

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Departement: de Genie Mecanique

المكنة
PROJET DE FIN D'ETUDES
E. POLYTECHNIQUE
HEQUE

SUJET

Adaptation du Régulateur au
comportement dynamique d'un
Procédé Thermique

Proposé Par :
A WERNER

Étudié Par :
Djamel BOUZIT

Dirigé Par :
Andrzej WERNER

PROMOTION
JUN 1985

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم و البحث العلمي

MENISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Departement de Genie Mecanique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

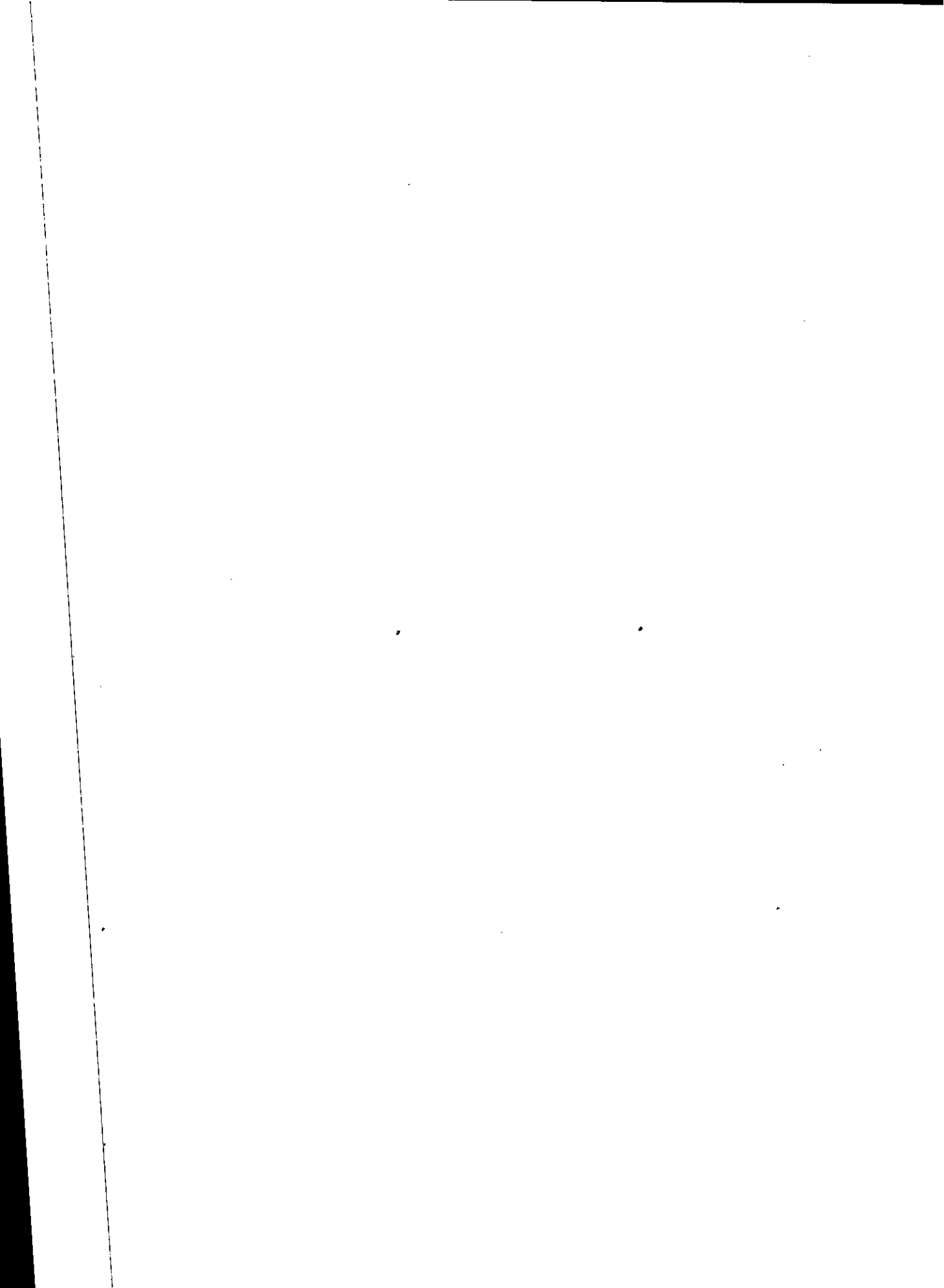
Adaptation du Régulateur au
comportement dynamique d'un
Procédé Thermique

Proposé Par :
A. WERNER

Etudié Par :
Djamel BOUZIT

Dirigé Par :
Andrzej WERNER

PROMOTION
JUN 1985



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

...وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ عَلَيْهِ تَوَكَّلْتُ وَإِلَيْهِ أُنِيبُ.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

- * A mon père et ma mère pour leurs
- * sacrifices afin que mes études
- * aboutissent,
- * A mes frères et soeurs,
- * A mes grands parents,
- * A tous ceux qui croient en DIEU
- * ALLAH et en son envoyé Mohamed

Je dédie ce modeste travail

Djamel

Je tiens à remercier ici, tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce projet, particulièrement mon père et ma soeur pour leur aide matérielle précieuse et mon oncle Mohamed.M pour ses conseils pratiques.

Je réitère mes remerciements et ma reconnaissance à M. Andrzej WERNER pour son suivi et les conseils qu'il ma prodigué.

Que tous ceux qui ont donné le meilleur d'eux même pour contribuer à ma formation d'ingénieur trouvent ici l'expression de ma vive reconnaissance.

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

وزارة التعليم العالي
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Département: GENIE MECANIQUE
Promoteur: Andrzej WERNER
Élève Ingénieur: Djamel BOUZIT

دايرة : هندسة ميكانيكية
موجه : اندراي فيرنير
تلميذ مهندس : جمال بوزيت

الموضوع: تكثف مُنظَّم للتحكم الديناميكي لهيُورَة حرارية .
الملخص: يتمثل هذا المشروع ، قبل كل شيء في إعادة تقييم نُخنة
اختبار منظم درجة حرارة فرن .
إن جميع عناصره ، بعد تهيئتها ، ستستعمل لدراسة
التحكم الديناميكي لهيُورَة الحرارة . انطلاقا من هاته النتائج
نحدد قيم العوامل الملائمة للمنظم .
هذه النخنة قد هيئت لتستعمل لأغراض تربوية وحتى
لبحوث .

Subject: Adaptation du régulateur au comportement dynamique d'un procédé thermique.

Résumé: Ce projet consiste avant tout, en une remise en valeur d'un banc d'essai de régulation de température d'un four.

Ses différents éléments, une fois mis en marche, serviront à l'étude du comportement dynamique du processus thermique. Sur cette base on détermine les affichages adéquats des régulateurs.

Ce banc est destiné à servir à des fins pédagogiques et à d'éventuelles recherches.

Subject: Controller adaptation to the dynamic behaviour of a thermal process.

Abstract: This work consists first, in regaining a furnace temperature control stand.

All its elements, set in action again, will be used for studying the dynamic behaviour of the thermal process. A right setting of the controller is based on the results of these tests.

This stand is destined for didactic purposes and for some researches too.

S O M M A I R E

AVANT-PROPOS	1
I- INTRODUCTION	2
I-1 Présentation du banc d'essai et son utilité dans l'école	22
I-2 Description générale du problème	2
I-3 Définitions des symboles utilisés	3
II- GENERALITES	4
II-1 Rappels sur les différentes actions du régulateur	4
II-1-1 Action "P"	
II-1-2 Action "PI"	
II-1-3 Action "PD"	
II-1-4 Action "PID"	
II-1-5 Régulation par "tout ou rien"	
Conclusion	
II-2 Identification de processus	13
II-2-1 Methode de STREJC	
II-2-2 Methode de BROIDA	
II-2-3 Identification de système intégrateur du n ^{ième} ordre	
III- DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI	16
III-1 Maquette du processus	16
III-2 Thermomètre à résistance	16
III-2-1 Principe de fonctionnement	
III-2-2 Caractéristiques	
III-3 Régulateur	17
III-3-1 Traitement du signal	
III-3-2 Module "Tout ou Rien"	
III-3-3 Module "proportionnel"	
III-3-4 Impulsionneur et commande du circuit de chauffage	
III-3-5 Module "integral"	
III-3-6 Amplificateur amortisseur	
III-3-7 Module "dérivé"	
III-4 Enregistreur multivoies	20
III-4-1 Principe de fonctionnement	
III-4-2 Caractéristiques techniques	
IV- MISE EN MARCHÉ DU BANC D'ESSAI	23
IV-1 Circuit de refroidissement	23
IV-2 Régulateur	23
IV-2-1 Traitement du signal	
IV-2-2 Module "proportionnel"	
IV-2-3 Impulsionneur	
IV-2-4 Module "integral"	
IV-2-5 Entretien du régulateur	

IV-3 Enregistreur	28
IV-3-1 Adaptation de l'enregistreur à nos besoins	
IV-3-2 Entretien de l'enregistreur	
V- ETUDE DU PROCESSUS THERMIQUE	38
V-1 Analyse théorique du comportement dynamique du processus	38
V-2 Analyse expérimentale du comportement dynamique du processus	41
V-2-1 Influence de la charge sur la grandeur réglée	
V-2-2 Le gain minimum du régulateur pour satisfaire aux exigences de précision	
V-2-3 Dynamique de la boucle fermée	
V-2-4 Assimilation du processus à un élément intégral	
V-3 Identification du processus thermique	44
VI- DETERMINATION DES CONFIGURATIONS OPTIMALES D'AFFICHAGE	48
VI-1 Critères de qualité de régulation	48
VI-2 Critères d'optimisation	48
VI-3 Méthodes d'optimisation	49
VI-3-1 Règles d'ajustement	
VI-3-2 Règles de ZIEGLER-NICHOLS	
VI-4 Détermination des affichages des régulateurs	50
VI-5 Essais vérifiant les résultats	51
Conclusion	
VII- PROPOSITIONS POUR L'UTILISATION DU BANC D'ESSAI	54
TP-1 Régulation par "tout ou rien"	54
TP-2 Régulation par action "P"	57
CONCLUSION	61
Annexe-A Utilisation du régulateur	
Annexe-B Adresses utiles	
BIBLIOGRAPHIE	

A V A N T - P R O P O S

Le développement de la régulation automatique a contribué pour une part importante aux progrès des industries. Elle leur apporte entre autres une économie d'énergie, la suppression de tâches manuelles serviles et une rapidité d'exécution avec diminution de risques d'erreur.

Particulièrement, les progrès dans la régulation des processus thermiques ont une importance croissante, tant parce qu'ils conditionnent la qualité des produits finis que pour les économies d'énergie. C'est le cas des fours industriels dont les applications les plus courantes sont le réchauffage, le traitement thermique ou la fusion. D'ailleurs, la conduite des fours de fusion conserve sa délicatesse à nos jours, et exige une régulation de température très rigoureuse, car la température optimale du métal liquide est souvent très proche de la sauvegarde de la voute. Quoique plus petits et construits différemment, les autres demandent une régulation aussi performante.

L'un des problèmes auxquels on se heurte dans ce domaine, est la méconnaissance exacte du processus à contrôler ainsi que son comportement lors de la variation de la charge.

Ceci a amené les spécialistes à concevoir des maquettes stimulant les processus industriels tout en présentant des temps de réponse faibles, pour pouvoir étudier le comportement dynamique et statique ainsi que le degré d'influence des perturbations.

I - INTRODUCTION

I-1 PRESENTATION DU BANC D'ESSAI ET SON UTILITE DANS L'ECOLE

Le département de genie chimique possède un banc d'essai de régulation de température d'un four. Il a été prévu pour effectuer des manipulations pendant les heures de travaux pratiques qui illustrent les théories enseignées dans les cours de régulation industrielle.

Ce banc comprend: fig I-1

- Un système thermique: c'est une maquette simulant un four chauffé électriquement, refroidit par de l'eau, à débit variable, pour permettre de modifier à volonté le processus.
- Un système de régulation: c'est un régulateur comportant un panneau de bornes servant au câblage des connections souhaitées, allant d'une simple connection "toutou rien" jusqu'à l'action proportionnelle-intégrale-dérivée.
- Un enregistreur multivoies: celui-ci sert à donner les variations de la température du four (grandeur réglée) et la puissance de chauffage (grandeur réglante).

I-2 DESCRIPTION GENERALE DU PROBLEME

Grossomodo, le projet consiste en une description du banc d'essai, sa mise en marche, puis de son exploitation pour l'adaptation du régulateur au comportement dynamique d'un procédé thermique.

Anormalement, la description à une grande importance dans ce travail, car le banc d'essai étant non utilisé depuis longtemps, a été trouvé sans prescription d'emploi ou autres. C'est pourquoi, de nombreux essais doivent être faits pour révéler son état et ses caractéristiques.

La mise en marche nécessite une grande prudence vu la fragilité des composants électroniques qui le constituent.

Quant à l'exploitation du banc, un très grand choix d'essais se présente devant nous, et plusieurs orientations sont possibles. On a choisi ici d'identifier le processus thermique puis de choisir le régulateur adéquat avec ses paramètres optimaux. On donnera ensuite quelques propositions de travaux pratiques sur ce banc.

I-3 DEFINITIONS DES SYMBOLES UTILISES

- T : grandeur réglée (sortie du procédé) = température du four
- P : grandeur réglante (entrée du procédé) = puissance de chauffage
- Θ : grandeur d'entrée du régulateur = signal d'écart entre température mesurée du four et température de consigne
- V : grandeur de sortie du régulateur = signal à courant continu, dont la variation fait varier la puissance de chauffage
- \bar{W}_s : grandeur perturbatrice = température d'entrée de l'eau de refroidissement
- \dot{m} : charge du système = débit d'eau de refroidissement
- τ : retard pur = délai après lequel on constate un démarrage de la variation de la grandeur de sortie, quand on applique un échelon à la grandeur d'entrée du procédé
- Z_r : temps de réponse = délai qui sépare l'application d'un échelon et le moment où la réponse indiciaire atteint un certain pourcentage de sa valeur finale
- T_1 : constante de temps du procédé si on le représente par un élément à capacité
- K_p : gain proportionnel du régulateur = c'est la variation de la grandeur réglante produite par une variation d'une unité de l'écart
- BP: bande proportionnelle = c'est la valeur de l'écart qui fait passer la grandeur réglante d'un extrémum à l'autre de la bande active
- T_i : constante de temps d'intégration du régulateur
- T_d : constante de temps de dérivation du régulateur

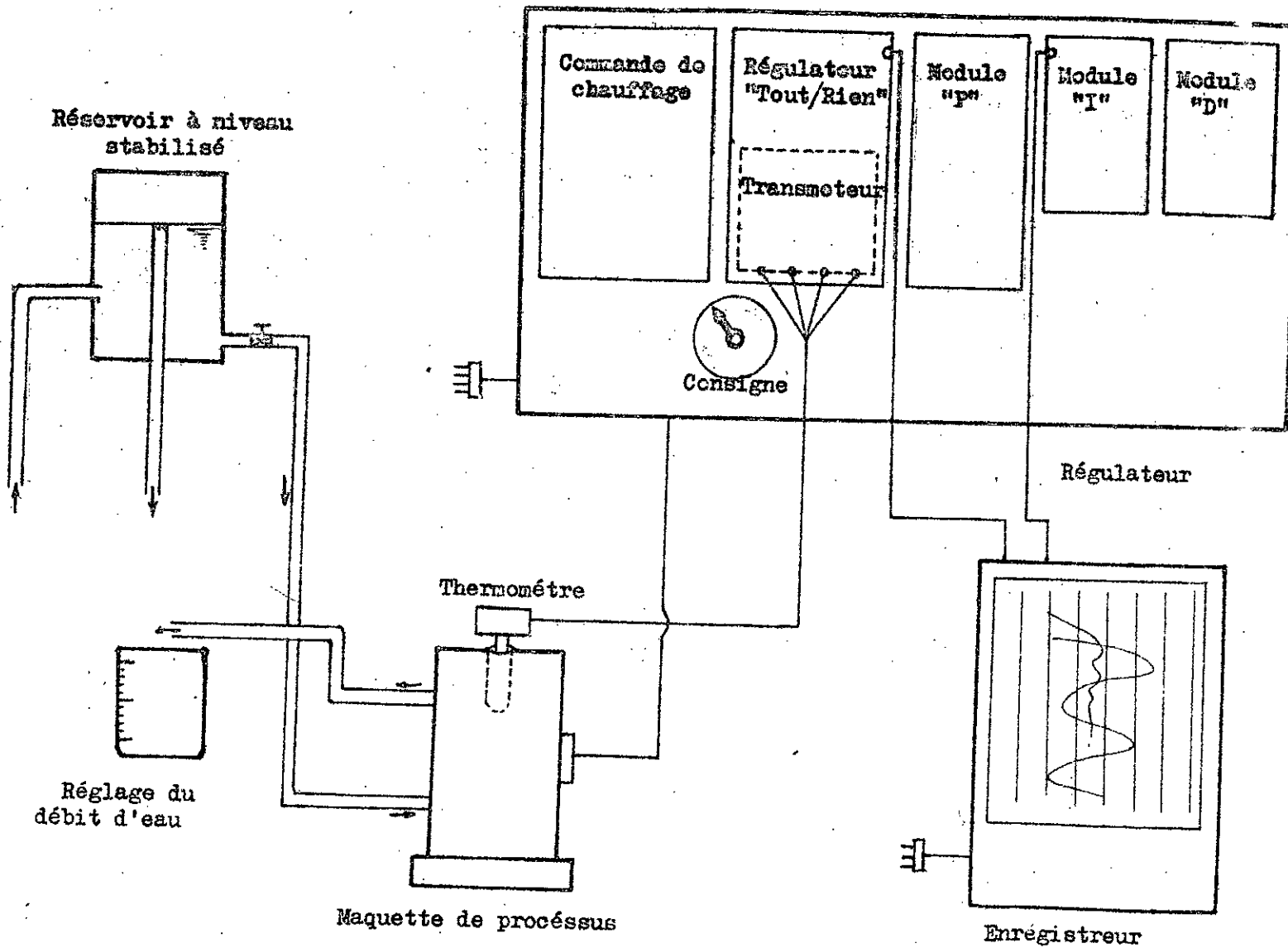


Fig I-1 SCHEMA SIMPLIFIE DU BANC D'ESSAI

II. GENERALITES

II.1 RAPPELS SUR LES DIFFERENTS REGULATEURS P,I,D

II.1.1 Régulateur à action proportionnelle

-Définition :

Dans ce mode de régulateur il y a une relation linéaire entre la valeur de l'écart (signal d'entrée) et la grandeur de sortie du régulateur .

-Régulateur électronique :

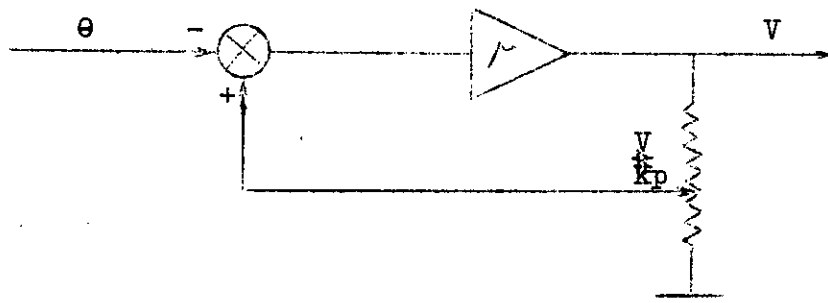


fig II.1.1

θ : Signal d'écart (tension proportionnelle à (tp° consigne - tp° mesurée)

V : Grandeur de sortie .

μ : Gain d'amplification , négatif et très grande valeur absolue .

$\frac{V}{Kp}$: Signal de retour .

Kp: Gain du régulateur " p "

Le signal de la boucle de retour est sommé au signal d'écart pour être amplifié et donner la grandeur de sortie V .

Le signe (+) du sommateur sert à conserver le signe du du signal V/Kp , du au fait que le gain est négatif .

La fonction de transfert de ce régulateur s'ecrit :

$$V = \frac{Kp}{Kp \mu - 1} \theta$$

Et comme le gain μ est très grand devant Kp (par construction) on néglige Kp/μ devant 1 dans l'équation précédente qui devient

$$V = - Kp . \theta$$

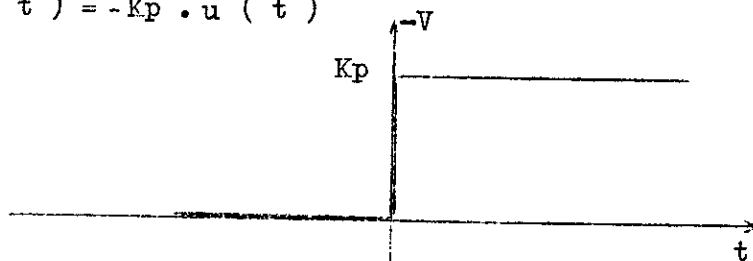
-Réponse indicielle :

On applique un échelon unité à l'entrée du régulateur :

$$u(t) = 1 \cdot u(t) \quad \begin{array}{l} u(t) = 0 \quad t < 0 \\ u(t) = 1 \quad t \geq 0 \end{array}$$

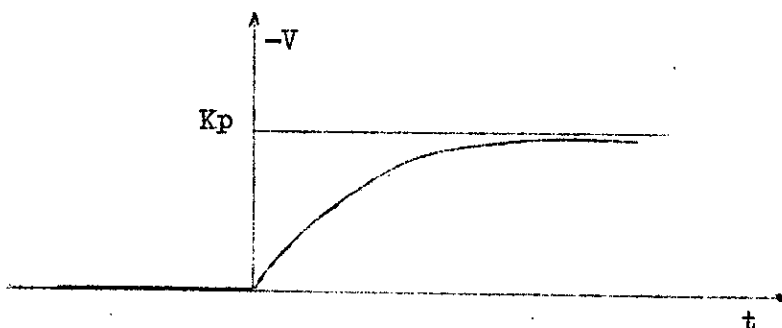
La réponse sera de la forme :

$$v(t) = -K_p \cdot u(t)$$



-Cas réel :

En pratique, la variation de la grandeur de sortie ne s'effectue pas au même temps que la variation de l'écart, et la valeur ne sera atteinte qu'après un temps, appelé " temps de réponse ".



-Propriétés :

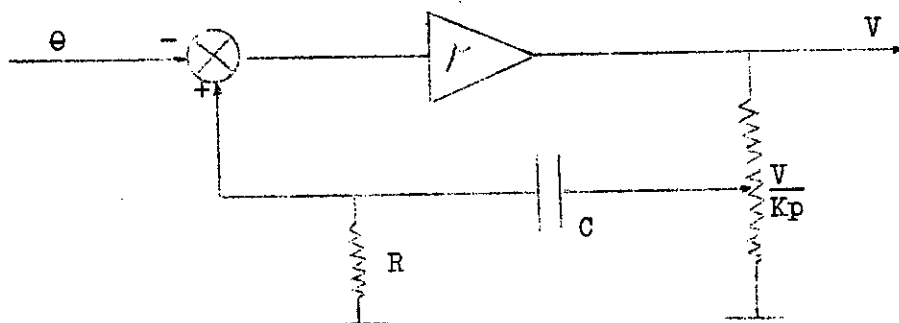
En boucle fermée, la régulation " P " laisse subsister un écart statique en régime permanent c'est à dire, il subsisterait une différence entre la grandeur réglée et la grandeur prescrite .

II.1.2 Régulateur à action proportionnelle-intégrale

-Définition de l'action " I " :

Dans ce mode de régulation la grandeur de sortie est proportionnelle à l'intégrale de l'écart (par rapport au temps).

-Régulation électronique :



C. Capacitance

R. Résistance

fig II.1.2

La fonction de transfert de ce régulateur s'écrit :

$$V = \frac{K_p}{\int} - \frac{K_p}{1 + s \cdot CR} \theta$$

Avec la même remarque que précédemment ($\lambda \gg K_p$) on a :

$$V = -K_p \left(1 + \frac{1}{s \cdot CR} \right) \cdot \theta$$

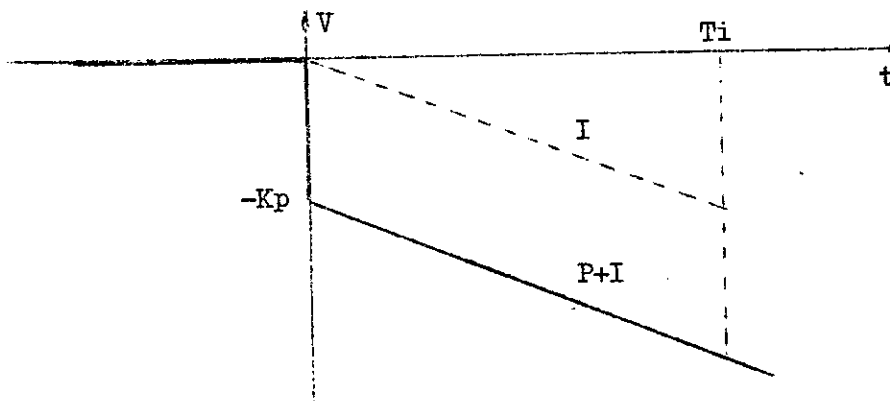
On peut identifier CR comme étant égale à la constante de temps d'intégration T_i

-Réponse indicielle :

On soumet le système à un échelon unité .

La réponse sera de la forme .

$$V(t) = -K_p - \frac{K_p}{T_i} t$$



-Cas réel :

D'après la réponse indicielle théorique ,l'action " P.I " ne présente pas de caractéristique statique ,mais en pratique si l'on maintient l'échelon unité, la grandeur de sortie va en butée (c'est la saturation).

-Propriétés :

L'action du régulateur " I " dans la boucle fermée d'asservissement , impose un retour exacte de la grandeur réglée à la valeur prescrite ,avec des oscillation tant que l'écart persiste .

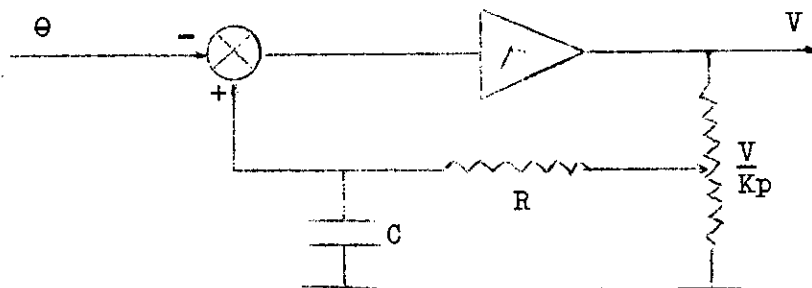
L'action " I " a donc puissamment l'avantage d'éliminer l'écart statique .

II.1.3 Régulateur proportionnel - dérivé

-Définition de l'action "D "

Dans ce mode de régulateur la grandeur de sortie est proportionnelle à la dérivée de l'écart ,par rapport au temps .

-Régulateur électronique :



La fonction de transfert de ce régulateur ,après simplification s'écrit

$$V = - K_p (1 + C.R s) \theta$$

On peut identifier CR comme étant égale à la constante de temps de dérivation T_d .

-Réponse indicielle :

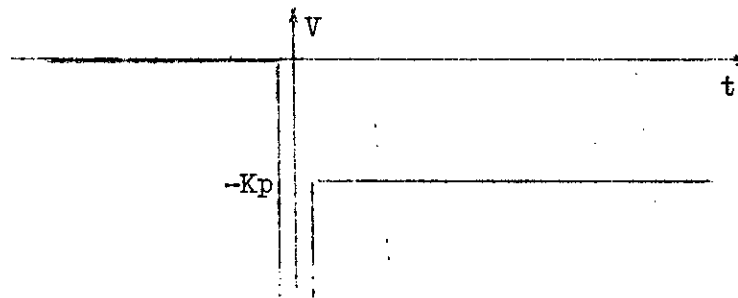
On soumet le système à un échelon de transformée $\theta (s) = 1/s$

La réponse sera $V (s) = - \frac{K_p}{s} - T_d \cdot K_p$

La transformée inverse de LAPLACE donne :

$$V(t) = -K_p - T_d K_p \delta(t)$$

ou $\delta(t)$ est l'impulsion de DIRAC



-Cas réel :

Pratiquement, une telle réponse est impossible à obtenir.

On se rapproche de la réalité en tenant compte de l'élément $\frac{1}{1 + Z_d s}$ dans la fonction de transfert du régulateur qui devient

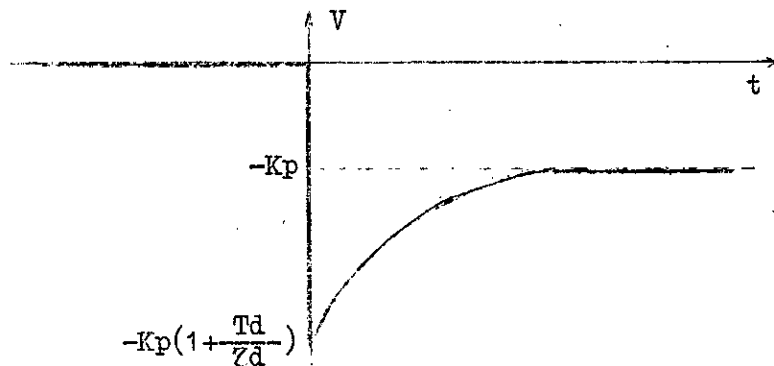
$$V = -K_p \left(1 + \frac{T_d s}{1 + Z_d s} \right)$$

ou Z_d - constante due à l'inertie de l'élément.

Toute fois la valeur de Z_d doit rester très faible pour approcher la transmittance idéale du régulateur " P D " .

La réponse indicielle sera dans ce cas :

$$V(t) = -K_p - K_p \frac{T_d}{Z_d} e^{-t/Z_d}$$



-Propriétés :

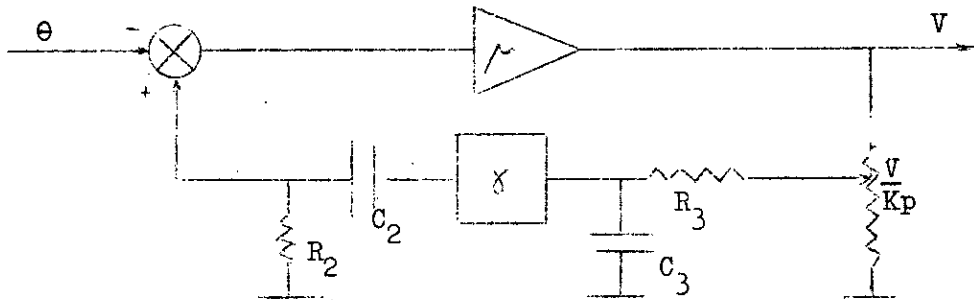
Dans le le régulateur P + D de boucle fermée, l'action D à l'a l'avantage de permettre l'augmentation du gain proportionnel (qui a pour but de diminuer l'écart statique) sans produire des oscillations excessives de la grandeur réglée .

II.1.4 Régulation proportionnel - intégral - dérivé :

-Définition :

C'est la combinaison des 3 modes d'action .

-Régulateur électronique :



Amplificateur - transmetteur : δ

Il transmet le signal de la première partie de la boucle de retour à la 2^{ème} après l'avoir amplifié , en évitant toute interaction entre ces 2 parties .

Comme précédemment après quelques manipulations algébriques on aboutit à la fonction de transfert suivante :

$$V = - K_p \left(1 + \frac{C_3 R_3}{C_2 R_2} + \frac{1}{s C_2 R_2} + s C_3 R_3 \right) \theta$$

En posant $T_d = R_3 \cdot C_3$ et $T_i = R_2 \cdot C_2$

L'équation précédente devient :

$$V = K_p \left(1 + \frac{T_d}{T_i} + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \theta$$

On remarque que le facteur d'action proportionnelle est devenu $K'_p = K_p \left(1 + T_d / T_i \right)$, il y a donc interaction des affichages .

-Réponse indicielle :

Comme déjà vu ^{pour} le régulateur P D , on considère la fonction de transfert réelle à cause de l'action D

$$V = - K_p \left(1 + \frac{T_d}{T_i} + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \tau s} \right) \theta$$

On applique un échelon unité $\theta = 1.u(t)$, La réponse est évidemment régie par l'équation :

$$V(t) = -K_p \left(1 + \frac{T_d}{T_i} + \frac{1}{T_i} t + \frac{T_d}{Z_d} e^{-t/Z_d} \right)$$

-Propriétés :

Il est facile de voir que le régulateur P,I,D profite des avantages des 3 actions P,I,D quand leur paramètres sont judicieusement choisis .

CONCLUSION

Chaque mode de régulation cité précédemment peut s'adapter à des processus particuliers présentant certaines caractéristiques bien particulières .

Par ailleurs , en considérant les propriétés évoquées de chaque régulation il est logique de se demander pourquoi le mode d'action P,I,D n'est pas utilisé exclusivement puisque il s'adapte à tous les processus avec efficacité et donne une stabilisation rapide de la grandeur réglée , avec un écart permanent nul . La raison est que cette solution est onéreuse , puique elle nécessite un équipement couteux et des interventions plus nombreuses pour le réglage , alors que (pour certains processus) on peut avoir une régulation aussi efficace en utilisant d'autres modes d'action .

II.1.5 Régulation " tout ou rien "

D'une façon générale , ce mode de régulation est caractérisé par les deux seules positions de l'organe de controle , à savoir :

-En position maximale (tout) : l'organe de controle doit assurer une valeur maximale de l'agent réglant .

-En position minimale (rien) : il ne doit assurer que le minimum de l'agent réglant .

Dans le cas d'un four chauffé électriquement , les résistances sont soit branchées pour un chauffage maximale ou débranchées pour un chauffage nul , donc refroidissement par la charge .

Parmi les phénomènes qui peuvent influencer ce mode de régulation sont le retard pur et l'hystérésis .

-Mode d'action du régulateur autour d'un point donné, avec retard pur, sans hystérésis et pour une charge donnée :

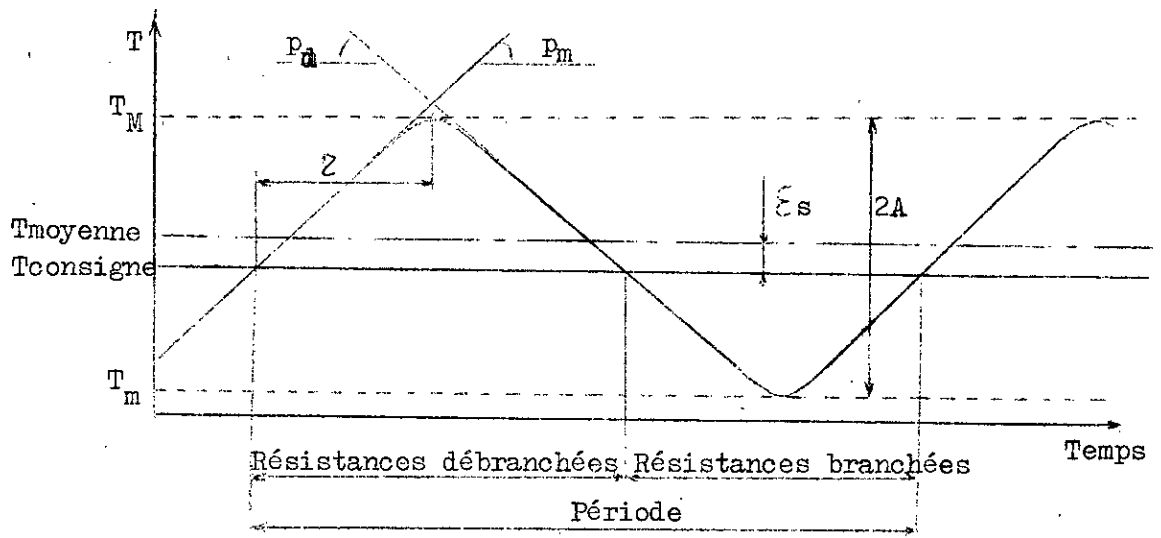


Fig II-1-5

Les résistances de chauffage étant branchées, la température monte et chauffe la masse jusqu'au seuil T_c (temps^o de consigne).

En raison du retard pur existant entre le système de chauffage et le capteur de température, elle continue à monter jusqu'à T_M ou les résistances se déclanchent. Ensuite la température descend suivant la courbe de décharge et la consigne T_c est atteinte de nouveau, mais la T_p continue à descendre jusqu'à T_m . Les résistances sont alors de nouveau branchées.

La température croît suivant la pente p_m (montée) et décroît suivant la pente p_d (descente). En pratique, le graphe de variation de température ne présente pas des droites mais des courbes avec les sommets emoussés. Pour pouvoir déterminer les pentes, on prolonge les courbes graphiquement par des droites.

La période des oscillations est déduites du graphe fig II-1-5)

$$T = Z \left(2 + \frac{P_m}{P_d} + \frac{P_d}{P_m} \right)$$

où P_m et P_d sont les valeurs absolues des pentes .

Z - Retard pur du système .

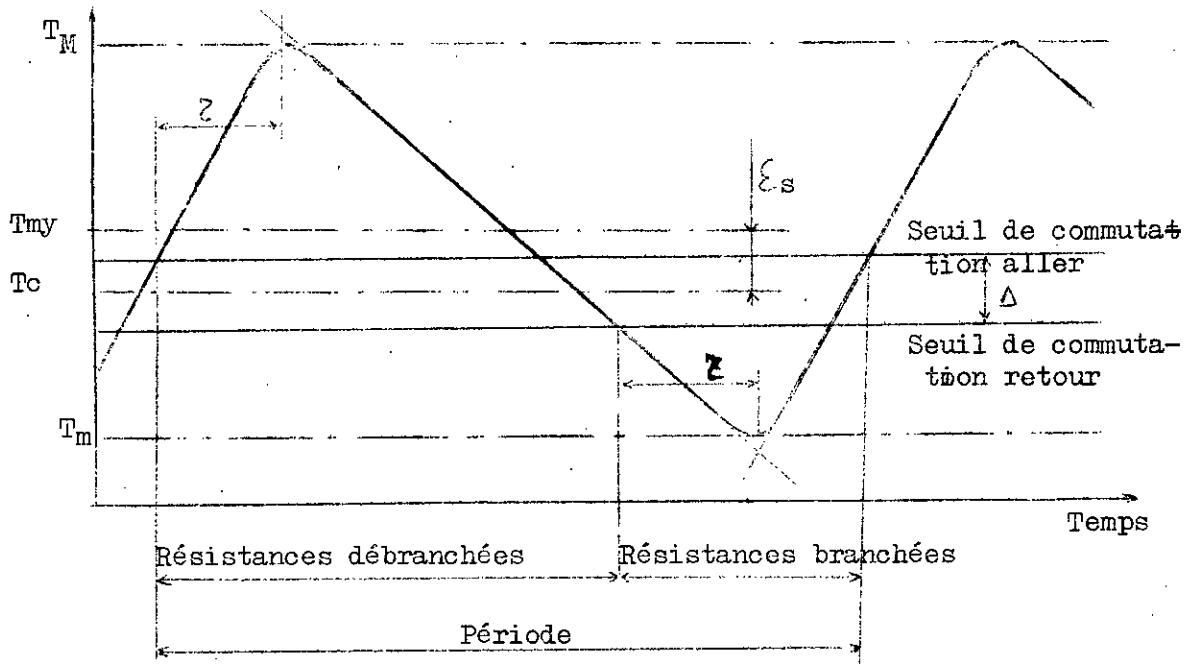
L'amplitude des oscillations est donnée par :

$$A = \frac{Z}{2} \cdot (P_m + P_d)$$

On obtient aussi la pseudo-erreur statique définie sur le graphe comme étant égale à l'écart entre la consigne et la valeur moyenne mesurée en régime établi :

$$\xi_s = \frac{Z}{2} \quad (P_m + P_d)$$

-Mode d'action du régulateur autour d'un point donné avec retard pur et hystérésis est pour une charge donnée :



L'hystérésis introduit par rapport au cas précédant une bande morte Δ comprise entre les seuils de commutation aller et retour. Les résistances ne se débranchent qu'une fois le seuil de commutation "aller" est atteint et elles ne se branchent qu'une fois le seuil de commutation "retour" est atteint.

II.2 IDENTIFICATION DE PROCESSUS

Très souvent le comportement exact d'un procédé n'est pas connu du moins très exactement, et leur identification est une opération délicate et indispensable aux calculs des paramètres d'action du régulateur.

On entend par identification d'un procédé, la connaissance de la fonction de transfert réglante, c'est à dire la fonction qui relie la grandeur réglante à la grandeur réglée.

Les processus réels sont très complexes (souvent de degré élevé). Toute fois, pour pouvoir les étudier on les assimile à des modèles beaucoup plus simples et malliables.

L'idée de l'identification, est donc de soumettre le système à identifier et son modèle aux mêmes signaux excitateurs, et de comparer leur réponses. Il existe plusieurs signaux testes (excitateurs) possibles, les plus importants sont : le signal échelon unité, rampe unité, impulsion unité et sinusoidale.

Empiriquement, il est plus aisé d'opérer par exemple un échelon unité sur la grandeur d'entrée, celle qui doit servir de grandeur réglante, et de voir comment le système se comporte en relevant sa réponse indicielle.

II.2.1 Méthode de STREJC

On assimile la réponse indicielle à celle d'un système du $n^{\text{ième}}$ ordre de fonction de transfert :

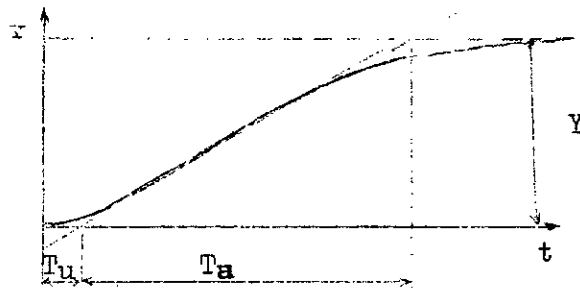
$$G(s) = \frac{K}{(1 + T_1 s)^n}$$

K : gain statique

T_1 : constante de temps

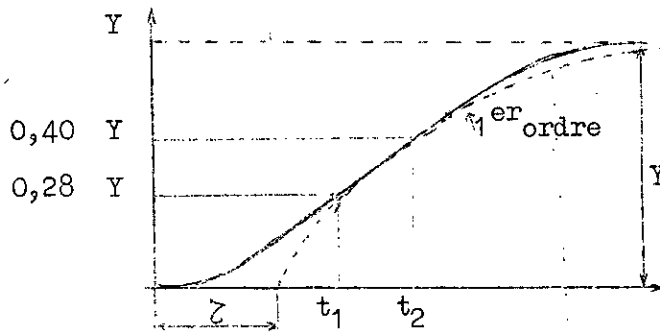
n : degré de la fonction

La détermination des paramètres K, T_1, n se fait à l'aide de la réponse indicielle enregistrée et du nomogramme transmittances. Ceci suppose la connaissance de certaines grandeurs définies sur la figure suivante :



II.2.2 Méthode de BROIDA

Elle consiste à identifier une fonction du $n^{\text{ième}}$ ordre à une fonction du 1^{er} ordre affectée d'un retard pur. La courbe du 1^{er} ordre passe par deux points situés sur la courbe enregistrée de coordonnées $(t_1; 0,28 \Delta Y)$ et $(t_2; 0,40 \Delta Y)$



On peut calculer :

$$\tau = 5,5 (t_1 - t_2)$$

$$T_1 = 2,8 t_1 - 1,8 t_2$$

La fonction de transfert identifiée est alors :

$$G(s) = \frac{K e^{-\tau s}}{1 + T_1 s}$$

II.2.3 Identification de système intégrateur du $n^{\text{ième}}$ ordre

La méthode consiste à admettre qu'un système intégrateur du $n^{\text{ième}}$ ordre de fonction de transfert :

$$G(s) = \frac{K}{s (1 + T_1 s)^n}$$

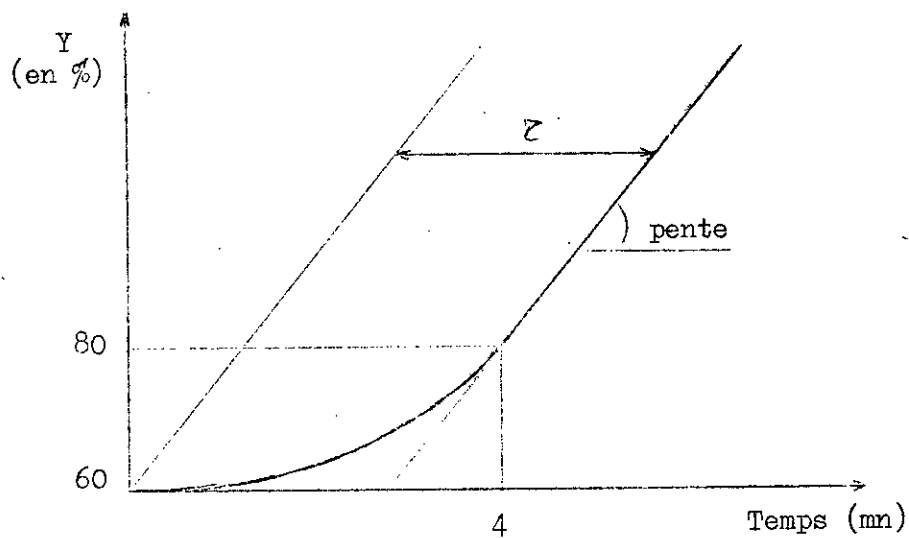
Peut être assimilé à un système intégrateur affecté d'un retard, soit

$$G(s) = \frac{e^{-\tau s}}{T_1 \cdot s}$$

τ - Retard pur
 T_1 - Constante de temps

L'exemple suivant illustre bien la méthode :

La réponse à l'échelon unité sur le signal d'entrée $X(t) = 10\%$ permet de déterminer les paramètres T_1 et τ .



On admet ici $Y(t)$ est confondu avec son asymptote .

$$\tau = 2 \text{ mn}$$

$$\text{Pente} = \frac{20\%}{2 \text{ mn}} = 10\%/\text{mn} \rightarrow T_1 = \frac{X}{\text{pente}} = \frac{10\%}{10\%/\text{mn}} = 1 \text{ mn}$$

d'ou $G(s) = \frac{e^{-3s}}{s}$

III. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI

III.1 MAQUETTE DU PROCESSUS

La maquette du processus est une pièce en aluminium plongée dans une chemise contenant de l'eau à débit variable .

Elle est munie d'un thermostat de sécurité réglé à 85°C , servant à déclencher la résistance de chauffage avant que la température atteigne celle de l'ébullition de l'eau et aussi éviter tout surchauffage qui risquerait de détruire la résistance .

La résistance chauffante est alimentée par le régulateur et peut débiter jusqu'à une puissance de 500W .

III.2 THERMOMETRE A RESISTANCE

I III.2.1 Principe de fonctionnement :

Le schéma de la fig III.a montre le principe de fonctionnement du thermomètre avec l'ensemble du transmetteur, qui est la mesure d'une f e m aux bornes d'un pont de WHEATSTONE .

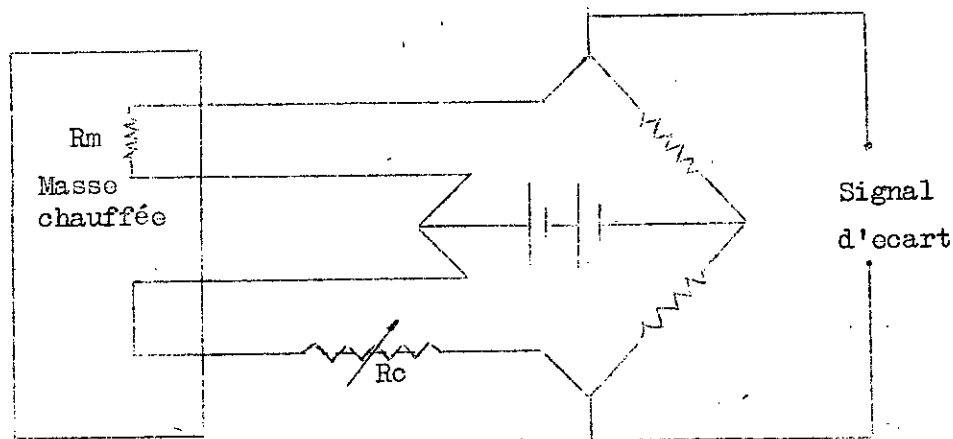


fig III.2.1

R_m - Résistance du thermomètre (en platine)

R_c - Résistance variable pour affichage de la consigne .

III.2.2 Caractéristiques :

Dans ce type de thermomètre ,les connexions électriques (entre la résistance et le pont) amènent d'inévitables perturbations dues à la variation de la température du milieu ambiant ,ce qui introduit une erreur systématique dans la mesure .

On a éliminé ici cet inconvénient par l'utilisation de 4 connexions (deux reliées à la résistance de platine ,deux en court-circuit) . C'est à dire que l'erreur est introduite sur les deux bras du pont et devient compensée .

Le thermomètre peut être placé directement dans la masse ou avec manchons de laiton ou babelite .

III.3 REGULATEUR

On va décrire le régulateur dans l'ordre logique de son fonctionnement .

III.3.1 Traitement du signal :

Le signal du thermomètre arrive au pont de WASTSTONE : schématisé sur le panneau au bas du module " tout ou rien " (fig III.2.1) et y est comparé à la consigne . Le signal d'erreur résultant est amplifié pour alimenter un indicateur d'écart de température ,un enregistreur et la partie dynamique des régulateurs . Le gain de l'ensemble du traitement est de 25mV /°c.

III.3.2 Module " tout ou rien "

Dans le cas de régulation " tout ou rien " le signal d'erreur alimente une bobine électroaimant qui ouvre ou ferme le circuit d'alimentation de la résistance chauffante .

III.3.3 Module " proportionnel "

Le signal d'erreur est traité par la boucle de régulation (comme décrite au II.1.1) et délivre un signal continu qui alimente un impulsioneur .

La bande proportionnelle est réglable en 0 et 100 % , le diviseur à résistance permet de la diminuer encore 10 fois (BP entre 0 et 10 % avec une bonne précision)

La gamme du signal continu de sortie est de $+2V$ à $-2V$ mais correspond à la gamme 100 à 0 % de la puissance de chauffage . Ceci entraine qu'une tension nulle appliquée à l'entrée de la boucle de régulation , se traduit par une tension nulle à sa sortie et entraine une chauffe de 50 % de la puissance maximale disponible .

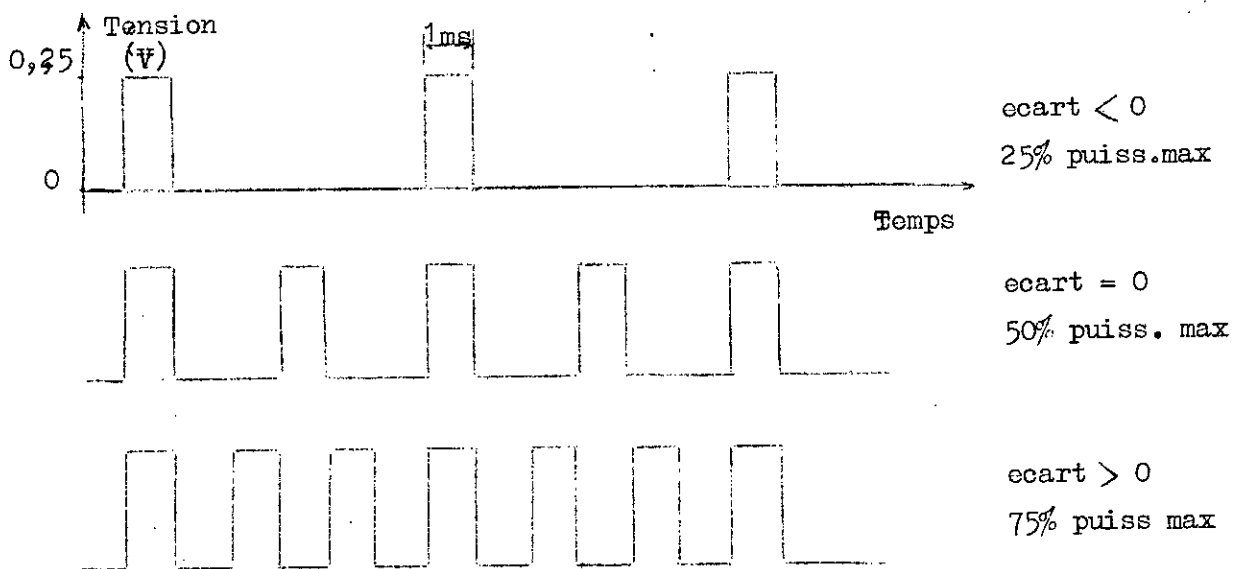
Toutefois , le dispositif " décalage manuel de l'entrée " permet de modifier la puissance nécessaire au maintien . de la température à la valeur affichée .

III.3.4 Impulsionneur et commande du circuit de chauffage

L'impulsionneur délivre un signal carré qui actionne la gachette du THYRISTOR du pont . Ce dernier commande à son tour le circuit ^{d'alimentation} de la résistance chauffante .

Une visualisation sur oscilloscope du signal carré permet de constater qu'une augmentation (positivement) du signal continu du régulateur fait augmenter le nombre d'impulsions dans un même interval de temps (donc diminuer la période) ce qui produit une augmentation de la puissance de chauffe, et inversement .

Il est à noter que la valeur et la durée d'une impulsion sont invariables .



III.3.5 Module " Intégral "

Les contre-réaction appropriées sont prévues pour une combinaison des régulateurs "PI", "PID". Le signal d'écart passe à travers la résistance de balance avant d'entrer dans le comparateur de la boucle (Amplificateur opérationnel). Ceci du fait que le signal de retour passe à travers l'intégrateur composé d'une capacité et d'une résistance .

La gamme d'affichage de la constante de temps d'intégration est de 0'06 à 50 mn .

III.3.6 Amplificateur amortisseur

Le passage de la conduite automatique à la conduite manuelle peut créer un saut de la grandeur réglante qui perturbe le système . Cet amplificateur est donc placé pour amortir ce saut ,il est introduit lors de la conduite manuelle . Le schéma de la fig III.5 montre les cas réglage auto et manuelle .

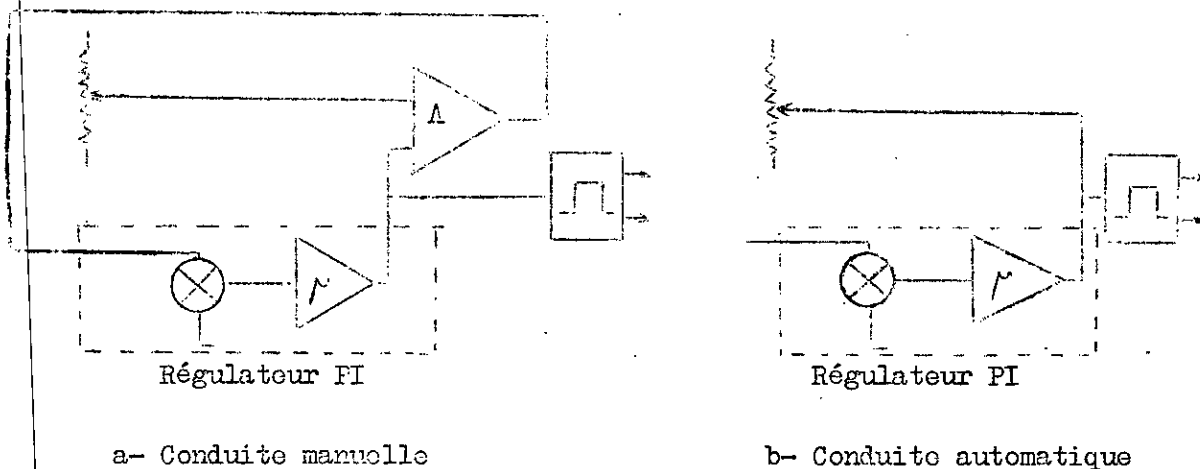


fig III.3.6

Lors du réglage manuel , la valeur de la grandeur réglante affichée agit par l'intermédiaire de l'amplificateur A qui constitue une partie d'une boucle . Ainsi la valeur affichée est reproduite lorsque l'écart à l'entrée de A est nul .

Avant de passer à la conduite manuelle , on règle l'entrée à 50 % . Elle prend aussi le relai fidèlement à la conduite automatique .

III.3.7 Module " Dérivé "

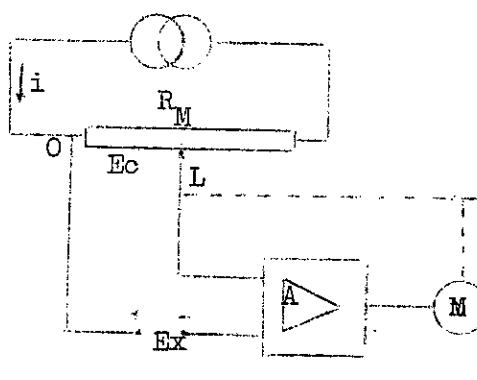
Les connections sont prévues pour une combinaison des actions " P " + " D " . La gamme d'affichage de la constante de temps de déviation est de 0,05 à 5mn .

NOTA- Les modes de connections pour les différents controles sont donnés dans l'annexe " A " .

III.4 ENREGISTREUR MULTIVOIES

III.4.1 Principe de fonctionnement

La mesure est fondée sur le principe du compensateur automatique . Le schéma de la fig III.6 le représente .



- R_M - potentiomètre
- i - courant continu stabilisé
- A - amplificateur de tension alternative avec une entrée à tension continue
- L - curseur du potentiomètre R_M
- M - moteur qui entraine le curseur
- E_x - tension continue à mesurer

fig III.4.1 .a

La différence entre les tensions E_x et E_c est appliquée à l'amplificateur A qui la transmet au moteur M . Celui-ci commence à tourner dans le sens adéquat au signe de cette différence de tension , jusqu'à ce qu'elle soit nulle .

Le fonctionnement est explicité par la boucle schématisée dans la fig III.4.1.b

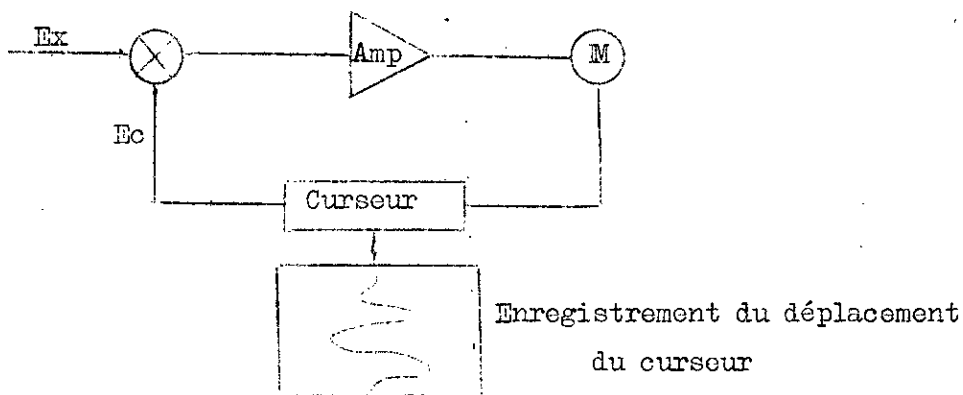


fig III.4.1.6 Principe de fonctionnement de l'enregistreur

III.4.2 Caractéristiques techniques

Dans le souci de profiter au maximum de cet enregistreur dans les laboratoires d'énergetiques, on a jugé nécessaire d'expliciter certaines de ces caractéristiques techniques.

Tension de secteur : 110, 125, 220, 245V à + 10 et - 15 %
50 HZ à + 5 %

Consommation : 50 à 100 V.A

Nombre de voies : 12 (sans notre modification)

Résistance d'entrée minimale à l'état non compensée : $\geq 5 \text{ K}\Omega$

Résistance maximale de source : $5 \text{ K}\Omega$

Capteurs : la gamme de mesure existant dans l'enregistreur est adaptée à la mesure des sources de mV.

Gamme de mesure : non commutable

5 possibilités de choix pour l'étendue de gamme :

1, 2, 5, 10, 20 mV

5 possibilités de choix pour la position du zéro :

-100, -50, -20, 0, 50 %

Précision : meilleure que 0,25 % de la valeur maximale de l'échelle

Reproductibilité : meilleure que 0,1 % de la valeur maximale

Vitesse de defiliment du papier : 8 vitesses : 20, 60, 120, 240 mm/h avec facteur multiplicatif 1 ou 5

Cadences de compostage: 1point par 2secondes
1point par 5 secondes

Papier enregistrement:

Largeur utile = 250 mm

Longueur visible = 200 mm

Longueur totale du rouleau 25 m

Dispositifs de réglage:

Réglage de la sensibilité de l'amplificateur

Remise à zéro

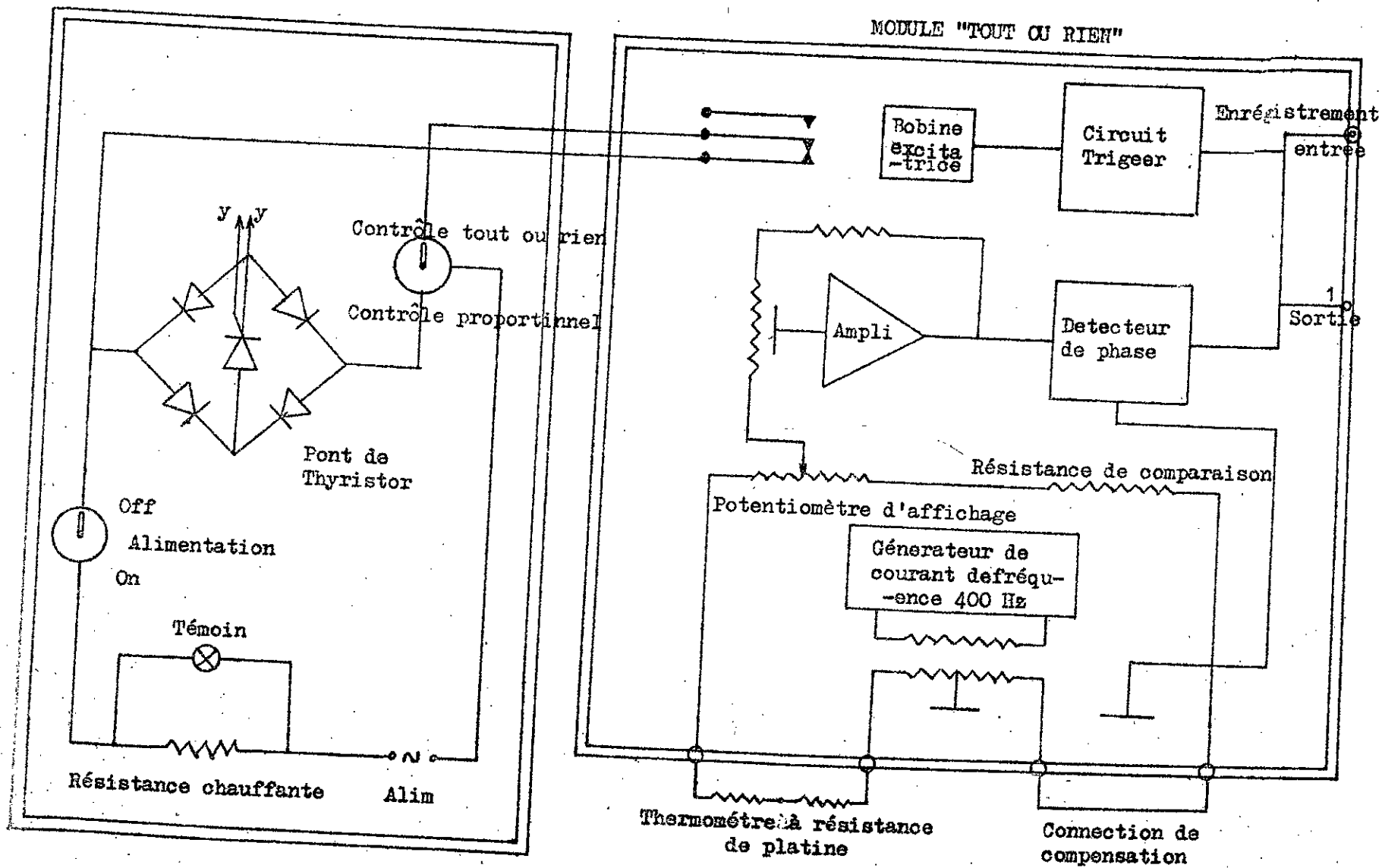


Fig III-a SCHEMA DE LA PREMIERE PARTIE DU REGULATEUR

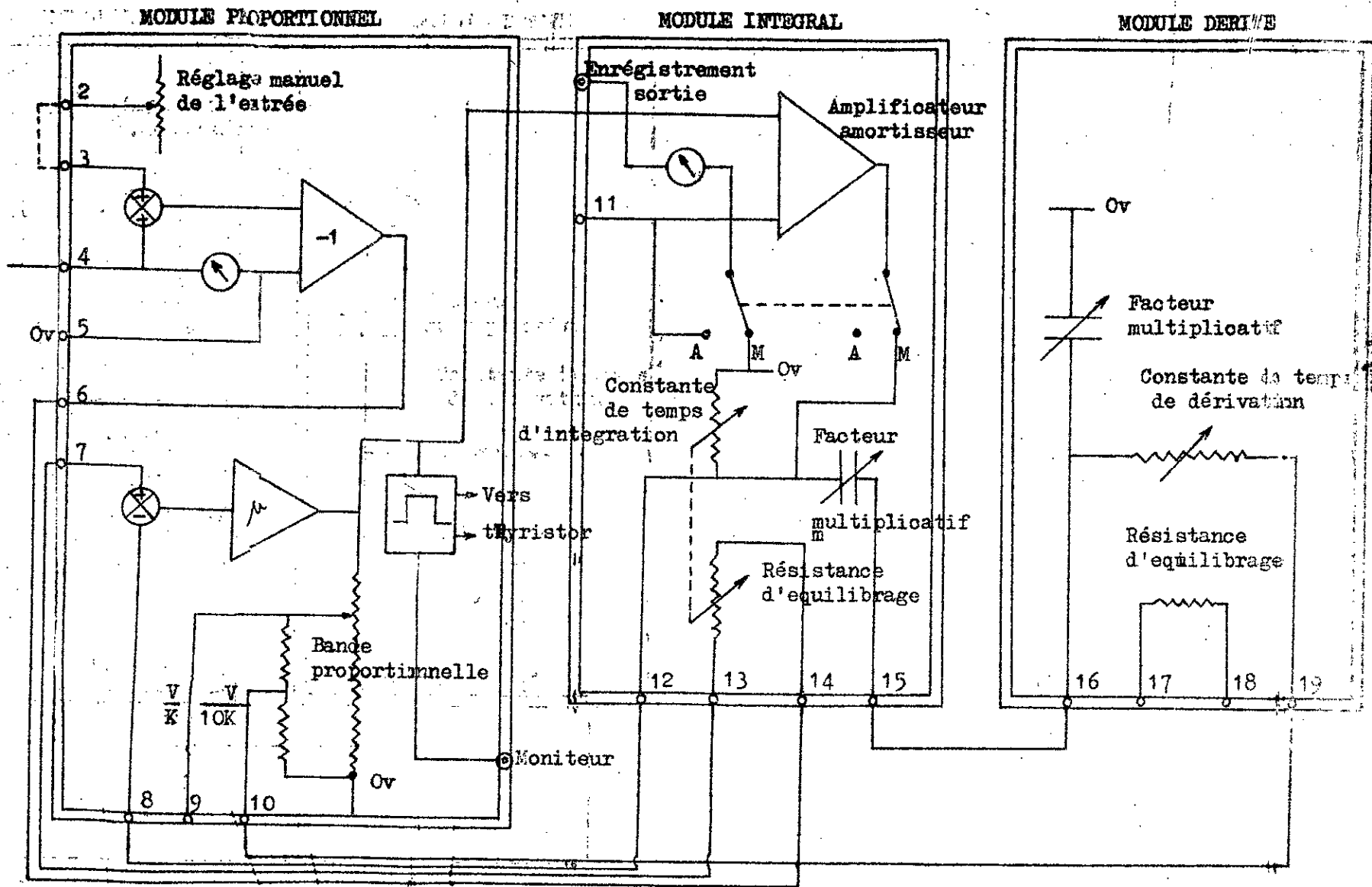


Fig III-b SCHEMA DE LA DEUXIEME PARTIE DU REGULATEUR

IV. MISE EN MARCHÉ DU BANC D'ESSAI

IV-1 CIRCUIT DE REFROIDISSEMENT

On a constaté que le débit d'eau délivré par le réseau d'alimentation du laboratoire n'était pas constant. On a donc été amené à réaliser un réservoir à niveau stabilisé. Il est simplement constitué d'un vase, muni d'une conduite de remplissage, d'un "trop plein" et d'un robinet pour régler le débit d'eau de refroidissement.

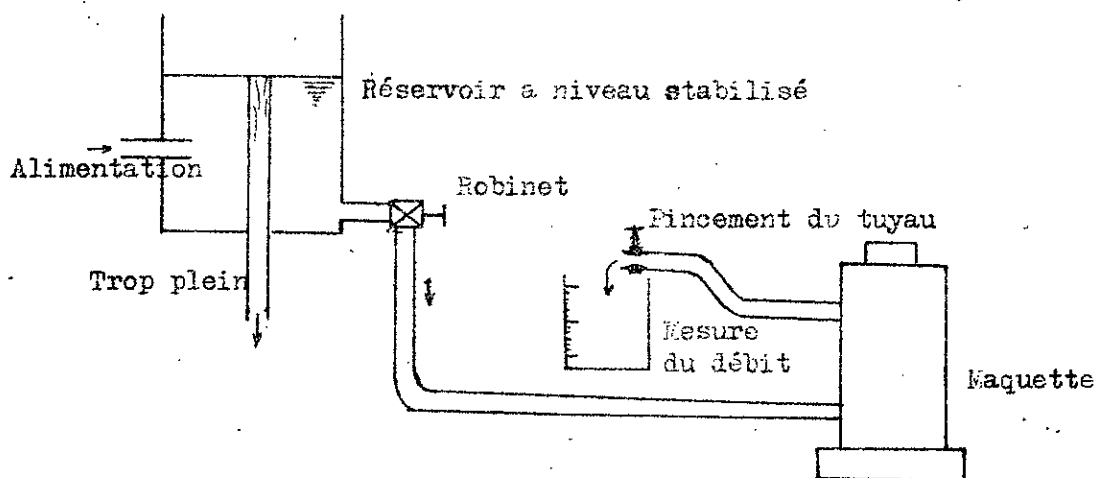
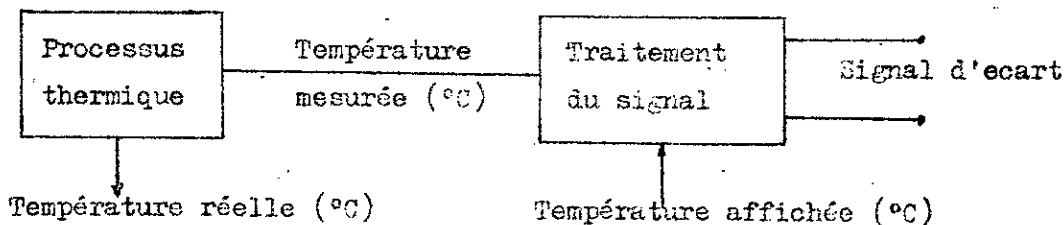


Fig IV-1

IV-2 REGULATEUR

IV-2-1 Traitement du signal:



Pour contrôler son fonctionnement on établit sur la base d'essais les caractéristiques liant les grandeurs d'entrée et de sortie de cet élément.

1^{er} essai : On maintient la température du thermomètre à une valeur constante par calorifugeage et on fait varier la température V de consigne affichée .

Résultats : On obtient une relation univoque entre le signal d'écart (en V) et l'écart entre la température mesurée et celle affichée . fig IV.2.1 a

Interprétation : On peut conclure que cet ^{élément} fonctionne bien et que son zéro est bien réglé .

2^{ème} essai : On fixe la valeur de la consigne , et on plonge le thermomètre dans un récipient d'eau dont on fait varier la température en rajoutant de la glace .

Résultats : On obtient une relation univoque entre le signal d'écart (en V) et l'écart entre la température réelle de l'eau et celle affichée .

fig IV.2.1.b le fait que la droite ne passe pas par l'origine des axes nous amène à douter de l'exatitude de la température lue par le thermomètre .

On a mis cela en évidence en traçant à partir des courbes fig a et b la variation de la température réelle du four en fonction de la température mesurée par le thermomètre à résistance . fig IV.2.1.c

Interprétation : On peut déduire que T réelle = T mesuré - 1.2°C . Ainsi l'indicateur affichera un signal d'écart (V) nul quand il subsisterait une différence de 1.2°C entre la température de consigne et la température réelle du four .Ceci est du aux pertes engendrées par la sonde métallique qui contient la résistance de platine du thermomètre .

IV.2.2 Module " Proportionnel "

-Contrôle de l'alignement du régulateur :

En boucle ouverte on règle de tel sorte que le signal d'écart soit nul .On fait varier le gain de 1 à 20 (BP de 5 à 100 %) et on remarque que la variation du signal de sortie ne dépasse pas 4 % . L'alignement est correct .

-Contrôle du gain du régulateur :

En boucle ouverte , on crée un écart non nul et on relève la variation de la sortie . On établit ainsi la caractéristique du régulateur " P " (signal de sortie en fonction du signal d'entrée) pour quelques valeurs de la bande proportionnelle . fig IV.2.2 . On détermine ensuite la valeur de la BP réelle qu'on compare à sa valeur affichée .

BP affichée %	10	25	50	75	100
BP réelle %	10	24,5	49,5	75	101,5

Le régulateur proportionnel est bien étalonné .

IV.2.3 Impulsionneur et commande du circuit - chauffage

Pour révéler la caractéristique de l'impulsionneur on est amené à faire certaines manipulations .

Principe :

La manipulation consiste à afficher sur le régulateur " P " une valeur du signal continu correspondante à une certaine valeur de la puissance de chauffage puis ^{de} mesurer la puissance effectivement apportée . Cette dernière est déduite à partir de la mesure de la variation de la température transitoire du four .

Le schéma suivant illustre cette manipulation :

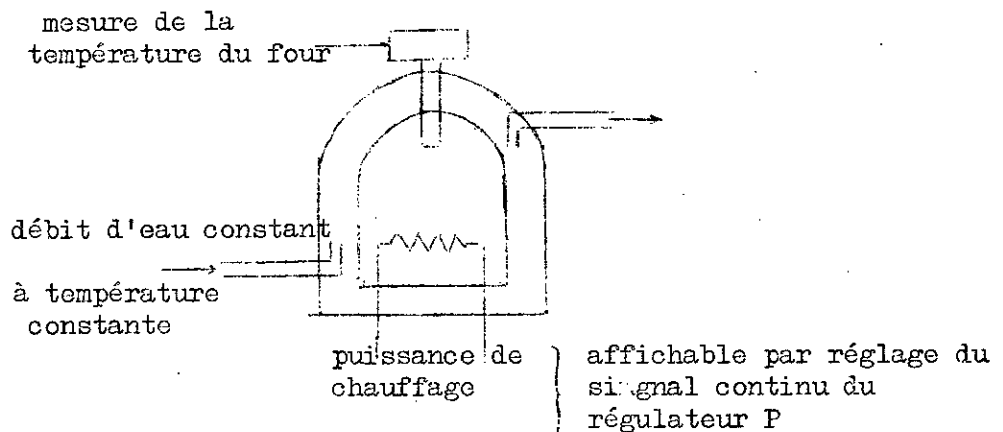


fig IV.2.3.a

Résultats et interprétations

Les courbes donnant la variation de la température du four en fonction du temps , pour les différentes valeurs de la puissance de chauffage (fig IV.2.3 b), comprennent 3 parties a savoir :

- Une première partie , ou la température reste inchangée pendant près de 30 s Ceci est engendré par le retard dû au thermomètre .
- Une deuxième partie linéaire dont la pente augmente avec la puissance de chauffe .Ce qui est prévisible puisque le débit d'eau est maintenu constant .
- Une troisième partie ,ou la température croit vers une valeur asymptotique . Ceci s'explique par le fait que l'eau sortante devient de plus en plus chaude, c . à .d que la différence des température d'entrée et sortie devient plus importante donc la quantité de chaleur prise par l'eau augmente .

La puissance effectivement apportée au four est donnée par le produit de la pente des tangentes de départ des courbes de la fig IV.2.3.b (exprimées en °c / mn) et la capacité calorifique du four (m.c) .

$$\text{Soit : } \left[\text{pente} \right] \times \left[\text{m.c} \right] = \frac{^{\circ}\text{c}}{\text{mn}} \cdot \text{Kg} \cdot \frac{\text{J}}{\text{Kg } ^{\circ}\text{c}} = \text{W} = \left[\begin{array}{l} \text{puissance} \\ \text{effective} \end{array} \right]$$

On obtient une relation univoque entre la puissance effective et la puissance affichée c.à.d le signal contenu du régulateur . fig IV.2.3.c

On en déduit donc , que la caractéristique de l'impulsionneur est linéaire .

IV.2.4 Module " Intégral "

Après avoir fait un constat général de l'état du module , on est passer à la vérification de l'exatitute de son fonctionnement .

-Le contrôle du temps d'intégration se fait par enregistrement de la réponse indicielle du régulateur " P I " .

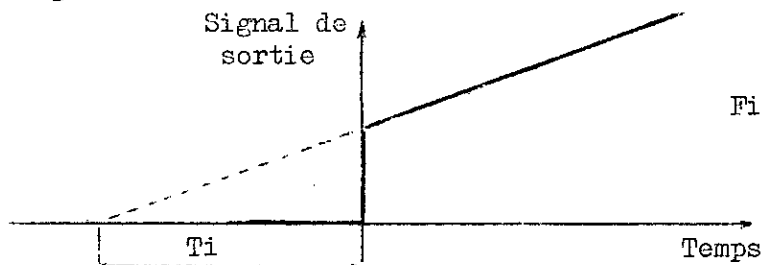


Fig IV-2-4-a

Les résultats obtenues permettent de conclure que T_i réelle et T_i affichée sont égales pour des valeurs inférieures à 5 mn, au delà on constate une incertitude relative de l'ordre de 30 % sur la valeur réelle.

- Contrôle en boucle fermée:

Pour ce faire, on réalise la boucle fermée à l'aide du processus et du régulateur à action "P I". On affiche les valeurs de T_i et BP susceptibles de donner une bonne régulation (déterminées à l'aide de méthodes appropriées) et on enregistre le signal d'écart de température. Courbe 1 de la figure IV-2-4-b. Celle ci montre que l'erreur en régime permanent est trop important et ne s'élimine pas, ce qui est contradictoire avec les propriétés de la régulation PI.

De nombreux autres essais ont été effectués pour détecter la source de l'anomalie, mais en vain. Ces constatations montrent que le module intégral n'assure pas son rôle, on a donc été amené à démonter tous les modules du régulateur et à procéder au contrôle de tous les composants un à un, qui se sont révélés en bon état, mis à part quelques points de soudure douteux qu'on a refait.

Par ailleurs, en ajoutant en parallèle à la résistance d'équilibrage une autre résistance de 450 K Ω , et refaisant l'essai précédent on remarque que l'erreur statique s'éliminait. Courbe 2 de la figure IV-2-4-b. Le remplacement des capacitances ne donne cependant rien. Cet artifice a permis de localiser l'anomalie sans toute fois pouvoir lui apporter un remède sûr.

IV-2-5 Entretien du régulateur:

Lieu d'installation: Le régulateur est constitué de composants électroniques fragiles, les risques de dégradation sont donc dus au fait qu'il a été placé dans un endroit humide. N'étant pas utilisé depuis longtemps, l'humidité a eu le temps de s'accumuler et nuire aux propriétés des composants.

IL faut éviter donc de l'installer dans des locaux où règnent des conditions défavorables telles que le taux d'humidité élevé, gaz corrosifs, température excessive ...

Provisoirement, on propose de le mettre pendant la période d'été dans un endroit sec afin que l'humidité accumulée s'évapore.

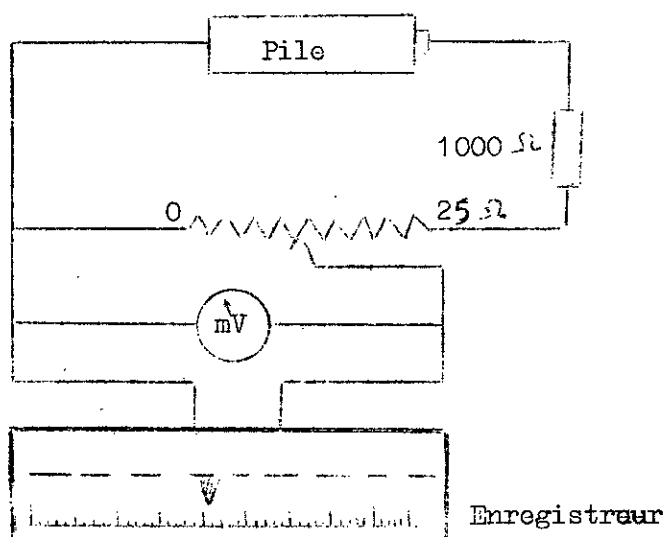
IV.3 ENREGISTREUR

Après avoir effectué un constat de l'état général de l'appareil .
On a procédé au remplacement des éléments déteriorés (connexions ,
courroies dentées,)

IV.3.1 Adaptation de l'enregistreur à nos besoins :

On a vu que la gamme des signaux de sortie du régulateur (signal
d'écart et signal continu) était de -2 à 2 V , alors que celle des sources
admises par l'enregistreur est de 20 mV .(pour la plus grande) . Il est
donc nécessaire de réaliser un dispositif assurant une réduction de tension .

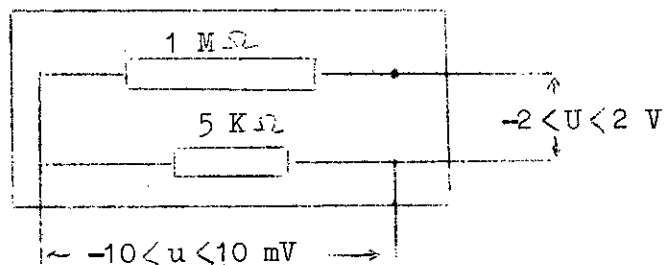
Dans un premier temps on a effectuer le montage suivant :



- Pile de 1,5 V
- Résistance de 100
- Rheostat de 0 - 25
- Millivolthmètre
- Enregistreur placé
sur 20 mV

En faisant varier la tension d'entrée de l'enregistreur de 0 à 20 mV
à l'aide du rheostat .Le composteur se déplace proportionnellement du minimum
au maximum de l'échelle .Ceci montre que l'enregistreur reçoit et décrit bien
le signal qui lui est introduit .

L'idée étant vérifiée , on a réaliser puis monter le diviseur simple
suivant :



On a réduit le nombre de voies à deux ,suffisants à nos besoins .
 Pour cela ,on a rassembler en parallèles les voies de numéros impairs ,et de numéros pairs ensemble .

Toute fois ,les transformations sont faciles à supprimer dans le cas d'autres utilisations .

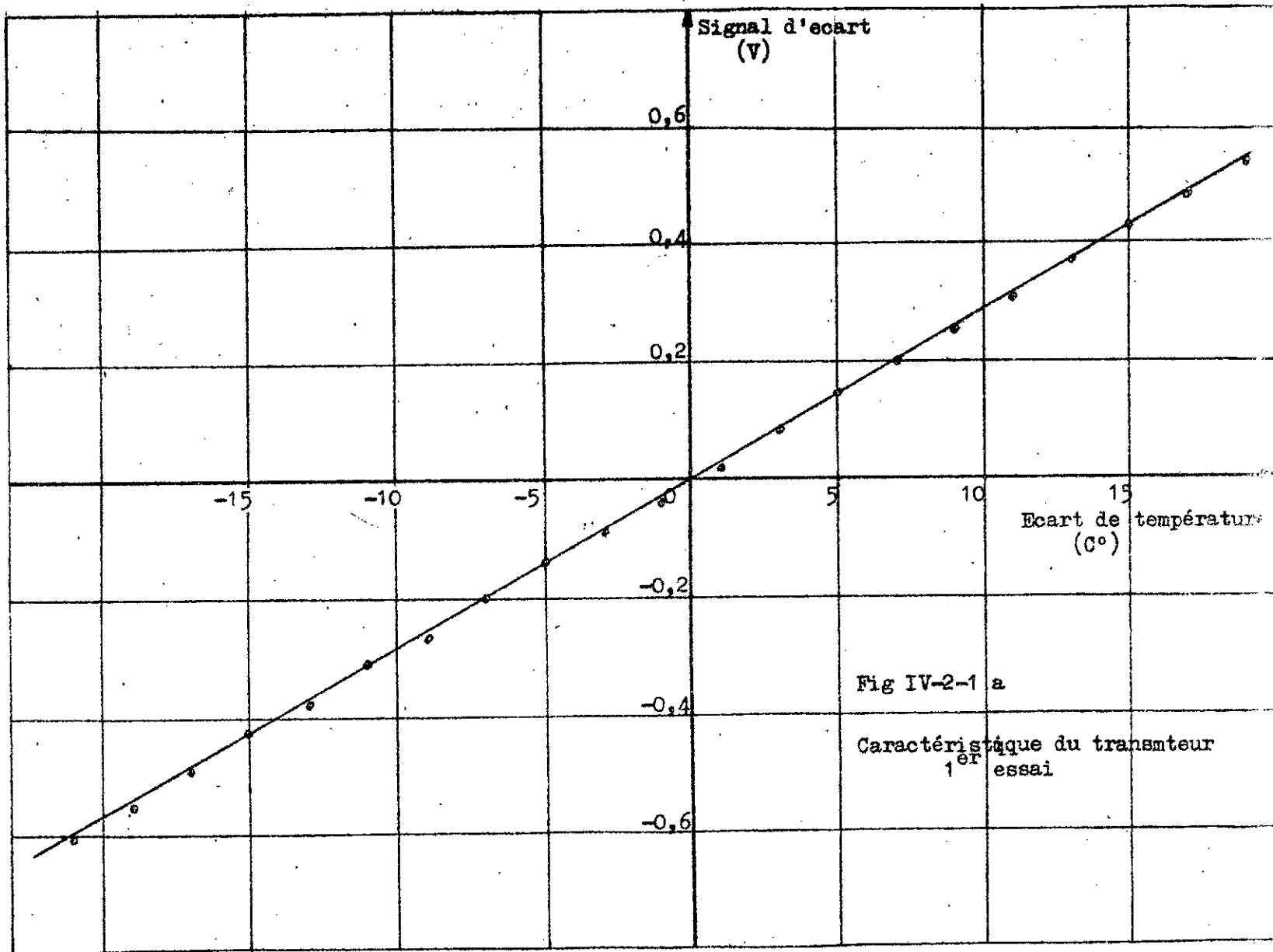
IV.3.2 Entretien de l'enregistreur :

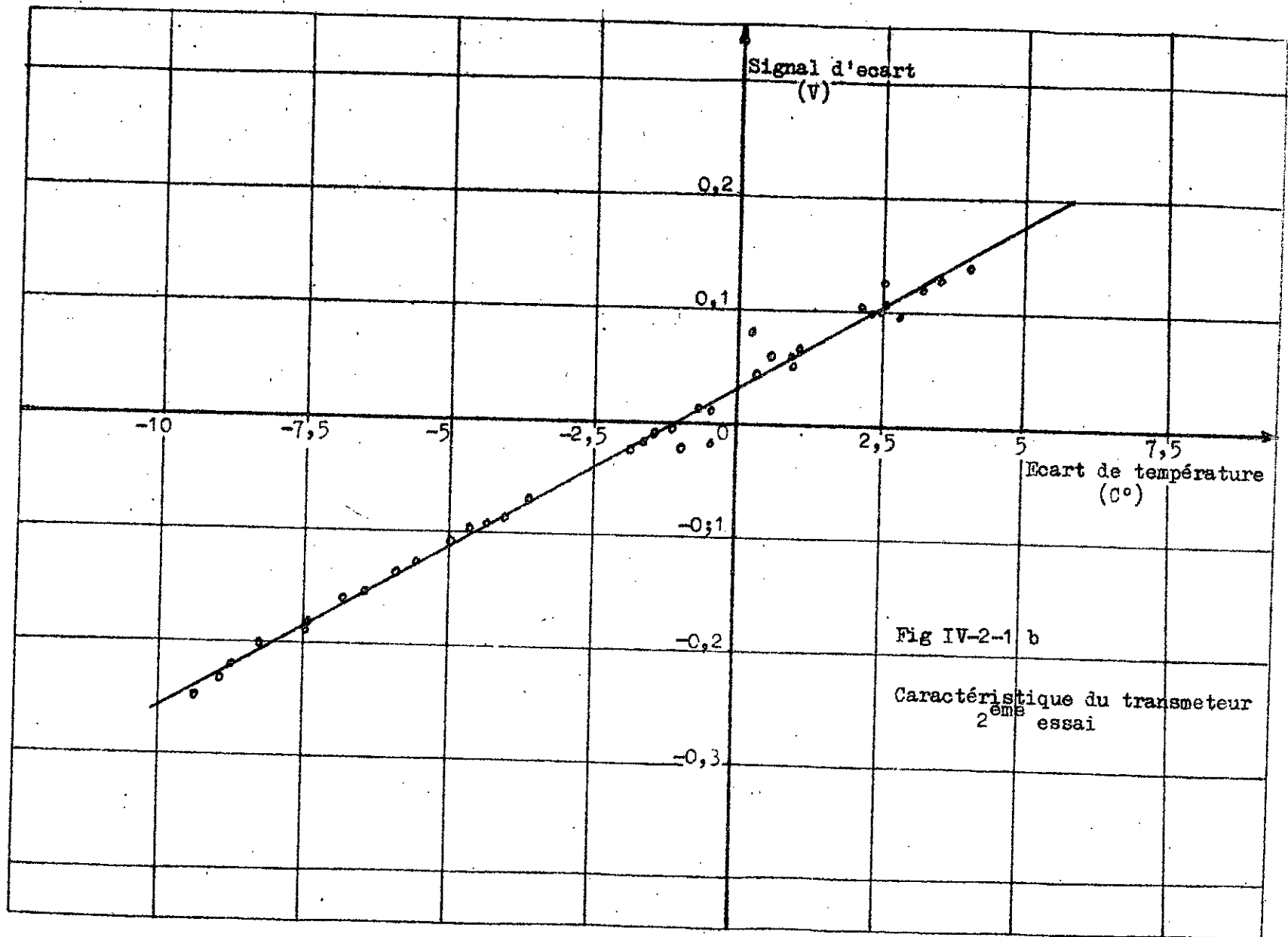
Vu les larges possibilités d'utilisation de cet enregistreur on a juger bon de rappeler quelques intructions d'entretien et de dépannage .

- Les éléments susceptibles d'usure ,nécessitant la recharge sont :
- Courroie dentée d'entraînement du papier
 (pas : $p = 5,08$, largeur : $b = 5$, n^{bre} de dents : $n = 53$)
- Courroie dentée d'entraînement des numéros du composteur
 ($p = 5.08$, $b = 5$, $n = 83$)
 (LES courroies qu'on a adapter ne sont pas d'origine)
- Roue encreuse (6 couleurs)
- Tube de néon (éclairage du papier)
- Rouleau de papier

Pour assurer un bon fonctionnement de cet appareil il est nécessaire d'effectuer une enbrification annuelle ,un étalonnage et un réglage du zéro et de sensibilité .

NOTA : des addresses utiles seront données dans l'annexe " B "





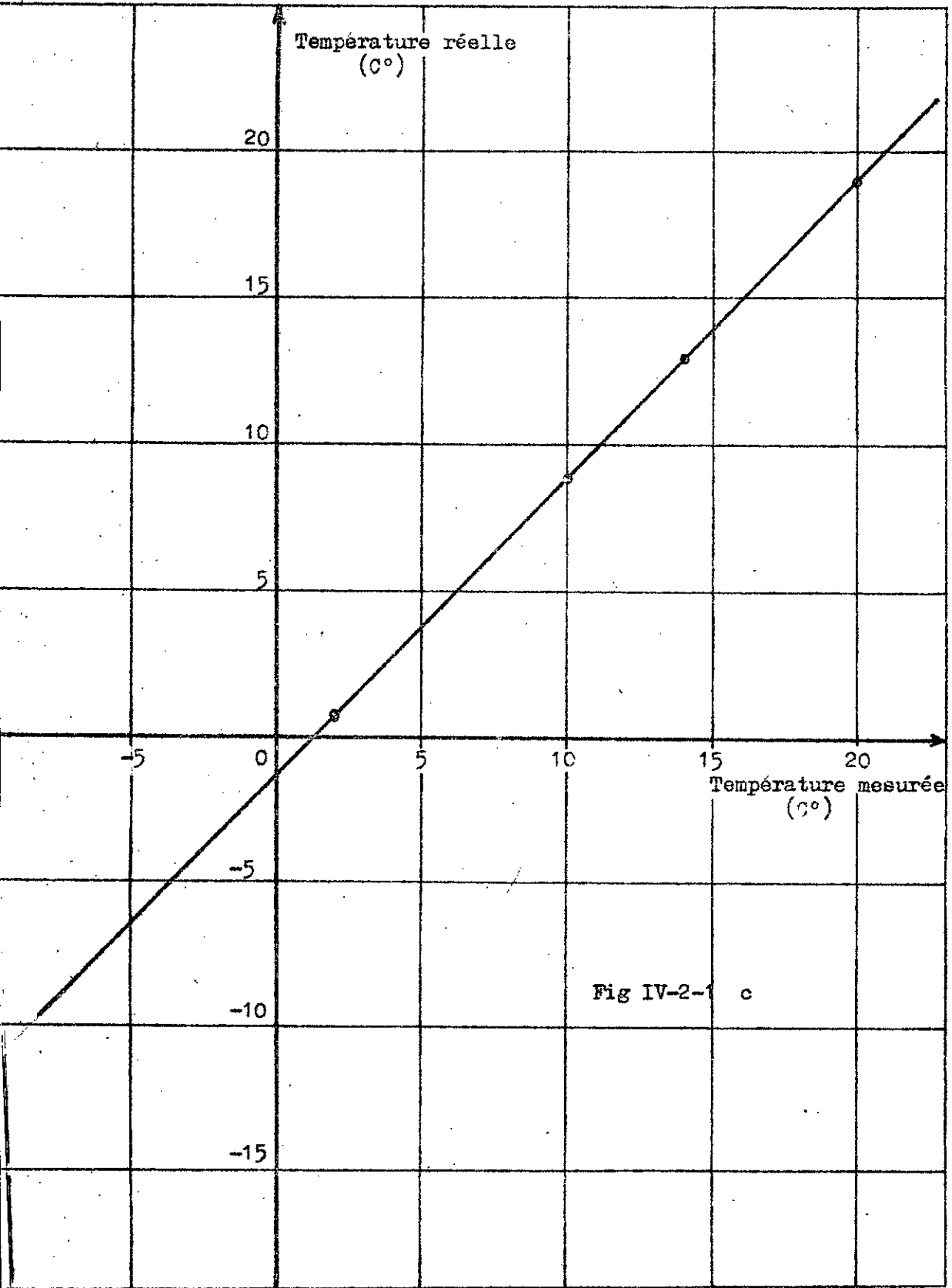


Fig IV-2-1 c

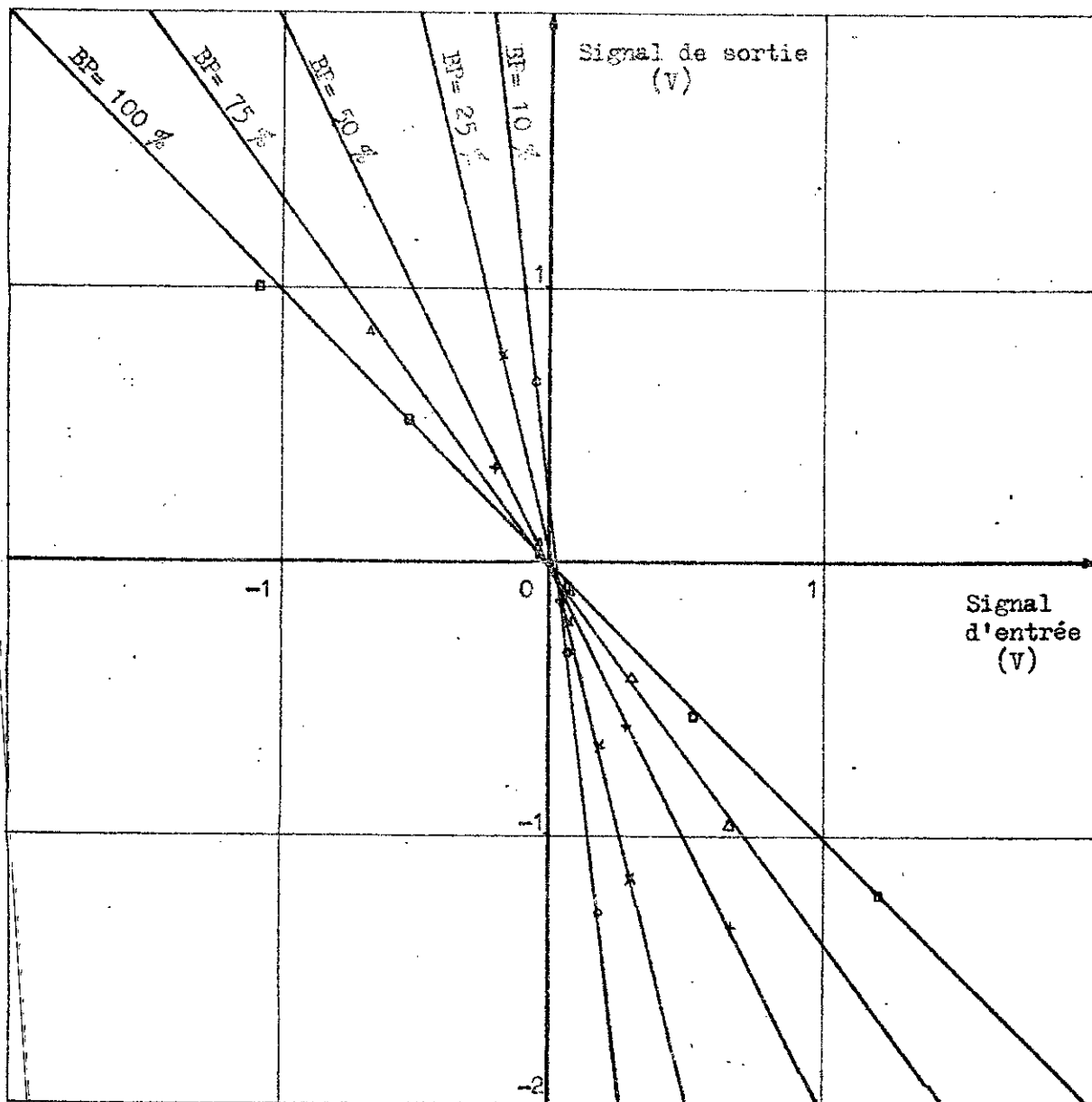
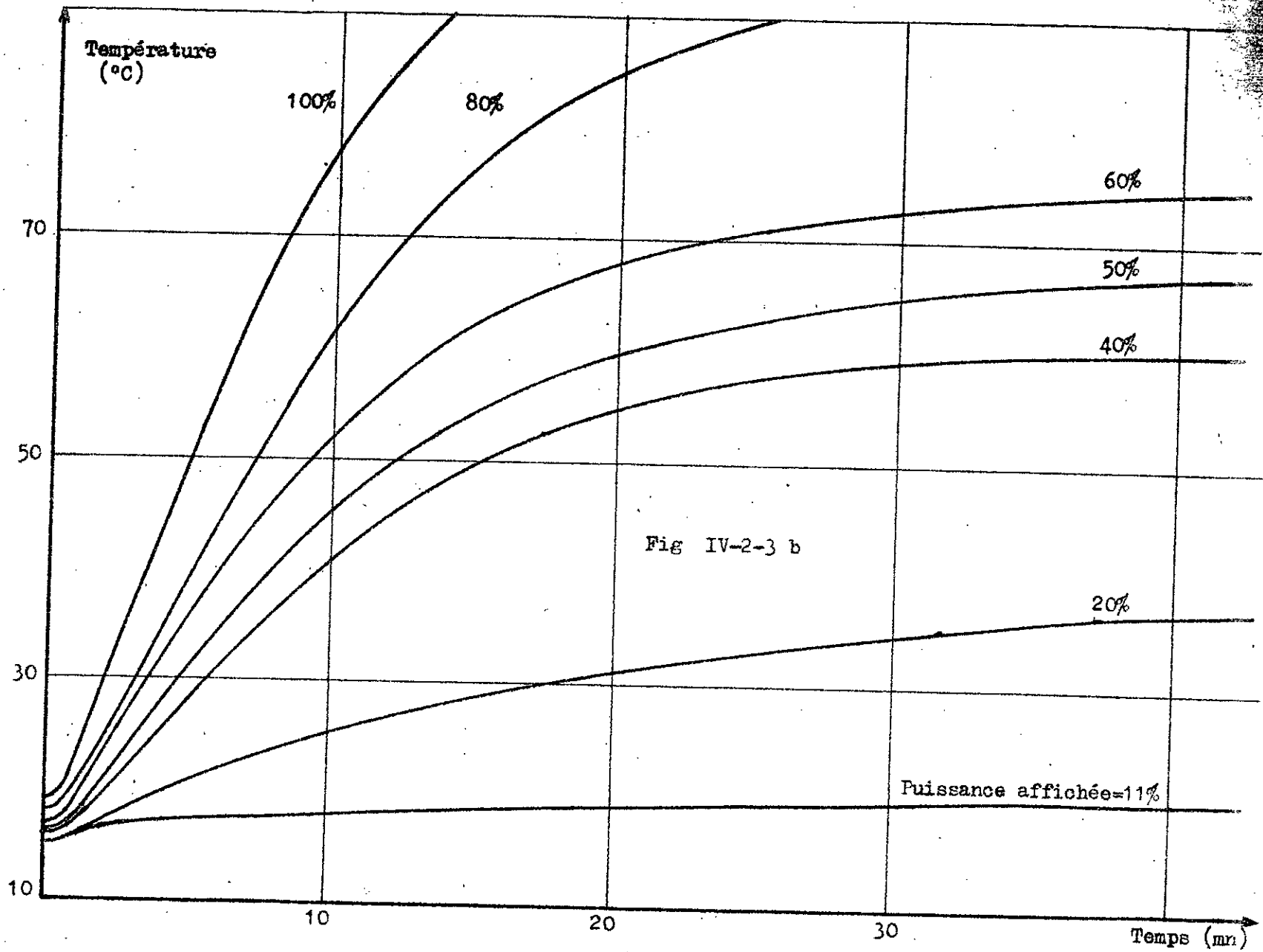


Fig IV-2-2 Caractéristiques du régulateur à action proportionnelle



Température
(°C)

100%

80%

60%

50%

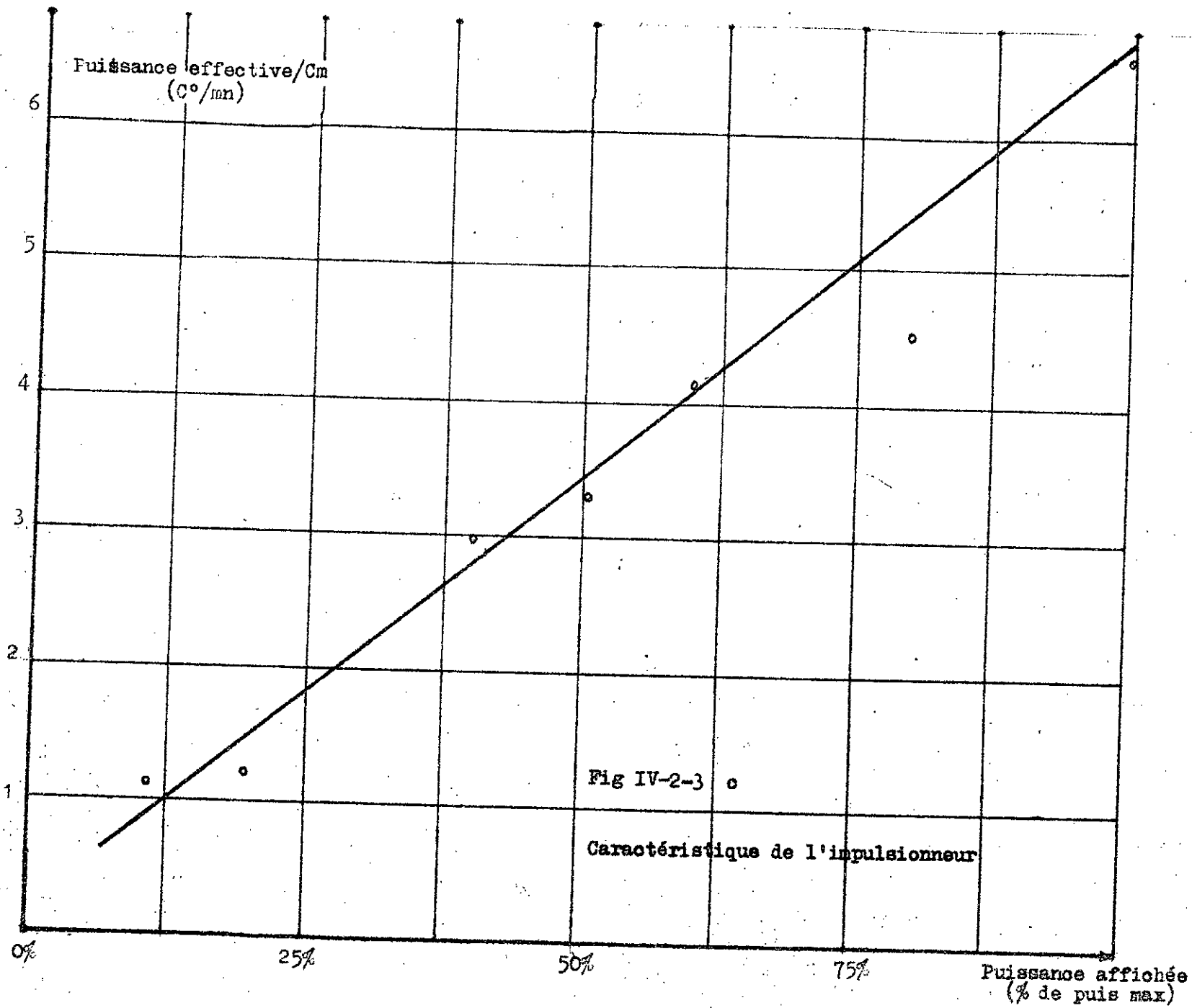
40%

Fig IV-2-3 b

20%

Puissance affichée=11%

Temps (mn)



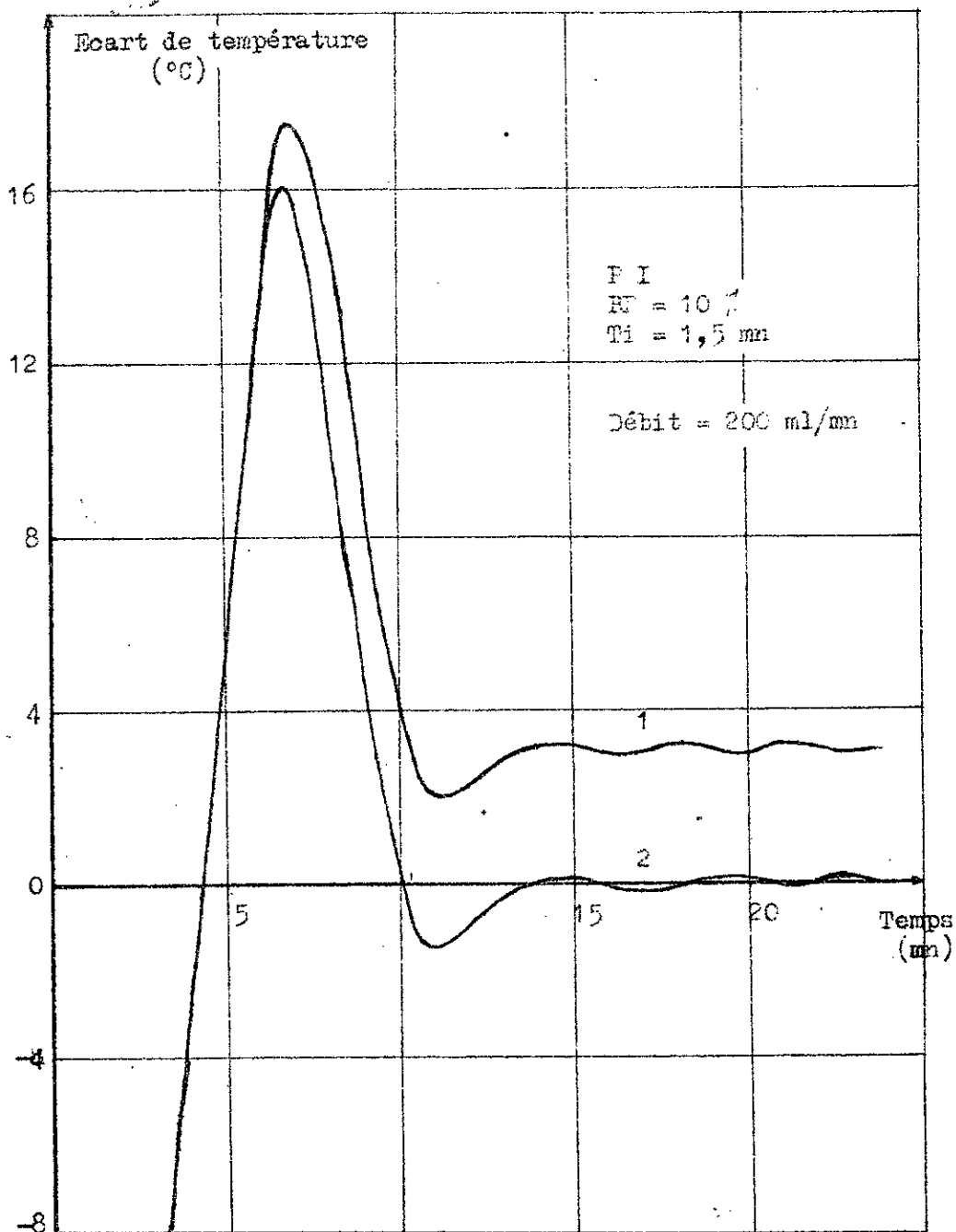


Fig IV-2-4-b Contrôle en boucle fermée du régulateur à action P I

Courbe 1 : on modifie rien au module "I"

Courbe 2 : on branche une résistance de 450 k en parallèle avec la résistance d'équilibrage (entre 13 et 14)

Signal à enregistrer
(v)

Fig IV-3 Courbe d'etalonage de l'enregistreur

Etendue de gamme: 20 mV
Position du zéro: 50 %

1

0

1

2

3

4

5

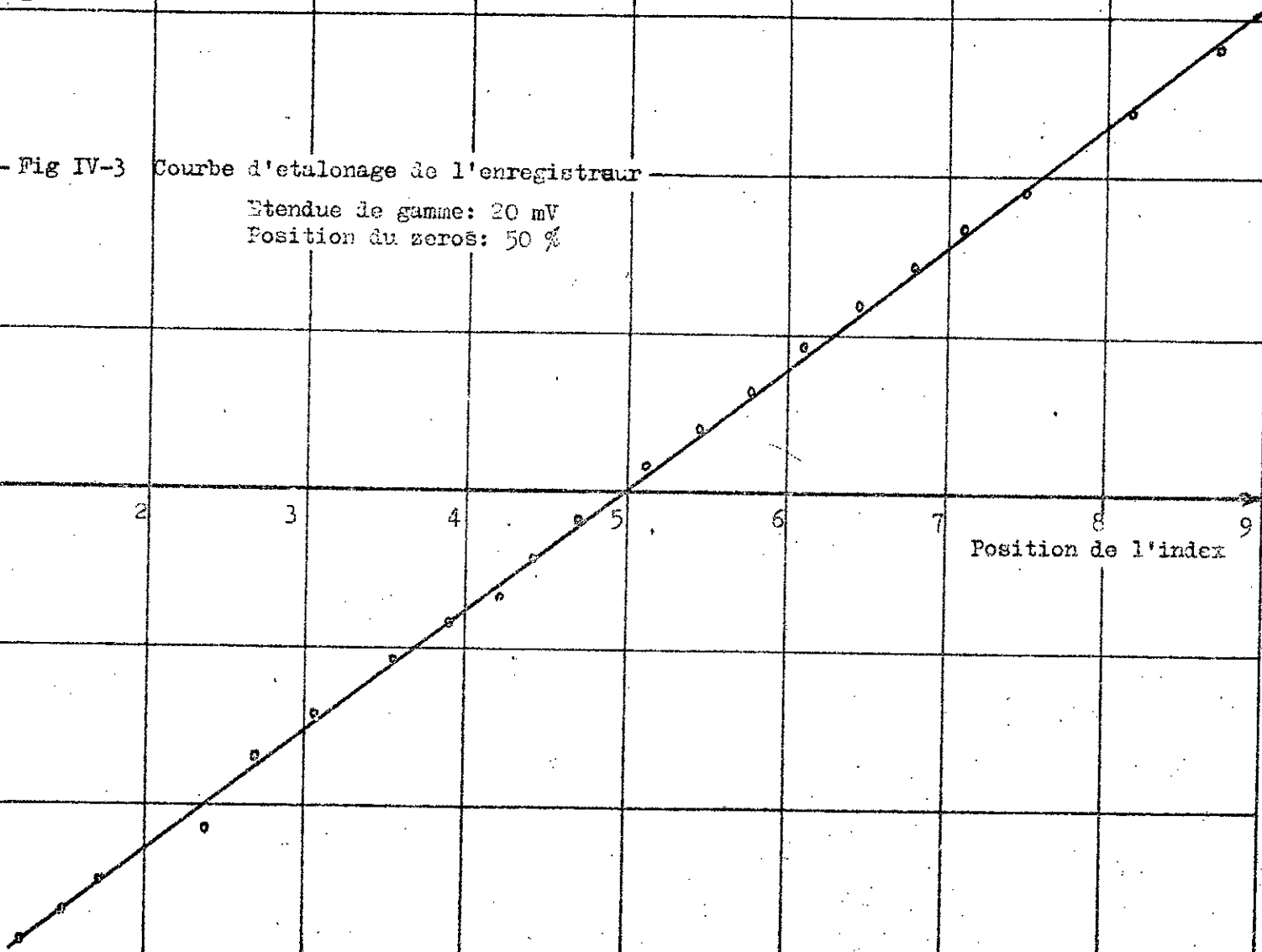
6

7

8

9

Position de l'index



V. ETUDE DU PROCESSUS THERMIQUE

V-1 ANALYSE THEORIQUE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU PROCESSUS THERMIQUE

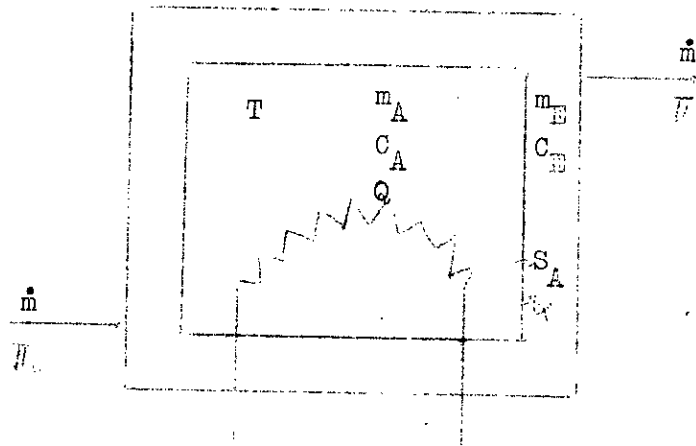


Fig V-1 Modèle mathématique du four

T : température de la masse d'aluminium ($^{\circ}\text{C}$)

T_e : température de l'eau entrante ($^{\circ}\text{C}$)

T_s : température de l'eau sortante ($^{\circ}\text{C}$)

Q : chaleur dégagée par la résistance chauffante (J/EG)

\dot{m} : débit massique de l'eau de refroidissement (kg/S)

m_A, m_E : masses respectives d'aluminium et d'eau (kg)

C_A, C_E : chaleurs spécifiques respectives d'aluminium et d'eau ($\text{J/kg} \cdot ^{\circ}\text{K}$)

S_A : surface d'échange de la masse d'aluminium (m^2)

α : coefficient de convection Al-eau

Bilan thermique pendant le temps infinitésimale dt :

-quantité de chaleur dégagée par la résistance: dq_T

-quantité de chaleur prise par la masse m_A : dq_A

$$dq_A = m_A C_A dT$$

-quantité de chaleur prise par la masse m_E : dq_E

$$dq_E = m_E C_E dT_e$$

-quantité de chaleur prise par l'eau traversante: dq_m

$$dq_m = \dot{m} C_E (T_e - T_s)$$

-quantité de chaleur cédée par la masse d'aluminium à l'eau: dq_s

$$dq_s = Q_s dt$$

Q_s étant le flux de chaleur quittant la surface de la masse d'Al

$$Q_s = \alpha S_A (T - \bar{T})$$

Equations de conservation d'énergie pour la masse et l'eau;

-pour la masse d'Al

$$dq_A = dq_T - dq_s$$

$$m_A C_A dT = dq_T - \alpha S_A (T - \bar{T}) dt$$

$$m_A C_A \dot{T} = Q - \alpha S_A (T - \bar{T}) \quad \dots \quad (1)$$

ou $T = \frac{dT}{dt}$, $Q = \frac{dq_T}{dt}$

-pour l'eau

$$dq_E = dq_s - dq_m$$

$$m_E C_E dt = \alpha S_A (T - \bar{T}) dt - dm C_E (\bar{T} - \bar{T}_0)$$

$$m_E C_E \dot{\bar{T}} = \alpha S_A (T - \bar{T}) - \dot{m} C_E (\bar{T} - \bar{T}_0) \quad \dots \quad (2)$$

ou $\bar{T} = \frac{d\bar{T}}{dt}$, $\dot{m} = \frac{dm}{dt}$

L'équation (1) donne:

$$\bar{T} = T + \frac{m_A C_A}{\alpha S_A} \dot{T} - \frac{Q}{\alpha S_A}$$

en dérivant par rapport au temps on obtient:

$$\dot{\bar{T}} = \dot{T} + \frac{m_A C_A}{\alpha S_A} \ddot{T} - \frac{\dot{Q}}{\alpha S_A}$$

et en reportant les expressions de \bar{T} et $\dot{\bar{T}}$ dans (2) on a:

$$m_E C_E \left(\dot{T} + \frac{m_A C_A}{\alpha S_A} \ddot{T} - \frac{\dot{Q}}{\alpha S_A} \right) = \alpha S_A \left(- \frac{m_A C_A}{\alpha S_A} \dot{T} + \frac{Q}{\alpha S_A} \right) - \dot{m} C_E \left(T + \frac{m_A C_A}{\alpha S_A} \dot{T} - \frac{Q}{\alpha S_A} - \bar{T}_0 \right)$$

en écrivant cette équation sous une forme classique, et en donnant des appellations aux différents coefficients on obtient:

$$T + \left(\frac{m_B}{m} + \frac{m_A C_A}{S_A} + \frac{m_A C_A}{m C_E} \right) \dot{T} + \frac{m_B m_A C_A}{m S_A} \ddot{T} =$$

$$= \frac{m_B}{m S_A} \dot{Q} + \left(\frac{1}{S_A} + \frac{1}{m C_A} \right) Q + \bar{\Pi}_0$$

ou encore:

$$\zeta_1 \dot{T} + \zeta_2 \ddot{T} + T = \nu \dot{Q} + \mu Q + \bar{\Pi}_0$$

Appliquons la transformation de LAPLACE en considérant les conditions initiales nulles:

$$(1 + \zeta_1 s + \zeta_2 s^2) \bar{T} = (\nu s + \mu) \bar{Q} + \bar{\Pi}_0 \quad (3)$$

ou, la transformée de chacune des grandeurs est munie d'une barre

Discussion de l'équation (3):

Pour simplifier le problème, on considère que la valeur du coefficient α est infinie, ce qui signifie physiquement que l'échange de chaleur entre l'aluminium et l'eau se fait d'une manière parfaite. Il s'en suit que les coefficients de l'équation (3) prennent les valeurs suivantes:

$$\zeta_2 = 0$$

$$\zeta_1 = \frac{m_B}{m} + \frac{m_A C_A}{m C_E}$$

$$\nu = 0$$

$$\mu = \frac{1}{m C_A}$$

celle-ci devient alors:

$$(1 + \zeta_1 s) \bar{T} = \mu \bar{Q} + \bar{\Pi}_0 \quad (3')$$

On en déduit l'expression de la grandeur de sortie en fonction des grandeurs d'entrée Q et $\bar{\Pi}_0$.

$$\bar{T} = \frac{\mu}{1 + \zeta_1 s} \bar{Q} + \frac{1}{1 + \zeta_1 s} \bar{\Pi}_0 \quad (4)$$

ou μ : gain statique du processus thermique

ζ_1 : constante de temps du processus

Il est intéressant de discuter l'équation (4) en analysant la réponse indiciale à la variation de chauffage d'un échelon unité. Ceci montre qu'aux premiers instants de la réponse indiciale (c'est à dire la variable temps t très faible donc la variable s infinie-très grande) le terme $\zeta_1 s$ est grand devant l'unité qu'on néglige alors, et la fonction de

transfert s'identifie à celle d'un élément intégral.

Le rapport du gain statique ρ et de la constante de temps T_1 de cet élément intégral est indépendant du débit \dot{m} .

$$\text{Preuve: } \frac{\rho}{T_1} = \frac{1/\dot{m} C_E}{\frac{\dot{m} C_E}{m_E} + \frac{\dot{m} C_A}{m_A}} = \frac{1}{m_E C_E + m_A C_A}$$

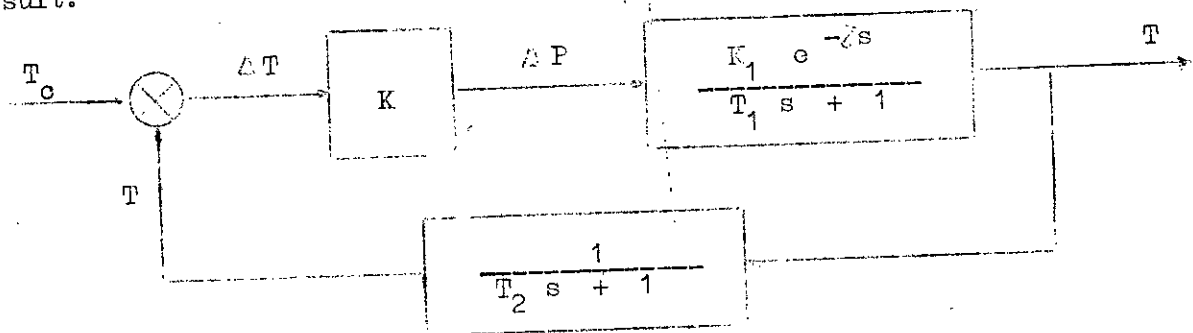
On en déduit donc que la réponse indicielle sera indépendante du débit aux premiers instants.

D'autre part on remarque que le gain statique diminue quand le débit \dot{m} augmente, il s'en suit que la valeur finale de la réponse indicielle (valeur asymptotique) diminue.

REMARQUE: On se propose de faire une analyse "experimentale" du comportement dynamique du processus pour confirmer ce qui vient d'être avancé.

V-2 ANALYSE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU PROCESSUS THERMIQUE

La boucle de régulation simplifiée, comportant le processus thermique et le régulateur à action proportionnelle peut être schématisée comme suit:



K : gain du régulateur

K_1 : gain du processus thermique

T_1 : constante de temps du processus

ζ : retard pur du processus

T_2 : constante de temps du manchon du thermomètre

ΔT : variation de la température du four par rapport à celle affichée

ΔP : variation de la puissance de chauffage

V-2-1 Influence de la charge sur la grandeur réglée:

-Manipulation:

L'essai se fait en boucle ouverte. On effectue l'échelon unité sur la grandeur réglante (par exemple 100 % de la puissance maximale) et on enregistre le signal d'écart de température. Ce dernier est donné par la fig V-2-1 pour différentes valeurs de la charge.

-Resultats et interprétations

Les courbes obtenues se décomposent de 3 parties:

Une première partie où la variation de la température est nulle. Cela étant dû au retard engendré par le thermomètre.

Une deuxième partie, où la variation de température est linéaire et indépendante de la charge.

Enfin, une troisième partie où la température augmente vers une valeur asymptotique qui diminue quand la charge augmente.

V-2-2 Le gain minimum du régulateur pour satisfaire aux exigences de précision:

On définit la précision comme étant l'inverse de la dépendance de la température du four (grandeur réglée) de la charge.

Pour concrétiser le problème on se donne les exigences de précision suivantes : par exemple, pour une variation du débit de 0,2 l/mn à 1 l/mn la tolérance sur la température doit être de ± 1 °C, c'est à dire que la variation de température admissible est de $\Delta T = 2$ °C.

ΔT admissible doit alors provoquer une variation de puissance de chauffage suffisante pour compenser la variation de la charge.

On est donc amené à déterminer la caractéristique liant la charge à la puissance de chauffage pour une température constante en régime établi.

-Manipulation:

On réalise la boucle fermée de la figure V-2 avec une faible bande proportionnelle du régulateur "P" (un gain élevé pour maintenir la température constante).

On enregistre alors le signal continu du régulateur qui est proportionnel à la puissance effective de chauffage (montrée au IV-3) utilisé

pour maintenir la température à sa valeur prescrite (soit 50°C), et cela pour plusieurs valeurs du débit d'eau.

-Résultats:et interprétations:

La courbe de variation de la puissance en fonction de la charge a une allure hyperbolique. Fig V-2-3

Pour les faibles charges, la température de l'eau sortante est à peu près égale à celle du four, alors une faible augmentation du débit augmente proportionnellement la prise de chaleur (le système y répond par une forte augmentation de la puissance de chauffage). Ceci est traduit sur la courbe par une pente élevée de la tangente à celle-ci.

Pour les débits élevés, la température de l'eau sortante diminue par rapport à la température du four, et donc une augmentation du débit augmente très peu la prise de chaleur. Les pentes des tangentes à la courbe sont ainsi plus faibles.

Cette courbe montre que ΔT admissible doit provoquer une variation de puissance de 45 % à 68 % de la puissance maximale. Le gain minimum du régulateur "P" qui peut assurer les exigences de précision sera donc:

$$K_{\min} = \frac{\text{Variation de la puissance}}{\text{Tolérance sur la température}} = \frac{68 - 45}{2} = 11,5 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$$

V-2-3 Dynamique de la boucle fermée:

Reprenons la boucle de la figure V-2 qu'on simplifie en considérant le retard pur τ (qui est de l'ordre de 20 secondes) négligeable devant T_1 , et que T_2 est aussi faible qu'on peut négliger l'intégrateur quelle provoque. La boucle devient:

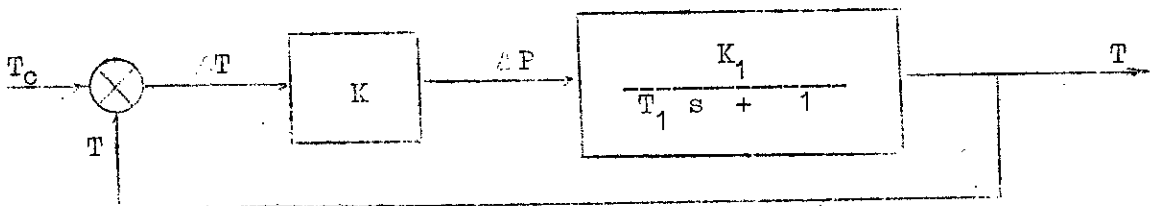


Fig V-2-4

La transmittance de la boucle formée est:
$$\frac{1}{\frac{T_1}{K K_1} s + 1}$$

Les paramètres K_1 et T_1 du processus thermique se déterminent à partir de la réponse indicelle en boucle ouverte. Et moyennant la méthode de BROIDA on obtient:

K_1 de l'ordre de 1,4

T_1 de l'ordre de 250 s

On remarque que le produit $K_{\min} \cdot K_1 = 11,5 \cdot 1,4 = 16,1$ est grand devant l'unité, qu'on peut négliger.

En ce cas la transmittance de la boucle fermée devient:

$$\frac{1}{\frac{T_1}{K_{\min} \cdot K_1} s + 1}$$

V-2-4 Assimilation du processus à un élément intégral:

On sait que la transmittance d'un élément intégral est $\frac{K_1 \cdot K}{T_1 s}$

En boucle fermée cette transmittance s'écrit:
$$\frac{1}{\frac{T_1}{K_1 \cdot K} s + 1}$$

On reconnaît la transmittance en boucle fermée du processus trouvée au V-2-3.

Conclusion:

En réalité le processus thermique est un élément à capacité. L'omission de l'unité devant $K_{\min} \cdot K_1$, signifie qu'on l'a remplacé par un élément intégral.

V-3 IDENTIFICATION DU PROCESSUS THERMIQUE

D'après le paragraphe V-2-4 on peut utiliser la méthode d'identification d'élément intégral. Et d'après le V-2-1 ce dernier est indépendant de la charge.

-Manipulation:

On réalise la boucle fermée de la figure V-2 qu'on coupe en déconnectant les bornes "1" et "4". On affiche sur le régulateur "P" un gain égal à 1 (BP= 100 %) de façon qu'il n'est pas d'effet sur le signal de sortie.

Partant d'un état stable, on donne un échelon sur le signal continu (puissance de chauffe). Au même moment on met en marche l'enregistreur qui reproduit le signal continu et le signal d'écart de température pendant

environ trois minutes (car seule la partie lineaire nous interesse).

-Résultats:

Pour pouvoir faire cette identification, on doit prendre les signaux d'entrée et de sortie au même point et avec les mêmes unités. Le montage du régulateur ne l'ayant pas permis, on a dû reporter le signal d'ecart à la sortie du régulateur. Pour cela, connaissant la caractéristique du régulateur "P" pour BF = 100 % on détermine la rampe de puissance correspondante à la rampe de l'ecart de température, qui est la réponse à l'echelon de puissance.

Dans le souci d'avoir une bonne approximation des paramètres de l'élément, on a fait plusieurs essais qui n'ont pas tous donné les mêmes résultats. On a choisis les valeurs moyennes trouvées, qu'on donne ici.

Retard pur: $\tau = 21 \text{ s}$

Pente du signal d'ecart: $0,25 \text{ V/mn}$

Valeur de l'echelon du signal continu: $1,66 \text{ V}$

Constante de temps: $T_1 = \frac{1,66}{0,25} = 6,64 \text{ mn} = 398,4 \text{ s}$

La fonction de transfert du processus thermique est donc:

$$G(s) = \frac{e^{-21s}}{398,4 \text{ s}}$$

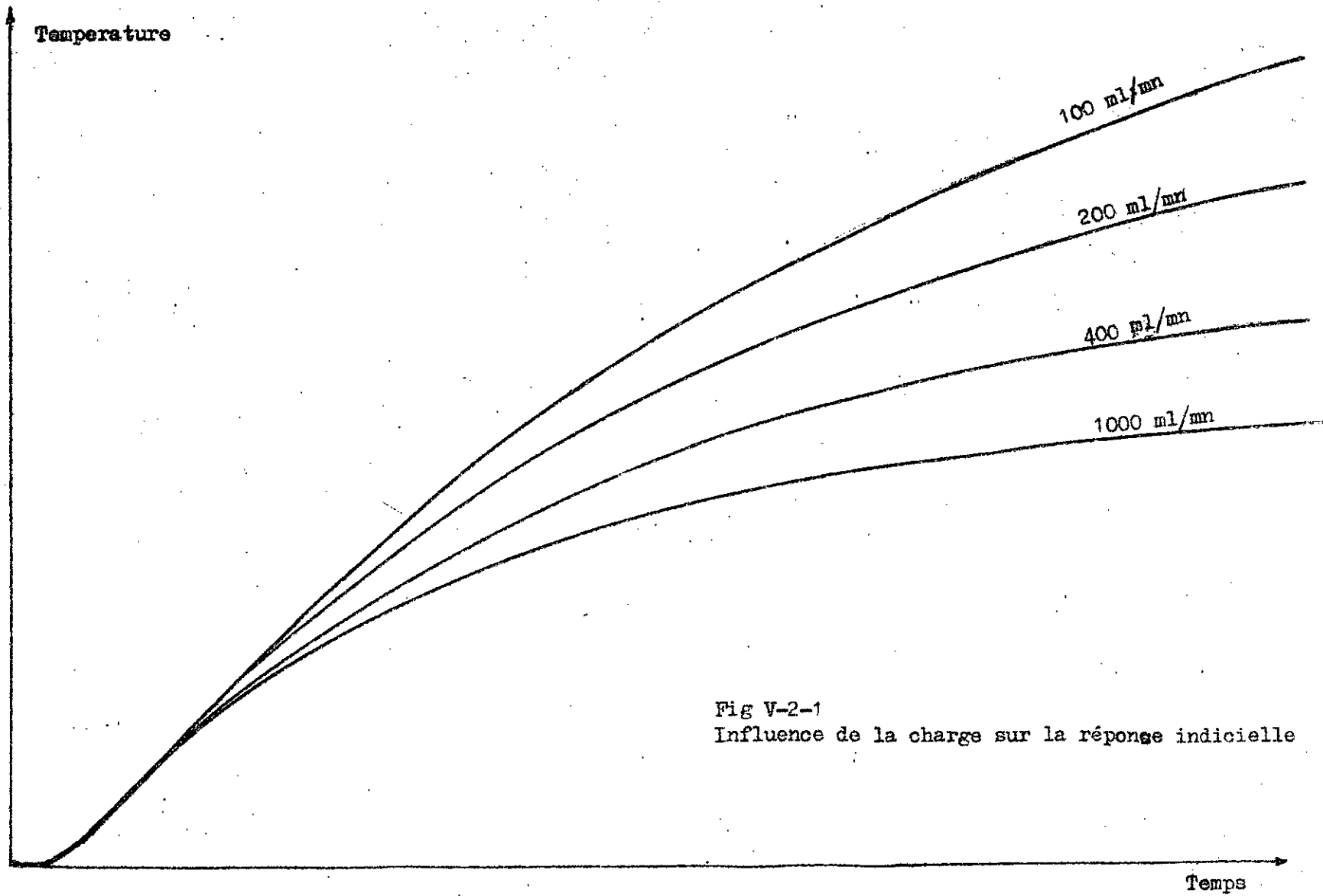


Fig V-2-1
Influence de la charge sur la réponse indicielle

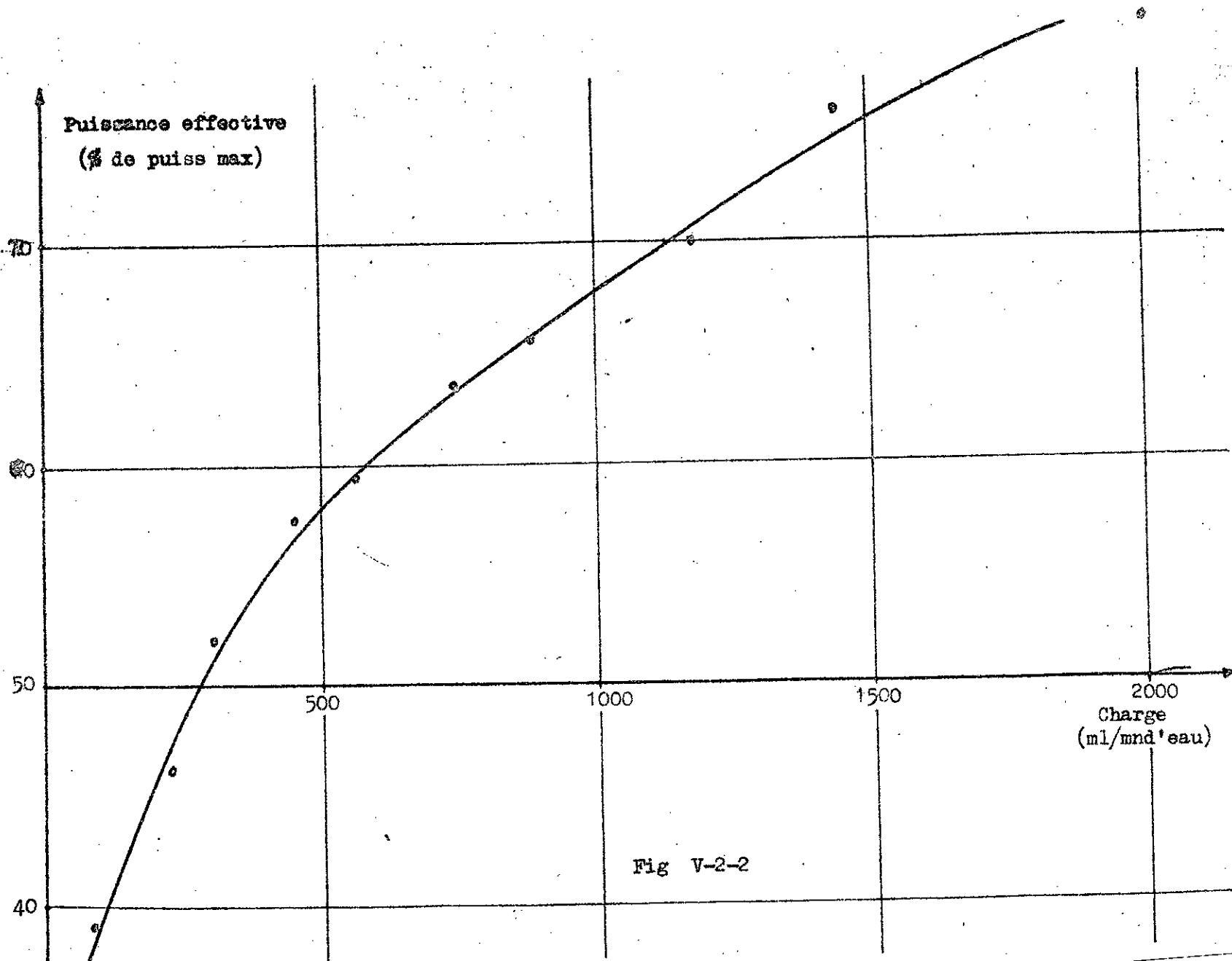


Fig V-2-2

VI.,. DETERMINATION DES CONFIGURATIONS
OPTIMALES D'AFFICHAGE

VI-1 CRITERES DE QUALITE DE REGULATION

La connaissance des facteurs de qualité permet de choisir la meilleur methode pour parvenir à maintenir une grandeur à sa valeur de consigne.

Les critères de qualité se basent sur la connaissance de l'ecart (ε = consigne - valeur mesurée) et de son evolution.

-Critères statiques: on cherche à minimiser l'ecart permanent (en régime établi)

-Critères dynamiques: on cherche à .minimiser le temps de réponse
.avoir un bon amortissement

VI-2 CRITERES D'OPTIMISATION

L'obtention d'une qualité meilleur consiste à minimiser l'erreur E

VI-2-1 Erreur intégral de l'ecart:

$$E_I = \lim_{t \rightarrow \infty} \int \varepsilon \, dt$$

L'inconvenient de cette methode est que dans decas des oscillatons de la grandeur réglée autour de la consigne, fait que les surfaces positives et négatives s'annulent, et donne à croire que E_I est faible.

VI-2-2 Erreur absolue intégral de l'ecart:

$$E_{AI} = \lim_{t \rightarrow \infty} \int |\varepsilon| \, dt$$

Elle elimine l'inconvenient de E_I

VI-2-3 Erreur quadratique intégral de l'ecart

$$E_{QI} = \lim_{t \rightarrow \infty} \int \varepsilon^2 \, dt$$

L'existence de la puissance 2 met l'accent sur les grands depassement que la minimisation de E_{QI} limite.

VI-2-4 Critère I.T.A.E

(Intégral of Time multiplied Absolute value Erreur)

$$E_{\text{IATE}} = \lim_{t \rightarrow \infty} \int \varepsilon t \, dt$$

Minimiser E_{IATE} , revient en plus à un réglage qui ramène la stabilité le plus rapidement possible.

VI-3 METHODES D'OPTIMISATION

Les critères de qualité de régulation doivent être mis en pratique par des méthodes qui déterminent les paramètres à afficher des régulateurs.

Le traitement mathématique des boucles de régulation peuvent déboucher sur le calcul de configurations optimales. Néanmoins, plusieurs chercheurs se sont basés sur des méthodes expérimentales et ont donné des règles d'ajustement de ces paramètres.

VI-3-1 Règles d'ajustement:

Le tableau de la figure VI-3-1 donne les paramètres d'affichage des différents régulateurs, pour un élément intégral astatique de constante de temps T_1 , et de retard pur τ .

Type de régulation	Dépassement 0 %	Dépassement 20 %	Minimum de $\int_0^{\infty} \varepsilon^2 dt$
P	$K_p = 0,37 \frac{T_1}{\tau}$	$K_p = 0,7 \frac{T_1}{\tau}$	---
P I	$K_p = 0,46 \frac{T_1}{\tau}$ $T_i = 5,75 \tau$	$K_p = 0,7 \frac{T_1}{\tau}$ $T_i = 3 \tau$	$K_p = \frac{T_1}{\tau}$ $T_i = 4,3 \tau$
P I D	$K_p = 0,65 \frac{T_1}{\tau}$ $T_i = 5 \tau$ $T_d = 0,23 \tau$	$K_p = 1,1 \frac{T_1}{\tau}$ $T_i = 2 \tau$ $T_d = 0,37 \tau$	$K_p = 1,36 \frac{T_1}{\tau}$ $T_i = 1,6 \tau$ $T_d = 0,5 \tau$

Fig VI-3-1 Paramètres de régulateurs pour élément intégral astatique. D'après la référence 4

VI-3-2 Règles de ZIEGLER et NICHOLS :

Le système (régulateur + procédé à réguler) étant en boucle fermé, ils l'amènent aux oscillations auto-entretenuës en augmentant le gain du régulateur proportionnel; Et notent la bande proportionnelle correspondante BP_{osc} , ainsi que la période des oscillations T_{osc} .

REMARQUE: Si la boucle contient le régulateur "P I", on supprime l'action intégrale en prenant pour T_i la valeur maximale.

Ils prennent alors comme configuration optimales d'affichage les valeurs données par le tableau de la figure VI-3-2.

Type de régulation	Affichages
P	$BP = 2 BP_{osc}$
P I	$BP = 2,2 BP_{osc}$ $T_i = 0,85 T_{osc}$
P I D	$BP = 1,7 BP_{osc}$ $T_i = 0,5 T_{osc}$ $T_d = 0,12 T_{osc}$

Fig VI-3-2 Résultats de Ziegler - Nichols

D'après les références 1,8

VI-4 DETERMINATION DES AFFICHAGES DES REGULATEURS

Pour appliquer les règles d'ajustement à notre cas, on utilise les résultats du paragraphe V-3:

$$\tau = 21 \text{ s}$$

$$T_1 = 398,4 \text{ s}$$

Pour appliquer les règles de Ziegler - Nichols on procède à la manipulation adéquate qui donne:

$$BP_{osc} = 1 \%$$

$$T_{osc} = 1,6 \text{ mn}$$

Tous les résultats sont récapitulés dans le tableau de la figure VI-4-1 .

Type de régulation		Dépas ^t 0%	Dépas ^t 20%	Mini $\int \xi^2 dt$	Ziegler-Nichols
P	Kp	7,02	13,28		
	BP %	14,2	7,5		2
P I	Kp	8,73	13,28	18,97	
	BP %	11,5	7,5	5,3	2,2
	Ti mn	2,02	1,05	1,5	1,45
P I D	Kp	12,33	20,87	25,8	
	BP %	8,1	4,8	3,9	2,5
	Ti mn	1,75	0,7	0,56	0,85
	Td mn	0,08	0,13	0,18	0,20

Fig VI-4-1

VI-4 ESSAIS VERIFIANT LES RESULTATS

Avant de passer aux essais on va faire une petite critique sur les résultats récapitulés dans le tableau précédent. On remarque ainsi que les affichages des constantes de temps Ti et Td trouvées par les deux méthodes (règles d'ajustement et règles de Ziegler-Nichols) sont du même ordre de grandeur. Par contre, les affichages des BP sont loin de l'être, les règles d'ajustement donnent des valeurs de la BP plusieurs fois plus grandes.

Cette différence des résultats est due au fait que les formules du tableau fig VI-3-1 sont données avec une large marge de sécurité (c'est à dire que la majoration des valeurs du gain proportionnel Kp est très pessimiste). Ce qui fait qu'elles donnent une valeur de la BP assez grande pour assurer une bonne stabilisation de la grandeur réglée, mais cela est malheureusement au dépend de la précision.

Une autre cause à citer, est que l'assimilation de la fonction de

transfert du processus thermique à celle d'un élément intégral n'est qu'une approche suffisamment précise sur la partie transitoire, mais reste différente de la réalité car il est incontestable que la fonction de transfert est d'un degré beaucoup plus grand.

Pour vérifier les affichages optimaux des régulateurs, on enregistre la réponse indicielle à une variation brusque de la valeur de consigne (on peut aussi produire un échelon sur la grandeur réglante). On maintient constants le débit et la température d'entrée de l'eau.

Les réponses indicielles enregistrées pour différents affichages du régulateur "P" sont données à la fig VI-5. Elles montrent clairement que pour l'affichage $BP = 2\%$ l'écart statique est le plus faible et la stabilité est bonne. Pour les deux premières valeurs de la BP la stabilité est meilleure mais l'écart statique est trop important, par contre la dernière courbe obtenue en affichant une BP très faible (plus faible que la valeur optimale) montre l'instabilité de la grandeur réglée qui oscille autour de la valeur de consigne.

Les essais de vérification des affichages des régulateurs "PI" et "PID" montrent aussi que les valeurs obtenues par la méthode de Ziegler-Nichols donnent la meilleure régulation de la température. On a pu voir pour l'action "PI" que si T_i est trop faible il y a instabilité du système, et si T_i est trop grande le système devient très lent. Cependant, comme le remède apporté au module intégral n'était pas sûr, on s'est abstenu de donner les enregistrements effectués.

CONCLUSION:

La méthode de Ziegler-Nichols est très puissante puisque elle ne nécessite aucune connaissance du procédé à réguler, de plus elle donne de bons résultats. Sa simplicité la rend très pratique pour son utilisation dans l'industrie.

Il faut tout de même remarquer qu'il est dangereux de l'utiliser pour des systèmes qui ne tolèrent pas le pompage.

Avec l'affichage $BP = 2\%$, le régulateur à action "P" est bien adapté au comportement dynamique du procédé, ce qui lui permet une bonne régulation de la température du four.

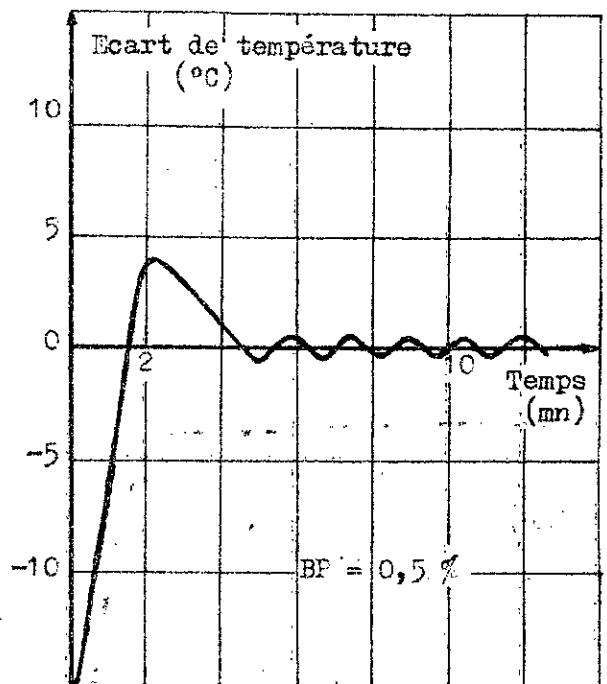
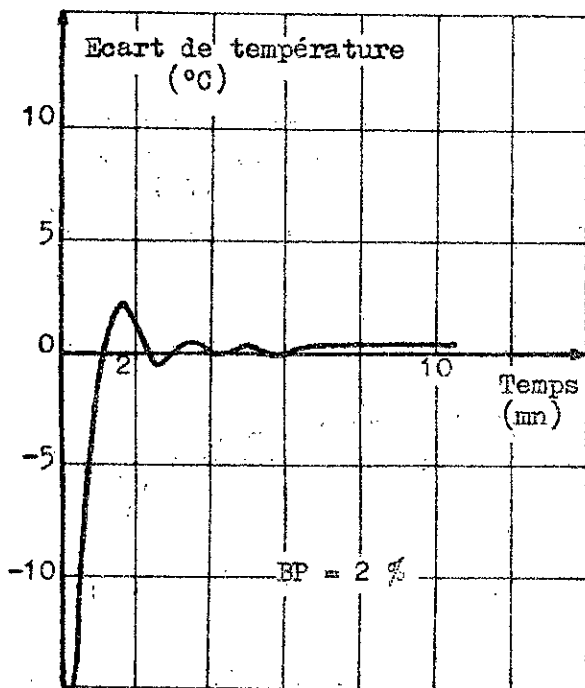
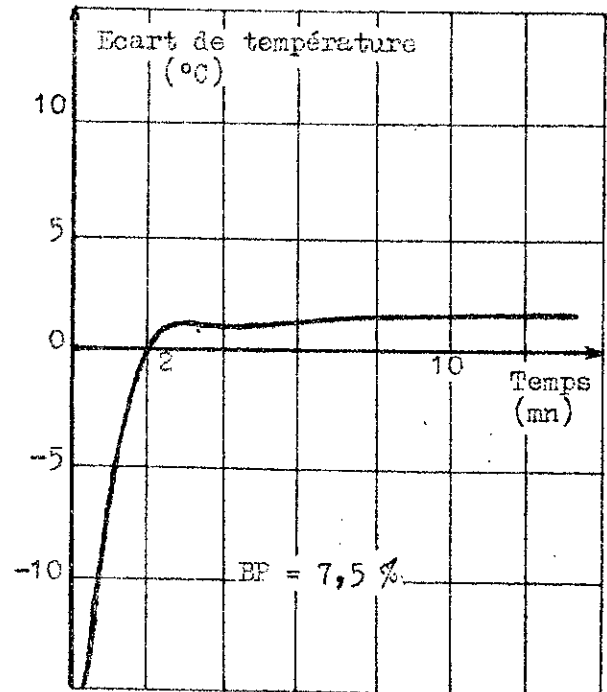
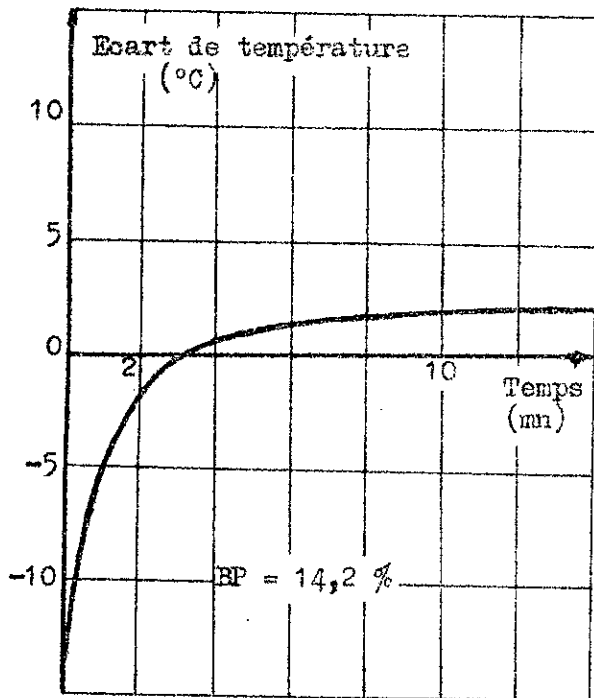


Fig VI-4-1-b Régulation à action proportionnelle

Débit d'eau = 200 ml/mn

VII. PROPOSITIONS POUR L'UTILISATION DU BANC D'ESSAI

INTRODUCTION:

Une vingtaine d'expériences peuvent être faites à l'aide de ce banc d'essai. Dans lesquelles on peut étudier, en plus de la régulation de la température du four par les différents modes d'action du régulateur et selon les différentes pertes thermiques, les réponses en fréquence du système et même le transfert de chaleur des manchons.

Toute fois, vu le programme des modules enseignés, dans lesquels les travaux pratiques sur ce banc peuvent y être insérés. Nous avons choisi de proposer des manipulations qui peuvent amener un aspect pratique aux cours théoriques, et qui n'ont pas eu la possibilité de se faire sur d'autres bancs. Ainsi, nous avons pensé que la régulation par "tout ou rien" pourrait donner une image très simple sur ce qu'est la "régulation" pour des débutants dans cette technique.

Travaux Pratiques-1 : REGULATION PAR "TOUT OU RIEN"

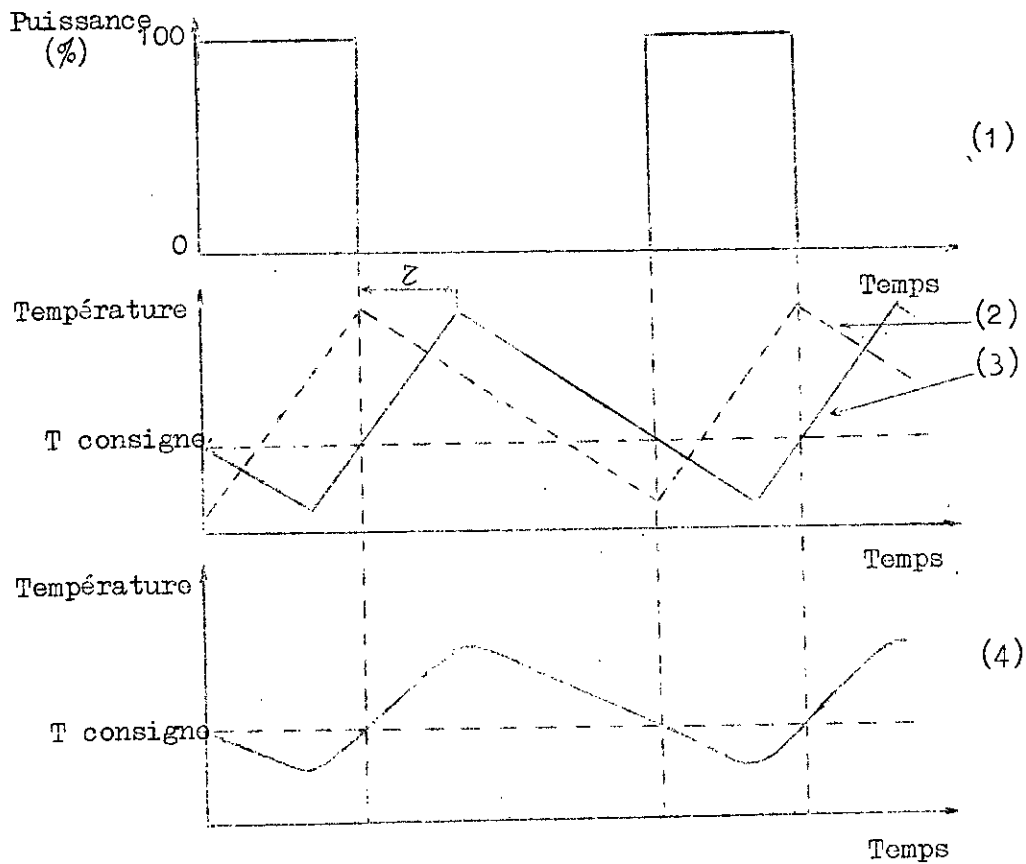
1-1 But:

Cette expérience a pour but de montrer que la régulation par "tout ou rien" produit des oscillations de la grandeur réglée autour de la valeur désirée et que la grandeur et la période de ces oscillations sont liées aux constantes de temps du système réglé.

1-2 Théorie:

Pour simplifier l'étude de la régulation de la température du four par le mode "tout ou rien", on va considérer que le processus est un élément à retard pur. Ce dernier est dû à l'inertie du système et à la distance existant entre le point source de chaleur (résistance chauffante) et le point où la température est mesurée (thermomètre). Il s'en suit que les courbes de variation de température en ces points sont décalées l'une par rapport à l'autre suivant l'axe des temps. Figures VII-1-2

La description détaillée de l'évolution de la température a été donnée au paragraphe II-1-5.



- courbe (1): Puissance de chauffage
 (2): Evolution theorique de la température au point source de chaleur
 (3): Evolution theorique de la température mesurée
 (4): Evolution pratique de la température mesurée

Fig VII-1-2

1-3 Manipulation:

Brancher la commande sur ON/OFF. Alimenter le régulateur et l'enregistreur. Alimenter le réservoir à déversement d'eau de refroidissement. Afficher une température de consigne (50 °C). Placer le thermomètre sans manchon. Régler le débit d'eau à 600 ml/mn.

Enregistrer le signal d'ecart de température. Refaire l'expérience pour un débit de 200 ml/mn, puis un débit nul.

NOTA: On recommande pour ce cas une vitesse de déroulement du papier d'enregistrement de 5 . 120 mm/h.

1-4 Résultats types:

Les courbes enregistrées sont données dans la figure VII-1. Les différents paramètres caractérisants chacune de ces courbes sont évalués et récapitulés dans le tableau suivant:

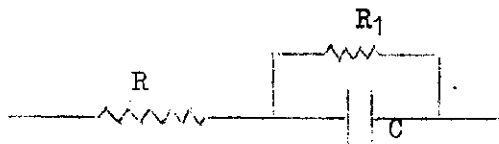
Débit d'eau	ml/mn	600	200	0
Pente de montée : p_m	°C/mn	4,08	5,27	3,29
Pente de descente : p_d	°C/mn	5,27	3,08	0,85
Ecart supérieur	°C	0,25	0,87	1,6
Ecart inférieur	°C	1,31	1,00	0,37
Amplitude des oscillations: A	°C	0,78	0,94	0,99
Période des oscillations: t	mn	0,69	0,97	2,94
Temps de réponse: τ_r	mn	0,17	0,22	0,47

1-5 Discussion des résultats:

On voit que dans ce mode de régulation la température oscille autour de sa valeur de consigne. Ainsi, le dépassement initial est supérieur aux autres. Ceci est dû au fait que la quantité de chaleur emmagasinée dans la masse thermique pendant la montée en température est supérieure à la quantité de chaleur fournie en régime permanent pendant les périodes de chauffage.

D'autre part, on remarque que le temps de réponse du système augmente quand le débit d'eau diminue. On va essayer d'expliquer cela en utilisant l'analogie électrique:

On considère le système comme une résistance R (masse thermique) qui alimente une capacité C (capacité thermique) avec une résistance de fuite R_1 (pertes dues à la charge), soit



La constante de temps du système peut alors s'écrire:

$$\tau_1 = C \frac{R \cdot R_1}{R + R_1}$$

On voit donc que cette constante de temps croit quand R_1 croit, or la croissance de R_1 correspond à une diminution du débit.

On remarque aussi que ce mode de régulation présente des écarts en régime permanent, ce qui n'a pas été prévu par la théorie (fig du N1-2). Cet écart statique dépend du débit d'eau, alors que l'amplitude des oscillations n'en dépend pas.

Travaux pratiques -2 : REGULATION PAR " ACTION PROPORTIONNELLE "

2-1 Buts :

- Détermination des affichages optimaux pour différentes des temps de de réponse (dues aux manchons) ^{valeurs} .
- Mise en évidence des effets de l'augmentation du gain sur l'écart en régime permanent .
- Détermination des relations liant les pertes dans le four et les écarts en régime permanent .

2.2 Théorie :

Toute la théorie concernant ce type de régulation à été donnée au paragraphe II.1 .Toute fois ,il est utile ici de détailler certains points concernant ce cas .

La fonction de transfert du régulateur étant $V = - K_p \cdot \theta$ mais si on ajoute le décalage manuel de l'entrée la valeur de l'écart introduit dans le régulateur sera $\theta' = \theta + \theta_m$ (ou θ_m est écart manuel) et la fonction de transfert de vient :

$$V = - K_p \theta - K_p \theta_m = - K_p \theta'$$

Par ailleurs on a vu au paragraphe IV-3-2 qu'une déviation nulle du signal de sortie correspond à 50 % de la puissance maximale de chauffe, la fonction doit donc s'écrire :

$$V = - K_p \theta' + 0,5$$

Si V_L est la valeur du signal continu (de sortie) nécessaire pour compenser les pertes de chaleur et maintenir la température du four à sa valeur prescrite, l'écart qui subsistera en régime permanent sera alors:

$$\epsilon_s = \frac{V_L}{K_p} - \frac{0,5}{K_p}$$

En posant V^* le pourcentage de la puissance maximale correspondante à la valeur V du signal de sortie on aura :

$$\epsilon_s = \frac{V_L^* - 50}{K_p}$$

Cette relation montre qu'il faut choisir un gain aussi grand que possible pour minimiser l'écart en régime permanent. C'est ce qu'on veut montrer par l'expérience tout en révélant l'instabilité que cela engendre.

2-3 Manipulations :

Faire le câblage du régulateur à action proportionnelle comme indiqué dans l'annexe "A". Pour pouvoir faire une étude comparative on va travailler toujours dans la même zone, par exemple entre 35 °C et 50 °C.

Laisser le système se stabiliser à la température 35 °C, puis à l'aide du dispositif d'affichage de la consigne, appliquer un échelon de 15 °C pour amener le système à la température de consigne de 50 °C.

On procédera ainsi dans chacune des expériences a, b, c.

a- Régler le débit d'eau à 200 ml/mn. et la BP à 100 %. Enregistrer le signal d'écart de température pendant au moins 5 mn du régime établi.

Refaire l'expérience pour des BP de 60, 20 et 5 %.

b- Régler le débit à 200 ml/mn. Placer le thermomètre directement dans la masse d'aluminium. Amener le système au oscillations entretenues en diminuant la valeur de la BP affichée. Enregistrer le signal d'écart pour les visualiser. Noter la valeur de la BP à laquelle on les aperçoit.

Refaire l'expérience avec le thermomètre placé avec manchon en laiton puis en bakelite.

c- Le thermomètre est placé sans manchon. Régler la BP à 10 %. Régler le débit d'eau à 600 ml/mn. Enregistrer le signal d'écart pendant suffisamment de temps pour voir le régime établi.

Refaire l'expérience pour des débits de 400, 200, 100, 0 ml/mn'.

N B: La deuxième voie de l'enregistreur donne l'évolution du signal continu comme réponse à l'échelon, mais reste sans grand intérêt pour cette étude.

2-4 Résultats types :

a- Les réponses indicelles enregistrées sont données à la fig VII-2-a (la première partie n'y est pas dessinée). Les valeurs des écarts en régime permanent sont mesurées sur ces graphes et récapitulées dans le tableau suivant :

Bande proportionnelle	%	100	60	20	5
Ecart statique	°C	4,2	3,8	3,2	2,9

b- Les enregistrements sont donnés à la fig VII-2-b . Ils permettent de déterminer la période des oscillations entretenues. On applique les règles de Ziegler-Nichols pour déterminer la bande proportionnelle optimale à afficher.

Térmomètre monté...	BP _{osc}	T _{osc}	BP optimale
sans manchon	1 %	1,6 mn	2 %
avec manchon en laiton	1,5	3,7	3
avec manchon en bakelite	2,5	5,9	5

c- Les enregistrements des réponses indicelles sont donnés à la fig VII-2-c. Les valeurs des écarts statiques sont récapitulés dans le tableau suivant:

Débit d'eau	ml/mn	625	400	100	0
Ecart statique	°C	-0,6	1,0	4,8	8,0

2-5 Interpretation des résultats :

a- Les résultats de cette expérience montrent que pour une BP de plus en plus faible, on a un écart statique et un écart maximal de plus en plus faibles. Aussi on remarque que la diminution de la BP engendre une déstabilisation de la boucle (composée du processus + régulateur) donc des oscillations de la grandeur réglée.

On est donc amené lors du réglage du régulateur, à trouver un compromis entre la stabilité et la précision.

b- Pour une charge donnée, on voit que l'affichage optimal du régulateur à action proportionnelle diffère suivant que le thermomètre est monté sans ou avec manchon en laiton ou bakelite. Ceci montre l'influence du retard pur du à ces derniers sur la stabilité et la précision de la grandeur réglée.

Il faut noter que le jeu existant entre le thermomètre, le manchon et la masse est rempli d'air qui engendre des pertes thermiques qui peuvent nuire à la précision de la régulation.

c- D'une manière générale l'influence de la charge sur la valeur de l'erreur statique est très importante.

Pour les faibles débits, la chaleur prise par l'eau est faible, et la température du four reste alors plus élevée que celle affichée. Or l'écart est égale à $T_{\text{consigne}} - T_{\text{mesurée}}$, ce qui explique pourquoi l'erreur statique ξ_s est négative et de valeur absolue élevée.

Pour les débits élevés, la quantité de chaleur prise par l'eau est importante par rapport à la puissance de chauffage, et la température du four reste alors plus faible que celle affichée. Ce qui fait que ξ_s est positive.

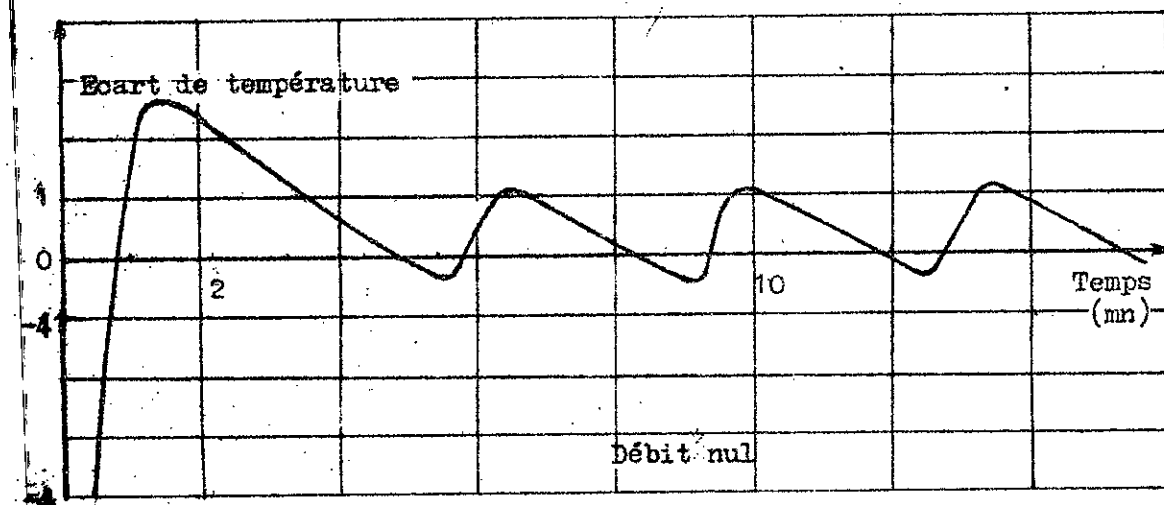
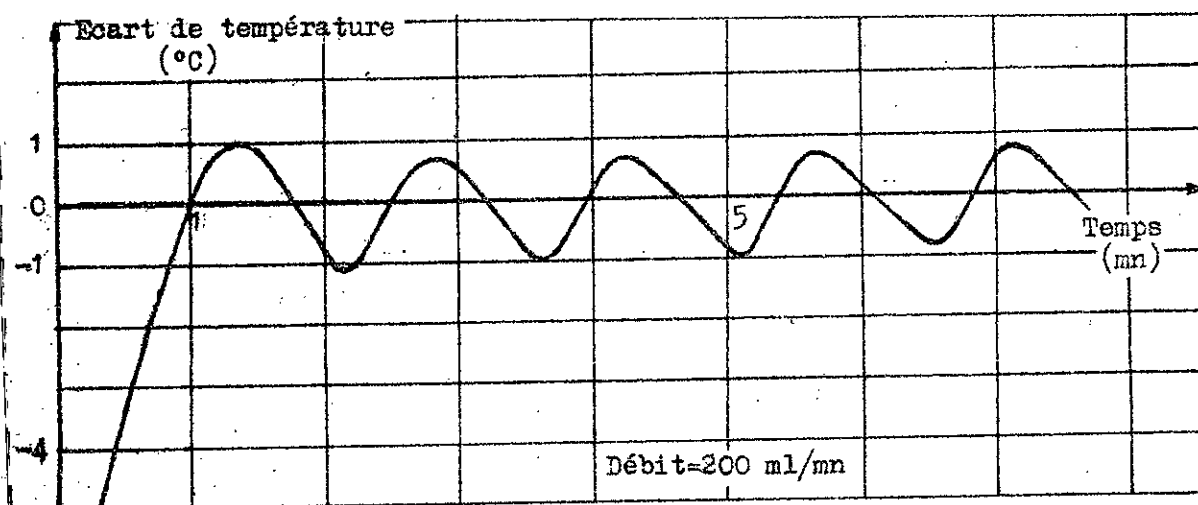
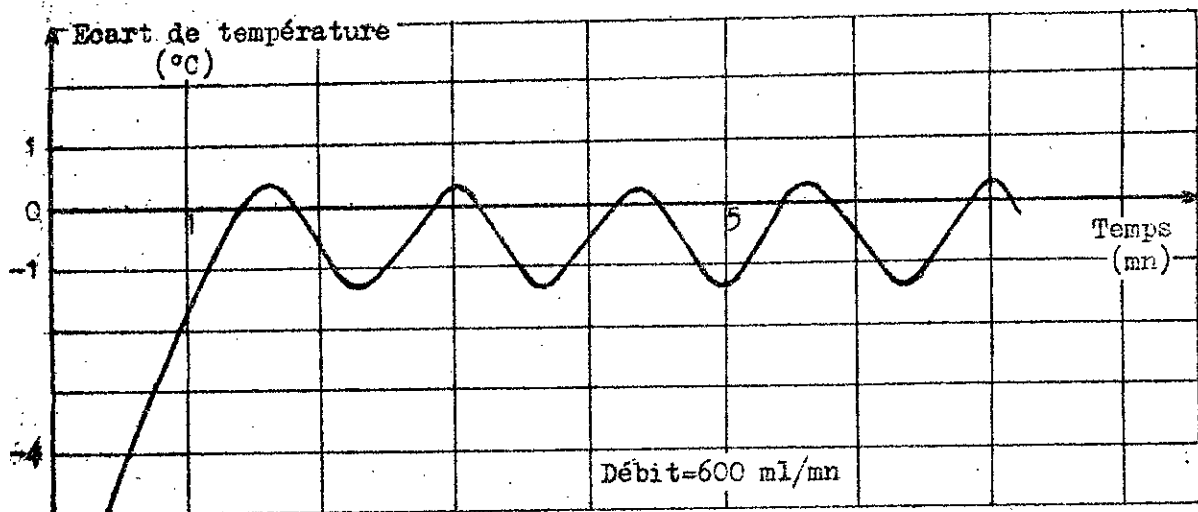


Fig VII-1 Régulation par "Tout ou rien"

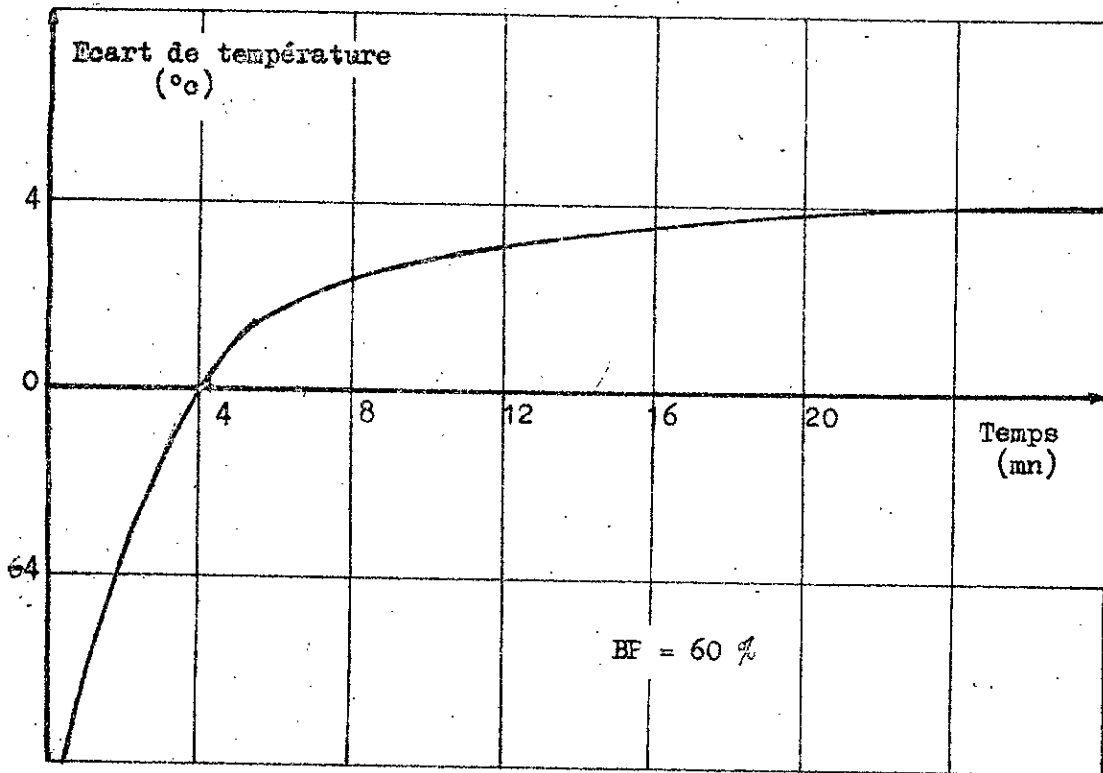
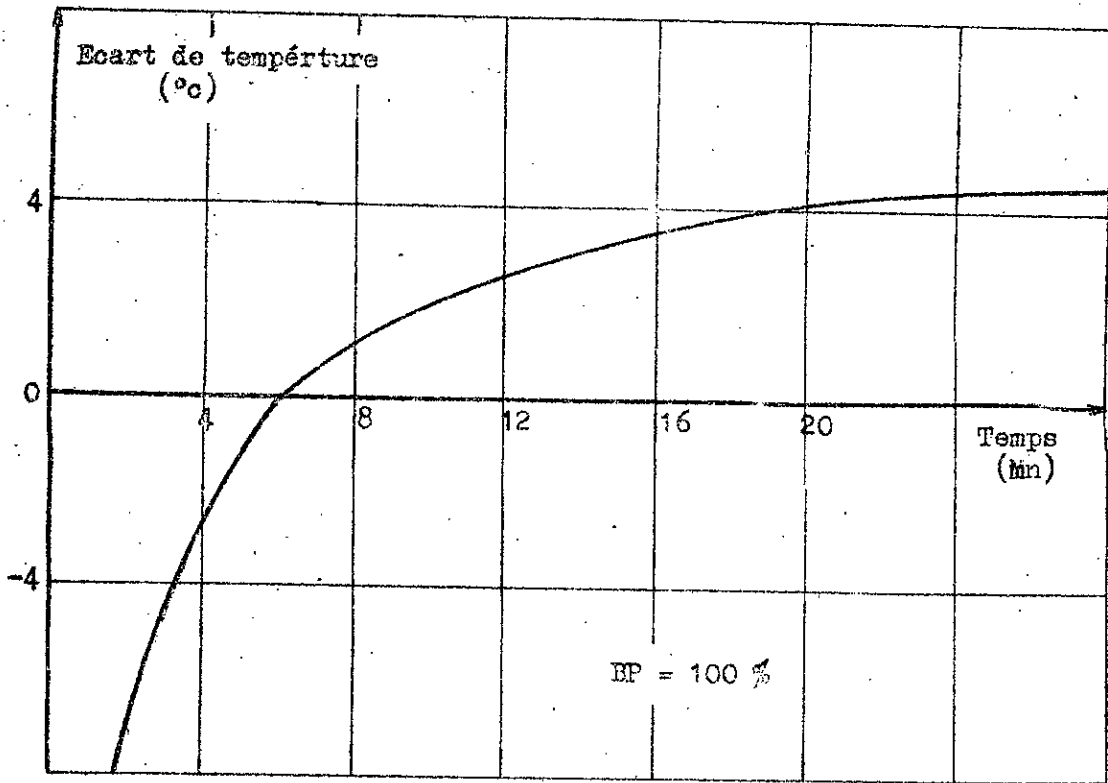
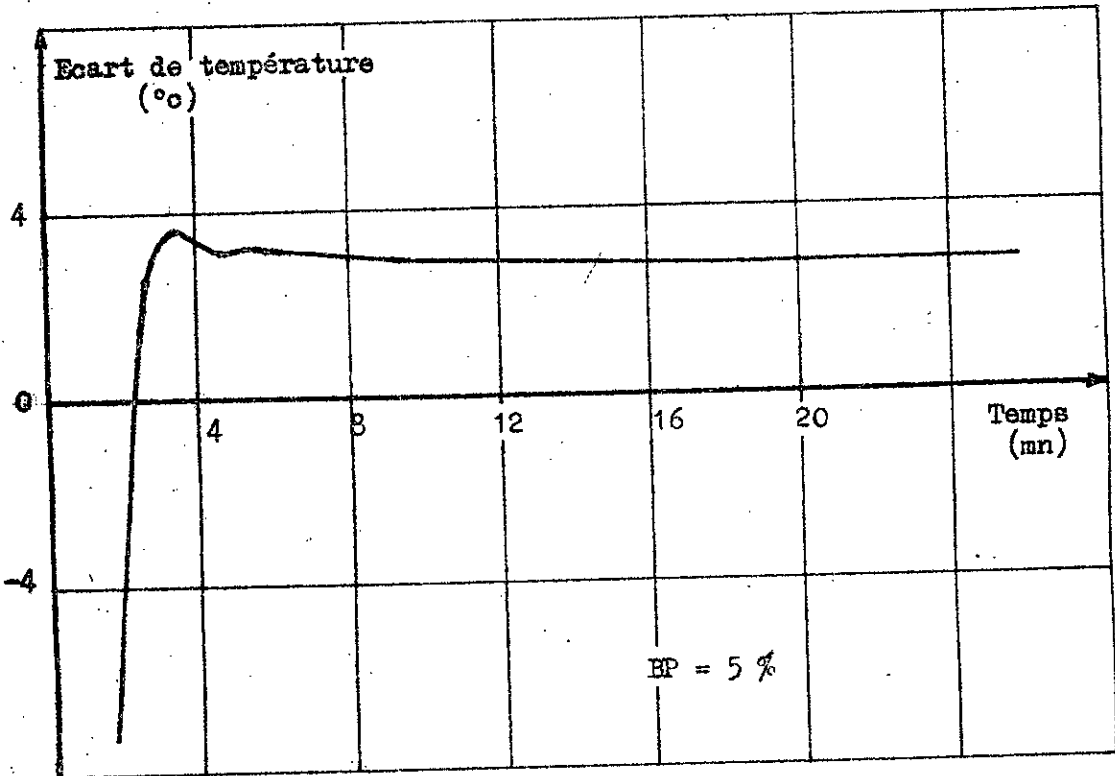
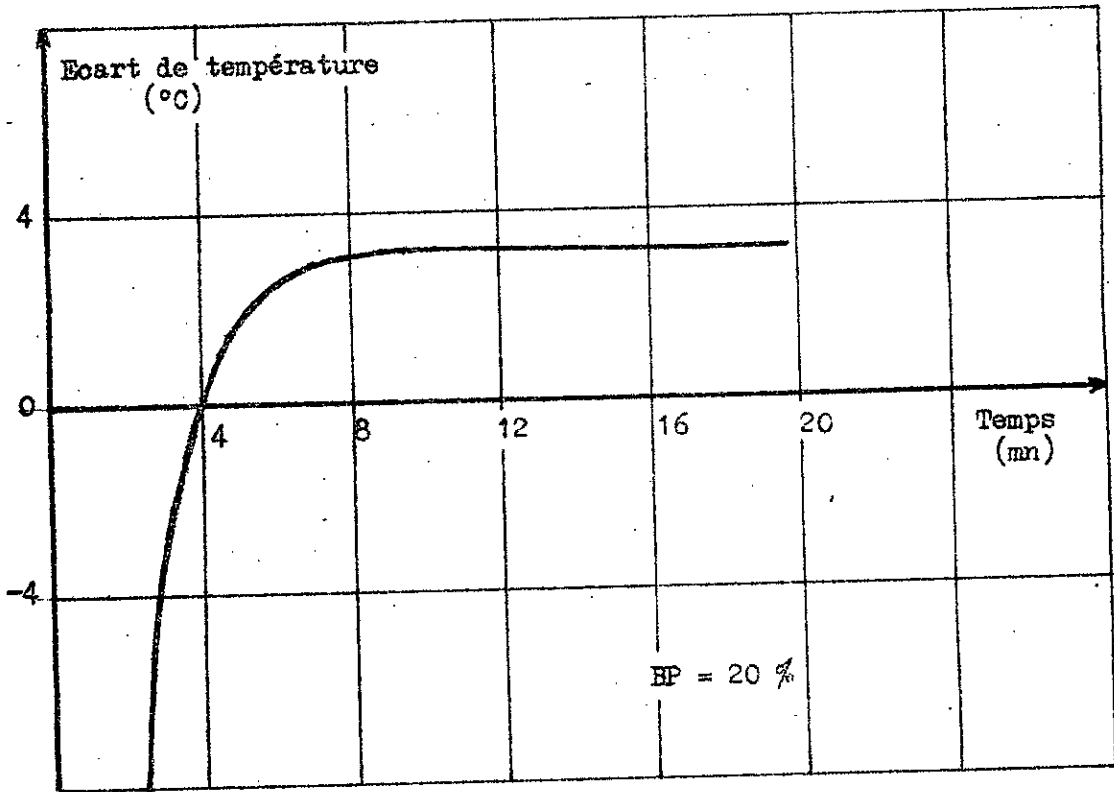
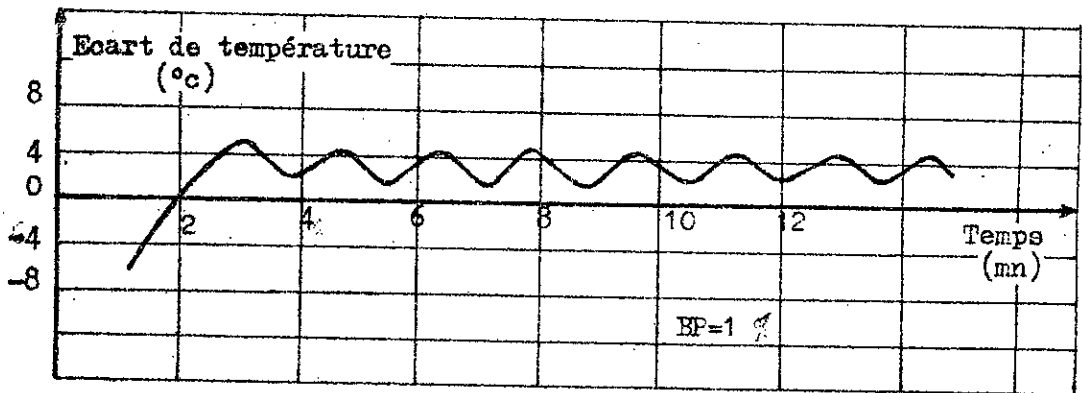


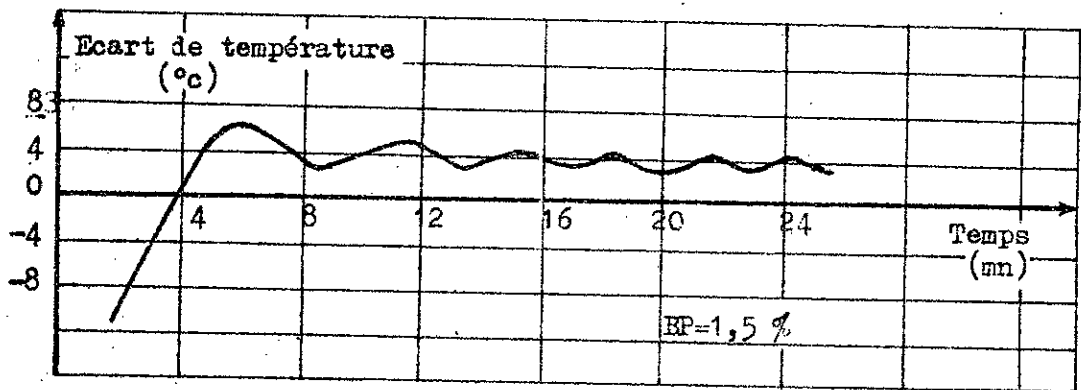
Fig VII-2-A Régulation à action proportionnelle
(Débit=200 ml/mn)

Suite de la fig VII-2-a

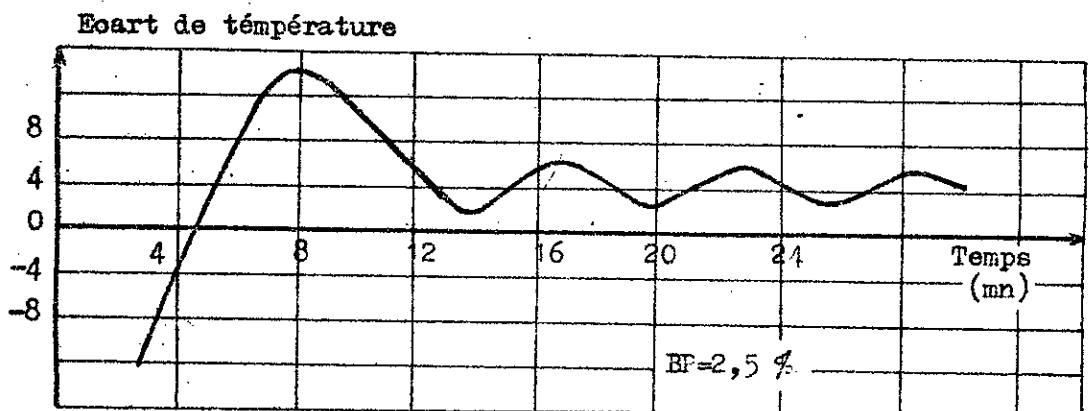




Thermomètre monté sans manchon



Thermomètre monté avec manchon en laiton



Thermomètre monté avec manchon en bakélite

Fig VII-2-b Régulation à action proportionnelle
(Débit=200 ml/mn)

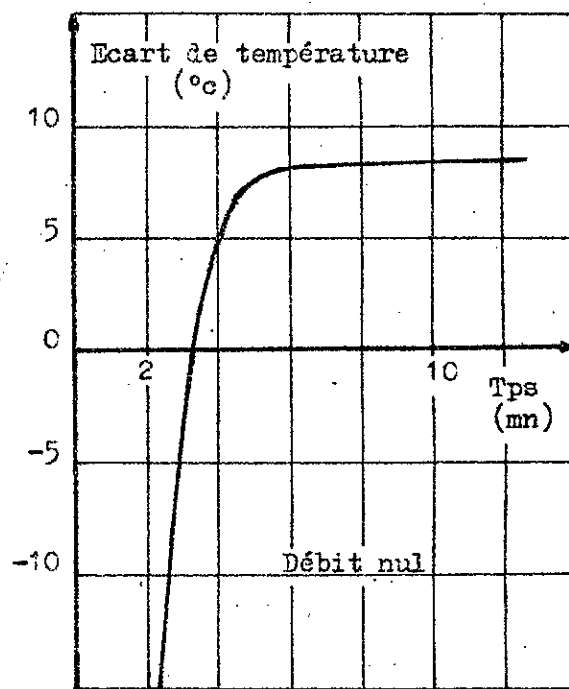
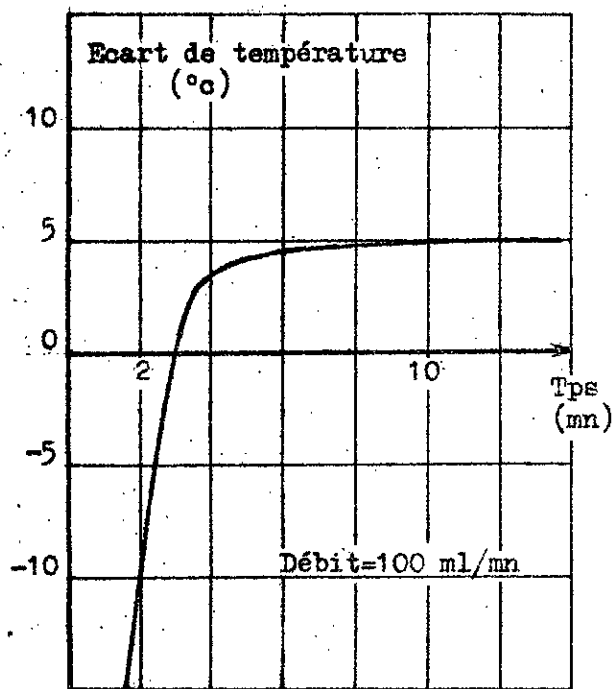
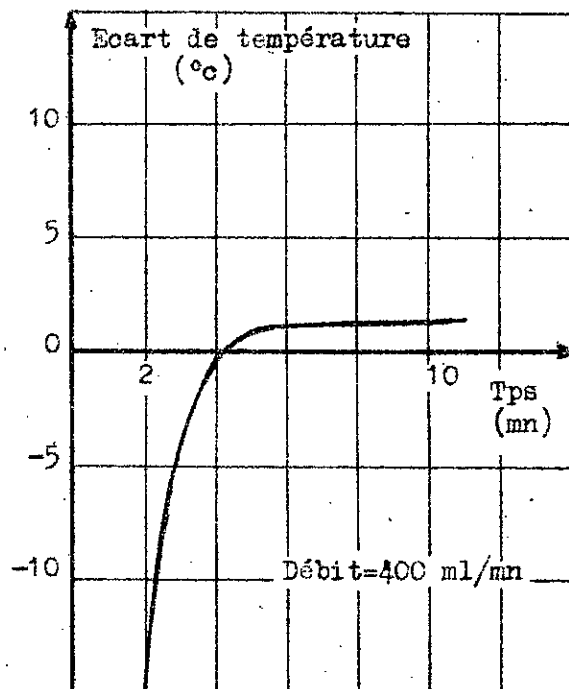
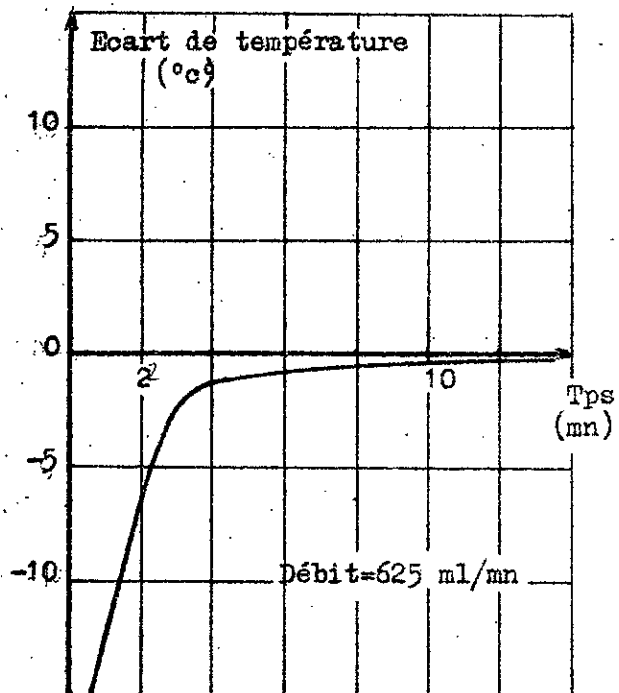


Fig VII-2 Régulation à action proportionnelle $HP=10\%$

C O N C L U S I O N

Notre principal objectif a été atteint; nous avons rendu opérationnel un banc d'essai de régulation et un enregistreur qui étaient inactifs depuis trop longtemps.

Aussi, on a pu élaborer une méthode d'adaptation du régulateur au comportement dynamique du procédé thermique et déterminer ses paramètres optimaux d'affichage. L'étude théorique permet de conclure que le régulateur à action PID est celui qui puisse assurer la meilleure régulation de la température du four, malheureusement on a pas pu vérifier ses affichages obtenus à cause de l'infidélité du module intégral du régulateur. On se contentera donc du régulateur à action "P" qu'on a parfaitement adapté.

Cet appareillage ayant des possibilités d'utilisation innombrables; permettra aux étudiants de découvrir beaucoup de choses sur la régulation.

En recommandations; j'insisterai d'abord sur les directives d'entretien que j'ai données. Il serait intéressant de compléter ce banc par un générateur de signaux harmoniques de très basses fréquences, qui permettrait l'étude de la réponse harmonique de la régulation de température.

L'enregistreur pourra aussi enrichir l'exploitation des nombreux bancs d'essai de notre laboratoire d'énergetique.

Pour ma part, je ne saurais évoquer toutes les connaissances que j'ai acquises aussi bien dans le domaine de la régulation que dans la pratique au contact de matériel diversifié.

Enfin, je dirai que l'ingénieur "polytechnicien" ne doit pas reculer devant des obstacles qui semblent en premier abord ne pas être de son domaine.

A N N E X E - A

UTILISATION DU REGULATEUR

On donne ici les connections nécessaires pour l'obtention des différents modes d'action du régulateur. Les numeros des bornes correspondent à ceux des figures III-a et b .

- Régulation par "tout ou rien" : 1-4 , pour visualiser l'ecart sur l'indicateur mettre en position "contrôle ON/OFF"
- Action "P" : 1-4 6-7 8-9 (2-3)
mettre en position "contrôle proportionnel"
- Action "P I" : 1-4 6-14 7-13 8-12 9-15 2-11
- Action "P D" : 1-4 6-18 7-17 8-16 9-15 (2-3)
- Action "P I D" : 1-4 6-14 7-13 8-12 9-19 15-16 2-11

N B : La connection 2-3 est facultatif suivant qu'on desire un decalage manuel de l'entrée ou non.

Le point 9 peut être remplacé par le 10 si l'on desire une bande proportionnelle entre 0 et 10 % .

ANNEXE - B

ADRESSES UTILES

Dans le souci d'exploiter au maximum les appareils composant ce banc d'essai, nous avons juger bon de donner ici quelques adresses susceptibles d'être utiles à l'aquisition de pièces détachées.

- Techipment - Limited -

Hooton street . Carlton road . Nottingham NG. 32 NJ
ENGLAND.

- Bureau de liaison Philips

24 bis, rue Bougainville . El Mouradia . Alger
ALGERIE.

- INTERIMEX (Vente par compte remboursement de materiel Philips)

2, rue Jean Mermoz . Po.Box 5177211 . 77210 Avon
FRANCE.

Tèlex : 600740

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

-OUVRAGES

- Ref 1 M. CERR Instrumentation industrielle -V 2-
Technique et documentation - 1980
- Ref 2 D. DINDELEUX Technique de la régulation industrielle
Eyrolles - 1981
- Ref 3 P. NASLIN Technologie et calcul pratique des systèmes asservis
Dunod - 1968
- Ref 4 W. FINDEISENA Automatyka - Poradnik inzyniera
Varsovie - 1969
- Ref 5 Encyclopédie des sciences industrielles
Quillet - 1974

-REVUES

- Ref 6 Mesure - Régulation - Automatisme
Aout / Septembre 1980
- Ref 7 Automatisme
Mars 69 et Octobre 70
- Ref 8 I . I . R . A . C . Mesure
5 Novembre 1984

-MANUELS

- Ref 9 Bulletin technique delta - lab
Régulateur et maquette de contrôle de processus
- Ref 10 Mode d'emploi
Enregistreur multivoies PR 3500

