nous réglons la tension d'alimentation à l'aide de l'autotransformateur à 60V ce qui correspond à 27.27 % de la puissance maximale .

Nous laissons le bain chauffer sous la tension de 60V jusqu'à atteindre son régime permanent . A ce moment là nous augmentons la tension d'alimentation jusqu'à 70V ce qui correspond à l'application d'un échelon unité de 4.54 % . La réponse à cet essai indiciel est portée sur le tableau VII-2 qui est représenté graphiquement à la figure VII-6 .

En appliquant la méthode de Broïda on obtient :

$$T = 3045.9 \text{ s} = 50.765 \text{ mn}$$

$$\tau = 23.16 \text{ s} = 0.386$$

Nous calculons le gain statique : $K = \frac{60}{121.13} = 0.49 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Watts}$

La fonction de transfert de ce système est alors :

$$F(s) = \frac{0.49.e^{-23.16s}}{1+3045.9s}$$

Tableau VII-2
Essai indiciel sur la bain - - Tamb = 19 °C .

T (°C)	t (min)
23	0
24	3.00
25	5.50
26	8.00
27	12.25
28	15.25
29	18.25
30	21.25
31	24.50
32	28.25
33	34.00
34	35.75
35	39.50
36	44.00
37	50.00
38	55.00
39	60.00
40	65.00
41	70.75
42	77.75
43	82.75
44	89.00
45	96.50
46	101.75
47	106.50
48	110.25
49	115.00
50	120.00
51	125.25
52	131.25
53	138.00
54	144.50
55	152.50
56	162.50
57	174.50
58	192.00
59	212.00
60	239.50

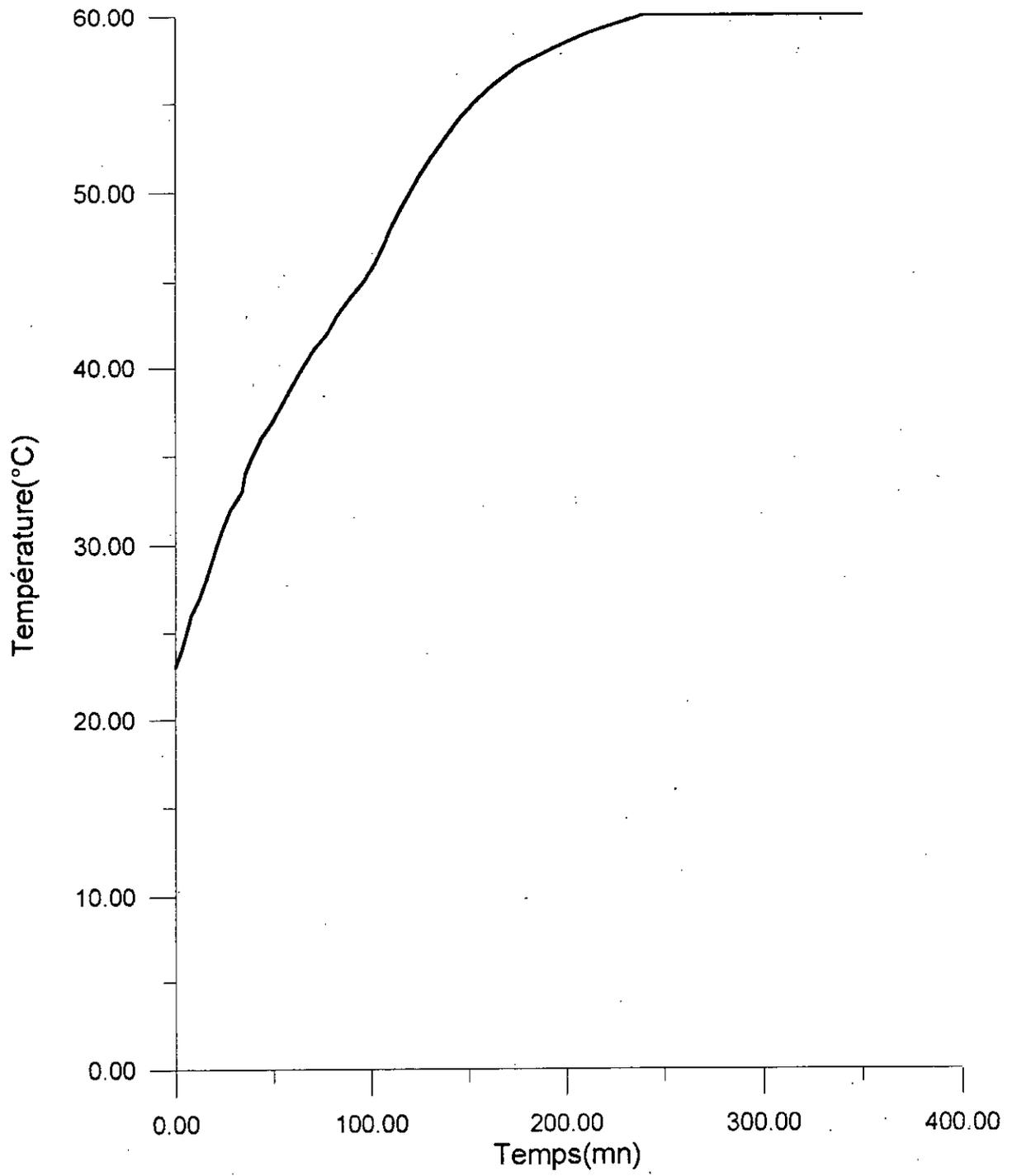


Figure VII-6 Identification du bain

VII-1-3 DETERMINATION DES PARAMETRES DE REGULATION NUMERIQUE :

Pour la programmation de la régulation analogique pilotée par ordinateur on a choisit une période d'échantillonnage Δ égale à une seconde .

On obtient alors les paramètres de régulation en suivant les valeurs données par Ziegler - Nichols :

VII-1-3-1 Les paramètres du système du four :

a) - Régulation PID :

$$K_p = 1.2 \frac{T}{\tau} = 1.2 \frac{1369.5}{22.8} = 72.079$$

$$T_i = 2. \tau = 2.(22.8) = 45.6 \text{ s .}$$

$$T_d = 0.5 \tau = 0.5(22.8) = 11.4 \text{ s .}$$

$$\text{On a : } K_i = \frac{\Delta}{T_i} K_p = \frac{1}{45.6} 72.079 = 1.581 \text{ .}$$

$$K_d = \frac{T_d}{\Delta} K_p = \frac{11.4}{1} 72.079 = 821.701 \text{ .}$$

Les paramètres du PID sont donc :

$$K_p = 72.079 \text{ , } K_i = 1.581 \text{ , } K_d = 821.701 \text{ .}$$

b) - Régulation PI :

$$\text{On a : } K_p = 0.9 \frac{T}{\tau} = 0.9 \frac{1369.5}{22.8} = 54.059 \text{ .}$$

$$T_i = 3.3 \tau = 3.3(22.8) = 75.240 \text{ donc } K_i = \frac{1}{75.240} 54.059 = 0.718 \text{ .}$$

Les paramètres du PI sont donc :

$$K_p = 54.059 \text{ , } K_i = 0.718 \text{ .}$$

c) - Régulation P (proportionnelle) :

On a :

$$K_p = \frac{1369.5}{22.8} = 60.066$$

VII-1-3-2 Les paramètres du système du bain :**a) - Régulation PID :**

On a : $K_p = 1.2 \frac{3045.9}{23.16} = 157.819$

$$T_i = 2 \tau = 2(23.16) = 46.320 \quad \text{donc} \quad K_i = \frac{1}{46.32} 157.819 = 3.407 .$$

$$T_d = 0.5 \tau = 0.5(23.16) = 11.580 \quad \text{donc} : K_d = \frac{11.58}{1} 157.819 = 1827.544 .$$

Les paramètres du PID sont donc :

$$K_p = 157.819 , K_i = 3.407 , K_d = 1827.544 .$$

b) - Régulation PI :

On a : $K_p = 0.9 \frac{3045.9}{23.16} = 118.364 .$

$$T_i = 3.3 \tau = 3.3(23.16) = 76.728 \text{ s} \quad \text{donc} : K_i = \frac{1}{76.364} 118.364 = 1.548 .$$

Les paramètres du PI sont donc :

$$K_p = 118.364 , K_i = 1.548 .$$

c) - Régulation P :

On a :

$$K_p = \frac{3045.9}{23.16} = 131.515 .$$

VII-2 DEUXIEME PARTIE :**LA REGULATION DE LA TEMPERATURE DU
FOUR PAR TOUT OU RIEN .****VII-2-1 BUT DE L'EXPERIENCE :**

Le but de cette expérience est l'étude de la régulation par tout ou rien , de la température du four PROLABO décrit dans la première partie et ce en fonction de la puissance de chauffe fournie au système .

VII-2-2 MATERIEL UTILISE :

- Four de marque PROLABO .
- Un autotransformateur qui permet de faire varier la puissance de chauffe .
- UN thermomètre digital de marque PROLABO .
- Un chronomètre .

VII-2-3 DESCRIPTION DU MONTAGE :

- Placer le thermocouple du thermomètre digital dans l'enceinte du four .
- Brancher la résistance du four à l'alimentation de l'autotransformateur .
- Relier l'entrée de l'autotransformateur à une alimentation externe de 220V .

NB : On a isolé le four avec de l'amiante et ce pour diminuer au maximum les pertes calorifiques subies par le système .

VII-2-4 CONDUITE DE L'EXPERIENCE :

On a fixé trois températures de consigne :

$T_c = 200^{\circ}\text{C}$, $T_c = 400^{\circ}\text{C}$ et $T_c = 600^{\circ}\text{C}$.

On fait varier la tension délivrée au four , à l'aide de l'autotransformateur , ce qui provoque la variation de la puissance de chauffe .

Le four ayant une résistance $R = 27.46$ Ohms , la puissance de chauffe est donnée par l'équation : $P = U^2 / R$

U étant la tension délivrée en Volts .

Nous avons procédé à trois séries d'expériences décrites comme suit :

VII-2-4-1 PREMIERE SERIE D'EXPERIENCES :

Tc = 200°C :

- On effectue une première expérience avec $U = 66$ V, soit $P = 158.63$ W .

Les résultats obtenus sont donnés au tableau VII-3 .

La figure VII-7 donne la représentation graphique des résultats de ce tableau .

- On procède après à une deuxième expérience avec $U = 77$ V , soit :

$P = 215.91$ W.

Les résultats de cet essai sont donnés au tableau VII-4 dont la représentation graphique est portée sur la figure VII-8 .

- Une troisième expérience est établie avec $U = 88$ V , soit $P = 282.01$ W .

Les résultats de cette expérience figurent au tableau VII-5 dont la représentation graphique est portée sur la figure VII-9 .

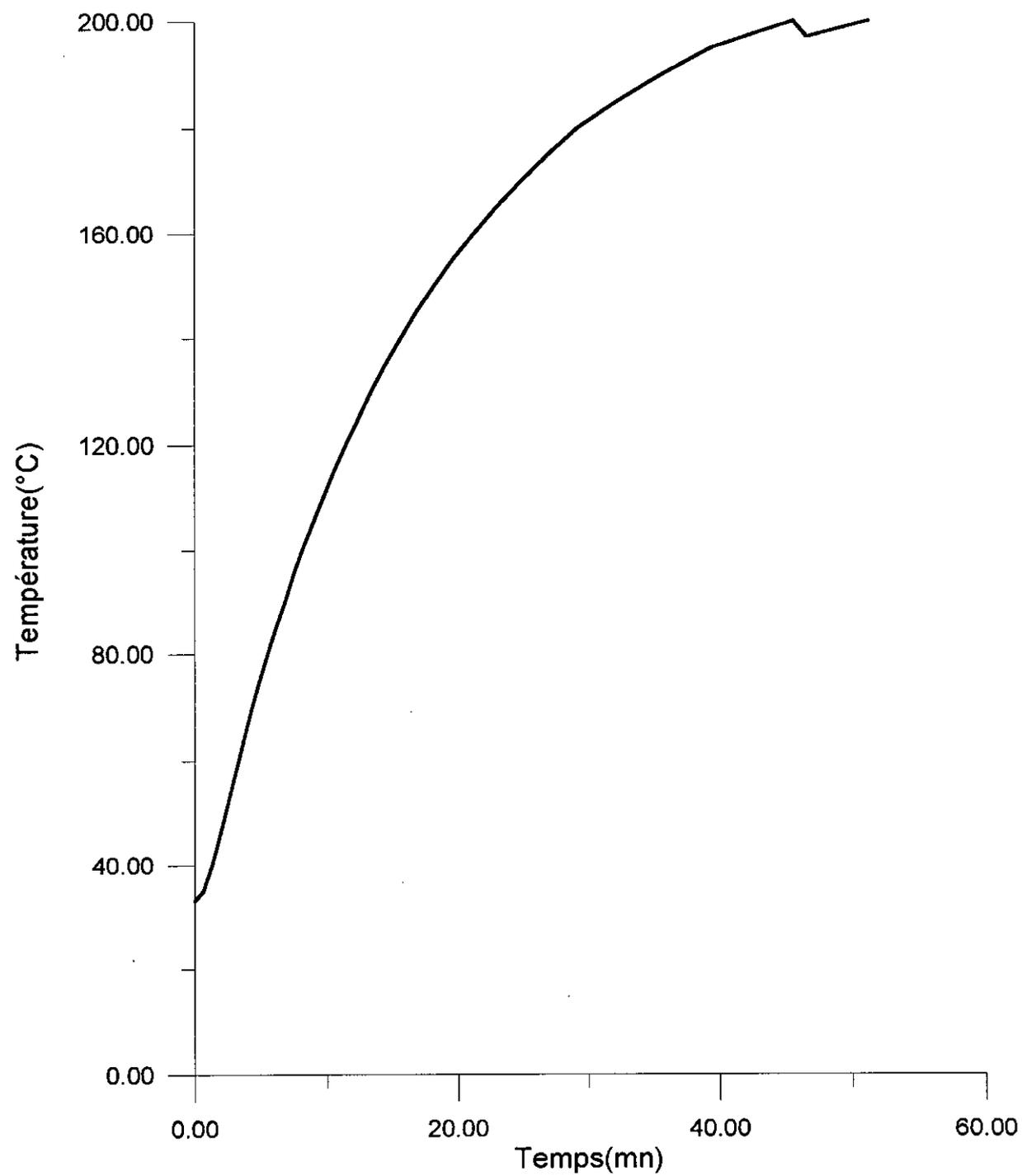
- La quatrième expérience est menée avec $U = 132$ V , soit $P = 634.52$ W

Les résultats de cet essai sont donnés au tableau VII-6 dont la représentation graphique est portée sur la figure VII-10 .

Tableau VII-3

 $T_c = 200\text{ }^\circ\text{C}$ $P = 158.63\text{ W}$ $T_{amb} = 30\text{ }^\circ\text{C}$

T (°C)	t (min)
33	0
40	1.283
50	2.317
60	3.300
70	4.333
80	5.467
90	6.800
100	8.117
110	9.667
120	11.600
130	13.350
140	15.617
150	18.183
160	21.200
170	24.767
180	29.117
190	35.550
200	45.583
199	46.083
198	46.367
197	46.583
198	48.883
199	49.917
200	51.217
199	51.633
198	51.917
197	52.100

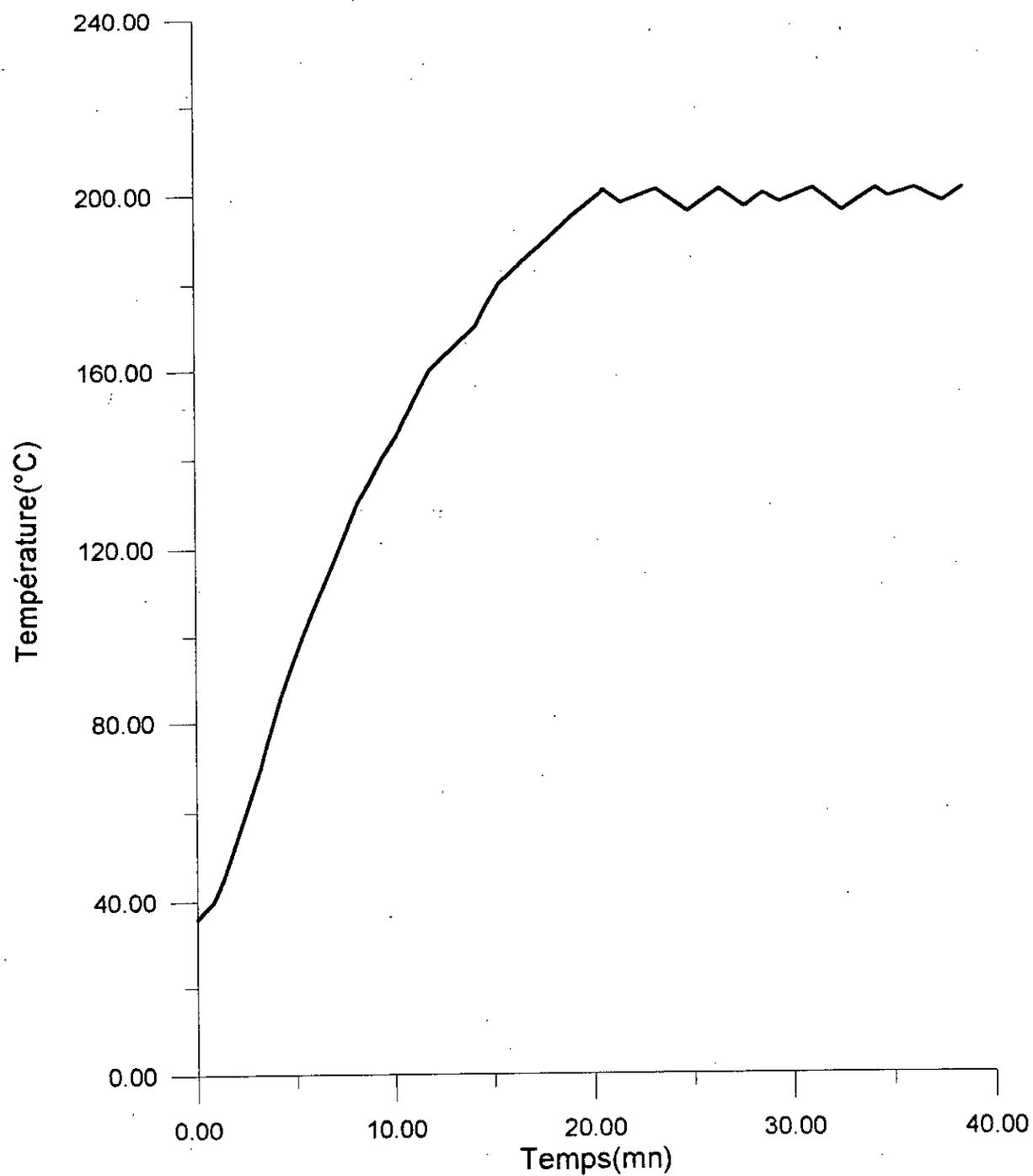


FigureVII-7 Régulation tout ou rien du four (1^{er} essai)

Tableau VII-4

 $T_c = 200\text{ }^\circ\text{C}$ $P = 215.91\text{ W}$ $T_{amb} = 30\text{ }^\circ\text{C}$

T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)
36	0	200	28.667
40	0.833	199	29.333
50	1.717	198	29.500
60	2.467	199	30.567
70	3.217	200	30.900
80	3.883	201	31.167
90	4.583	200	32.000
100	5.383	199	32.117
110	6.283	198	32.283
120	7.250	197	32.017
130	8.183	196	32.583
140	9.433	197	33.167
150	10.733	198	33.433
160	11.867	199	33.733
170	14.200	200	33.950
180	15.600	201	34.283
190	17.850	200	34.650
200	20.483	199	34.900
201	20.617	200	35.917
200	21.283	201	36.217
199	21.417	200	36.583
198	21.550	201	36.683
199	22.467	200	37.183
200	23.100	199	37.333
201	23.283	198	37.549
200	24.233	199	38.266
199	24.333	200	38.449
198	24.433	201	38.549
197	24.533	200	38.866
196	24.883	199	39.233
197	25.250	200	39.549
198	25.583	201	40.116
199	25.950	200	40.766
200	26.233	199	40.833
201	26.467	198	40.916
200	27.333	197	41.099
199	27.250	198	41.383
198	27.483	199	41.749
197	27.717	200	41.899
198	29.150		
199	28.367		

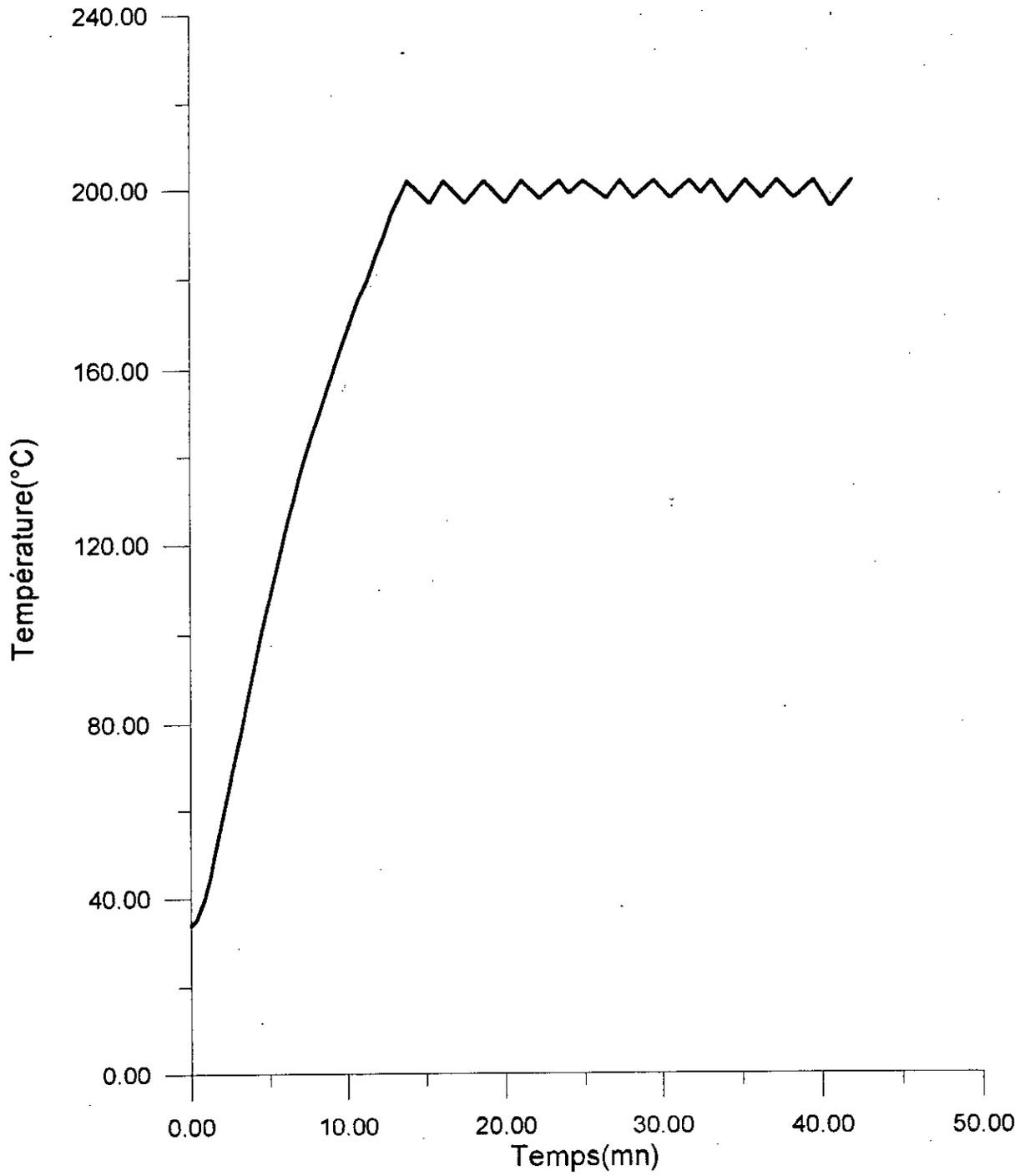


FigureVII-8 Régulation tout ou rien du four (2^{ème} essai)

Tableau VII-5

 $T_c = 200\text{ }^\circ\text{C}$ $P = 282.01\text{ W}$ $T_{amb} = 30\text{ }^\circ\text{C}$

T (°C)	t (min)						
34	0	199	19.700	199	31.083	197	41.100
40	0.833	198	19.833	200	31.400	198	41.300
50	1.533	197	20.100	201	31.583	199	41.517
60	2.117	198	20.300	202	31.833	200	41.667
70	2.700	199	20.600	201	32.050	201	41.817
80	3.283	200	20.750	200	32.283	202	41.933
90	3.867	201	20.933	199	32.533		
100	4.483	202	21.133	200	32.833		
110	5.167	201	21.533	201	32.950		
120	5.850	200	21.833	202	33.217		
130	6.600	199	22.050	201	33.567		
140	7.333	198	22.283	200	33.750		
150	8.233	199	22.783	199	33.850		
160	9.167	200	23.000	198	33.950		
170	10.200	201	23.200	197	34.167		
180	11.367	202	23.483	198	34.633		
190	12.417	201	23.717	199	34.833		
200	13.633	200	23.950	200	34.967		
201	13.733	199	24.133	201	35.083		
202	13.666	200	24.817	202	35.317		
201	14.583	201	24.950	201	35.433		
200	14.766	202	25.000	200	35.950		
199	14.883	201	25.567	199	36.167		
198	15.833	200	25.883	198	36.333		
197	15.333	199	26.100	199	36.800		
198	15.483	198	26.350	200	36.967		
199	15.817	199	26.750	201	37.100		
200	16.017	200	26.967	202	37.300		
201	16.100	201	27.100	201	37.767		
202	16.183	202	27.383	200	37.950		
201	16.917	201	27.783	199	38.133		
200	17.133	200	28.000	198	38.367		
199	17.250	199	28.100	199	38.650		
198	17.350	198	28.283	200	38.950		
197	17.533	199	29.050	201	39.167		
198	18.050	200	29.200	202	39.583		
199	18.367	201	29.317	201	40.017		
200	18.467	202	29.567	200	40.183		
201	18.567	201	30.050	199	40.250		
202	18.733	200	30.267	198	40.350		
201	19.350	199	30.450	197	40.433		
200	19.567	198	30.633	196	40.617		

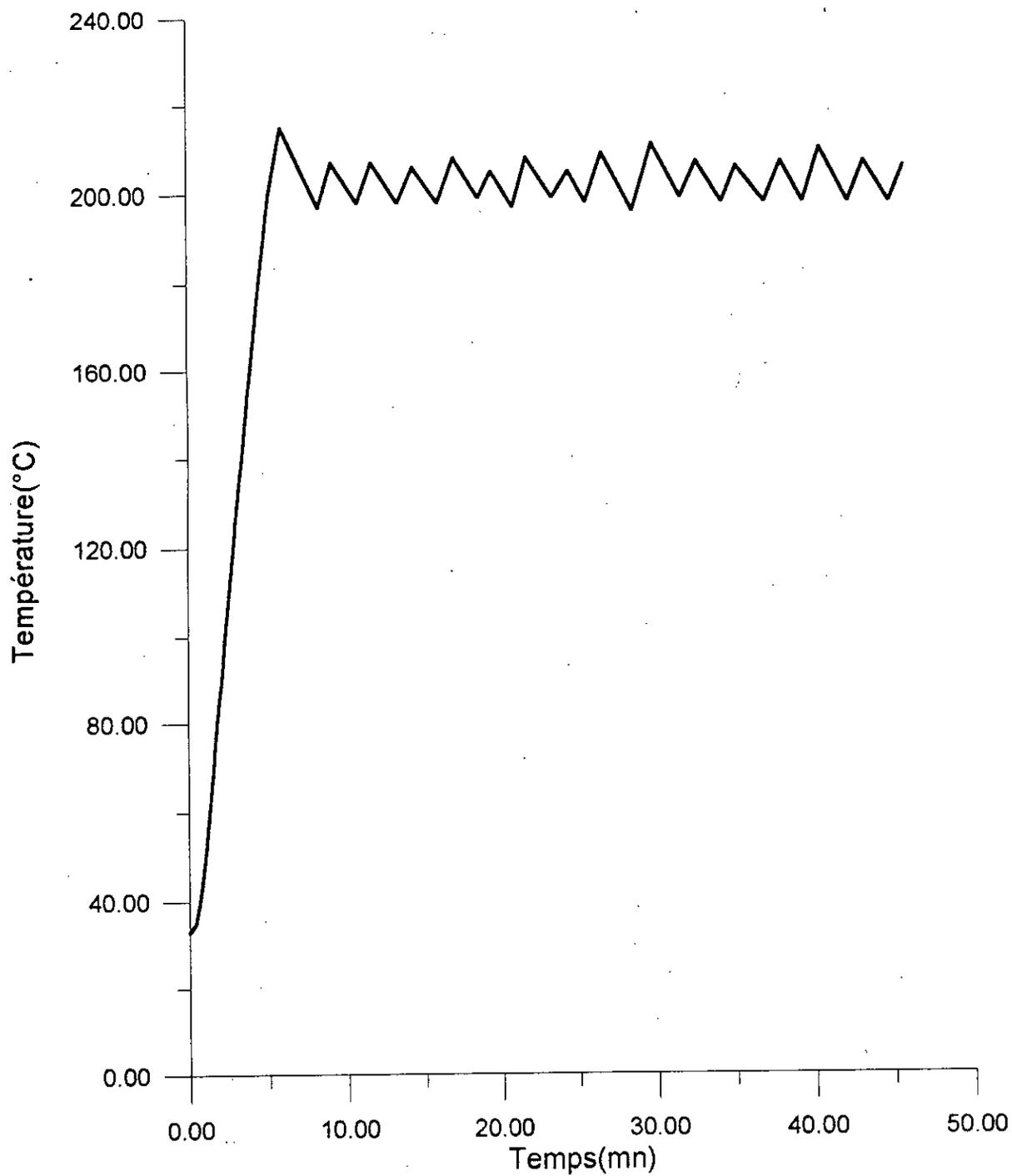


FigureVII-9 Régulation tout ou rien du four (3^{eme} essai)

Tableau VII-6
 $T_c = 200\text{ }^\circ\text{C}$ $P = 634.52\text{ W}$ $T_{amb} = 30\text{ }^\circ\text{C}$

T (°C)	t (min)						
33	0	198	8.40	204	14.050	198	20.650
40	0.683	199	8.500	205	14.150	199	20.817
50	1.033	200	8.600	206	14.317	198	20.900
60	1.317	201	8.683	205	15.067	199	21.033
70	1.583	202	8.733	204	15.233	200	21.100
80	1.833	203	8.783	203	15.367	201	21.150
90	2.100	204	8.833	202	15.533	202	21.200
100	2.333	205	8.917	201	15.633	203	21.250
110	2.583	206	9.017	200	15.733	204	21.317
120	2.850	207	9.117	199	15.833	205	21.383
130	3.100	206	9.700	198	15.933	206	21.450
140	3.383	205	9.817	199	16.250	207	21.533
150	3.650	204	9.917	200	16.400	208	21.700
160	3.967	203	10.083	201	16.450	207	22.300
170	4.250	202	10.217	202	16.533	206	22.583
180	4.517	201	10.350	203	16.583	205	22.683
190	4.833	200	10.483	204	16.650	204	22.800
200	5.133	199	10.600	205	16.717	203	22.950
205	5.350	198	10.750	206	16.783	202	23.067
210	5.517	199	10.950	207	16.850	201	23.167
211	5.567	200	11.067	208	16.967	200	23.250
212	5.600	201	11.150	207	17.567	199	23.400
213	5.667	202	11.200	206	17.767	200	23.750
214	5.717	203	11.283	205	17.917	201	23.867
215	5.917	204	11.350	204	18.017	202	23.950
214	6.450	205	11.433	203	18.133	203	24.033
213	6.583	206	11.533	202	18.267	204	24.150
212	6.683	207	11.667	201	18.333	203	27.850
211	6.817	206	12.200	200	18.417	202	27.933
210	6.917	205	12.383	199	18.583	201	28.050
209	7.017	204	12.550	200	18.933	200	28.133
208	7.117	203	12.667	201	19.017	199	28.217
206	7.283	202	12.800	202	19.200	198	28.317
205	7.417	201	12.950	203	19.167	197	23.367
204	7.517	200	13.133	204	19.250	196	28.517
203	7.633	199	13.233	205	19.433	197	28.717
202	7.817	198	13.333	204	19.967	198	28.783
201	7.817	199	13.633	203	20.133	199	28.833
200	7.883	200	13.750	202	20.333	200	28.900
199	7.983	201	13.833	201	20.400	201	28.967
198	8.067	202	13.917	200	20.500	202	29.017
197	8.250	203	13.983	199	20.583	203	29.067

T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)
204	29.117	204	36.183	200	41.917
205	29.167	203	36.300	199	42.017
206	29.217	202	36.483	198	42.133
207	29.283	201	36.617	199	42.367
208	29.366	200	36.717	200	42.450
209	29.517	199	36.817	201	42.550
210	29.617	198	36.900	202	42.650
211	29.783	199	37.250	203	42.717
210	30.050	200	37.350	204	42.783
209	30.267	201	37.417	205	42.867
208	30.383	202	37.483	206	42.967
207	30.550	203	37.550	207	43.133
206	30.667	240	37.600	206	43.533
205	30.783	205	37.683	205	43.717
204	30.917	206	37.783	204	43.850
203	31.050	207	37.933	203	44.000
202	31.183	206	38.567	202	44.167
201	31.300	205	38.717	201	44.417
200	31.433	204	38.833	200	44.533
199	31.583	203	38.917	199	44.633
200	31.983	202	38.983	198	44.717
201	32.100	201	39.050	199	45.000
202	32.167	200	39.133	200	45.133
203	32.200	199	39.233	201	45.217
204	32.267	198	39.333	202	45.283
205	32.350	199	39.650	203	45.367
206	32.483	200	39.750	204	45.417
207	32.600	201	39.817	205	45.517
206	33.017	202	39.867	206	45.617
205	33.200	203	39.900	205	46.067
204	33.367	204	39.967	204	46.467
203	33.533	205	40.017	203	46.700
202	33.717	206	40.067	202	46.917
201	33.867	207	40.133	201	47.100
200	33.983	208	40.183		
199	34.100	209	40.283		
198	34.217	210	40.367		
199	34.500	209	41.000		
200	34.600	208	41.117		
201	34.667	207	41.283		
202	34.767	206	41.367		
203	34.817	205	41.517		
204	34.883	204	41.600		
205	34.967	203	41.667		
206	35.017	202	41.733		
205	35.983	201	41.817		



FigureVII-10 Régulateur tout ou rien du four (4^{ème} essai)

VII-2-4-1-1 Discussion des résultats :**a)- Evolution de la température jusqu'à la température de consigne :**

Puissance de chauffe (W)	Temps de montée (min)	Vitesse de chauffe moyenne(°C / min)
158.30	45.58	3.66
215.91	20.48	8.01
282.01	13.63	12.18
634.52	5.13	32.55

b)- Etude des périodes et des amplitudes :**P = 158.30 W :**

n° Période	Période (min)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
1	5.55	197	200
2	5.85	197	200

P = 215.91 W :

n° Période	Période (min)	Tmin (°C)	Tmax (min)
1	2.62	198	201
2	3.13	196	201
3	2.44	197	201
4	3.33	198	201
5	2.65	196	200
6	1.93	199	201
7	1.87	198	201
8	1.10	199	201
9	2.35	197	201

P = 282.01 W :

n° Période	Période (min)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
1	2.39	197	202
2	2.45	197	202
3	2.28	197	202
4	2.25	198	202
5	1.82	199	202
6	2.15	198	202
7	2.23	198	202
8	2.20	198	202
9	1.43	199	202
10	2.14	197	202
11	2.00	198	202
12	1.98	198	202
13	2.71	196	202

P = 634.52 W :

n° Période	Période (min)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
1	3.47	197	215
2	2.47	198	207
3	2.68	198	207
4	2.65	198	206
5	2.53	199	208
6	2.17	197	206
7	2.65	199	208
8	2.20	198	205
9	2.95	196	209
10	3.08	199	211
11	2.62	198	207
12	2.75	198	206
13	2.40	198	207
14	2.70	198	210
15	2.68	198	207

VII-2-4-2 DEUXIEME SERIE D' EXPERIENCES :

$T_c = 400\text{ }^\circ\text{C}$:

- On effectue une première expérience avec $U = 88\text{ V}$, soit $P = 282.01\text{ W}$.

Les résultats obtenus sont représentés au tableau VII-7 et à la figure VII-11.

- La deuxième expérience est menée avec $U = 110\text{ V}$, soit $P = 440.06\text{ W}$.

Nous obtenons les résultats du tableau VII-8 dont la représentation graphique est donnée à la figure VII-12.

- La troisième expérience est établie avec $U = 121\text{ V}$, soit $P = 533.17\text{ W}$.

Les résultats obtenus sont donnés au tableau VII-9 et à la figure VII-13.

- La quatrième expérience est réalisée avec $U = 132\text{ V}$, soit $P = 634.52\text{ W}$.

Nous obtenons les résultats du tableau VII-10 dont la représentation graphique est donnée à la figure VII-14.

Tableau VII-7

 $T_c = 400\text{ }^\circ\text{C}$ $P = 282.01\text{ W}$ $T_{amb} = 29\text{ }^\circ\text{C}$

T (°C)	t (min)
34	0
40	0.917
50	1.550
60	2.117
70	2.683
80	3.283
90	3.867
100	4.550
110	5.233
120	5.917
130	6.683
140	7.500
150	8.383
160	9.383
170	10.350
180	11.283
190	12.333
200	13.483
210	14.667
220	16.133
230	17.550
240	19.150
250	20.850
260	23.500
270	25.400
280	27.817
290	30.333
300	35.017
310	41.967
320	47.500
330	58.200

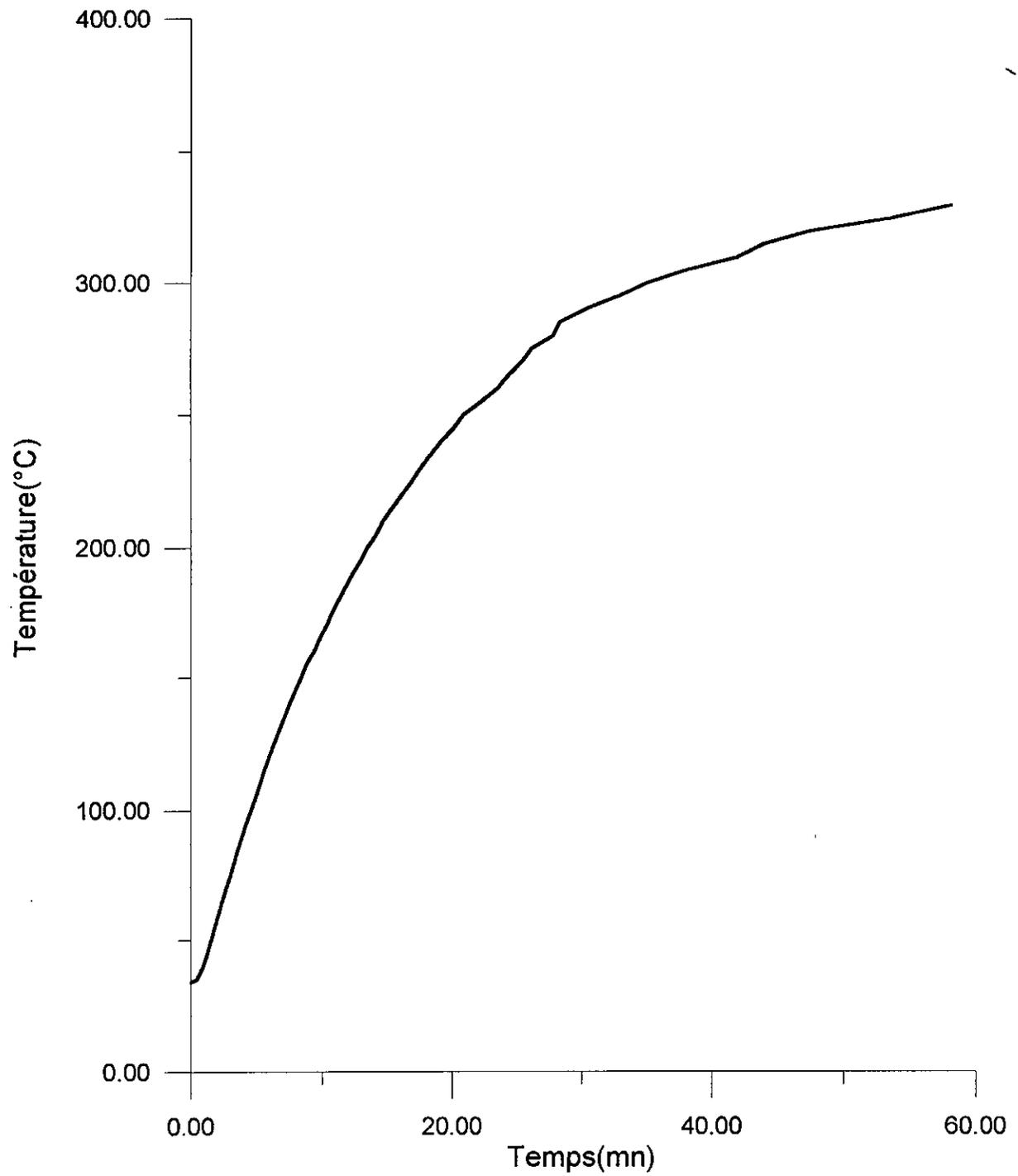
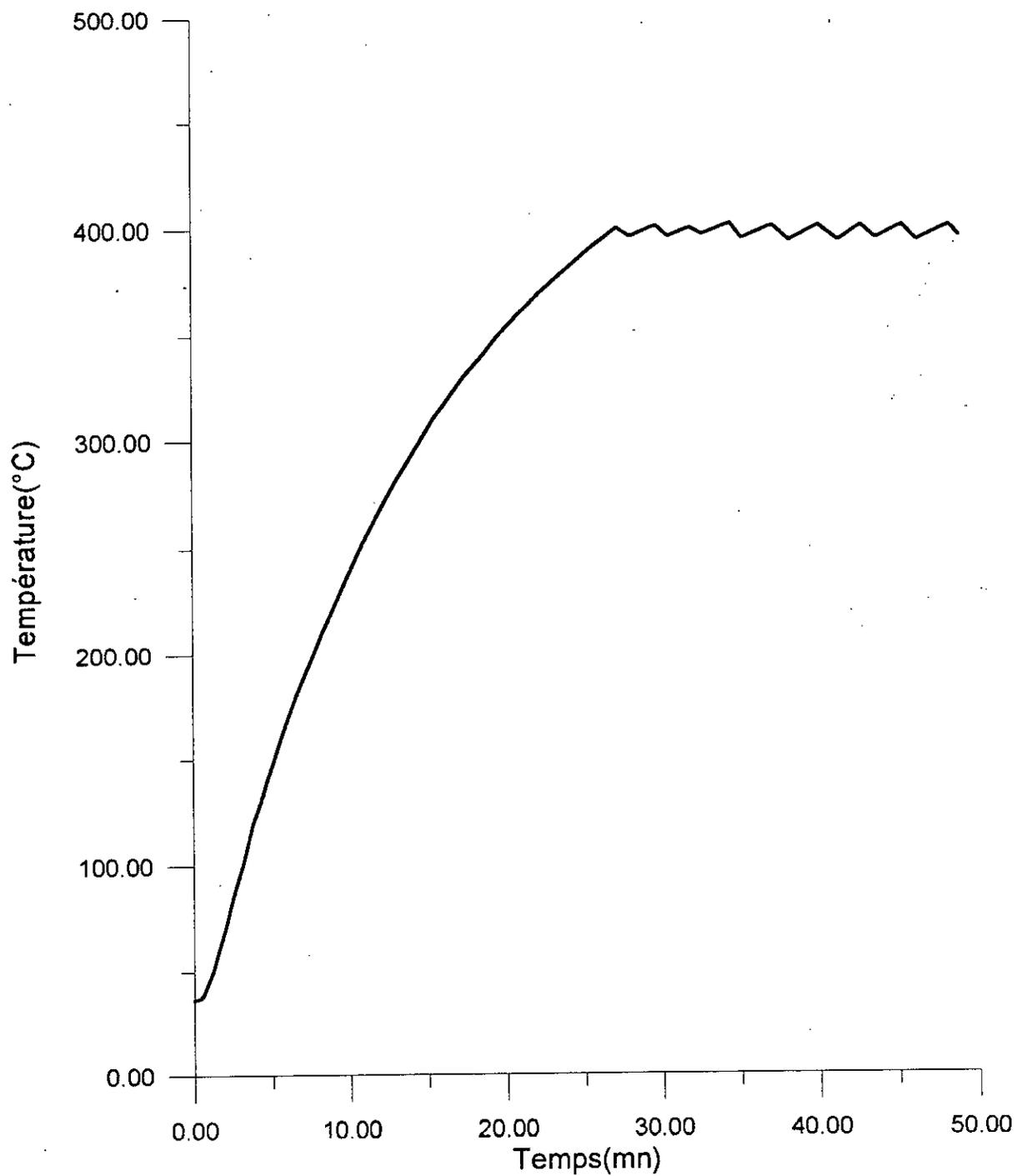


Figure VII-11 Régulation tout ou rien du four (5^{ème} essai)

Tableau VII-8
 $T_c = 400\text{ }^\circ\text{C}$ $P = 440.06\text{-W}$ $T_{amb} = 33\text{ }^\circ\text{C}$

T (°C)	t (min)						
36	0	398	29.117	397	39.267	400	47.933
40	0.683	399	29.383	398	39.533	401	48.233
50	1.200	400	29.533	399	39.700	400	48.417
60	1.583	401	29.700	400	39.850	399	48.533
70	1.983	400	29.967	401	40.033	398	48.667
80	2.333	399	30.067	400	40.383	397	48.767
90	2.700	398	30.167	399	40.517	396	48.850
100	3.117	397	30.333	398	40.600	397	49.667
110	3.467	396	30.533	397	40.683	398	49.767
120	3.883	397	31.117	396	40.783	399	49.950
130	4.300	398	31.500	395	40.917	400	50.483
140	4.717	399	31.700	394	41.300		
150	5.167	400	31.900	395	41.433		
160	5.617	399	32.267	396	41.717		
170	6.100	398	32.383	397	41.933		
180	6.583	397	32.700	398	42.117		
190	7.117	398	33.383	399	42.333		
200	7.683	399	33.717	400	42.500		
210	8.233	400	34.100	401	42.717		
220	8.833	401	34.267	400	43.017		
230	9.433	402	34.433	399	43.117		
240	10.067	401	34.600	398	43.267		
250	10.733	400	34.700	397	43.350		
260	11.433	399	34.817	396	43.467		
270	12.167	398	34.900	395	43.633		
280	12.933	397	34.983	396	44.417		
290	13.783	396	35.100	397	44.583		
300	14.600	395	35.200	398	44.750		
310	15.433	396	35.967	399	44.933		
320	16.450	397	36.233	400	45.100		
330	17.400	398	36.467	401	45.283		
340	18.567	399	36.667	400	45.600		
350	19.600	400	36.983	399	45.750		
360	20.867	401	37.150	398	45.800		
370	22.200	400	37.583	397	45.883		
380	23.717	399	37.683	396	45.967		
390	25.333	398	37.750	395	46.100		
400	27.167	397	37.833	394	46.200		
399	27.617	396	37.933	395	47.100		
398	27.750	395	39.050	396	47.300		
397	27.933	394	38.200	397	47.533		
396	28.067	395	38.733	398	47.633		
397	28.767	396	39.000	399	47.800		



FigureVII-12 Régulation tout ou rien du four (6^{me} essai)

Tableau VII-9
 $T_c = 400\text{ }^\circ\text{C}$ $P = 533.17\text{ W}$ $T_{amb} = 28\text{ }^\circ\text{C}$

T (°C)	t (min)						
29	0	399	20.317	400	26.983	402	32.300
30	0.367	398	20.367	401	27.083	403	32.400
40	0.933	397	20.433	402	27.183	402	32.667
50	1.317	396	20.500	403	27.350	401	32.850
60	1.617	395	20.583	402	27.583	400	32.983
70	1.933	394	20.667	401	27.700	399	33.067
80	2.233	395	21.433	400	27.767	398	33.133
90	2.550	396	21.567	399	27.833	397	33.167
100	2.850	397	21.683	398	27.883	396	33.217
110	3.167	398	21.800	397	27.933	395	33.300
120	3.483	399	21.967	396	27.983	394	33.450
130	3.817	400	22.083	395	28.033	393	33.550
140	4.167	401	22.183	394	28.083	394	34.100
150	4.533	402	22.317	393	28.250	395	34.200
160	4.883	401	22.717	394	28.650	396	34.283
170	5.267	400	22.800	395	29.100	397	34.383
180	5.667	399	22.883	397	29.300	398	34.533
190	6.100	398	22.950	398	29.350	399	34.617
200	6.500	397	23.033	399	29.450	400	34.700
210	6.933	396	23.067	400	29.550	401	34.800
220	7.400	395	23.183	401	29.617	402	34.900
230	7.867	394	23.300	402	29.700	403	35.000
240	8.367	395	23.950	403	29.850	402	35.333
250	8.850	396	24.083	402	30.183	401	35.450
260	9.383	397	24.217	401	30.283	400	35.533
270	9.917	398	24.333	400	30.350	399	35.600
280	10.450	399	24.417	399	30.400	398	35.650
290	11.000	400	24.517	398	30.450	397	35.700
300	11.583	401	24.600	397	30.517	396	35.767
310	12.217	402	24.800	396	30.583	395	35.833
320	12.900	401	25.167	395	30.633	394	35.967
330	13.567	400	25.267	394	30.700	393	36.117
340	14.283	399	25.333	393	30.800	392	36.250
350	15.100	398	25.417	392	30.950	393	36.450
360	15.867	397	25.467	393	31.350	394	36.683
370	16.683	396	25.550	394	31.467	395	36.817
380	17.500	395	25.600	395	31.717	396	36.933
390	18.417	394	25.717	396	31.767	397	37.033
400	19.450	395	26.450	397	31.817	398	37.150
401	19.550	396	26.567	398	31.967	399	37.250
402	19.650	397	26.667	399	32.050	400	37.333
401	20.183	398	26.767	400	32.133	401	37.417
400	20.267	399	26.867	401	32.217	402	37.567

T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)
403	37.667	400	43.317
402	37.933	399	43.450
401	38.000	398	43.517
400	38.100	397	43.583
399	38.183	396	43.667
398	38.267	395	43.733
397	38.333	394	43.867
396	38.400	395	44.400
395	38.450	396	44.583
394	38.483	397	44.717
393	38.550	398	44.783
392	38.750	399	44.850
393	39.250	400	44.933
394	39.467	401	45.033
395	39.633	402	45.133
396	39.700	403	45.200
397	39.800	402	45.633
398	39.883	401	45.733
399	39.950	400	45.817
400	40.000	399	45.883
401	40.133	398	45.950
402	40.217	397	46.017
403	40.383	396	46.083
402	40.583	395	46.133
401	40.717	394	46.183
400	40.867	393	46.250
399	40.933		
398	41.000		
397	41.067		
396	41.133		
395	41.150		
394	41.200		
393	41.317		
394	41.950		
395	42.067		
396	42.150		
397	42.250		
398	42.333		
399	42.433		
400	42.567		
401	42.683		
402	42.783		
403	42.900		
402	43.050		
401	43.150		

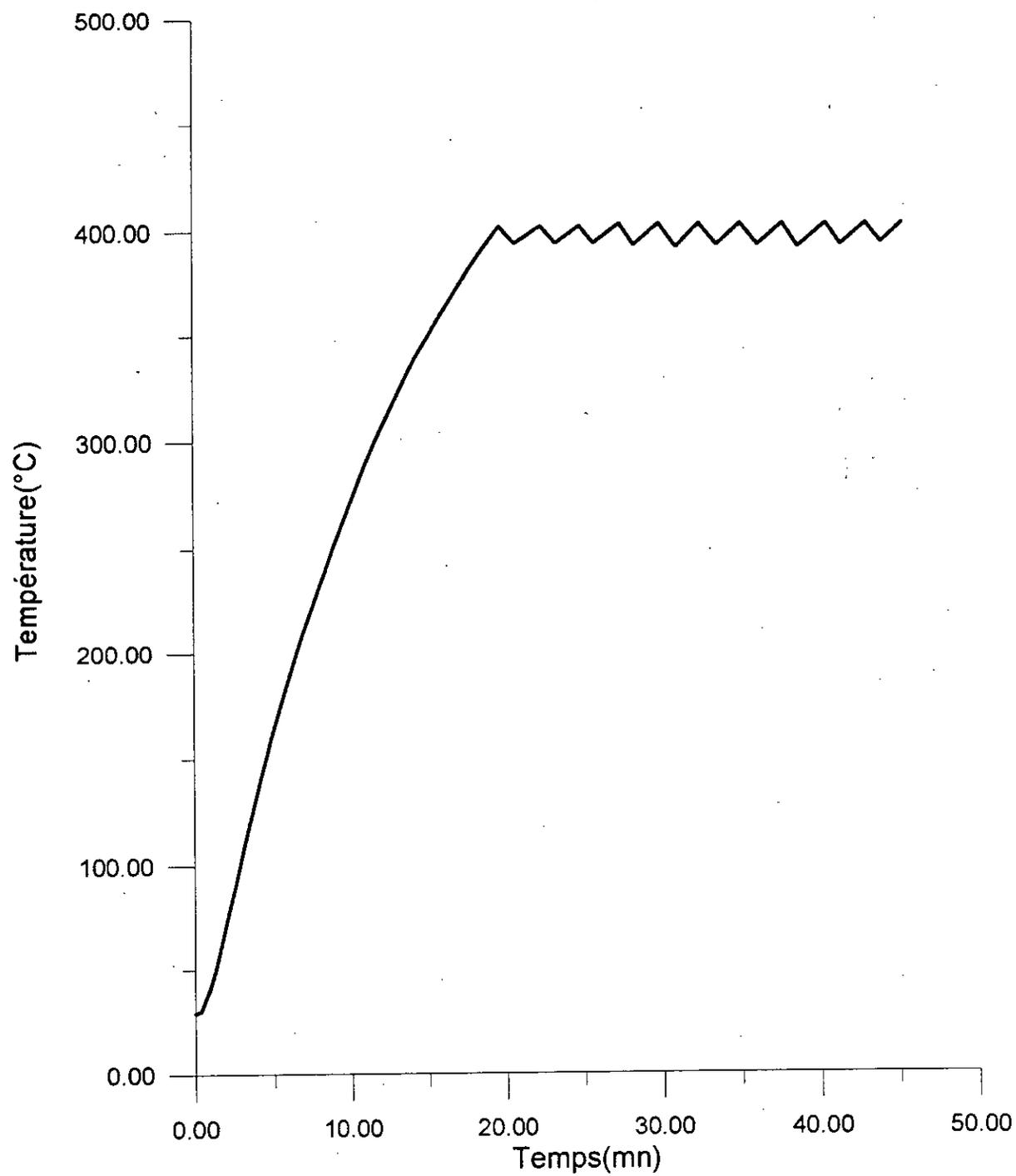
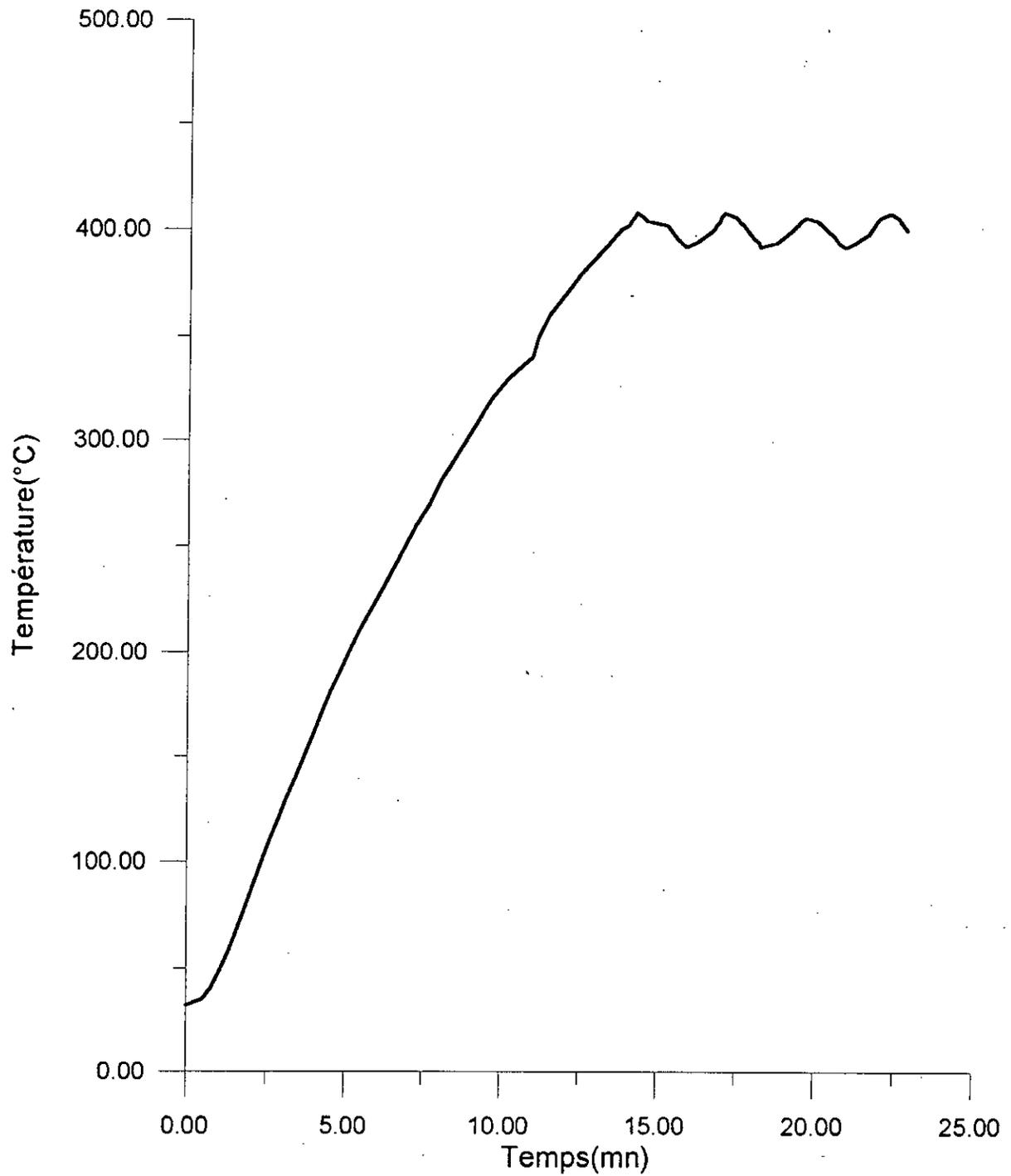


Figure VII-13 Régulation tout ou rien du four (7^{ème} essai)

Tableau VII-10
 $T_c = 400\text{ }^\circ\text{C}$ $P = 634.52\text{ W}$ - $T_{amb} = 30\text{ }^\circ\text{C}$

T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)
32	0	408	14.265	402	21.800
35	0.500	406	14.448	404	21.883
40	0.750	404	14.581	406	21.983
45	.933	402	15.247	408	22.316
50	1.100	400	15.363	406	22.566
60	1.383	398	15.463	404	22.632
70	1.633	396	15.563	402	22.748
80	1.883	394	15.713	400	22.831
90	2.116	392	15.863		
100	2.350	394	16.179		
110	2.600	396	16.362		
120	2.883	398	16.562		
130	3.133	400	16.728		
140	3.433	402	16.811		
150	3.700	404	16.927		
160	3.966	406	19.960		
170	4.216	408	17.076		
180	4.483	406	17.459		
190	4.783	404	17.559		
200	5.100	402	17.692		
210	5.416	400	17.792		
220	5.783	398	17.892		
230	6.166	396	18.025		
240	6.533	394	18.175		
250	6.900	392	18.192		
260	7.250	394	18.724		
270	7.700	396	18.907		
280	8.016	398	19.057		
290	8.433	400	19.223		
300	8.850	402	19.356		
310	9.266	404	19.472		
320	9.666	406	19.665		
330	10.200	404	20.021		
340	10.966	402	20.187		
350	11.150	400	20.320		
360	11.483	398	20.486		
370	12.016	396	20.602		
380	12.516	394	20.685		
390	13.150	392	20.901		
400	13.766	394	21.184		
402	14.016	396	21.384		
404	14.082	398	21.600		
406	14.182	400	21.700		



FigureVII-14 Régulation tout ou rien du four (8^{ème} essai)

DISCUSSION DES RESULTATS :**a)- Evolution de la température jusqu'à la température de consigne :**

Puissance de chauffe (W)	Temps de montée (min)	Vitesse de chauffe moyenne(°C/min)
282.01	— (*)	— (*)
440.06	27.17	13.40
533.17	19.45	19.07
634.52	13.77	26.72

(*) : Le régime permanent du four est atteint avant la température de consigne .

b)-Calcul des périodes et des amplitudes :

P = 440.06 W :

n° Période	Période (min)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
1	2.66	396	401
2	2.07	396	400
3	2.80	397	402
4	2.88	395	401
5	2.80	394	401
6	2.64	394	401
7	2.58	395	401
8	2.82	394	401

P = 533.17 W :

n° Période	Période (min)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
1	2.63	394	402
2	2.44	394	402
3	2.46	394	402
4	2.57	393	403
5	2.56	392	403
6	2.59	393	403

P = 634.52 W :

n° Période	Période (min)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
1	2.96	392	408
2	2.49	392	408
3	2.48	392	406

VII-2-4-3 TROISIEME SERIE D'EXPERIENCES :

Tc = 600 °C :

- On effectue une première expérience avec $U = 132 \text{ V}$, soit : $P = 634.52 \text{ W}$.

On obtient les résultats du tableau VII-11 dont la représentation graphique est donnée à la figure VII-15.

- Une deuxième expérience est établie avec $U = 176 \text{ V}$, soit : $P = 1128.04 \text{ W}$.

Les résultats de cet essai sont portés au tableau VII-12 et à la figure VII-16.

Tableau VII-11
 $T_c = 600\text{ }^\circ\text{C}$ $P = 634.52\text{ W}$ $T_{amb} = 33\text{ }^\circ\text{C}$

T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)
37	0	460	18.417
40	0.500	470	19.283
50	0.933	480	20.233
60	1.233	490	21.233
70	1.483	500	22.367
80	1.783	510	23.500
90	2.017	520	24.717
100	2.283	530	26.067
110	2.550	540	27.617
120	2.817	550	29.267
130	3.083	560	30.933
140	3.350	570	33.167
150	3.633	580	36.017
160	3.933	590	39.783
170	4.217	600	45.000
180	4.500	599	45.417
190	4.833	598	45.467
200	5.133	596	45.533
210	5.483	595	45.617
220	5.800	594	45.717
230	6.133	593	45.767
240	6.500	592	45.867
250	6.883	591	45.867
260	7.267	590	46.017
270	7.600	589	46.667
280	8.017	590	46.983
290	8.433	591	47.450
300	8.850	592	47.767
310	9.317	593	48.300
320	9.767	594	48.767
330	10.250	595	49.167
340	10.750	596	49.767
350	11.300	597	50.117
360	11.767	598	51.233
370	12.317	599	51.733
380	12.933	600	52.167
390	13.500	599	52.533
400	14.100	598	52.617
410	14.733	597	52.667
420	15.433	596	52.733
430	16.083	595	52.800
440	16.850	594	52.850
450	17.600	593	52.917

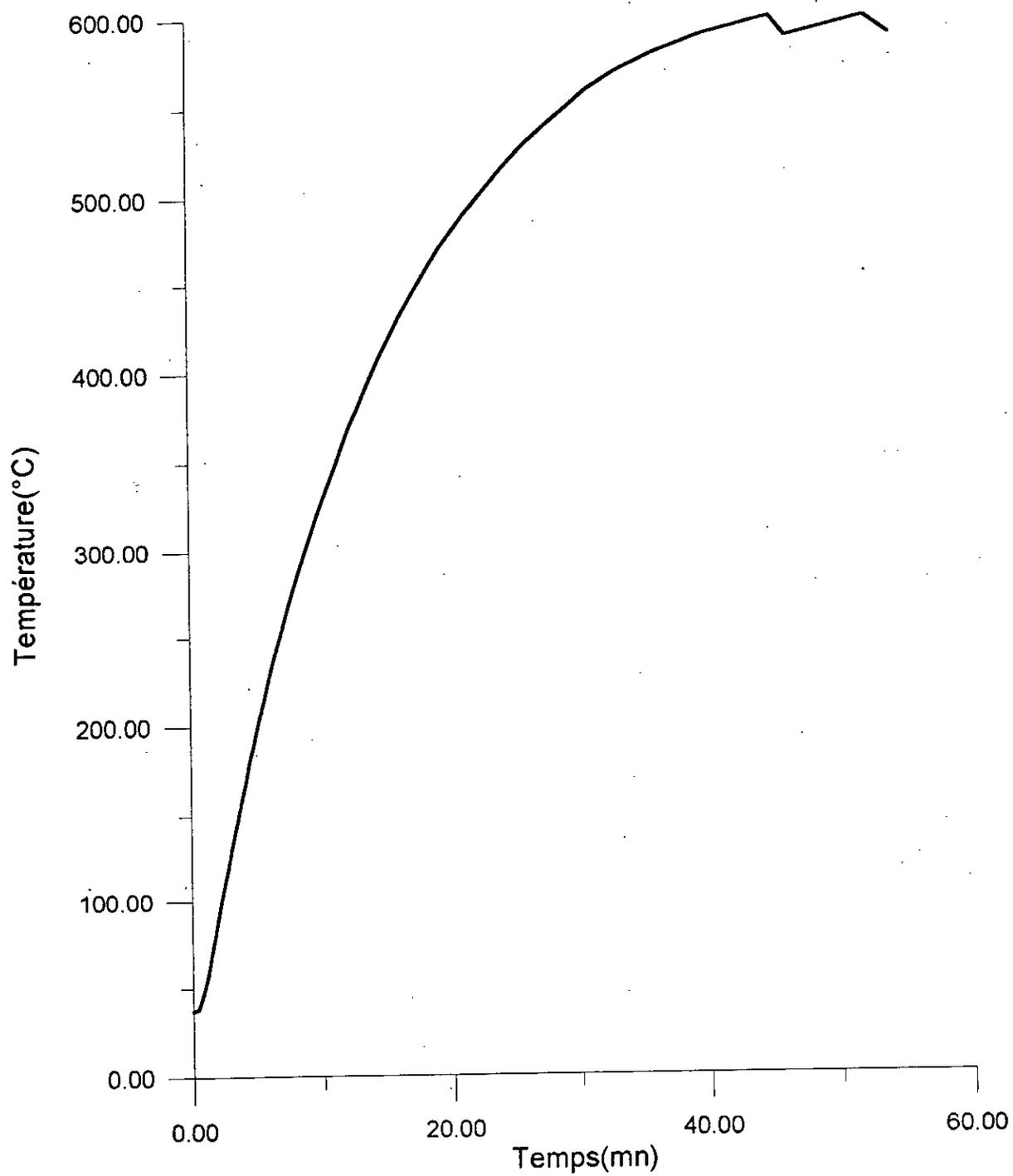
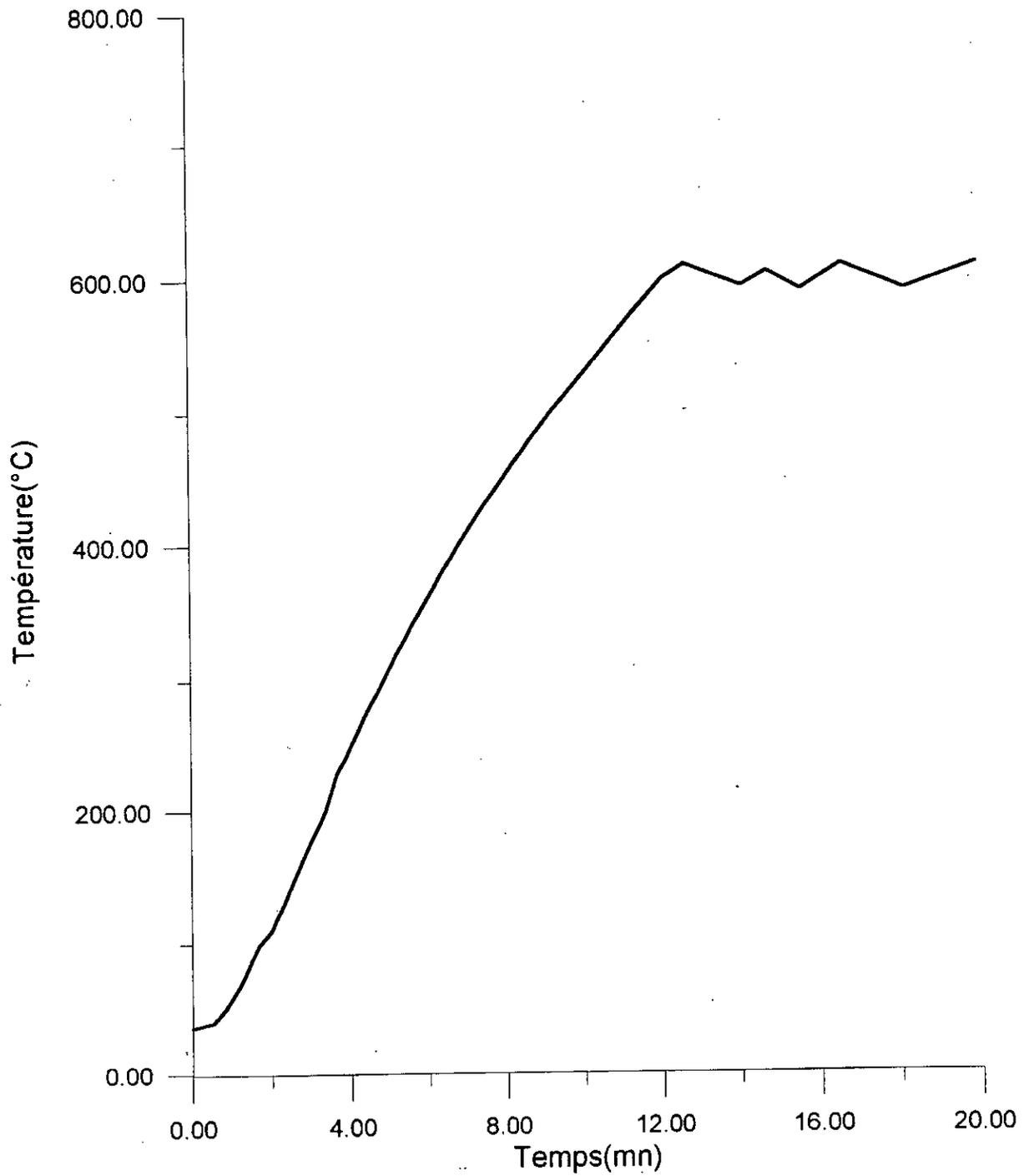


Figure VII-15 Régulation tout ou rien du four (9^{ème} essai)

Tableau VII-12
 $T_c = 600\text{ }^\circ\text{C}$ $P = 1128.04\text{ W}$ $T_{amb} = 29\text{ }^\circ\text{C}$

T (°C)	t (min)						
36	0	460	8.200	594	14.083	610	16.583
40	0.517	470	8.450	595	14.133	609	16.917
50	0.817	480	8.683	596	14.167	608	16.967
60	1.017	490	8.950	597	14.217	607	17.017
70	1.217	500	9.200	598	14.250	606	17.067
80	1.383	510	9.483	599	14.283	605	17.117
90	1.533	520	9.750	600	14.333	604	17.150
100	1.700	530	10.000	601	14.400	603	17.200
110	2.000	540	10.317	602	14.467	602	17.250
120	2.150	550	10.600	603	14.550	601	17.283
130	2.317	560	10.883	604	14.600	600	17.317
140	2.450	570	11.183	605	14.717	601	17.366
150	2.600	580	11.483	604	14.833	602	17.416
160	2.750	590	11.800	603	14.950	603	17.449
170	2.900	600	12.100	602	15.017	604	17.466
180	3.050	601	12.150	601	15.083	605	17.499
190	3.217	602	12.167	600	15.133	606	17.533
200	3.367	603	12.200	599	15.167	607	17.566
230	3.683	604	12.217	598	15.200	608	17.599
240	3.867	605	12.283	597	15.233	609	17.633
250	4.017	606	12.317	596	15.283	610	17.699
260	4.183	607	12.350	595	15.317	611	17.749
270	4.333	608	12.417	594	15.350	610	17.966
280	4.500	609	12.483	593	15.400	609	18.033
290	4.700	610	12.650	592	15.433	608	18.099
300	4.850	609	12.900	591	15.567	607	18.133
310	5.033	608	12.933	592	15.817	606	18.199
320	5.200	607	12.967	595	15.983	605	18.233
330	5.400	606	13.000	596	16.017	604	18.283
340	5.600	605	13.033	597	16.100	603	18.316
350	5.800	604	13.066	598	16.150	602	18.349
360	5.983	603	13.100	600	16.217	601	18.383
370	6.183	600	13.200	201	16.267	600	18.433
380	6.383	594	13.364	202	16.300	590	18.766
390	6.600	592	13.467	203	16.317	600	19.549
400	6.800	591	13.517	204	16.350	590	21.383
410	7.017	590	13.567	205	16.383	600	21.850
420	7.250	589	13.617	206	16.417	610	22.249
430	7.483	588	13.700	207	16.450	600	22.883
440	7.733	589	13.917	208	16.500	590	22.233
450	7.967	590	13.933	209	16.550		



FigureVII-16 Régulateur-tout ou rien du four (10^{ème} essai)

DISCUSSION DES RESULTATS :**a)- Evolution de la température jusqu'à la température de consigne :**

Puissance de chauffe (W)	Temps de montée (min)	Vitesse de chauffe moyenne (°C/min)
634.53	45.00	46.61
1128.04	12.10	46.61

b)- Calcul des périodes et des amplitudes :**P = 634.53 W :**

n ° Période	Période (min)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
1	7.20	589	600
2	6.90	589	600

P = 1128.04 W :

n° Période	Période (min)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
1	2.25	589	610
2	1.65	591	605
3	2.10	589	610
4	2.55	589	610

CONCLUSION :

- Les résultats obtenus nous montrent que le temps de montée diminue lorsqu'on augmente la puissance de chauffe mais l'écart est plus important, ce qui diminue la précision de la régulation.

- D'après le travail effectué, on conclue que la régulation par tout ou rien est basée sur le tâtonnement qui consiste à trouver pour un système spécifié et pour une température donnée, la puissance de chauffe optimale qui permet d'obtenir la meilleure précision possible.

Pour notre système on conseille les puissances de chauffe suivantes :

Température de consigne (°C)	Tension d'alimentation (V)
200	66 → 77
400	110 → 121
600	132 → 143

- On constate dans certains cas, que le four atteint son régime permanent avant d'arriver à la température de consigne. Pour cela et pour augmenter la rapidité de l'évolution du système, l'utilisation d'une puissance maximale au début de l'opération, puis sa réduction à l'approche de la consigne est fortement conseillé.

VII-3 TROISIEME PARTIE

ETUDE DU REGULATEUR PROLABO

VII-3-1 BUT DE L'EXPERIENCE :

Le but de cette expérience est l'étude du comportement du régulateur de température PROLABO .

VII-3-2 MATERIEL UTILISE :

- Le four décrit à la première partie .
- Un régulateur de température de marque PROLABO .
- Un autotransformateur .
- Un Chronomètre .

VII-3-3 DESCRIPTION DU MONTAGE :

- Relier l'entrée de l'autotransformateur à une alimentation externe de 220V .
- Relier la sortie du courant du régulateur à l'alimentation de l'autotransformateur .
- Brancher la résistance du four sur le régulateur .
- Placer le thermocouple du régulateur dans l'enceinte du four .

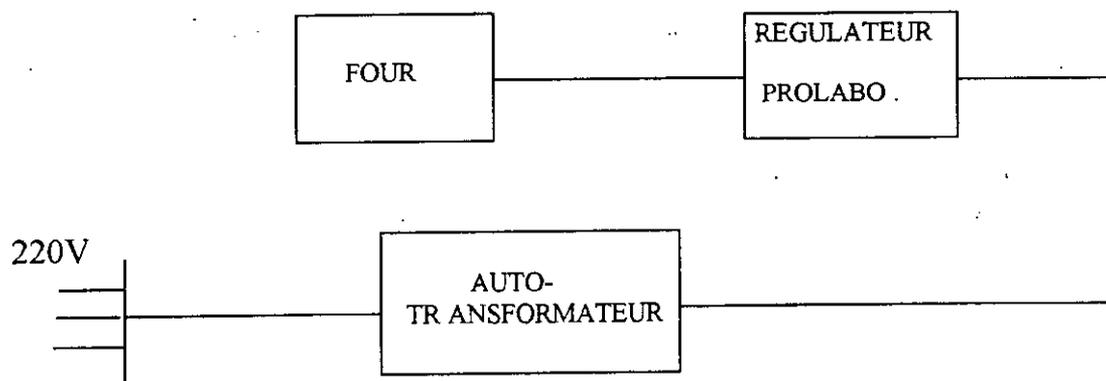


Figure VII-13. Description du montage .

VII-3-3 CONDUITE DE L'EXPERIENCE :

On refait les mêmes expériences de la première partie pour la température de consigne : $T_c = 200\text{ }^\circ\text{C}$.

Les résultats de ces essais sont portés sur les tableaux et graphes ci-dessous :

Tableau VII-13
 $T_c = 200\text{ }^\circ\text{C}$ $P = 158.63\text{ W}$ $T_{amb} = 29\text{ }^\circ\text{C}$

T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)
34	0	178	37.050	183	56.167
40	1.167	177	37.300	184	58.00
50	2.217	178	37.667	185	58.467
60	3.233	179	38.167	184	59.033
70	4.283	178	38.317	185	59.400
80	5.350	177	38.583	184	60.000
90	6.600	178	39.250	185	60.183
100	8.033	179	39.517	186	60.283
110	9.617	178	39.667	186	60.667
120	11.283	179	40.367	185	60.767
130	13.417	180	40.750		
140	15.633	181	41.017		
150	17.833	180	41.533		
160	21.450	179	41.650		
170	25.983	178	41.967		
174	27.733	177	42.233		
173	27.967	178	42.367		
174	28.183	179	43.967		
175	28.350	180	44.900		
176	28.617	181	45.100		
177	29.183	180	45.333		
176	29.600	179	45.533		
175	30.017	180	46.000		
174	30.383	181	46.250		
175	30.783	182	49.583		
176	30.850	183	49.733		
175	31.083	182	50.000		
176	31.483	183	50.083		
177	32.117	184	50.217		
178	32.167	183	50.417		
179	32.333	182	51.033		
178	32.633	183	52.333		
177	32.900	182	52.900		
178	34.167	183	53.283		
179	34.250	184	53.400		
178	34.717	185	53.550		
179	35.100	184	53.800		
178	35.520	183	54.017		
179	36.017	182	54.433		
180	36.150	183	55.183		
181	36.517	184	55.350		
180	36.783	183	55.850		
179	36.850	184	55.933		

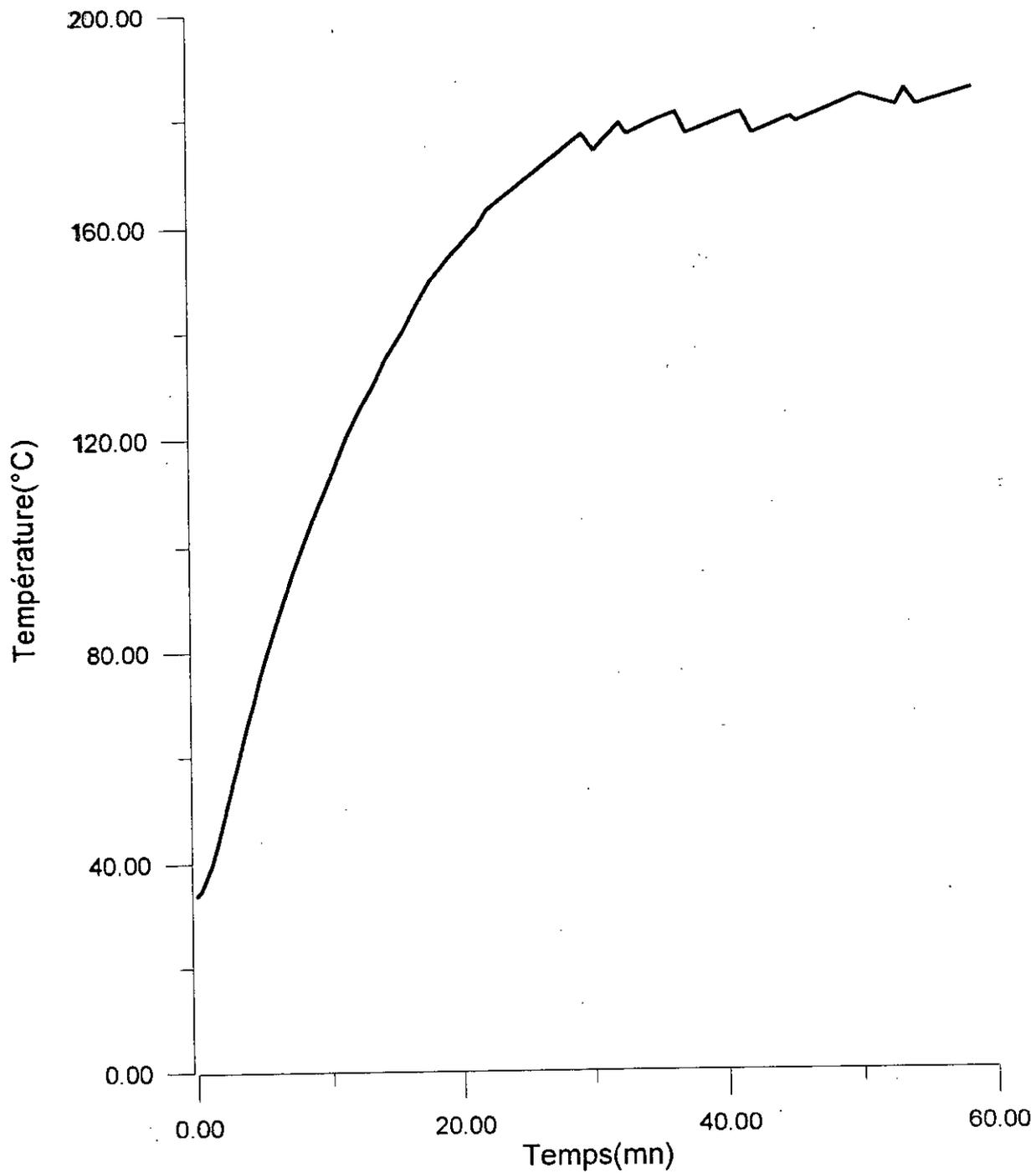
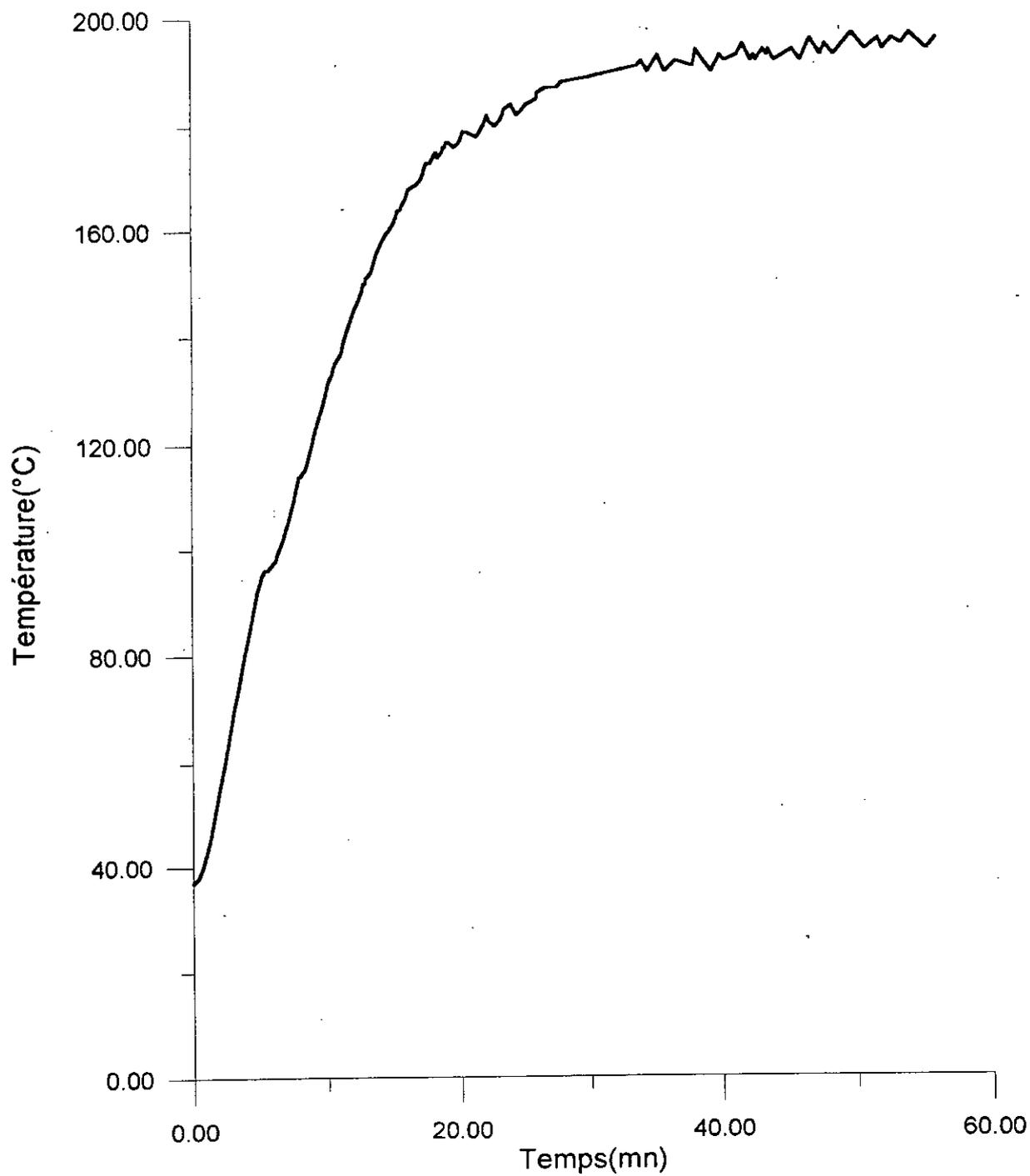


Figure VII-18 Régulateur PROLABO (1^{er} essai)

Tableau VII-14
 $T_c = 200\text{ }^\circ\text{C}$ $P = 215.91\text{ W}$ $T_{amb} = 26\text{ }^\circ\text{C}$

T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)
37	0	189	28.100	194	41.950
40	0.717	188	28.833	193	42.200
50	1.617	187	29.100	192	42.317
60	2.383	188	29.367	193	42.550
70	3.100	189	29.700	192	42.667
80	3.867	190	29.783	193	43.050
90	4.700	189	30.050	194	43.233
100	6.500	190	30.083	195	43.533
110	7.633	189	30.383	194	43.617
120	8.950	188	30.517	196	50.100
130	10.017	189	31.000	195	50.367
140	11.433	190	31.233	194	50.783
150	12.833	189	31.900	195	50.967
160	14.783	190	32.267	196	51.750
170	17.167	191	32.750	195	51.850
175	18.250	192	33.450	194	52.033
174	18.450	191	33.700	195	52.167
175	18.733	192	34.117	196	52.733
176	18.867	191	34.417	195	53.433
177	19.067	190	34.583	196	53.883
176	19.667	191	34.983	197	54.033
177	20.067	192	35.067	196	54.317
178	20.233	193	35.333	195	54.700
179	20.367	192	35.467	194	55.283
178	21.417	191	35.633	195	55.417
179	21.667	190	35.867	196	55.967
180	21.867	191	36.417	195	56.267
181	22.067	192	36.683	194	56.417
182	22.233	191	37.967	193	56.667
181	22.383	192	37.850	194	57.000
180	22.833	193	37.950	195	57.183
181	23.200	194	38.183	194	57.967
182	23.433	193	38.383	193	58.233
183	23.533	192	38.667	192	58.383
184	24.067	191	38.883	193	58.667
183	24.267	190	39.383	194	59.450
182	24.483	191	39.633	195	60.833
183	24.933	192	39.833	194	61.217
184	25.183	193	40.000	193	61.367
185	26.033	192	40.367	194	61.500
186	26.583	193	41.250	193	61.667
187	26.667	194	41.617	194	62.000
188	27.967	195	41.700	195	62.100



FigureVII-19 Régulateur PROLABO (2^{ème} essai)

Tableau VII-15

 $T_c = 200\text{ }^\circ\text{C}$ $P = 282.01\text{ W}$ $T_{amb} = 28\text{ }^\circ\text{C}$

T (°C)	t (min)						
28	0	183	19.767	200	33.967	199	47.117
30	450	184	20.133	199	34.400	198	47.283
40	1.233	185	20.500	200	35.417	197	47.450
50	1.833	186	20.600	201	35.667	196	47.650
60	2.367	187	20.733	200	36.183	197	47.817
70	2.900	188	20.867	199	36.350	198	48.117
80	3.500	187	21.450	200	36.933	199	48.283
90	4.133	188	22.283	199	37.300	198	48.983
100	4.750	189	22.483	200	37.367	197	49.117
110	5.467	190	22.633	201	37.733	198	49.467
120	6.283	191	22.883	200	38.333	199	49.733
129	7.100	190	23.333	199	38.467	198	50.283
128	7.883	191	24.050	198	38.600	199	51.100
129	8.233	192	24.383	199	38.867	200	51.367
130	8.383	193	24.633	200	39.000	199	51.567
135	9.183	194	24.800	201	39.350	198	51.883
140	10.000	193	25.383	200	39.483	199	52.567
145	10.583	192	25.567	201	41.500	200	52.650
150	11.433	193	26.017	202	41.633	201	52.717
155	12.233	194	26.200	201	42.167	202	52.850
160	12.800	195	26.317	200	42.267	201	53.033
165	14.283	196	26.633	199	42.383	200	53.350
170	14.800	195	27.117	198	42.533	199	53.483
173	15.317	196	27.783	199	42.867	200	53.933
172	15.600	197	27.883	200	42.967	201	54.383
173	16.117	196	28.417	199	43.750	200	54.833
174	16.317	197	29.233	198	43.850	201	55.150
175	16.500	198	29.633	197	44.083	202	55.933
176	16.800	197	29.900	198	44.383	201	56.333
177	16.967	198	30.717	199	44.650	200	56.600
178	17.067	197	31.533	200	45.083	201	57.250
179	17.217	196	31.717	199	45.533	202	57.433
180	17.333	197	32.117	198	45.800	201	58.067
179	17.700	198	32.217	199	46.383	200	58.267
180	18.500	199	32.417	200	46.517	199	58.500
181	18.733	198	32.900	201	46.650	200	58.867
182	18.933	197	33.067	200	46.733	201	59.017
183	19.050	198	33.717	201	46.800	200	59.867
184	19.217	199	33.817	200	46.900	199	60.083

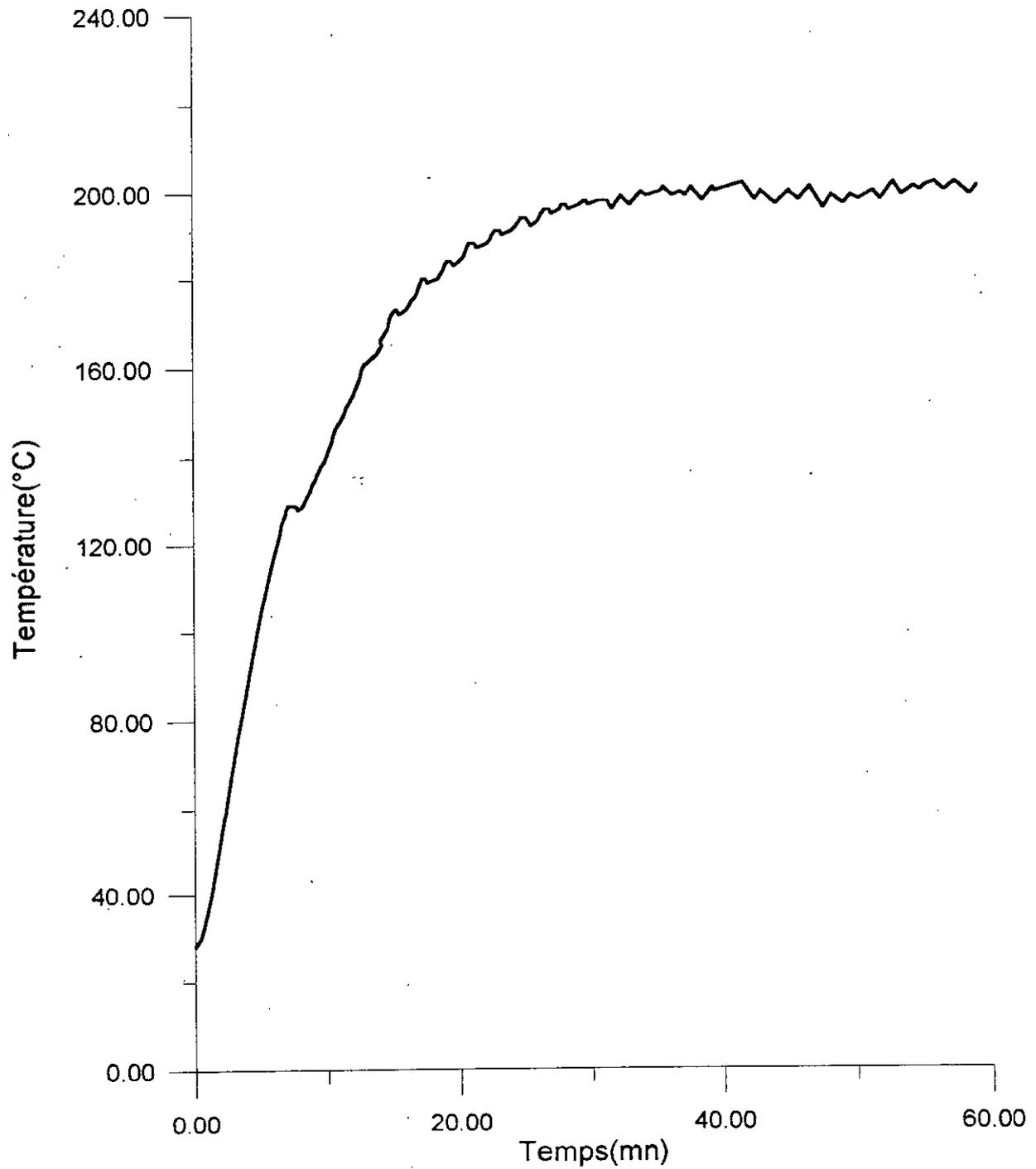


Figure VII-20 Régulateur PROLABO (3^{ème} essai)

Tableau VII-16
 $T_c = 200\text{ }^\circ\text{C}$ $P = 634.52\text{ W}$ $t_{amb} = 30\text{ }^\circ\text{C}$

T (°C)	t (min)						
37	0	201	15.450	217	22.167	229	28.967
40	0.450	202	15.583	218	22.400	228	29.100
50	0.867	204	15.667	219	22.517	227	29.217
60	1.100	205	15.800	220	22.617	228	29.583
70	2.233	206	15.900	221	22.683	230	29.750
80	2.617	207	16.067	222	22.750	231	29.667
90	3.367	206	16.267	223	22.817	232	29.950
100	4.000	205	16.483	224	22.983	234	30.283
110	4.467	204	16.600	223	23.350	233	30.600
115	5.167	203	16.750	222	23.533	232	30.667
121	5.533	204	17.033	221	23.767	231	30.783
129	5.900	205	17.167	223	24.267	230	31.083
140	7.100	207	17.267	224	24.333	231	31.400
150	7.633	208	17.333	225	24.433	232	31.500
157	8.100	209	17.400	226	24.567	233	31.633
158	8.217	201	17.467	225	25.033	234	31.733
157	8.317	211	17.533	224	25.283	233	32.017
158	8.717	212	17.700	223	25.450	232	32.500
159	8.850	211	18.167	222	25.583	231	32.633
160	8.967	210	18.550	223	25.950	230	32.667
170	9.567	209	18.733	224	26.033	229	32.750
180	10.833	210	18.917	225	26.100	228	32.900
182	11.433	211	19.017	226	26.167	229	33.150
181	11.483	212	19.100	227	26.250	230	33.300
180	11.600	214	19.217	228	26.367	231	33.366
181	11.917	215	19.267	229	26.500	232	33.450
182	11.983	216	19.317	230	26.667	233	33.517
183	12.033	217	19.433	229	26.883	234	33.683
186	12.200	216	19.833	228	26.967	233	34.250
188	12.317	215	20.167	227	27.067	232	34.400
189	12.400	214	20.317	226	27.183	231	34.600
190	12.533	213	20.433	225	27.250	230	34.667
189	13.217	214	20.617	224	27.400	229	34.800
190	13.483	215	20.717	225	27.533	228	34.883
191	13.667	216	20.783	226	27.683	229	35.083
193	13.800	217	20.867	227	27.783	230	35.133
194	13.867	218	20.933	228	27.850	232	35.233
197	13.950	219	21.000	229	27.933	234	35.333
198	14.150	220	21.083	230	28.000	236	35.450
199	14.233	221	21.283	231	28.050	237	35.533
198	14.867	220	21.733	232	28.217	236	35.800
199	15.217	219	21.883	231	28.567	235	36.283
200	15.333	218	21.950	230	28.850	234	36.383

T (°C)	t (min)						
232	36.550	236	44.383	235	51.717	231	59.050
231	36.717	235	44.550	236	51.800	232	59.417
232	37.033	234	44.983	237	51.950	233	59.483
233	37.167	233	45.250	236	52.283	234	59.550
234	37.250	232	45.317	235	52.367	235	59.600
235	37.333	231	45.417	234	52.500	236	59.733
236	37.400	230	45.483	232	52.667	235	60.233
237	37.450	231	45.983	233	52.933	234	60.400
238	37.533	232	46.067	234	53.017	233	60.517
237	37.700	233	46.117	235	53.117	232	60.667
236	38.267	234	46.200	236	53.250	231	60.733
235	38.350	235	46.250	235	53.600	230	60.900
234	38.500	236	46.350	234	53.667	231	61.117
233	38.683	237	46.700	233	53.767	232	61.250
234	38.967	236	46.917	232	53.883	233	61.333
235	39.100	235	47.083	231	54.033		
236	39.133	234	47.383	232	54.300		
237	39.183	233	47.533	233	54.383		
238	39.233	232	47.667	234	54.467		
239	39.283	231	47.750	235	54.500		
240	39.350	232	48.033	236	54.550		
241	39.417	233	48.533	237	54.617		
243	39.633	234	48.683	238	54.700		
242	39.967	233	48.867	239	54.783		
241	40.283	232	48.967	238	55.033		
240	40.433	231	49.033	237	55.133		
239	40.567	230	49.150	236	55.350		
238	40.650	229	49.233	235	55.483		
237	40.750	228	49.367	234	55.583		
238	41.033	229	49.567	233	55.683		
239	41.283	230	49.717	234	56.050		
238	41.833	231	49.783	235	56.167		
237	41.933	232	49.883	236	56.300		
236	42.083	233	49.933	237	56.433		
235	42.233	234	49.983	236	57.000		
236	42.617	235	50.167	235	57.050		
237	42.717	234	50.367	234	57.250		
238	42.883	233	50.550	233	57.400		
239	43.100	232	50.650	234	57.800		
238	43.283	231	50.783	235	57.883		
237	43.450	230	50.883	236	58.117		
236	43.633	231	51.417	235	58.483		
235	43.767	232	51.500	234	58.583		
234	43.983	233	51.600	233	58.750		
235	44.200	234	51.667	232	58.900		

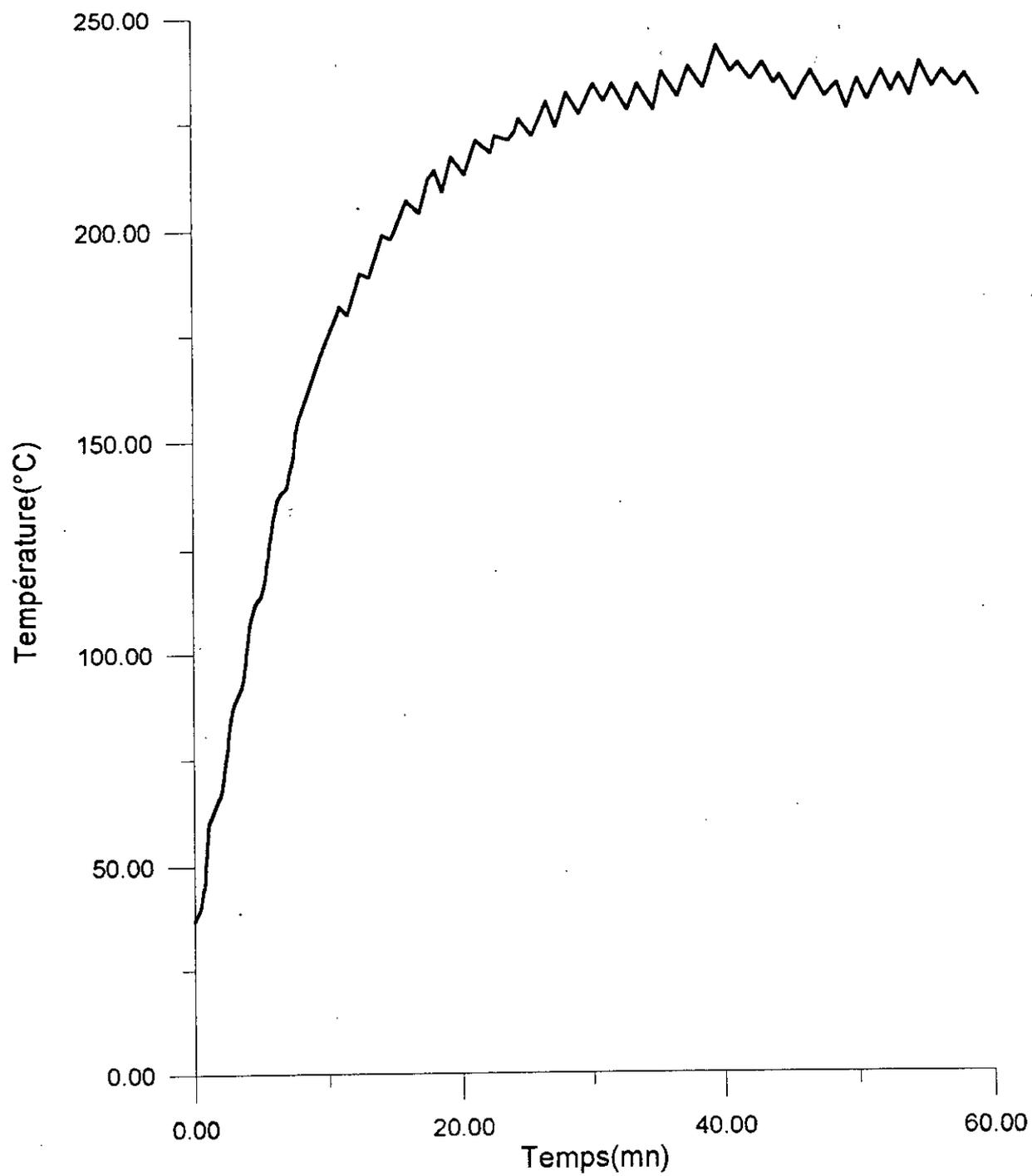


Figure VII-21 Régulateur PROLABO (4^{ème} essai)

DISCUSSION DES RESULTAS :**a)- Evolution de la température jusqu'à la température de consigne :**

Puissance de chauffe (W)	Temps de montée (min)	Vitesse de chauffe moyenne
158.83	— (*)	— (*)
215.91	— (*)	— (*)
282.01	33.97	5.06
634.52	15.33	10.63

(*) : On n'atteint pas La température de consigne .

CONCLUSION :

- On constate que les temps de montée de cette régulation beaucoup plus grands par rapport à ceux obtenus par la régulation par tout ou rien .
- Ce régulateur coupe la chauffe à plusieurs reprises avant d'atteindre la température de consigne , ce qui provoque les chutes de températures qui paraissent sur les graphes .
- Les mêmes conclusions de la régulation par tout ou rien peuvent être appliquées dans l'utilisation de ce régulateur . Pour une température de consigne de 200 °C on conseille une tension d'alimentation de 88V .

VII-4 QUATRIEME PARTIE

APPLICATION DE LA REGULATION ECHANTILLONNEE SUR UN BAIN-MARIE

VII-4-1 DESCRIPTIONS GENERALES :

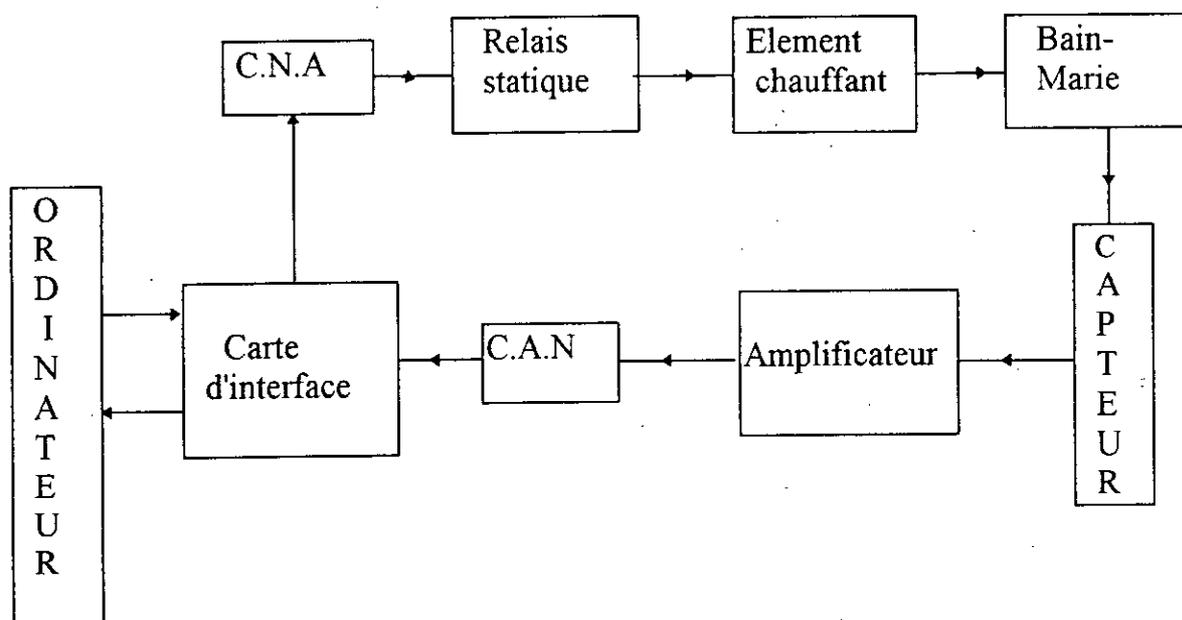


Figure VII-14. Schéma synoptique de la régulation de température pilotée par ordinateur .

La figure VII-14 représente un schéma synoptique du montage de la régulation de la température par ordinateur . Nous allons examiner de plus près chaque bloc :

- Le système du bain :

Il est constitué d'une enceinte thermique rectangulaire contenant 4 litres d'eau .

- Le capteur :

C'est un circuit intégré qui polarisé permet d'émettre une tension variable en fonction de la température .

- L'amplificateur :

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

- Le convertisseur Analogique-Numérique (CAN) :

Il transforme le signal analogique en un signal numérique .

- La carte d'interface :

La carte d'interface permet la transmission des informations du et vers l'ordinateur en réalisant la conversion série-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 .

-Le micro-ordinateur :

C'est le calculateur de process . Il a pour rôle la synthèse de la loi de commande à partir d'un programme établi .

-Le convertisseur Numérique-Analogique (CNA) :

Il convertie le signal numérique généré par la loi de commande en un signal analogique .

- 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 .

- L'élément chauffant :

Il est alimenté par le relais statique , et plongé dans la masse d'eau ($R = 40.39\Omega$) .

VII-4-2 REGULATION PAR TOUT OU RIEN :

On prend comme température de consigne : $T_c = 60\text{ }^\circ\text{C}$ et on effectue deux essais , l'un avec une puissance $P = 431.39\text{ W}$, l'autre avec une puissance $P = 587.17\text{ W}$. Les résultats obtenus sont portés aux tableaux et graphes ci-dessous :

Tableau VII-17
 1^{er} essai sur le bain : tout ou rien
 $T_c = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P = 431.39\text{ W}$ $T_{amb} = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$

T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)
27	0	58	17.033
28	0.733	59	17.733
29	1.317	60	17.950
30	1.767	61	18.000
31	2.100	62	18.250
32	2.317	61	22.417
33	2.783	60	23.583
34	3.050	59	24.283
35	3.300	58	24.617
36	3.433	59	25.317
37	3.767	60	25.533
38	4.033	61	25.583
39	4.333	62	25.833
40	4.433	61	30.000
41	4.700	60	32.167
42	4.917	59	31.867
43	5.167	58	32.200
44	5.333	59	32.900
45	5.500	60	33.117
46	5.800	61	33.167
47	6.083	62	33.417
48	6.333	61	37.583
49	6.550	60	38.750
50	6.830	59	39.450
51	7.250	58	39.783
52	7.500	59	40.483
53	7.600	60	40.700
54	7.817		
55	8.083		
56	8.217		
57	8.467		
58	8.783		
59	8.917		
60	9.133		
62	9.267		
63	9.517		
64	9.933		
63	10.250		
62	10.667		
61	14.833		
60	16.000		
59	16.700		

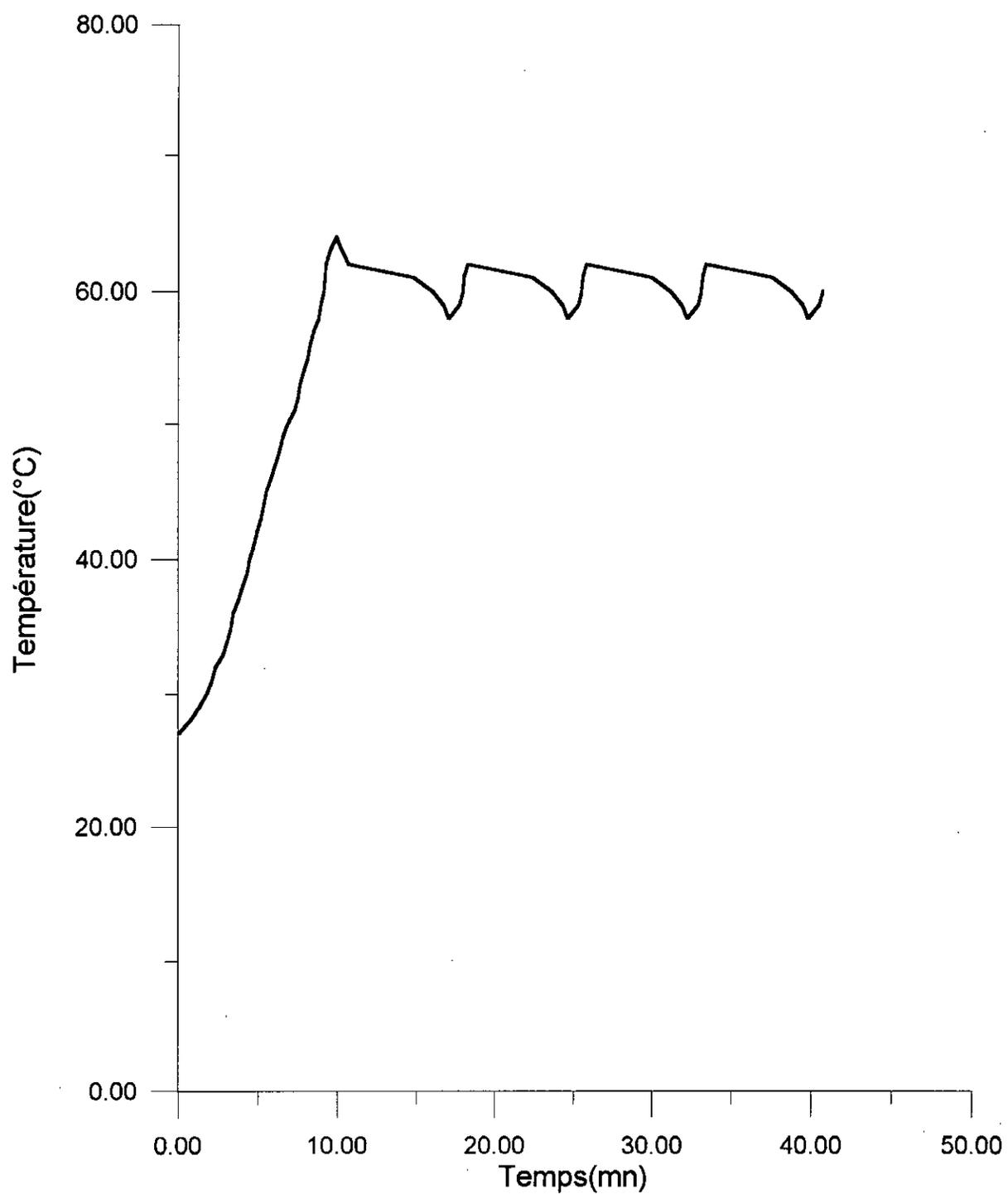


Figure VII-23 Régulation numérique tout ou rien du bain (1^{er} essai)

Tableau VII-18
2^{eme} essai sur le bain : tout ou rien
T_c = 60 °C P = 587.17 W T_{amb} = 26 °C

T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)
27	0	58	15.267
28	0.717	57	15.767
29	1.117	58	17.433
30	1.383	59	17.933
31	1.700	60	18.433
32	1.883	61	18.933
33	2.100	62	19.433
34	2.333	63	19.933
35	2.600	62	21.600
36	2.767	61	22.100
37	3.000	60	22.600
38	3.300	59	23.100
39	3.567	58	23.600
40	3.767	57	24.100
41	3.917	58	25.767
42	4.200	59	26.267
43	4.400	60	26.767
44	4.617	61	27.267
45	4.717	62	27.767
46	5.100	61	29.433
47	5.333	60	29.933
48	5.600	59	30.433
49	5.750	58	30.433
50	6.000	57	31.433
51	6.100	58	33.100
52	6.400	59	33.600
53	6.900	60	34.100
54	7.167		
55	7.200		
56	7.367		
57	7.650		
58	7.950		
59	8.133		
60	8.300		
62	8.367		
63	8.600		
64	9.150		
63	10.667		
62	11.250		
61	13.167		
60	14.267		
59	14.767		

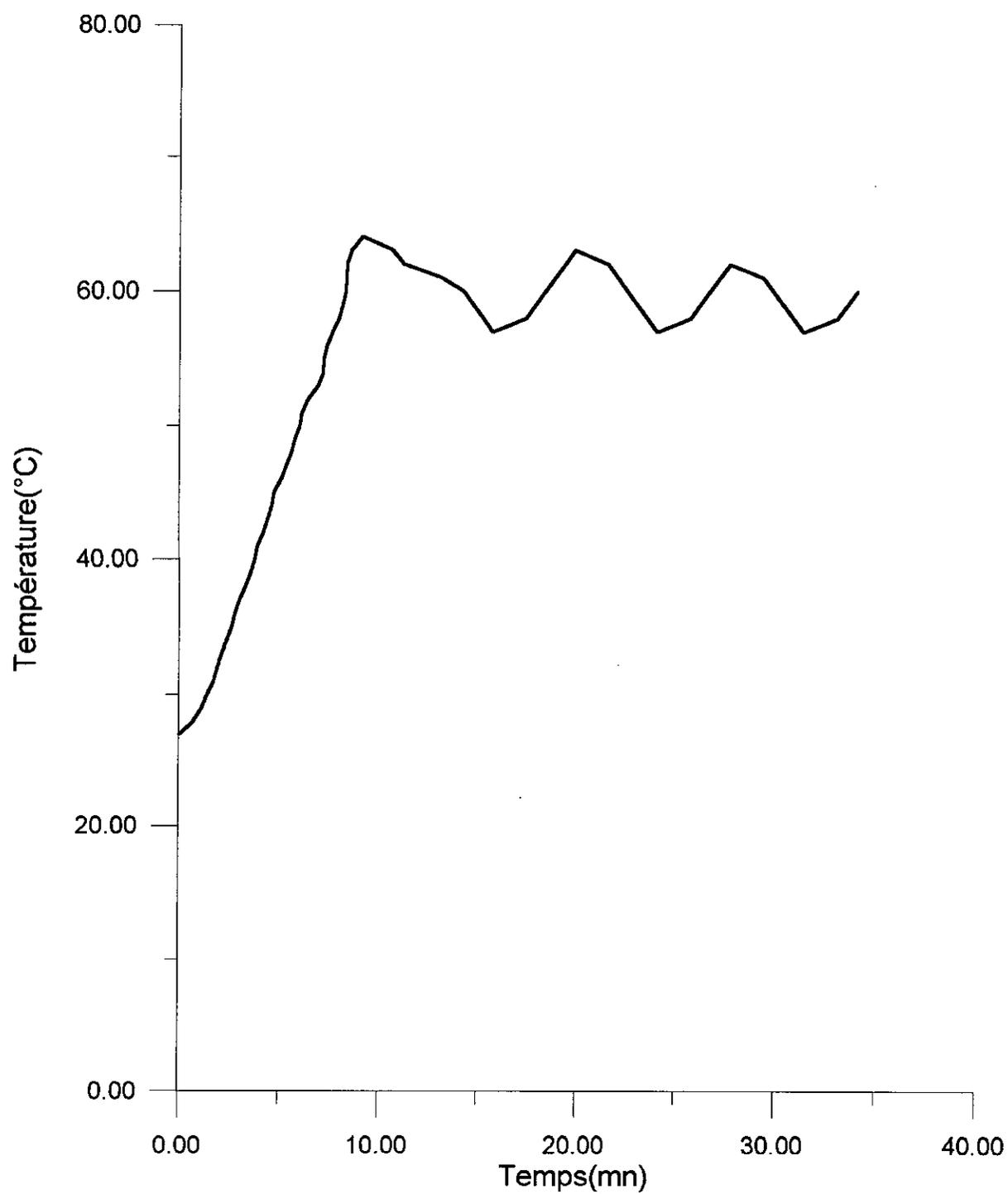


Figure VII-24 Régulation numérique tout ou rien du bain (2^{ème} essai)

DISCUSSION DES REULTAS :**a)- Evolution de la température jusqu'à la température de consigne :**

Puissance de chauffe (W)	Temps de montée (min)	Vitesse de chauffe moyenne (°C/min)
431.39	9.13	3.61
587.17	8.30	3.96

b)-Calcul des périodes et amplitudes :**P = 431.39 W :**

n° Période	Période (min)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
1	8.82	58	64
2	7.58	58	62
3	7.58	58	62
4	7.58	58	62

P = 587.17 W :

n° Période	Période (min)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
1	10.13	58	64
2	8.33	57	63
3	7.33	57	62

VII-4-3 REGULATION PROPORTIONELLE :

On réalise une régulation proportionnelle en utilisant les résultats obtenus lors de l'identification du système .

On a obtenu le paramètre de régulation $K_p = 162.072$.

On a étudié cette régulation avec deux températures de consigne :

$T_c = 32 \text{ }^\circ\text{C}$.

$T_c = 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Les résultats de ces essais sont portés aux tableaux et graphes donnés ci-dessous :

Tableau VII-19
 3^{ème} essai sur le bain : Régulation Proportionnelle
 $T_c = 32\text{ °C}$ $K_p = 126.072$ $T_{amb} = 25\text{ °C}$

T (°C)	t (min)		
22	0	35	132.933
23	0.717	34	143.967
24	1.000	33	156.850
25	1.200	32	160.850
26	1.450	31	167.517
27	1.750	30	174.267
28	1.833		
29	2.167		
30	2.333		
31	2.700		
32	2.767		
34	2.833		
35	2.917		
34	13.950		
33	26.833		
32	30.833		
31	37.500		
30	44.250		
29	45.650		
30	45.817		
32	45.850		
34	46.117		
35	46.200		
34	57.233		
33	70.117		
32	74.117		
31	80.783		
30	87.533		
29	88.767		
30	88.933		
32	88.967		
34	89.233		
35	89.317		
34	100.35		
33	113.73		
32	117.733		
31	124.400		
30	131.150		
29	132.38		
30	132.550		
32	132.583		
34	132.850		

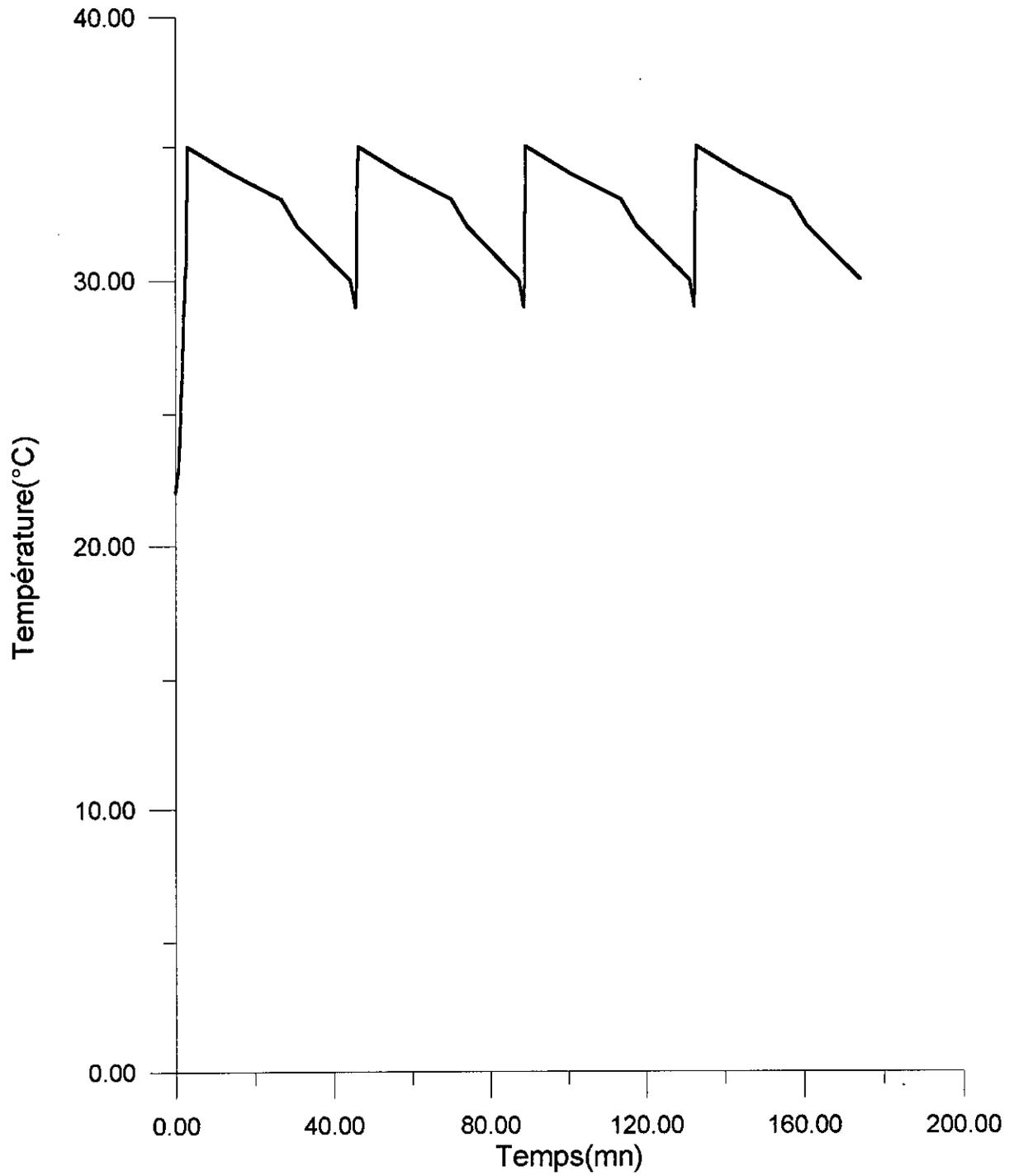


Figure VII-25 Régulation numérique proportionnelle du bain (3^{eme} essai)

Tableau VII-20
 4^{eme} essai sur le bain : proportionnelle
 $T_c = 40\text{ }^\circ\text{C}$ $K_p = 126.072$ $T_{amb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$

T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)
22	0	40	76.717
23	0.467	39	81.383
24	0.750	38	86.050
25	1.100	39	96.383
26	1.333	40	96.417
27	1.667		
28	1.750		
29	2.167		
30	2.333		
31	2.717		
32	3.000		
33	3.167		
34	3.400		
35	3.650		
36	3.833		
37	4.167		
38	4.333		
39	4.650		
40	4.667		
41	4.783		
42	4.800		
43	4.983		
42	13.650		
41	18.083		
40	19.417		
39	24.083		
38	28.750		
39	39.083		
40	39.100		
41	39.216		
42	39.233		
41	49.567		
40	50.900		
39	55.567		
38	60.233		
39	64.900		
40	64.917		
41	65.033		
42	65.050		
41	75.383		

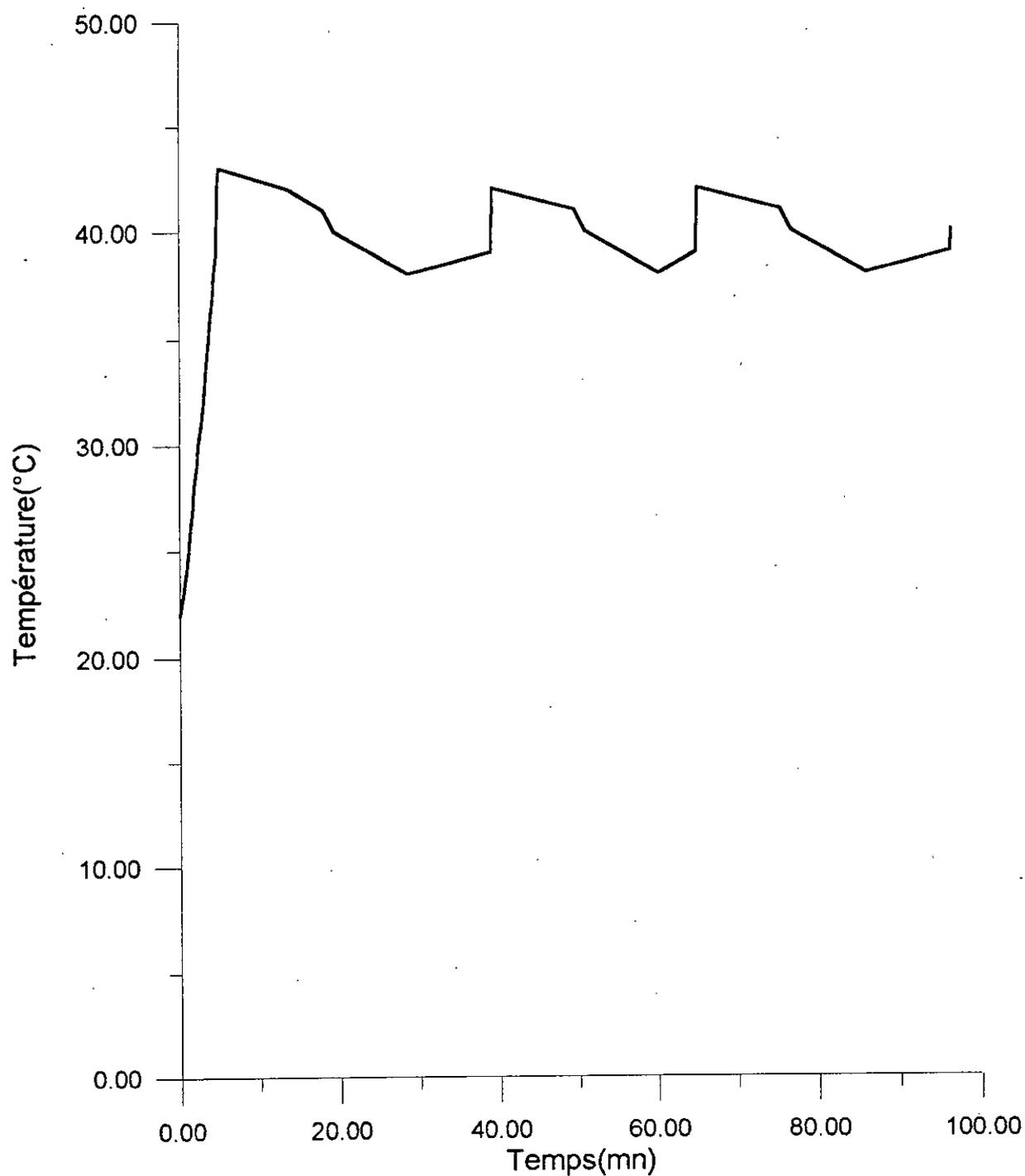


Figure VII-26 régulation numérique proportionnelle du bain (4^{ème} essai)

DISCUSSION DES RESULTAS ;**a)-Evolution de la température jusqu'à la température de consigne :**

Température de consigne (°C)	Temps de montée (min)	Vitesse de chauffe moyenne (°C/min)
32	2.77	3.61
40	4.67	3.85

b)- Calcul des périodes et des amplitudes :**Tc = 32 °C :**

n° Période	Période (min)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
1	43.08	29	35
2	43.11	29	35
3	43.62	29	35

Tc = 40 °C :

n° Période	Période (min)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
1	34.42	38	43
2	25.82	38	42
3	31.50	38	42

CONCLUSION :

- les premières périodes d'oscillation sont relativement grandes à cause du dépassement initial dû à la quantité de chaleur emmagasinée dans la masse thermique pendant la montée en température .

- 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 .

- Un système de refroidissement par circulation d'eau froide atténuerait les amplitudes et augmenterait ainsi la précision de la régulation thermique du bain-marie .

- Les conclusions obtenues lors de la régulation du four par tout ou rien peuvent être appliquées dans ce cas .

CONCLUSION

CONCLUSION GENERALE

Pour conclure , nous pouvons dire que notre projet nous a permis de toucher de plus près le domaine de la régulation pilotée par ordinateur , ainsi que l'établissement d'une méthode de travail pour effectuer une régulation d'une grandeur déterminée pour un système donné .

On a essayé de présenter une étude théorique qu'on espère être complète et utile aux étudiants de notre département et de les aider à bien comprendre les bases de la régulation pilotée par ordinateur qui est très employée de nos jours.

On souhaite pour notre département , l'acquisition de cartes d'interfaces d'origine , ainsi qu'un logiciel d'aide pour l'identification des systèmes , et ceci dans le but d'utiliser le programme qu'on a établi pour la régulation des différents paramètres des opérations du Génie Chimique tels que la pression , la température , le débit ...

Vu le manque de moyens matériels que connaît notre pays , et plus particulièrement notre département , nous pensons que le meilleur moyen de contourner ce type de problèmes passe par le recours à des logiciels qui permettront une économie d'argent appréciable ; notre projet en est le meilleur exemple .


```

LINE (34, 28)-(178, 58), 8, BF
LINE (26, 20)-(170, 50), 3, BF
LOCATE 3, 6: PRINT "Rgulateur P"
LINE (30, 94)-(218, 300), 8, BF
LINE (22, 86)-(208, 292), 3, BF
COLOR 3, 8
LOCATE 3, 37: PRINT "T(½C)"
Yc = 280 - INT(Tc * 2.8)
VIEW (630, 50)-(310, 330), 8, 3
LINE (0, Yc)-(320, Yc), 4, B

```

```

LOCATE 23, 68: PRINT " Temps (mn) "
LOCATE 12, 5: PRINT " Temperature "
LOCATE 13, 5: PRINT "-----"
LOCATE 14, 5: PRINT "* ½C *"
LOCATE 15, 5: PRINT "-----"
LOCATE 17, 8: PRINT " Temps "
LOCATE 18, 8: PRINT "-----"
LOCATE 19, 8: PRINT "* s *"
LOCATE 20, 8: PRINT "-----"
LOCATE 3, 49: PRINT "4"
LOCATE 3, 59: PRINT "8"
LOCATE 3, 69: PRINT "12"
LOCATE 3, 79: PRINT "16"
LOCATE 8, 6: PRINT " Puissance "
LOCATE 9, 6: PRINT "-----"
LOCATE 10, 6: PRINT "* % *"
LOCATE 11, 6: PRINT "-----"

```

```

FOR I% = 0 TO 280 STEP 28
LINE (0, I%)-(2, I%), 2, B
LINE (318, I%)-(320, I%), 2, B
NEXT I%
FOR j% = 1 TO 5
n% = 110 - (j% * 20)
LOCATE (2 + 4 * j%), 35: PRINT n%
NEXT j%
FOR j% = 0 TO 320 STEP 40
LINE (j%, 0)-(j%, 2), 2, B
LINE (j%, 278)-(j%, 280), 2, B
NEXT j%

```

```

'***** OUVERTURE DE LA VOIE DE COMMUNICATION *****
OPEN "COM1:4800,N,8,1" FOR RANDOM AS #1
RefB = -1 'temprature pour une tension d'entre de 0V
RefH = 100 'temprature pour une tension d'entre de 5V
'valeurs ajuster selon le rglage de l'ampli
K = 0
Pmax = 100

```

```

DO
'***** BOUCLE DE TEMPORISATION *****
ON TIMER(1) GOSUB 5 'pour une priode d'chantillonnage d'une seconde
TIMER ON
td = TIMER
WHILE ta < 1
ta = TIMER - td
WEND
END

```

```

'5 a% = INP(&H3F8) 'lecture sur le port E/S.
'Temperature du bain:
T = INT(a% * (RefH - RefB) / 250 + RefB)
e = Tc - T 'calcul de l'ereur et de la
'***** LA LOI DE COMMANDE *****
P = INT(Kp * e) IF P > Pmax THEN P = Pmax
OUT &H3F8, P 'sortie de p sur le port E/S
temps = K
LOCATE 10, 9: PRINT P
LOCATE; 14, 8: PRINT T
LOCATE 19, 10: PRINT temps
'***** Le trac des points *****
ycoord = 280 - INT(T * 2.8)
xcord = INT(K / 3)
'PSET (xcord,ycoord),5
CIRCLE (xcord, ycoord), 1, 10
K = K + 1
LOOP WHILE INKEY$ <> CHR$(27)
RETURN

```

```

'*****
'*
'* *** REGULATEUR TOUT OU RIEN ***
'*
'*****
'TR: CLS
CLEAR , , 20000

```

```

INPUT "Donnez la temprature de consigne:Tc ", Tc 'temprature du bain-marieINPUT
INPUT "puissance de chauffe(entre 1 et 100% de Pmax):", puissance

```

```

SCREEN 9: CLS
PRINT "T consigne :"; Tc
LINE (304, 340)-(640, 44), 5, BF
LINE (18, 28)-(246, 58), 8, BF
LINE (10, 20)-(238, 50), 3, BF
LOCATE 3, 4: PRINT " Rgulateur TOUT OU RIEN "
LINE (30, 94)-(216, 300), 8, BF
LINE (22, 86)-(208, 292), 3, BF
COLOR 3, 8
LOCATE 3, 37: PRINT "T( $\frac{1}{2}$ C)"
Yc = 280 - INT(Tc * 2.8)
VIEW (630, 50)-(310, 330), 8, 3
LINE (0, Yc)-(320, Yc), 4, B

LOCATE 23, 68: PRINT " Temps(mn) "
LOCATE 12, 5: PRINT " Temperature"
LOCATE 13, 5: PRINT "-----"
LOCATE 15, 5: PRINT "-----"
LOCATE 17, 8: PRINT " Temps"
LOCATE 18, 8: PRINT "-----"
LOCATE 19, 8: PRINT " * s *"
LOCATE 20, 8: PRINT "-----"
LOCATE 3, 49: PRINT "4"
LOCATE 3, 59: PRINT "8"
LOCATE 3, 69: PRINT "12"
LOCATE 3, 79: PRINT "16"

LOCATE 8, 6: PRINT " Puissance "
LOCATE 9, 6: PRINT "-----"
LOCATE 10, 6: PRINT " * % * "
LOCATE 11, 6: PRINT "-----"

FOR I% = 0 TO 280 STEP 28
LINE (0, I%)-(2, I%), 2, B
LINE (318, I%)-(320, I%), 2, B
NEXT I%
FOR j% = 1 TO 5
n% = 110 - (j% * 20)
LOCATE (2 + 4 * j%), 35: PRINT n%
NEXT j%
FOR j% = 0 TO 320 STEP 40
LINE (j%, 0)-(j%, 2), 2, B
LINE (j%, 278)-(j%, 280), 2, B
NEXT j%

'***** OUVERTURE DE LA VOIE DE COMMUNICATION *****
OPEN "COM1:4800,N,8,1" FOR RANDOM AS #1

RefB = -1 'Temperature pour une tension d'entre de 0V
RefH = 100 'Temperature pour une tension d'entre de 5V
'Valeurs ajuster selon le rglage de l'ampli
K = 0
'***** BOUCLE DE TEMPORISATION *****
ON TIMER(1) GOSUB AFFICHE 'pour une priode d'chantillonnage d'une seconde
TIMER ON
td = TIMER
WHILE ta < 1
ta = TIMER - td
WEND
END
' AFFICHE: a% = INP(&H3F8) 'lecture sur le po
' la temperature du bain:
T = INT(a% * (RefH - RefB) / 250 + RefB)
P = puissance
IF T >= Tc THEN P = 0
OUT &H3F8, P 'sortie de p sur le port E/S.
temps = K
LOCATE 10, 9: PRINT P
LOCATE 14, 8: PRINT T
LOCATE 19, 10: PRINT temps

'***** Le trac des points *****
ycoord = 280 - INT(T * 2.8)
xcoord = INT(K / 3)
'PSET(xcoord,ycoord),5
CIRCLE (xcoord, ycoord), 1, 10
K = K + 1
IF K > 20 THEN CLEAR , , 20000
LOOP WHILE INKEY$ <> CHR$(27)

RETURN

'*****
' *
' * ** REGULATEUR PI **
' *
'*****
'PI: CLS

```

```

CLEAR , , 20000
SCREEN 9
INPUT "Donnez la temprature de consigne:Tc", Tc
INPUT "Donnez les valeurs de Kp,Ki"; Kp, Ki

CLS
LOCATE 24, 8
PRINT " T consigne:"; Tc
LINE (304, 340)-(640, 44), 5, BF
LINE (34, 28)-(178, 58), 8, BF
LINE (26, 20)-(170, 50), 3, BF
LOCATE 3, 6: PRINT " Rgulateur PI"
LINE (30, 94)-(218, 300), 8, BF
LINE (22, 86)-(208, 292), 3, BF

COLOR 3, 8
LOCATE 3, 37: PRINT "T( $\frac{1}{2}$ C)"
Yc = 280 - INT(Tc * 2.8)
VIEW (630, 50)-(310, 330), 8, 3
LINE (0, Yc)-(320, Yc), 4, B

LOCATE 23, 68: PRINT "    Temps(mn)      "
LOCATE 12, 5: PRINT "    Temperature      "
LOCATE 13, 5: PRINT "-----"
LOCATE 14, 5: PRINT "*                 $\frac{1}{2}$ C          *"
LOCATE 15, 5: PRINT "-----"
LOCATE 17, 8: PRINT "    Temps          "
LOCATE 18, 8: PRINT "-----"
LOCATE 19, 8: PRINT " *                s          *"
LOCATE 20, 8: PRINT "-----"
LOCATE 3, 49: PRINT "4"
LOCATE 3, 59: PRINT "8"
LOCATE 3, 69: PRINT "12"
LOCATE 3, 79: PRINT "16"
LOCATE 8, 6: PRINT "    Puissance      "
LOCATE 9, 6: PRINT "-----"
LOCATE 10, 6: PRINT "*                %          *"
LOCATE 11, 6: PRINT "-----"
FOR i% = 0 TO 280 STEP 28
LINE (0, i%)-(2, i%), 2, B
LINE (318, i%)-(320, i%), 2, B
NEXT i%
FOR j% = 1 TO 5
n% = 110 - (j% * 20)
LOCATE (2 + 4 * j%), 35: PRINT n%
NEXT j%
FOR j% = 0 TO 320 STEP 40
LINE (j%, 0)-(j%, 2), 2, B
LINE (j%, 278)-(j%, 280), 2, B
NEXT j%

'***** Ouverture de la voie de communication *****
OPEN "COM1:4800,N,8,1" FOR RANDOM AS #1

RefB = -1 'Temprature pour une tension d'entre de 0 V
RefH = 100 'Temprature pour une tension d'entre de 5 V
'Valeurs...ajuster selon rglage de l'ampli.

K = 0
P1 = 0
e1 = 0
e2 = 0
Kpi = Kp + Ki
Pmax = 100
DO
'***** Boucle de temporisation *****
ON TIMER(1) GOSUB 25 'pour une priode d'chantillonnage d'une seconde
TIMER ON
td = TIMER
WHILE ta < 1
ta = TIMER - td
WEND
END
'25 a% = INP(&H3F8) 'lecture sur le port E/S.
'La temprature du bain:
T = INT(a% * (RefH - RefB) / 250 + RefB)
e = Tc - T 'calcul de l'erreur et de la
'***** La loi de commande *****
P = INT(P1 + Kpi * e - Kp * e2)
IF P > Pmax THEN P = Pmax
IF P < 0 THEN P = 0
OUT &H3F8, P 'sortie de p sur le port E/S.
P1 = P
e2 = e1
e1 = e
temps = K
LOCATE 10, 9: PRINT P
LOCATE 14, 8: PRINT T
LOCATE 19, 10: PRINT temps

```



```

'45 a% = INP(&H3F8)      'lecture sue le port E/S.
'La temprature du bain:
T = INT(a% * (RefH - RefB) / 250 + RefB)
e = Tc - T      'calcul de l'erreur et de la
'***** La loi de commande *****
P = INT(P1 + Kpid * e - Kpd * e1 + Kd * e2)
IF P > Pmax THEN P = Pmax
IF P < 0 THEN P = 0
OUT &H3F8, P      'sortie de p sur le port E/S.
P1 = P
e2 = e1
e1 = e
temps = K
LOCATE 10, 9: PRINT P
LOCATE 14, 8: PRINT T
LOCATE 19, 10: PRINT temps

'***** Le trac des points *****
ycoord = 280 - INT(T * 2.8)
xcoord = INT(K / 3)
'PSET (xcoord,ycoord),5
CIRCLE (xcoord, ycoord), 1, 10
K = K + 1
LOOP WHILE INKEY$ <> CHR$(27)
RETURN

END

```

BIBLIOGRAPHIE

- ASTROM " *Computer controlled systems* "
(Ed. Prentice hall International . New York 1990)
- BENTOUNSI - HASSANI " *Elaboration d'un régulateur numérique autonome pour différentes applications au laboratoire de physique* "
(PFE Juin 1985) E.N.P
- BOUHELIT - HADEF " *Réalisation pratique d'un régulateur de température* "
(PFE Juin 1983) E.N.P
- C. BOZZO " *Correcteurs numériques* "
(*Techniques de l'ingénieur R 7420*)
- M. BUHLER " *Réglage échantillonné . Vol 1* "
(Ed. Presses polytechniques Romandes . Lausanne 1986)
- N. M. CEAGLSKE " *Automatic process control for chemical engineering* "
(Ed. Jhon wiley & Sons . New York 1963)
- C.E.T.I.M " *Les régulateurs industriels* "
(Ed. CETIM . Paris 1991)
- O. DINDELEUX " *Technique de la régulation industrielle* "
(Ed. Eyrolles . Paris 1983)
- C. DELANNOY " *Les fichiers en basic sur micro - ordinateur* "
(Ed. Eyrolles . Paris 1985)
- P. DESHIZEAUX " *Langage de programmation industrielle* "
(Ed. Technique de l'ingénieur R 565)
- C. FOULARD " *Algorithme de la commande par ordinateur* "
(Ed. Technique de l'ingénieur R 7562)
- GHEZAL " *Etude et réalisation d'un programmeur de température à l'aide d'un micro - ordinateur* "
(PFE Juin 1983) E.N.P
- O. HACHOUR " *Régulation électronique pour fours électriques chauffage par résistance*)
(PFE Juin 1982) E.N.P

- HAMLA - ZAHZOUH " *Etude et réalisation d'un régulateur de température avec amélioration de sa dynamique* "
(PFE Juin 1984) E.N.P
- J. HEURTIN " *Chauffage par effet joule* "
(Ed. Technique de l'ingénieur D 824)
- W. LUYBEN " *Process modeling simulation and control for chemical engineering* "
(Ed. Mac Graw Hill .USA 1990)
- L. MARET " *Régulation automatique* "
(Ed. Presses polytechniques Romandes . Lausanne 1987)
- P. NASLIN " *Technologie et calcul pratique des systèmes asservis* "
(Ed. Dunod . Paris 1988)
- NEDJRAOUI " *Régulateur électronique d'un four électrique* "
(PFE Juin 1977) E.N.P
- PASCHIS " *Fours électriques industriels* "
(Ed. Dunod . Paris 1986)
- J. RIOUT " *Capteurs industriels , technologie et méthode de choix* "
(Ed. CETIM . Paris 1986)
- M. RIVOIRE - J. FERRIER " *Cour d'automatique* "
(Ed. Chihab-Eyrolles . Alger 1994)