

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

25/87

وزارة التعليم و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

2006

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المكتبة الوطنية المتعددة التخصصات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

SYSTEME DE REGLAGE  
AUTOMATIQUE D'UN FOUR  
OPALINE

Proposé par :

Mr. LYSSOV

— Etudié par :

ALLET mourad  
Amirouche B.

Dirigé par :

Mr LYSSOV

PROMOTION Juin 87

REMERCIEMENTS

Nous exprimons notre reconnaissance à Monsieur LYSSOV pour son aide et ses précieux conseils dans l'élaboration de ce travail.

Nous remercions Monsieur ABADLI chef de département métallurgie d'avoir mis à notre disposition le laboratoire.

Nous remercions également toutes les personnes qui nous ont aidé dans notre travail.

Expression de notre profonde reconnaissance à tous les professeurs qui ont contribué à notre formation.

I. INTRODUCTION

Présentation du four serie "OPALINE".

II. PRINCIPES DE LA REGULATION AUTOMATIQUE

II.1. Généralités.

II.2. Régulation de la température.

- Méthode générale du réglage automatique.

II.3. Régimes permanents et régimes transitoires.

II.4. Les réglages discontinus par "Tout ou rien" ou "Tout ou peu".

II.5. Réglages continus.

II.5.1. Généralités.

II.5.2. Régulateur proportionnel P.

II.5.3. Régulateur PI.

II.5.4. Régulateur PID.

II.5.5. Régulateurs adaptatifs.

II.5.6. Régulateurs à action à deux ou trois positions.

III. LE FOUR

III.1. Principe de fonctionnement.

III.2. Alimentation du four.

III.3. Mise en service du four.

III.3.1. Mise sous tension.

III.3.2. Mise en marche des pompes.

III.3.3. Mise en service de la chauffe du four.

III.3.3.1. Fonctionnement manuel.

III.3.3.2. Fonctionnement automatique.

III.3.4. Arrêt du four.

IV. LE REGULATEUR

Principe de fonctionnement du système de commande de relais.

V. GENERALITES ET PROCEDES DE CONSTRUCTION DES COURBES DU REGIME TRANSITOIRE

V.1. Généralités sur les systèmes asservis non linéaires.

V.1.1. Limitation des méthodes non linéaires.

V.1.2. Définition des méthodes non linéaires.

V.1.3. Les non linéarités les plus fréquentes dans les systèmes asservis.

- V.2. Etude des méthodes de calcul des systèmes avec l'élément "tout ou rien"
- V.2.1. Régime transitoire d'un asservissement par "tout ou rien" idéal.
  - V.2.2. Régime transitoire d'un asservissement par "tout ou rien" avec hystérésis.
  - V.2.3. Régime transitoire d'un asservissement par tout ou rien avec seuil et sans hystérésis.
  - V.2.4. Régime transitoire d'un asservissement par tout ou rien avec seuil et hystérésis.
- V.3. Construction du régime transitoire par portions
- V.3.1. Etude théorique.
    - V.3.1.1. Analyse de la partie non linéaire.
    - V.3.1.2. Analyse de la partie linéaire.
    - V.3.1.3. Utilisation de la méthode sur un système d'ordre 2
  - V.3.2. Etude pratique.
- V.4. Construction de la courbe du régime transitoire à l'aide du théorème du retard.
- V.5. Analyse de la précision et synthèse d'un système pour son amélioration.
- VI. ETUDE EXPERIMENTALE.
- VI.1. Fonction de transfert.
  - VI.2. Caractéristiques du relais.
  - VI.3. Caractéristiques des éléments de l'organe de mesure.
    - VI.3.1. Câbles de compensation.
    - VI.3.2. Circuit de correction de la soudure froide.
  - VI.4. Choix du placement de la réaction négative.
- VII. CONCLUSION.
- VIII. BIBLIOGRAPHIE.

## I) INTRODUCTION

Ce four serie OPALINE que nous avons étudié se trouve dans le laboratoire du département de métallurgie.

Il est utilisé dans les laboratoires de recherche, dans les entreprises industrielles.

Avec ce four on peut obtenir différentes températures d'après n'importe quelle en fonction du temps.

Ce four ne fonctionnait pas , nous l'avons réparé et utilisé pour :

- tracer les courbes de température
- trouver le modèle mathématique du four.
- comprendre le fonctionnement du système.

Et enfin indiquer une méthode afin d'améliorer les capacités du four.

I) Présentation générale

Les fours de cette série sont essentiellement constitués par :

- un tube laboratoire horizontal en silice fondue, fixé sur une tête d'extrémité en acier inoxydable.
- un four de chauffage qui se déplace automatiquement autour du tube laboratoire et permet une mise en chauffe et un refroidissement rapides des pièces à traiter.

Encombrement au sol : 1600 x 600 mm.

II) Four de chauffage et tube laboratoire.

a) Four de chauffage:

Elément chauffant: tophet A ou kanthal A, alimenté sous une tension triphasée de 220 v.

La puissance appliquée est de 7 kw.

Les dimensions internes du moufle sont les suivantes:  $\phi$  160 mm, L 500 mm.

Le déplacement automatique du four est obtenu au moyen d'un moteur réducteur et d'un ensemble de chaîne et poulies. Le guidage en translation est assuré par des coulisses à billes.

b) Tube laboratoire:

Tube fermé à une extrémité, réalisé en silice fondue.

Le diamètre intérieur est de 100 mm et la partie pénétrant dans le four permet d'obtenir une zone utile d'une longueur de 250 mm.

III) Bâti support caréné.

Ce bâti est réalisé en profilés métalliques soudés, muni de panneaux amovibles, et possède un socle inférieur muni de quatre vérins à vis pour calage au sol.

IV) Equipement de vide moléculaire.

Un groupe de pompage composé des éléments principaux suivants:

- une pompe à diffusion d'huile à quatre étages D 600 H LPA, débit normal 600 l/s, acier inoxydable.
- une vanne baffle à voie de 150, refroidie par circulation d'eau, type V 150 P LPA, acier inoxydable.
- deux vannes de by-pass à voie de 20, type V 20 P LPA. Ces vannes sont à commande électropneumatique.
- un piège à azote liquide P 600 N LPA.

- une pompe primaire.
- un coffret de mesure de vide Physivac 10 LFA ( jauge à ionisation  $10^{-3}$  à  $10^{-6}$  torr )
- un tube à lueur et son transformateur pour contrôle du vide primaire.
- un dispositif électrique de sécurité sur le débit d'eau.
- une vanne électromagnétique d'entrée d'air.

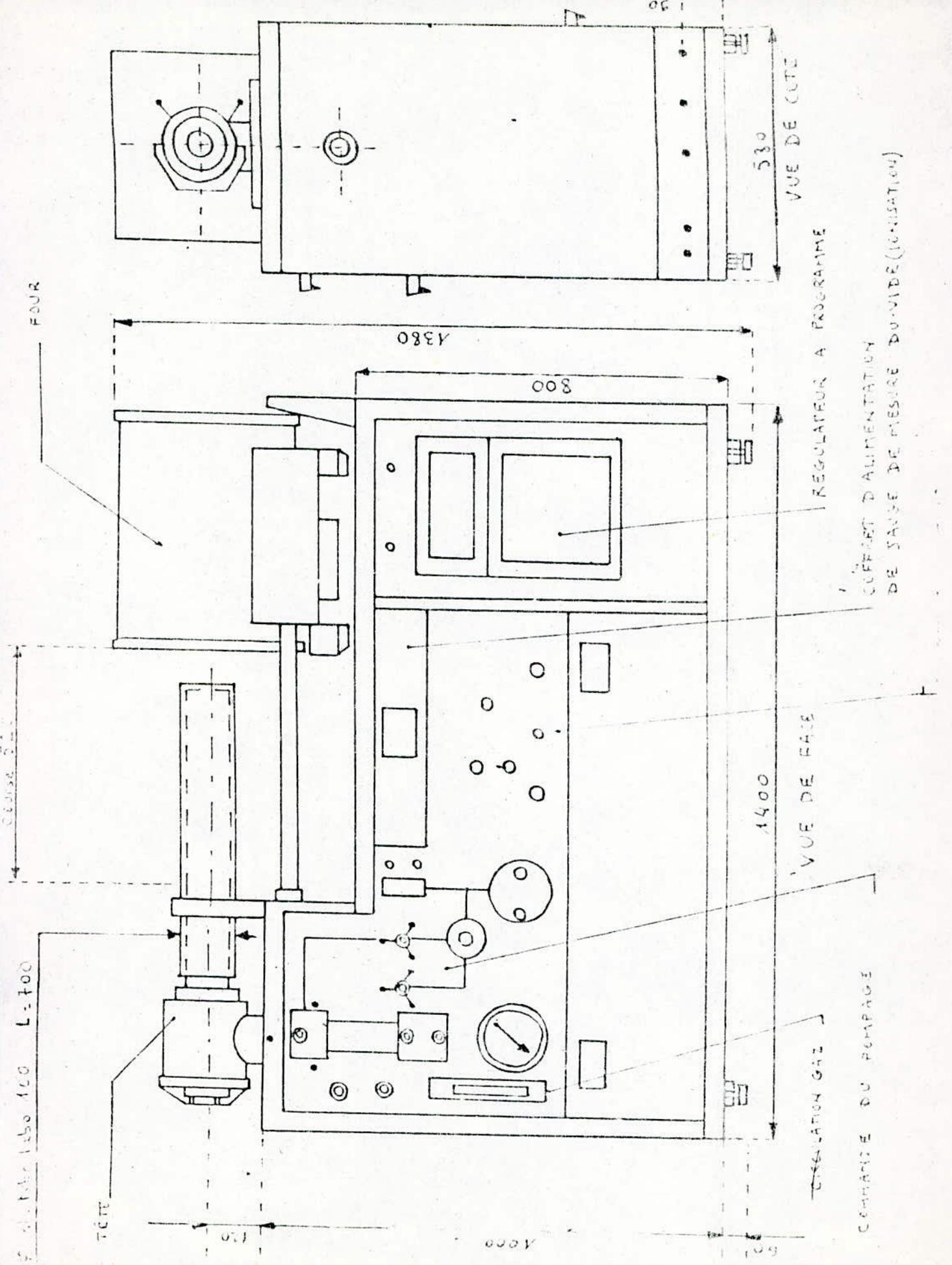
Le vide atteint, à chaud, est de l'ordre de quelques  $10^{-6}$  torr ( four vide ).

V) Régulation thermique - Alimentation électrique.

La régulation de température est assurée par un pyromètre régulateur à programme 0- 1200° C.

Le four est équipé d'un thermocouple blindé Nickel/Nickel allié.

L'action de régulation est en " TOUT OU RIEN ".



FOUR

1380

800

1400

530

VUE DE COTE

REGULATEUR A PROGRAMME

COFFRET D ALIMENTATION DE SAUSE DE MESURE DU VIDE (IONISATION)

VUE DE FACE

COMMANDE DU POMPAGE

CIRCULATION GAZ

TETE

F. M. N. B. Labo 100 L. 700

CEINTRE

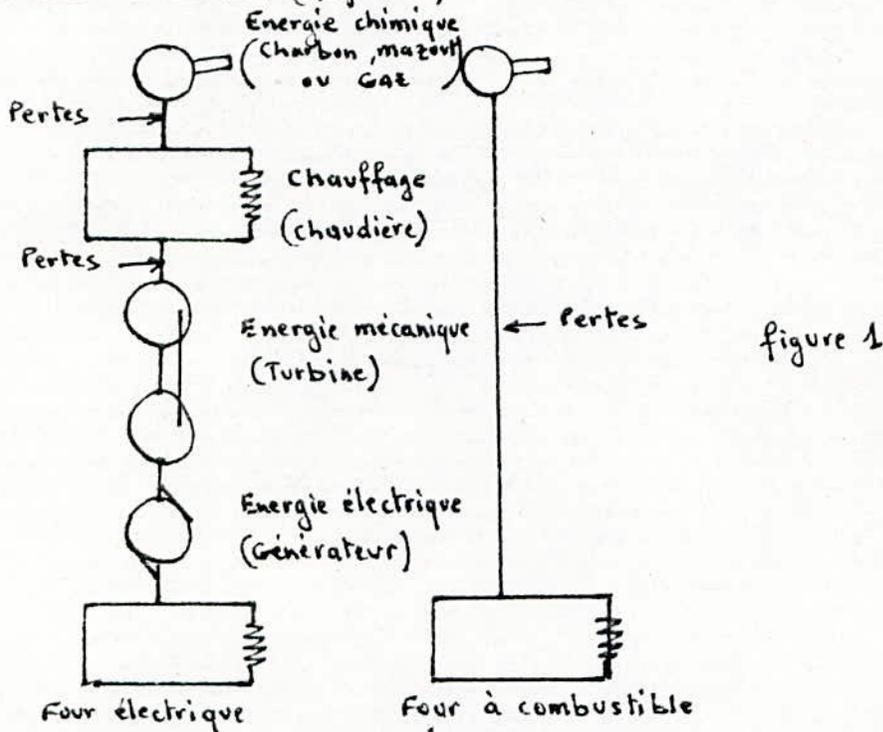
1000

50

## II) Principes de la régulation automatique.

### II. 1. Généralités.

Le schéma suivant représente la comparaison entre le flux de l'énergie dans un four à combustible et dans un four électrique dans le cas d'une centrale thermique. (figure 1)

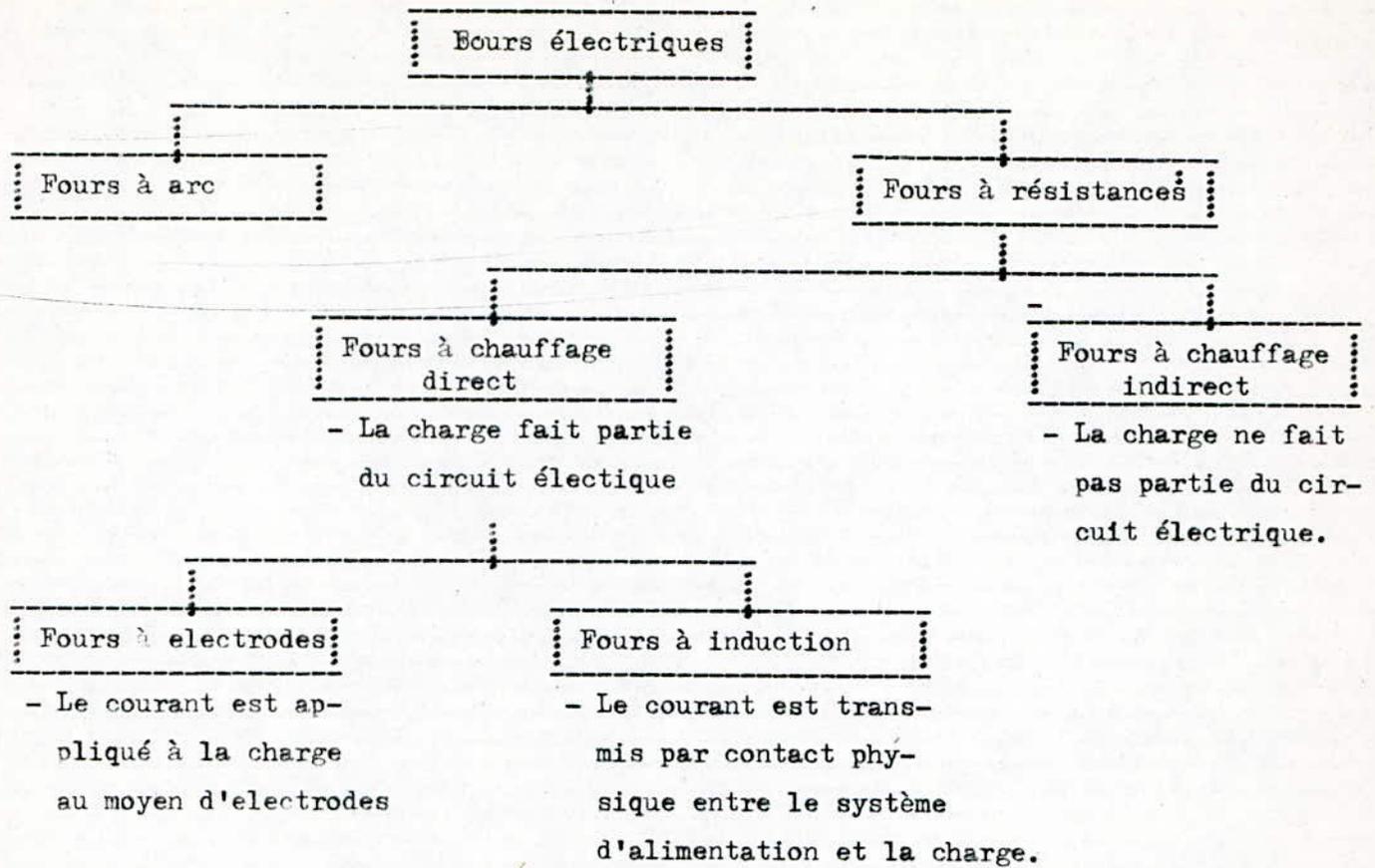


Nous remarquons que dans le cas du chauffage électrique, il y a quatre transformations d'énergie dans le cas des fours à combustible, il n'y a qu'une transformation de l'énergie. De plus il y a quatre sources de pertes dans le cas d'un four électrique, contre seulement une source dans le cas du four à combustible.

Il y a deux raisons principales pour lesquelles un four électrique est plus économique qu'un four à combustible ce sont :

- Le rendement relativement élevé du four électrique.
- Un certain nombre d'avantages secondaires, tels que la facilité de régulation, la propreté, etc...

La classification la plus convenable des fours est basée sur les caractéristiques électriques, particulièrement sur la façon dont l'énergie électrique est transformée en calories. Il y a deux façons d'effectuer cette transformation : dans l'arc; dans les résistors, solides ou liquides.



La coutume veut qu'on classe séparément les fours à induction.

Il y a trois groupes principaux de fours :

- Les fours à arc.
- Les fours à induction.
- Les fours à résistances.

Les modes opératoires nécessitant des températures supérieures ou égales à 1320 °C utilisent des fours à arc ou des fours à résistances à chauffage direct ( y compris les fours à induction ).

Dans le cas où la température demandée est inférieure à 1320 °C on utilise des fours à résistors à chauffage direct où indirect.

Le four serie OPALINE que nous allons étudier est un four à résistances à chauffage indirect, le transfert de calories s'effectue par rayonnement.

Dans les fours à résistances à chauffage indirect les pièces sont chauffées exclusivement par la surface.

## II)2 Régulation de la température

La puissance maximum totale utilisée dans un four à résistors dépasse toujours la puissance de maintien en régime permanent. Si de tels fours ne comportaient pas de dispositifs de régulation, la température monterait jusqu'au moment où les pertes à cette nouvelle température seraient devenues égales à la puissance du four (résistances détériorées, réfractaires cassés).

La régulation peut être automatique ou manuelle, mais on peut également la classer suivant les moyens utilisés : pour diminuer la consommation d'énergie ou pour diminuer la puissance du four.

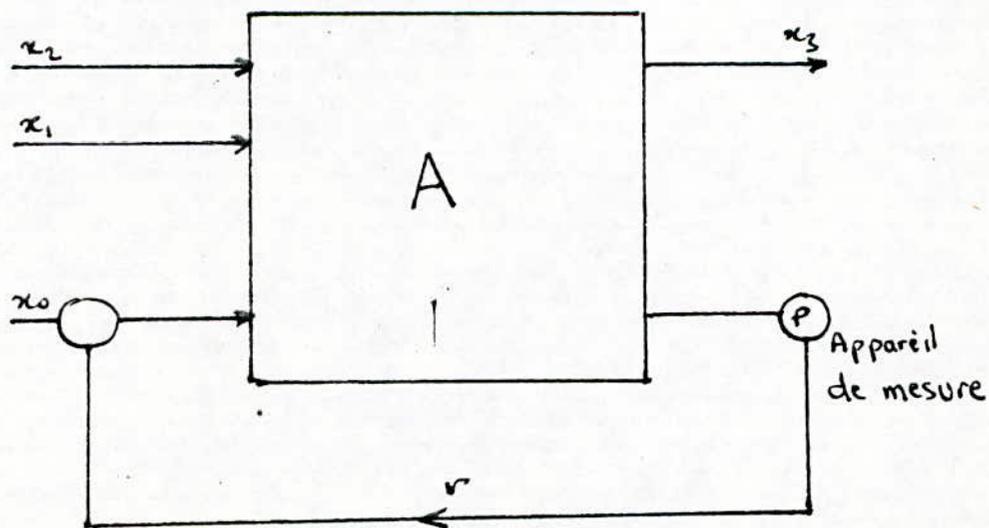
Les moyens dont on dispose pour abaisser la puissance, comportent l'abaissement de la tension ou le changement de couplage des résistances, de façon à modifier leur résistance ohmique.

Le problème de la régulation automatique consiste le plus souvent à maintenir automatiquement à des valeurs fixes; déterminées à priori par l'objectif à atteindre, une ou plusieurs grandeurs. Ces grandeurs peuvent être de natures très diverses : dans le domaine industriel ce sera, par exemple, la température d'un four, la pression de vapeur d'une chaudière etc...

Dans le cas où on assujettit la valeur d'une grandeur à suivre une loi déterminée en fonction du temps, le réglage est dit "à programme".

### Méthode générale du réglage automatique

Soit le schéma suivant :



A : une installation quelconque.

p : grandeur physique qui caractérise le fonctionnement de A et que nous proposons de régler.

$x_0, x_1, x_2, x_3, \dots$  : grandeurs physiques.

Les mécanismes de régulation automatique réalisent presque tous un couplage entre la " grandeur à régler " p et l'une des grandeurs  $x_0, x_1, x_2, x_3, \dots$ , soit  $x_0$  par exemple qui est ainsi choisie parmi les autres comme "grandeur de réglage ". Sur la figure ce couplage est symboliquement représenté par la ligne r. Le sens du couplage est naturellement tel qu'une modification de p à partir de sa valeur optimale  $p_0$ , dite " valeur de réglage " ou " valeur de consigne " entraîne une variation de  $x_0$  dont la répercussion sur p s'oppose à la modification initiale.

C'est ainsi que la régulation de température d'un four s'obtient généralement en réalisant un couplage continu ou discontinu entre cette température et le débit d'entrée du combustible.

D'une façon générale il y a couplage entre deux grandeurs si l'action de la première sur la seconde s'accompagne d'une réaction de la seconde sur la première.

Le mécanisme de régulation automatique a précisément pour rôle d'y adjoindre la réaction de p sur  $x_0$ . Pour appeler le sens compensateur de cette réaction, on dit qu'il s'agit d'une " réaction négative ".

La réaction de p sur  $x_0$  est, en réalité, uniquement commandée par " l'écart " que présente la valeur actuelle de p avec la valeur de réglage  $p_0$ .

Les mécanismes de régulation inclus dans la chaîne fermée  $x_0 \rightleftharpoons p$  de la figure et qui ont pour effet de réduire automatiquement cet écart à une valeur nulle si possible, n'interviennent donc effectivement qu'au signal résultant d'un écart non nul.

On réserve le nom de servo-mécanisme, ou plus généralement de servo-système, à tout dispositif qui procède de la sorte pour assurer l'égalité des valeurs p et  $p_0$  de deux grandeurs de même espèce.

Un servo-système comprend donc toujours une chaîne fermée en un point de laquelle sont comparées les deux valeurs p et  $p_0$ , l'écart  $p-p_0$  constituant le signal de commande du servo-système ou du servo-mécanisme. L'ensemble formé par une installation et son régulateur constitue donc un servo-système.

Il existe différents modes de couplage ( couplages par inertie, par élasticité, etc...), à chacun de ces modes correspond une forme particulière des termes qui, au sein des équations différentielles intéressant le système étudié, traduisent le couplage réalisé.

Il est également possible, dans les installations de régulation automatique, d'utiliser une gamme variée de modes de couplage entre la grandeur réglée et la grandeur de réglage. Chacun d'eux caractérise ici un processus particulier de réglage continu.

L'intervention d'une seule grandeur de réglage  $x_0$  permet de compenser automatiquement les écarts de la grandeur à régler  $p$ , provoqués par n'importe laquelle des grandeurs  $x_1, x_2, x_3, \dots$  et  $X_0$  lui-même. On dit que la chaîne  $x_0 \rightleftharpoons p$  est autorégulatrice vis-à-vis de toute perturbation extérieure.

### II.3 - Régimes permanents et régimes transitoires.

Il convient dans l'étude de la régulation automatique, de bien préciser la distinction entre régime permanent et régime transitoire.

Considérons par exemple un four électrique destiné à chauffer un fluide qui circule à vitesse constante et suffisamment lente pour lui permettre d'être en équilibre thermique avec le four avant d'en sortir.

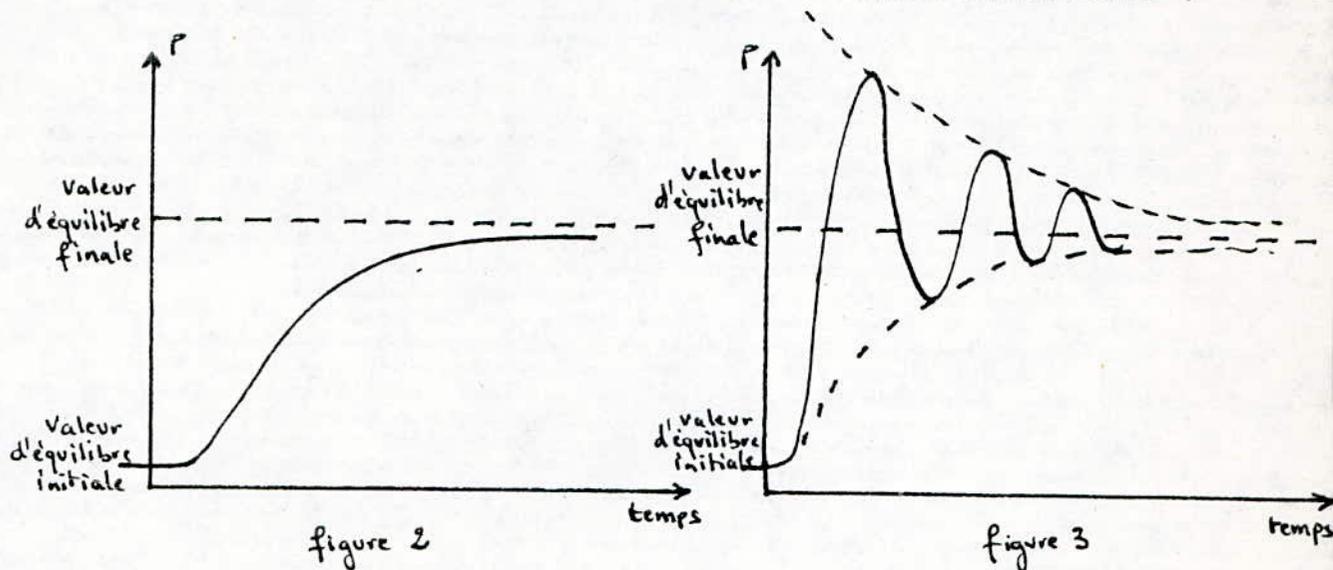
Si l'alimentation électrique reste constante, la température du four se stabilise à une valeur fixe, indépendante du temps dite température d'équilibre du four. Une modification de l'intensité du courant ou du débit du fluide entraîne une évolution de la température qui finit par se stabiliser à une nouvelle valeur fixe. Si l'on fait abstraction de la période d'évolution, ces valeurs stables définissent pour la température un régime permanent.

D'une façon générale, les valeurs d'une grandeur  $p$  définissant un état de régime permanent sont représentés par une fonction  $p=f(x_0, x_1, \dots)$  où ne figure pas explicitement le temps. C'est bien à cette condition que ces valeurs peuvent demeurer fixes quand les différentes grandeurs restent constantes. On peut aussi définir un régime permanent oscillatoire, mais un tel régime peut toujours être caractérisé par des grandeurs ( amplitudes, valeurs efficaces, ...) indépendantes du temps.

Si l'une des grandeurs  $x_0, x_1, \dots$  subit une modification, que nous supposons pour simplifier instantanée et permanente, mais après un certain délai pendant la durée duquel le régime de variation de  $p$  est dit transitoire.

Tant que subsiste ce régime transitoire, la grandeur  $p$  dépend explicitement du temps, puisqu'elle varie en présence des grandeurs  $x_0, x_1, \dots$  fixes.

Dans la plupart des cas, cette variation est représentée par une courbe d'allure exponentielle ou par une série d'oscillations dont l'amplitude s'amortit graduellement en fonction du temps ( figures 2 et 3 )

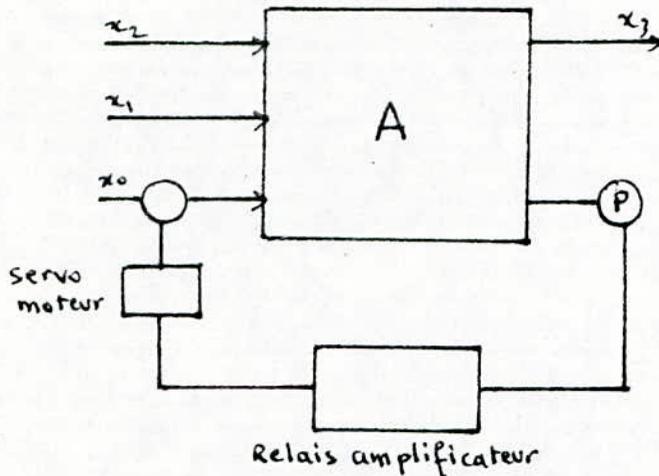


Les courbes représentatives admettent la valeur d'équilibre finale comme asymptote, et, en toute rigueur ce n'est qu'après un délai théoriquement infini que celle-ci est atteinte. Pratiquement, bien entendu, ce délai est toujours limité; sa durée dépend de la forme des courbes d'allure exponentielle des figures 2 et 3 et qui constituent les caractéristiques de réponse de l'installation, très importantes au point de vue du réglage.

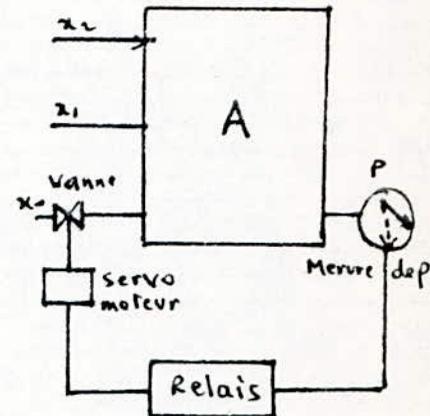
On dit souvent d'une façon abusive qu'elles traduisent l'inertie du système.

## II.4. Les réglages discontinus par "Tout ou rien" ou "tout ou peu".

Ces dispositifs sont utilisés dans les réglages de température ou de niveau. L'appareil qui mesure la grandeur à régler commande, par l'intermédiaire du régulateur et conformément au schéma de la figure 4 une vanne ou un interrupteur à deux positions auxquelles correspondent deux valeurs de la grandeur de réglage  $x_0$ . Celle-ci sera, par exemple, pour la température d'un four, le débit du combustible; pour le niveau d'un réservoir, le débit du liquide qui l'alimente.



- figure 4 -



- figure 5 -

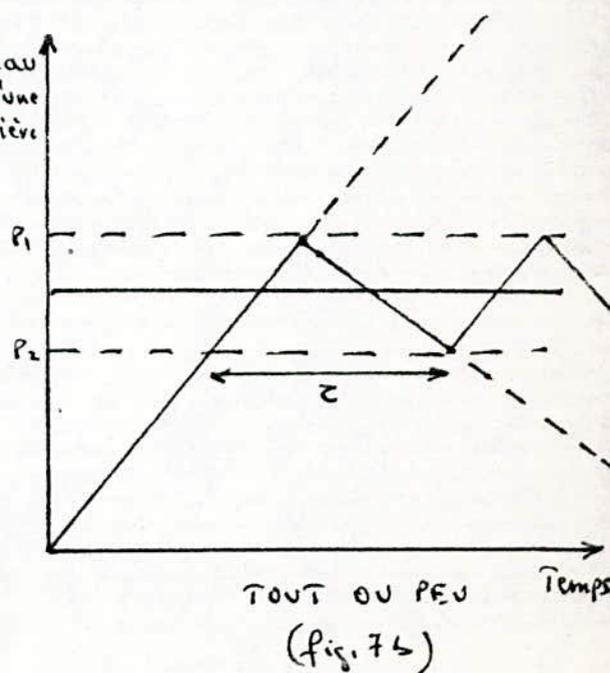
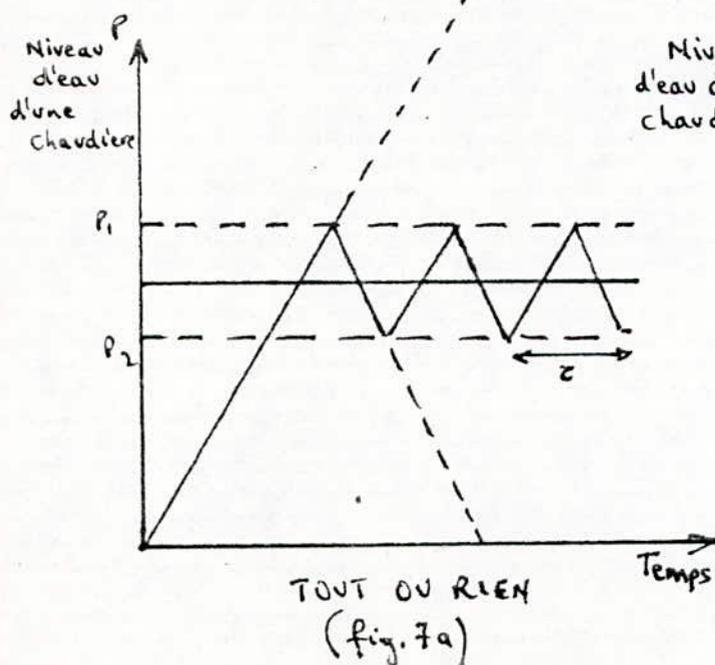
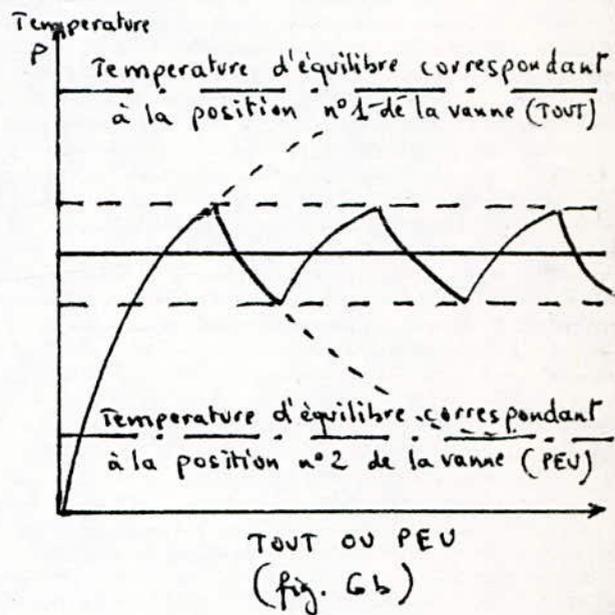
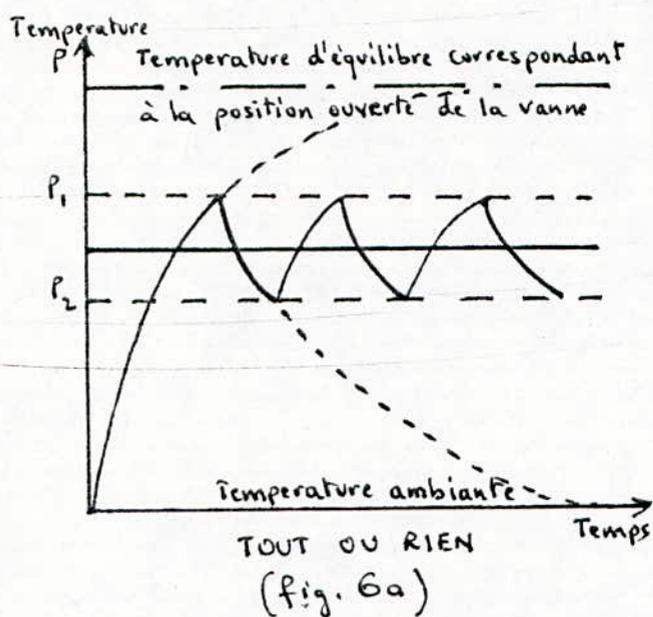
A la première position de la vanne ( ou de l'interrupteur ) correspond une valeur maximale de  $x_0$  ( TOUT ). Celle-ci doit être suffisante pour provoquer un accroissement de  $p$  dans la zone intéressant la valeur de réglage.

A la deuxième position de la vanne ( ou de l'interrupteur ) correspond, soit une valeur nulle de  $x_0$  ( RIEN ) s'il s'agit d'un réglage par tout ou rien, soit une valeur relativement faible ( PEU ) de  $x_0$  s'il s'agit d'un réglage par tout ou peu. Dans ce dernier cas celle-ci doit être suffisamment faible pour entraîner une diminution de  $p$  dans la zone intéressée.

Le signal de commande de vanne ( ou de l'interrupteur ) est lancé par l'appareil qui mesure  $p$ , pour deux valeurs  $p_1$  et  $p_2$ , encadrant symétriquement la valeur de réglage ( figure 5 ). Le processus est donc essentiellement discontinu.

Les figures 6 et 7 permettent de comprendre aisément le régime de fonctionnement normal d'une installation ainsi réglée. Les courbes 6a et 6b se rapportent au réglage de température d'un four ou d'un échangeur respectivement pour tout ou rien ou tout ou peu. Leurs prolongements en pointillés conduisent aux valeurs d'équilibre qu'atteindrait la température si la vanne ( ou l'interrupteur ) demeurait en permanence dans l'une ou l'autre des deux positions.

On remarquera que les traces en traits pleins figurant la marche réelle décrivent une succession de régimes transitoires.



Les courbes 7a et 7b concernent le réglage du niveau d'eau d'une chaudière, qui est effectivement obtenu par voie discontinue dans le cas des chaudières à forte capacité.

Les deux tracés correspondent à une même valeur supposée fixe du débit de vapeur  $qS$ .

A la différence de l'exemple précédent, l'extrapolation des portions de courbe intéressant la marche réelle ne conduit pas à une asymptote horizontale, puisque le niveau n'atteindrait aucun équilibre stable si la vanne se fixait dans l'une de ses deux positions ( absence de régime permanent ).

Dans la pratique du réglage automatique par " tout ou rien " de la température des fours, les courbes obtenues ne présentent généralement pas des points anguleux aussi marqués que ceux des graphiques car la fermeture de la vanne, coupant brusquement l'arrivée du combustible, n'entraîne pas nécessairement une chute aussi brutale de la puissance calorifique fournie: si; par exemple la vanne est située à quelque distances des brûleurs, le combustible isolé en aval de cette vanne poursuit sa progression et, s'il est gazeux, se détend plus ou moins rapidement selon les conditions de son écoulement; l'extinction de la flamme se poursuit alors progressivement et les courbes de température présentent par suite un aspect plus arrondi qui peut même rappeler l'allure sinusoïdale. D'ailleurs il arrive même quelque fois que le temps de manoeuvre de la vanne ne soit pas négligeable.

Enfin une analyse rigoureuse du phénomène doit tenir compte du temps de propagation de la chaleur, temps qui devient notable si celle-ci doit traverser d'épaisses parois réfractaires. En outre, les gaines de protection, souvent indispensables, du détecteur de température introduisent elles-mêmes un temps de propagation appréciable.

L'avantage essentiel du réglage discontinu réside dans la simplicité et, par suite, dans l'économie de sa mise en oeuvre. La fermeture ou l'ouverture de la vanne peut être, par exemple, provoquée par l'action d'un relais magnétique que commande l'appareil de mesure par le jeu de deux contacts électriques.

## II.5. Réglages continus.

### II.5.1. Généralités.

Le rôle des régulateurs est de :

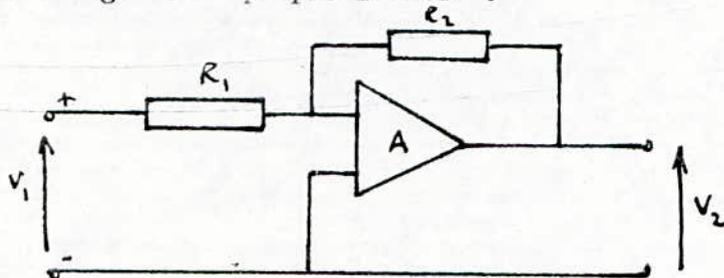
- comparer la valeur réelle avec la valeur de consigne.
- stabiliser le circuit de réglage.

Dans les réglages industriels on utilise des régulateurs standard du type PI ( Proportionnel-Intégrateur ) ou PID ( Proportionnel-Intégrateur-Dérivateur ),

Pour la réalisation de ces régulateurs on utilise généralement des amplificateurs opérationnels. Ces derniers sont souvent appelés amplificateurs de réglage. Ils traitent les signaux sous forme de tension continue.

Les régulateurs à deux ou trois positions sont des dispositifs employés lorsque le système à régler exige à son entrée une intervention par " tout ou rien ".

### II.5.2. Régulateur proportionnel P.

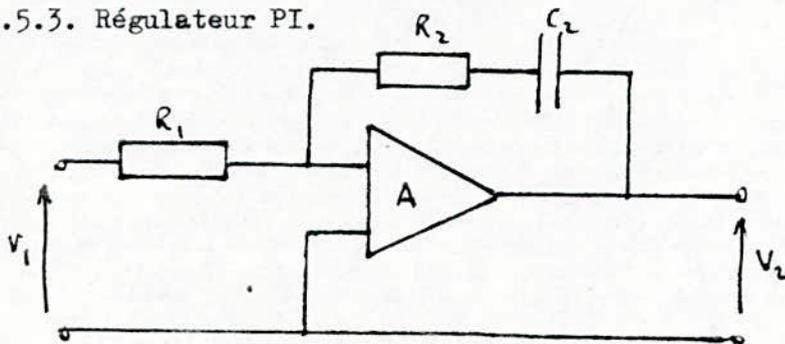


$$\frac{V_2}{V_1} = - \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow V_2 = - \frac{R_2}{R_1} V_1 = -G V_1$$

$$G(p) = - \frac{R_2}{R_1}$$

La tension de sortie est proportionnelle à la tension d'entrée.

### II.5.3. Régulateur PI.



$$z_1 = R_1$$

$$z_2 = R_2 + \frac{1}{C_2 p} = \frac{R_2 C_2 p + 1}{C_2 p}$$

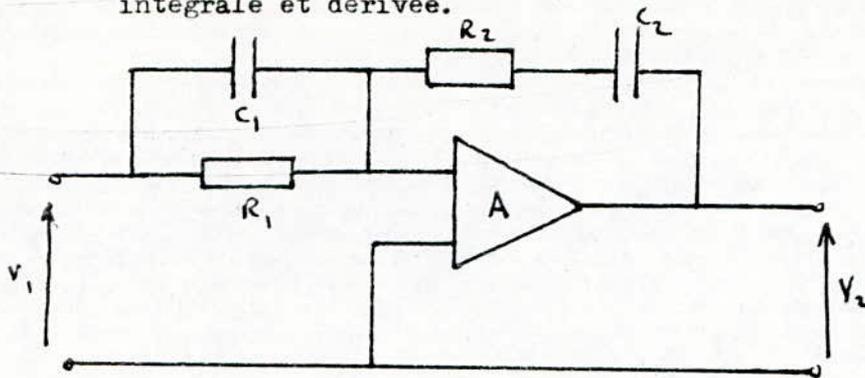
$$\text{avec: } K = - \frac{R_2}{R_1}$$

$$T_i = R_2 C_2$$

$$\frac{V_2}{V_1} = - \frac{z_2}{z_1} = - \frac{\frac{R_2 C_2 p + 1}{C_2 p}}{R_1} = - \frac{R_2}{R_1} \left( 1 + \frac{1}{R_2 C_2 p} \right) \Rightarrow G(p) = K \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right)$$

#### II.5.4. Régulateur PID.

C'est un couplage en cascade des fonctions proportionnelle, intégrale et dérivée.



$$G(p) = \frac{R_2}{R_1} \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right) (1 + T_d p) \quad \text{avec: } T_i = R_2 C_2$$
$$T_d = R_1 C_1$$

#### II.5.5. Régulateurs adaptatifs.

Si les caractéristiques statiques et dynamiques du système à régler varient il y a des points de fonctionnement où l'amortissement dans le circuit de réglage n'est plus satisfaisant et où il peut même apparaître un risque d'instabilité. Dans ce cas on utilise des régulateurs adaptatifs.

#### II.5.6. Régulateurs à action à deux ou trois positions.

Ils sont utilisés lorsque le système à régler exige une action " tout ou rien " à son entrée. A l'entrée est appliqué un signal analogique sous forme de tension continue, tandis que le signal de sortie est du type digital. Ce signal est formé d'un ou deux signaux binaires, selon que le régulateur est à deux ou trois positions.

Le régulateur à action à deux positions permet d'enclencher et de déclencher un dispositif exemple réglage de chauffage ( brûleur enclenché ou déclenché ) ou pour commander un variateur de courant ( contact statique enclenché ou déclenché ).

Le régulateur à action à trois positions permet d'enclencher un dispositif selon deux modes différents, par exemple marche avant ou arrière d'un servo-moteur à vitesse constante. En plus, il existe une position où ce dispositif est déclenché.

### III. LE FOUR

Le schéma électrique du four est donné à la fin du polycopé.

#### III.1 Principe de fonctionnement.

Le bouton manuel mis en position "manuel" (contact (7.29) fermé) déclenche :

- le relais programme (RPr) donc fermeture du contact (23.22).
- le relais marche générale d'où :
  - le contact (28.25) se ferme ce qui entraîne l'allumage de la lampe 24.
  - les contacts (7.36) et TC se ferment.
- le discontacteur four d'où :
  - le contact (38.39) se ferme.
  - la lampe LM s'allume.

Dès que la température de consigne est atteinte tous les contacts précédemment cités s'ouvrent ce qui entraîne la fermeture du contact (8.37) d'où la lampe LA s'allume (le four s'arrête).

#### III.2. Alimentation du four.

Comme la tension délivrée par le réseau triphasé est de 380V alors que le four doit être alimenté par 220V (il n'est pas possible de connecter l'élément chauffant en étoile) il faut donc utiliser un transformateur triphasé 380/220V.

#### III.3. Mise en service du four.

##### III.3.1. Mise sous tension.

La mise sous tension du four se fait par l'interrupteur "commande générale à clef".

Tous les voyants rouges s'allument.

##### III.3.2. Mise en marche des pompes.

Cette opération s'effectue pour la mise sous vide ou sous gaz.

- mise en marche de la pompe primaire.
- mise en marche de la pompe secondaire.

### III.3.3. Mise en service de la chauffe du four.

Toutes les opérations préliminaires ayant été effectuées (mise en oeuvre du bâti de pompage soit pour le travail sous vide, soit sous gaz), le débit d'eau étant normal, on peut faire chauffer le four.

#### III.3.3.1. Fonctionnement manuel.

Pour effectuer un palier à une température donnée :

- Mettre le bouton "Auto-manuel" sur la position "manuel".
- Régler les index de température chaude et froide sur les positions correspondant avec consignes désirées, ainsi que la distance entre eux qui détermine les fluctuations entre ces deux consignes.
- Mettre le tube laboratoire dans le four de chauffage en appuyant sur le bouton poussoir de translation avant.
- Mettre le four en marche par le bouton "marche four" ( le voyant vert "marche four" doit s'allumer)

#### III.3.3.2. Fonctionnement automatique.

- Mettre le bouton "Auto-manuel" sur la position "Auto".
- Tourner le bouton "marche four" à droite.
- Après avoir choisi le disque de programme positionner le zéro (graduation du bouton en haut à gauche) avec le repère fixe (point rouge).
- La programmation de l'arrêt du four (cycle unique) se fera par le réglage de l'index (bouton en haut à gauche) sur la graduation correspondante à la durée de chauffage du four.

#### III.3.4. Arrêt de chauffage.

Il ne faut jamais couper l'alimentation du circuit de puissance alors que le four est à haute température.

Pour arrêter ce four , il faut ramener le programme à l'ambiante par la découpe du disque.

Lorsque la température du four est suffisamment basse (300°C à 400°C) on peut alors couper le courant.

#### IV. LE REGULATEUR

Principe de fonctionnement du système de commande de relais

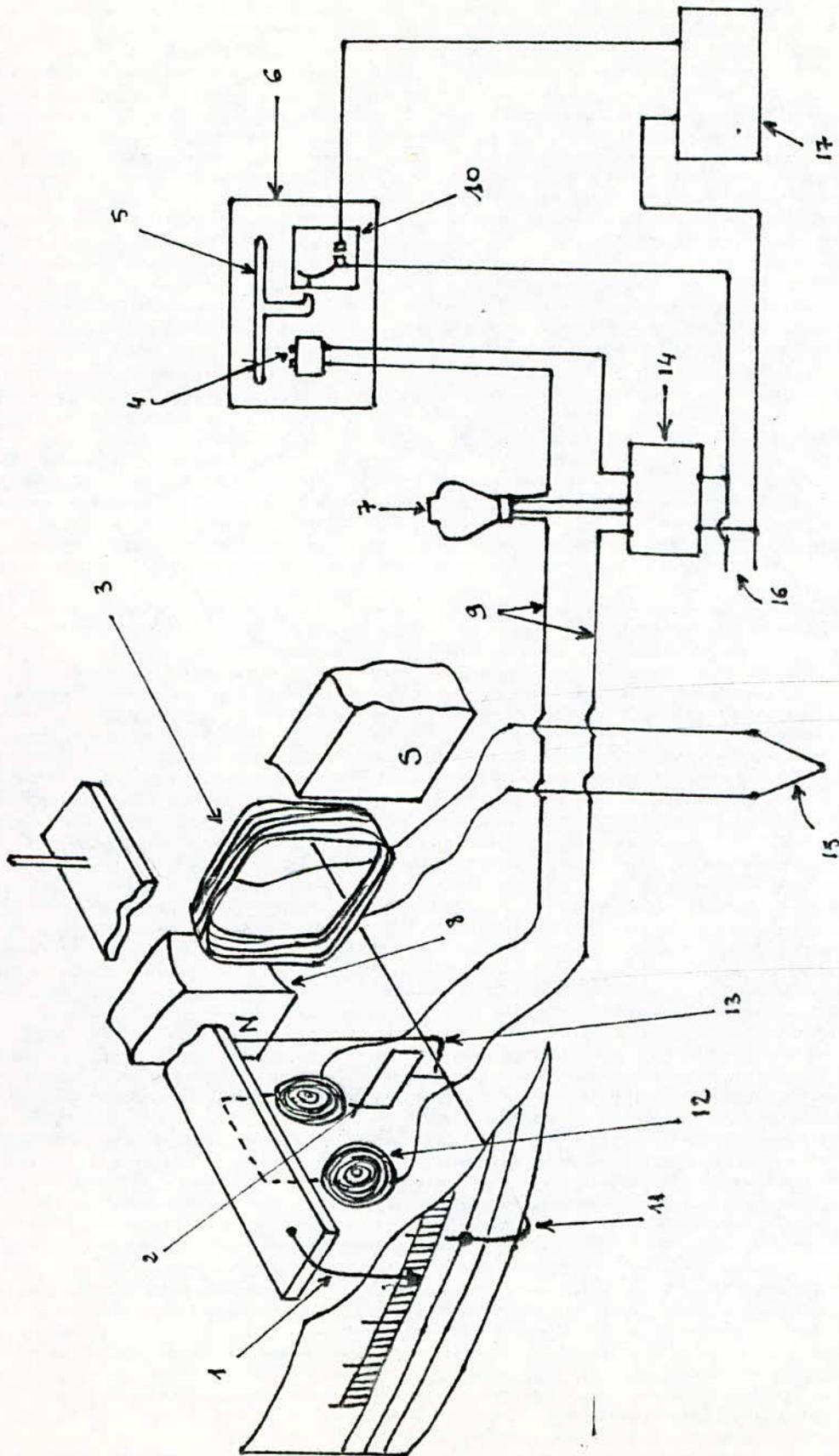
Le système de commande est constitué d'un amplificateur à double triode travaillant en oscillateur, dont l'anode et la grille comportent deux circuits oscillants LC identiques couplés et accordés.

Quand les deux bobines ne sont pas interrompues par la palette qui est solidaire à l'aiguille du galvanomètre, les conditions d'entretien des oscillations ne sont pas vérifiées.

Dans ce cas la double triode fonctionne comme une diode, par contre quand la palette coupe l'espace compris entre les deux bobines, l'oscillateur commence à fonctionner normalement.

Ce qui fait apparaître un courant continu dans la grille, qui en passant dans la résistance qui shunte le circuit oscillant de la grille rend celle-ci plus négative, donc le courant anodique qui passe dans la bobine de relais pour le commander diminue; ce qui fait remettre le relais en position de repos.

Remarque : En branchant en parallèle deux tubes identiques, on obtient un tube de même coefficient d'amplification et de résistance interne divisée par deux il en résulte évidemment que la pente est deux fois plus élevée, pour cette raison une double triode à été utilisée.



REGULATION ELECTRONIQUE (Wheelco Instruments Company)

Légende du schéma de la régulation électronique ( Wheelco Instruments Company ).

1. Index indiquant la température demandée.
2. Drapeau.
3. Cadre de galvanomètre déplacé par le courant du thermocouple.
4. Bobine et relai alimentés par la lampe radio.
5. Bras du relai.
6. Relai sous capot.
7. Lampe radio.
8. Aimant.
9. Fil d'alimentation.
10. Relais de faible puissance.
11. Aiguille indicatrice de température.
12. Bobine inductrice.
13. Butée d'aiguille.
14. Transformateur.
15. Soudure chaude du thermocouple.
16. Alimentation en 115 ou 230 V .
17. Vanne ou tout autre appareil de régulation.

## V) GENERALITES ET PROCEDES DE CONSTRUCTION DES COURBES DU REGIME TRANSITOIRE

### V.1. Généralités sur les systèmes asservis non linéaires.

#### V.1.1. Limitation des méthodes non linéaires.

Les systèmes linéaires sont définis comme étant les systèmes physiques représentés par des équations différentielles linéaires à coefficients constants. L'hypothèse de linéarité équivaut au principe de superposition énoncé comme suit :

- Si la réponse d'un système linéaire à une entrée  $e(t)$  est  $s(t)$  alors sa réponse à l'entrée  $Ae(t)$  est  $As(t)$ , ceci correspond à la proportionnalité des effets et causes ou homogénéité.
- Si les réponses d'un système linéaire à des entrées  $e_1(t)$  et  $e_2(t)$  sont respectivement  $s_1(t)$  et  $s_2(t)$  alors la réponse à l'entrée  $e_1(t) + e_2(t)$  est  $s_1(t) + s_2(t)$ , ceci correspond à l'additivité.

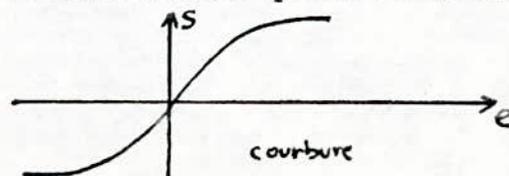
#### V.1.2. Définition des méthodes non linéaires.

Les systèmes non linéaires, par opposition aux systèmes linéaires sont l'ensemble des systèmes qui n'observent pas le principe de superposition.

Donc c'est une définition extrêmement extensive, qui, par opposition aux systèmes linéaires, elle s'applique à des systèmes qui n'ont rien en commun. Cette diversité ne permet de parler de méthodes générales applicables aux systèmes non linéaires, comme c'est le cas pour les systèmes linéaires dont l'étude est basée sur la fonction analytique. En plus c'est une définition relative à la précision avec laquelle elle est conçue.

#### V.1.3. Les non linéarités les plus fréquentes dans les systèmes asservis.

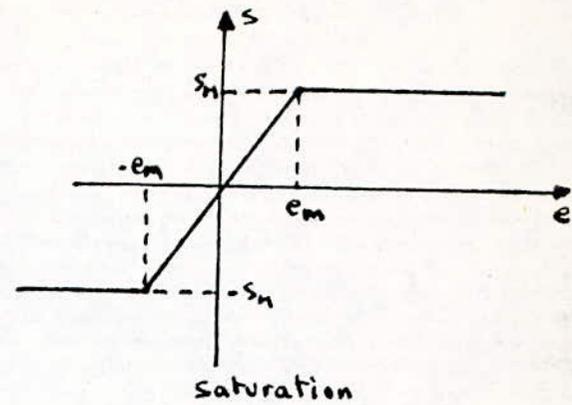
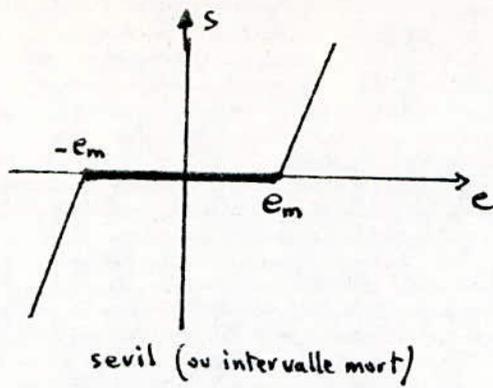
- Courbure : En fait la caractéristique d'amplitude sortie/entrée statique d'un organe réel n'est jamais parfaitement rectiligne elle représente toujours une courbure plus ou moins marquée. On a cinq types fondamentaux de non linéarité qui ne sont en fait que des schématisations commodes.



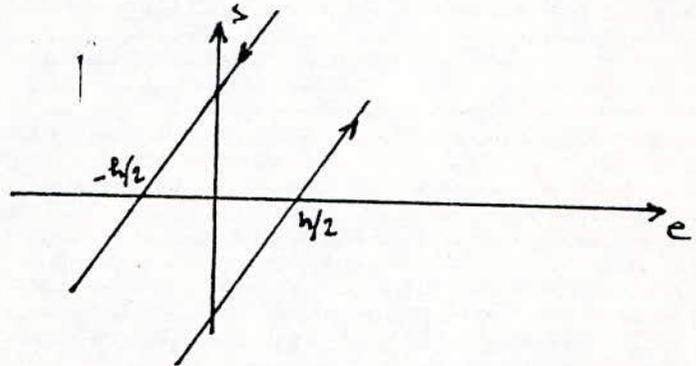
- Seuil de sensibilité ( ou intervalle mort ) et saturation.

En outre tout système même réputé linéaire possède un

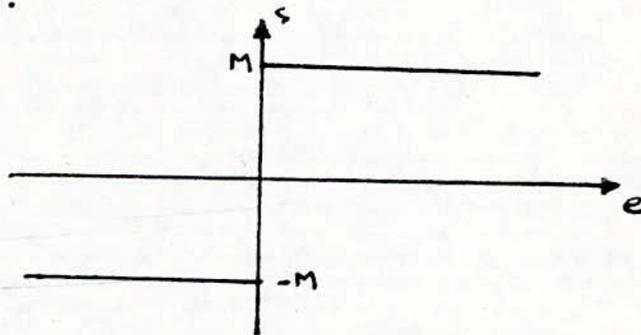
seuil de sensibilité et une saturation.



- D'autre part des phénomènes héréditaires à type d'hystérésis peuvent donner naissance à une caractéristique en forme de boucle.

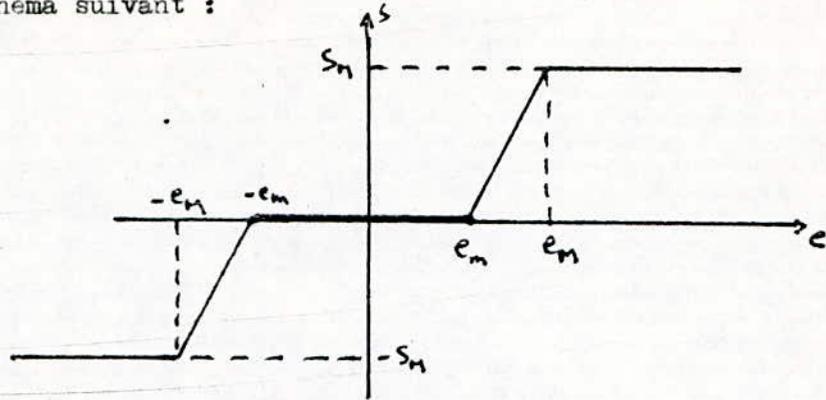


- Enfin les organes travaillant par plus ou moins ou tout ou rien possèdent une caractéristique représentée sur la figure suivante est définie par l'équation  $s(t) = M \text{ sign } e(t)$  avec  $\text{sign } e(t) = 1$  si  $e(t)$  est positif et  $\text{sign } e(t) = -1$  si  $e(t)$  est négatif.

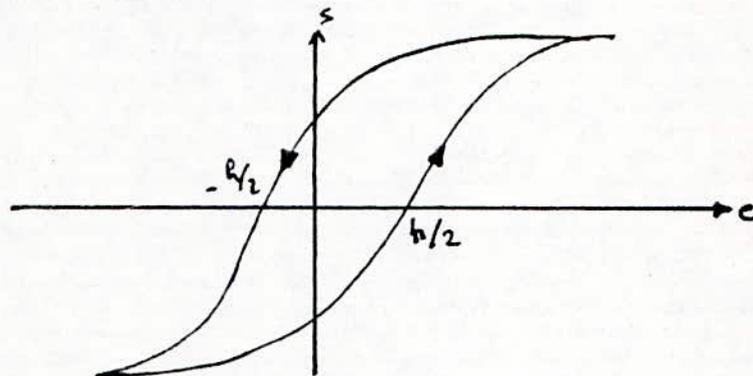


Bien sûr ces schématisations commodes peuvent s'associer de façon diverse et donner ainsi toutes les combinaisons possibles.

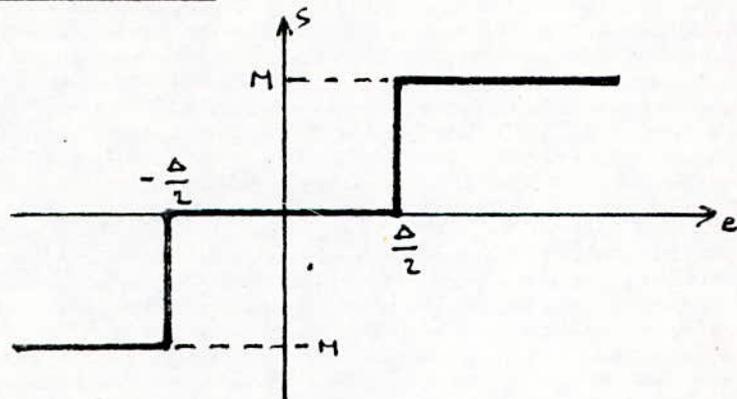
- Seuil et saturation : cette association de ces deux types donne naissance au mode seuil-saturation représenté sur le schéma suivant :



Courbure et hystérésis :



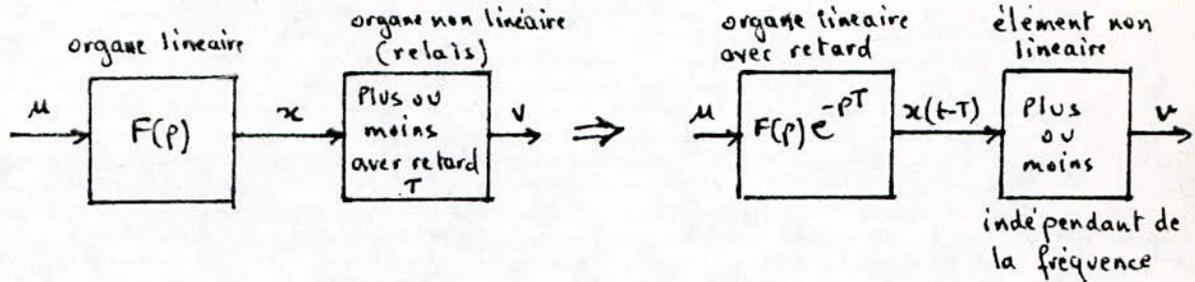
Plus ou moins avec seuil :



Remarque : Les différents types de non linéarité qui viennent d'être envisagés donnent une correspondance entre les valeurs instantanées de l'entrée et de la sortie donc la sortie est déterminée par l'entrée indépendamment des dérivées de celle-ci ceux sont des non linéarités indépendantes de la fréquence, c'est le type que nous envisageons dans notre étude.

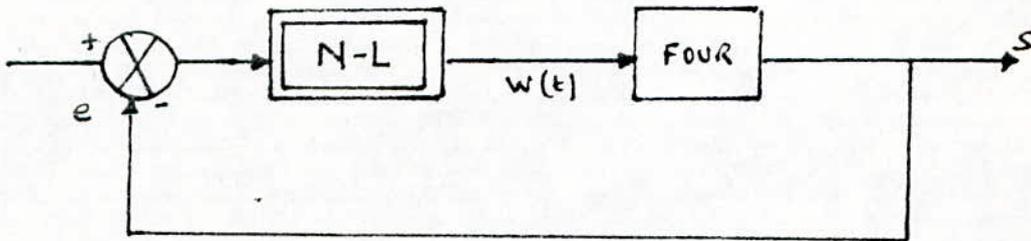
En parallèle il existe des non linéarités qui dépendent de la fréquence, le cas le plus important est celui des relais qui présentent en plus de leur intervalle mort un retard de com-

mutation. Ce cas est ramené à celui d'un élément non linéaire indépendant de la fréquence en incorporant le retard à un organe linéaire voisin ( voir schéma suivant ).



#### IV.2. Etude des méthodes de calcul des systèmes avec l'élément " TOUT OU RIEN ".

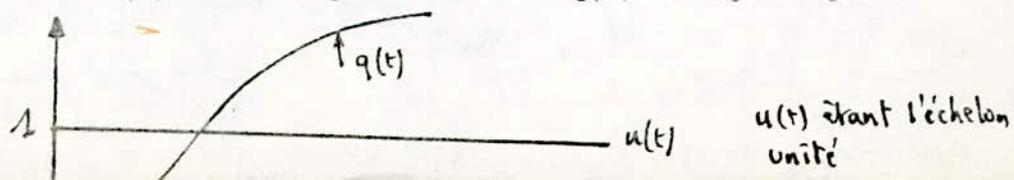
En pratique dans la technique des asservissements on a souvent à traiter le cas d'un système asservi possédant un élément non linéaire. Dans notre cas cet élément est du type " TOUT OU RIEN ". Donc notre système peut être représenté comme suit :



##### IV.2.1. Régime transitoire d'un asservissement par " TOUT OU RIEN " idéal.

Soit un asservissement par plus ou moins idéal soumis à une entrée ( commande )  $e(t)$ . La sortie de l'élément tout ou rien est une succession de signaux carrés. En effet on a  $w(t) = +M$  lorsque  $e(t)$  est supérieur à  $s(t)$ ;  $w(t) = 0$  lorsque  $e(t)$  est inférieur à  $s(t)$ .

Supposons le système initialement au repos et appliquons lui une entrée  $e(t)$  qui commence par être positive. Au début l'erreur  $\xi(t)$  est positive d'où  $w(t) = +M$ . La réponse de la boîte linéaire à cette entrée  $Mu(t)$  est sa réponse unitaire  $q(t)$  multipliée par  $M$



Cette réponse croît avec le temps et va rattraper l'entrée  $e(t)$  à un certain instant  $t_1$ . A ce moment l'élément tout ou rien va commuter ( $w(t) = -M$ ) de sorte que la boîte linéaire sera soumise à l'entrée  $-Mu(t-t_1)$ . Par suite on aura :

$$s(t) = Mq(t) u(t) - Mu(t-t_1) q(t-t_1) \quad t_1 < t < t_2$$

$t_2 = 2^{\text{ème}} \text{ commutation}$

Cette réponse va décroître et rejoindra ainsi le signal à l'entrée on aura alors la commutation qui nous donne ainsi la forme :

$$s(t) = M \left[ q(t) \left[ u(t) - u(t-t_1) + u(t-t_2) \right] \right]$$

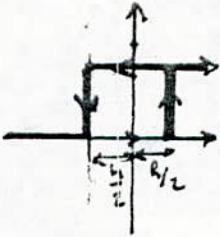
En suivant ce raisonnement on arrive à l'expression générale de la sortie qui sera donnée par :

$$s(t) = M \left[ q(t) \left[ u(t) - u(t-t_1) + u(t-t_2) - u(t-t_3) + \dots \right] \right]$$

$$= M \left[ q(t) u(t) + \sum_1^n (-1)^k \underbrace{q(t) u(t-t_k)}_{q(t-t_k)} \right]$$

Ces considérations permettent le tracé par addition graphique de la réponse  $s(t)$ . Prenons des exemples pour les courbes  $e(t)$  et  $q(t)$  qui approchent au mieux notre système pratique. ( fig. 8 )

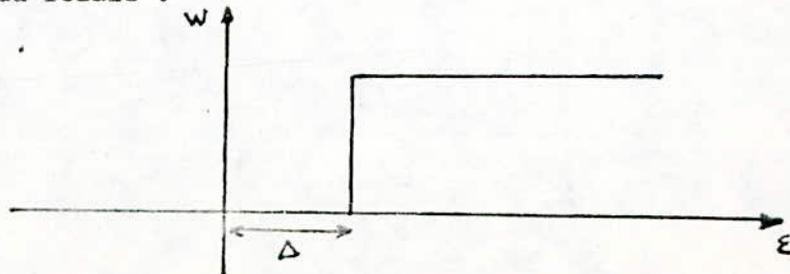
### V.2.2. Régime transitoire d'un asservissement par tout ou rien avec hystérésis. ( fig. 9 )



Lorsqu'il y a hystérésis la même méthode s'applique, seulement les commutations de moins à plus se produisent lorsque  $e(t) - s(t) = \frac{1}{2}h$  et les commutations de plus à moins lorsque  $e(t) - s(t) = -\frac{1}{2}h$  on aura la courbe de la figure 9 après la superposition graphique.

### V.2.3. Régime transitoire d'un asservissement par tout ou rien avec seuil et sans hystérésis.

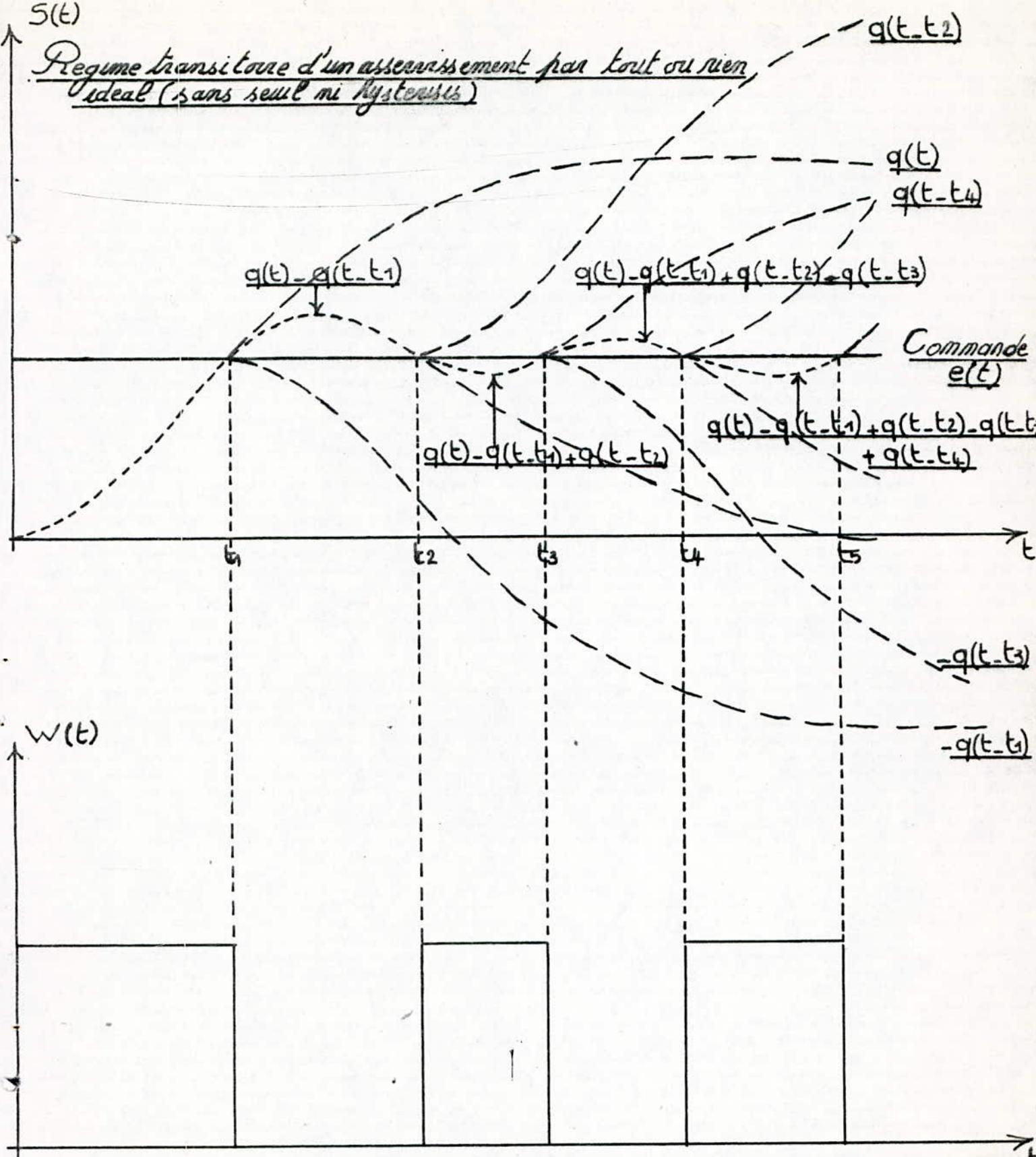
Schéma du relais :



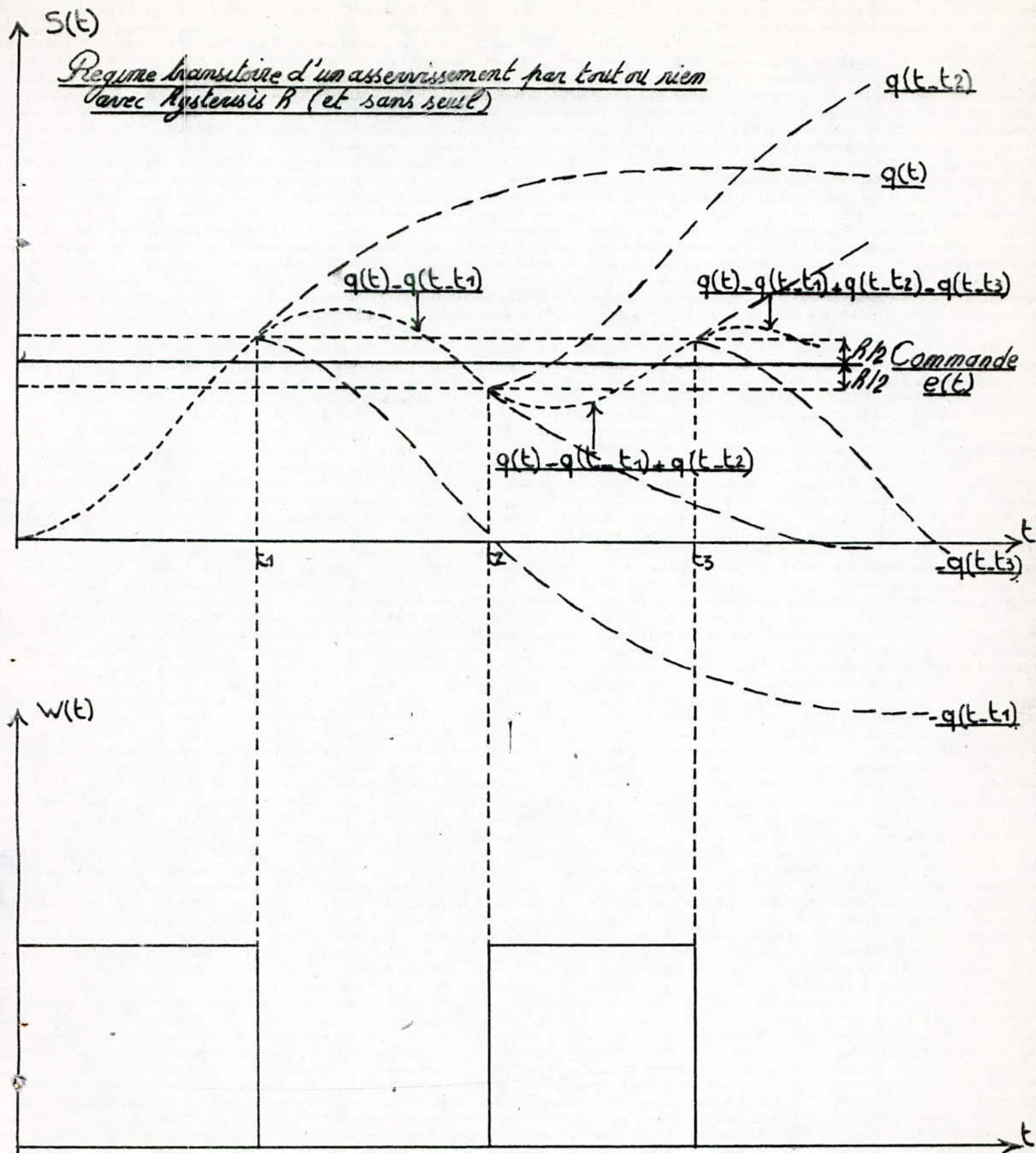
Dans ce cas la commutation se fera lorsque  $\hat{e} = e - s$  atteindra la valeur  $\Delta$  c'est à dire  $s = e - \Delta$ , avec  $e$  étant la valeur de

$S(t)$

Régime transitoire d'un asservissement par tout ou rien  
idéal (sans seuil ni hystérésis)



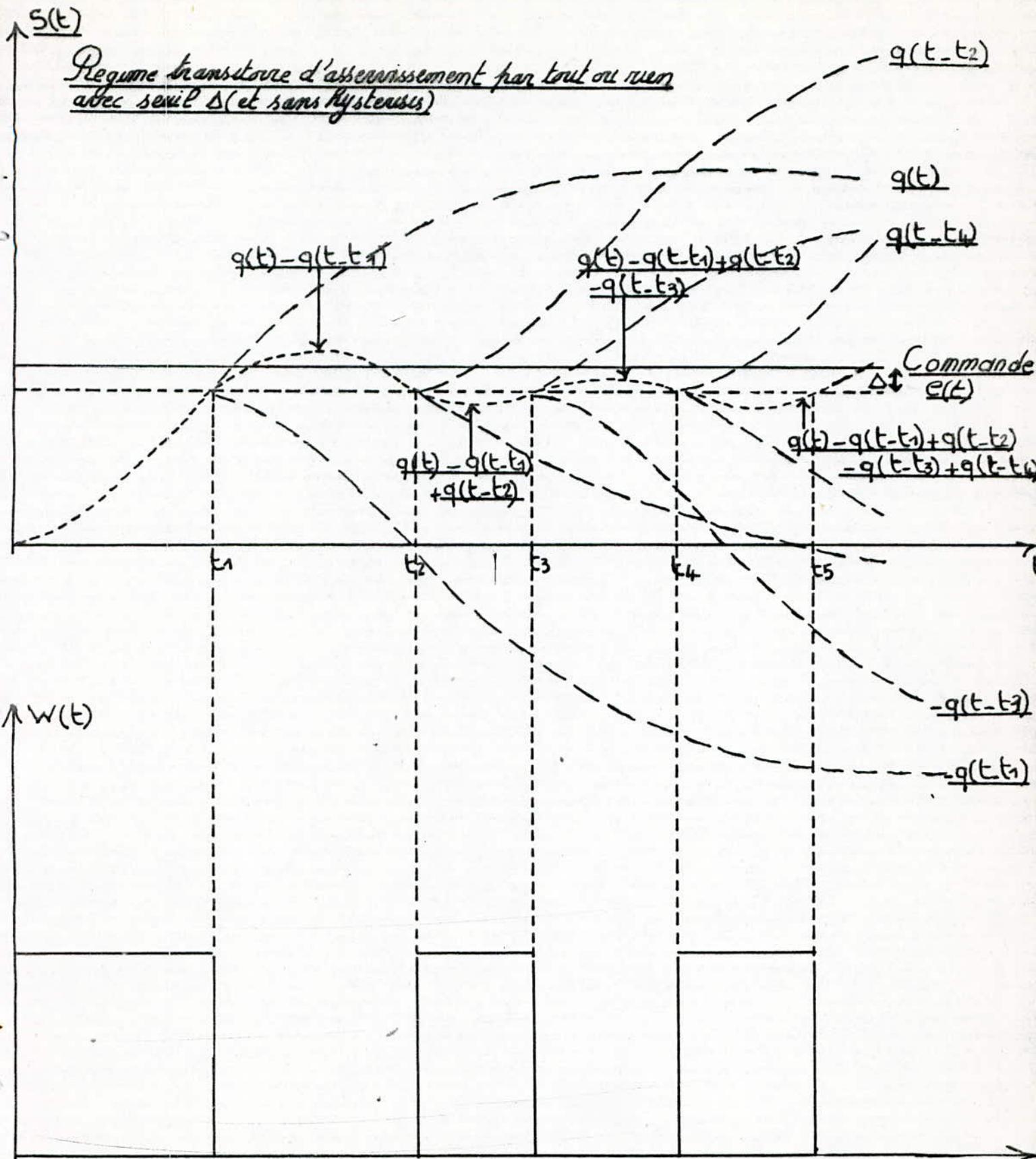
(figure 8)



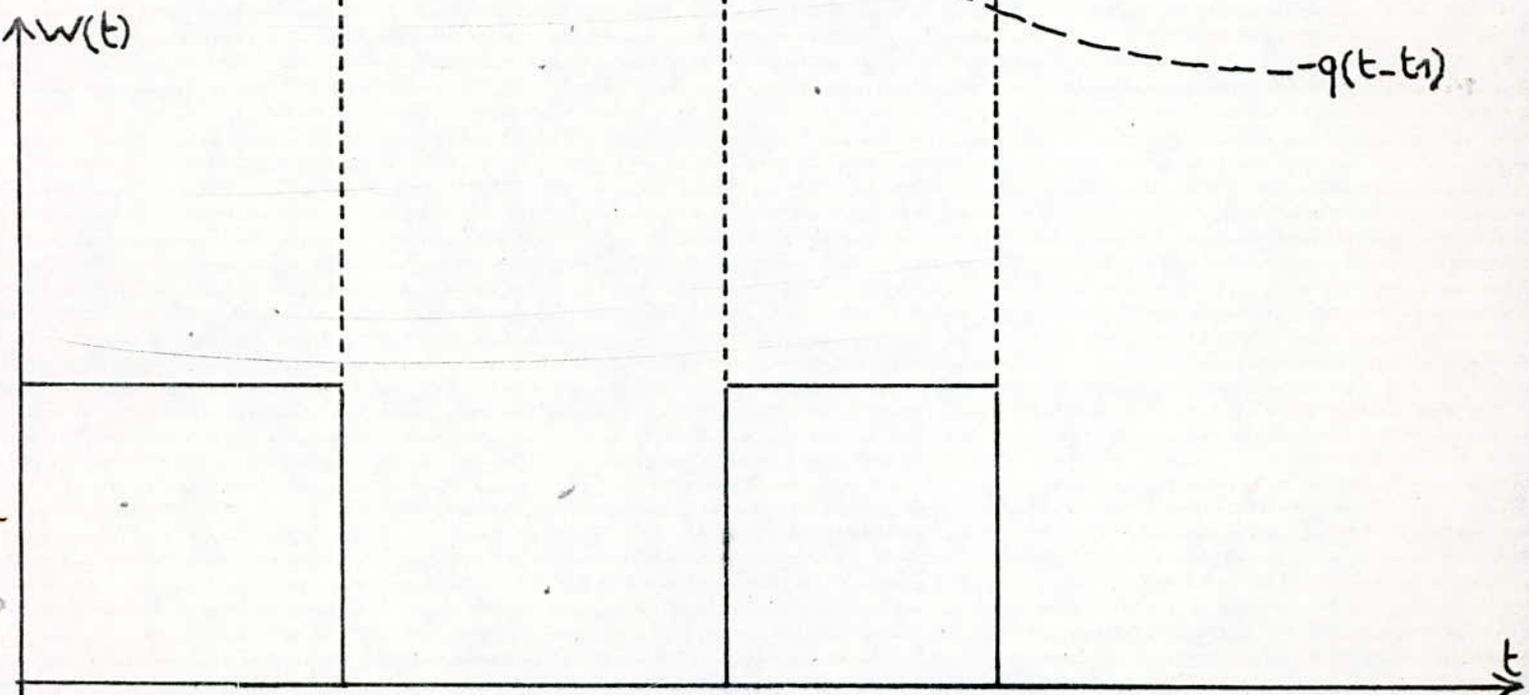
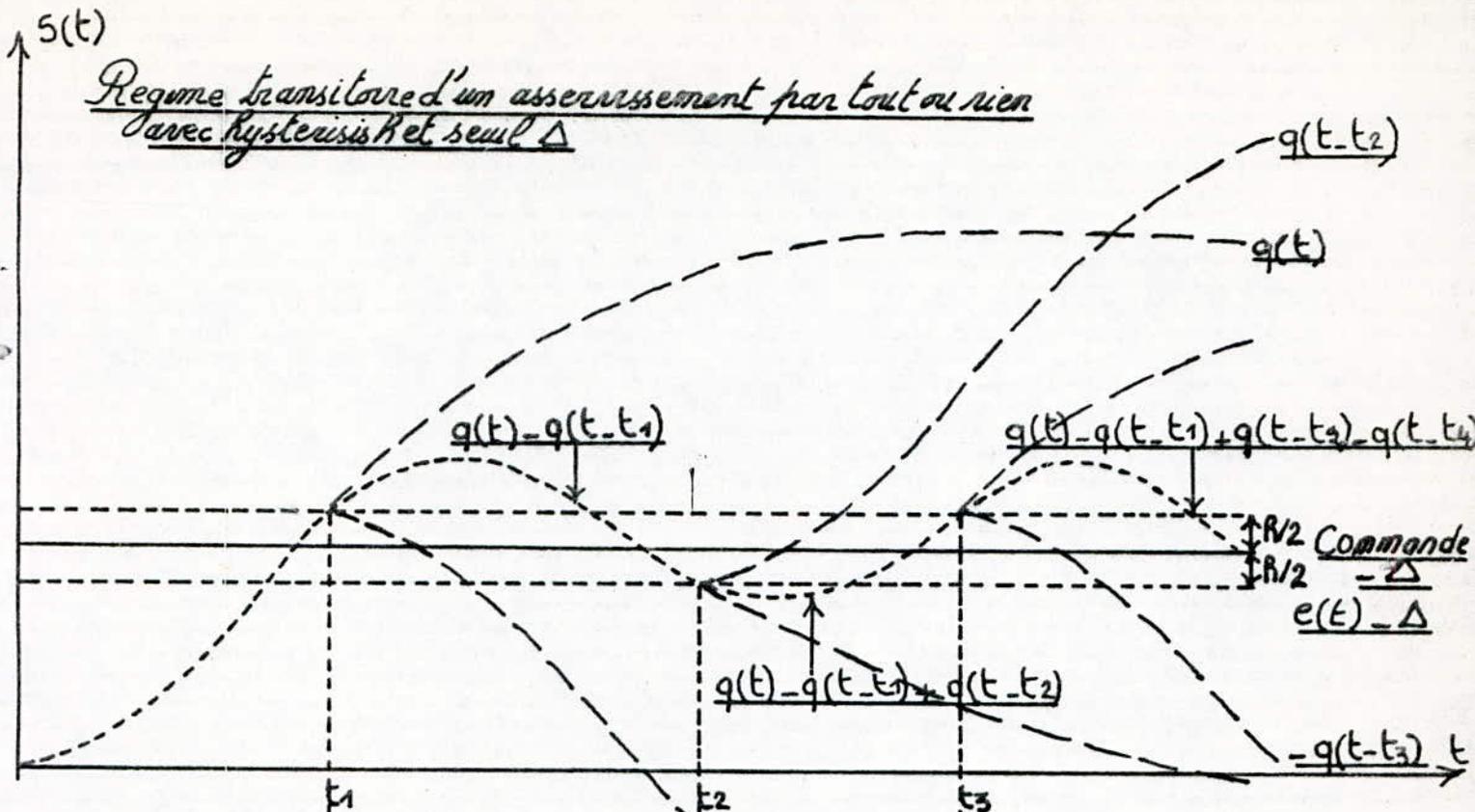
(figure 9)

$S(t)$

Regime transitoire d'asservissement par tout ou rien  
avec seuil  $\Delta$  (et sans hysteresis)



(figure 10)



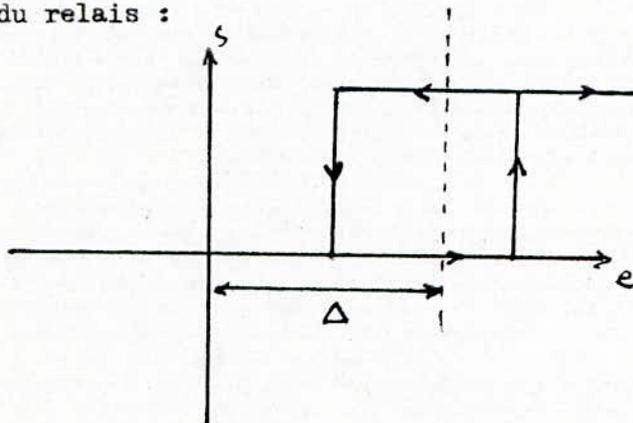
(Figure 11)

la commande ou la consigne d'entrée.

Donc à  $t=0$ , on a le relais qui est branché et de là le four suit sa fonction de transfert  $q(t)$ , mais lorsque  $s=e-\Delta$  on aura la première commutation qui débranchera le relais, ainsi le four suivra la fonction  $q(t) - q(t-t_1)$  ( voir figure 10 ) et ainsi de suite.

V.2.4. Régime transitoire d'un asservissement par tout ou rien avec seuil  $\Delta$  et hystérésis  $h$ .

Schéma du relais :

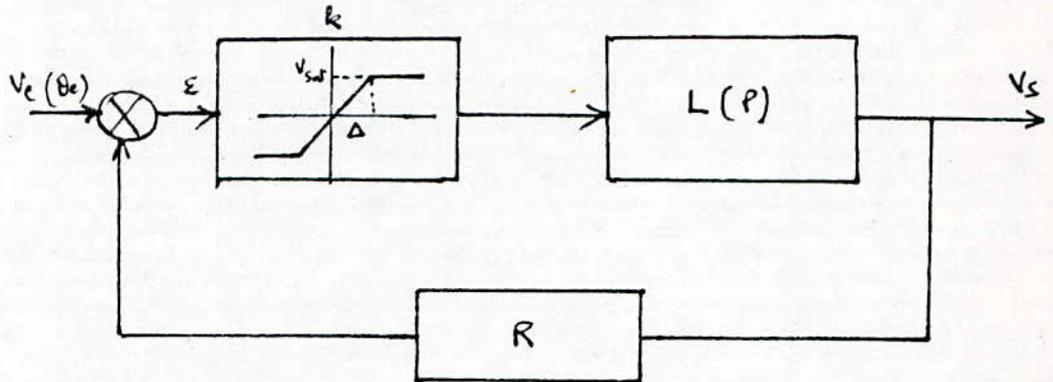


Dans ce cas la commutation de + à 0 se fera lorsque  $\xi$  atteindra la valeur  $\Delta - h/2$  c'est à dire  $s = e - \Delta + h/2$  et la commutation de 0 à + se fera lorsque  $\xi$  atteindra la valeur  $\Delta + h/2$  c'est à dire  $s = e - \Delta - h/2$ .

Donc à  $t=0$  on a le relais qui est branché et de là le four suit sa fonction de transfert  $q(t)$ , mais lorsque  $s = e - \Delta + h/2$  on aura la première commutation qui débranchera le relais, ainsi le four suivra la fonction de transfert  $q(t) - q(t-t_1)$ . Cela se fera jusqu'où  $s = e - \Delta - h/2$  lieu de la deuxième commutation qui branchera le relais et laissera le four suivre la fonction  $q(t) - q(t-t_1) + q(t-t_2)$  et ainsi de suite. ( voir figure 11 )

### V.3. Construction du régime transitoire par portions

Le relais est du type linéaire, mais comme tout système physique il présente une saturation. Le schéma de principe de cette présentation est donné par :



#### V.3.1. Etude théorique.

##### V.3.1.1. Analyse de la partie non linéaire.

Dans ce cas la contre réaction n'entre pas en jeu et ainsi la sortie sera donnée par :

$$V_s(p) = \frac{V_{sat}}{p} L(p)$$

##### V.3.1.2. Analyse de la partie linéaire.

Sur cette partie, la contre réaction aura son effet et de là on tire l'expression :

$$V_s = \xi(k) L(p) \quad \text{avec } \xi = V_e - RV_s$$

on aura :

$$V_s = (V_e - RV_s) L(p) \cdot k$$

$$V_s (1 + kRL(p)) = kL(p)V_e$$

d'où :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{kL(p)}{1 + kRL(p)}$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{R + \frac{1}{kL(p)}}$$

Si on considère que le système étudié est d'ordre  $n$   
c'est à dire :

$$R + \frac{1}{kL(p)} = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0$$

On aura :

$$V_s(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0) = V_e$$

c'est à dire en passant au domaine temporel l'expression  
devient :

$$V_e = a_n \frac{d^n V_s}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} V_s}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dV_s}{dt} + a_0 V_s \quad (1)$$

Bien sûr dans ce cas on a pas pris en considération  
les conditions initiales, ce qui n'est pas correct  
étant donné qu'on avait un intervalle de démarrage  
( partie non linéaire ) pour cette partie.

D'après les formules de LAPLACE on a :

$$\mathcal{L}\left[a_1 \frac{dV_s}{dt}\right] = a_1 \mathcal{L}\left[\frac{dV_s}{dt}\right] = a_1 \left[p V_s(p) - V_s(0)\right]$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}\left[a_2 \frac{d^2 V_s}{dt^2}\right] &= a_2 \mathcal{L}\left[\frac{d^2 V_s}{dt^2}\right] = a_2 \left[p(V_s'(p)) - V_s'(0)\right] \\ &= a_2 \left[p(p V_s(p) - V_s(0)) - V_s'(0)\right] \\ &= a_2 \left[p^2 V_s(p) - p V_s(0) - V_s'(0)\right] \end{aligned}$$

Et ainsi on arrive à la formule globale :

$$\begin{aligned} \mathcal{L}\left(a_n \frac{d^n V_s}{dt^n}\right) &= a_n \mathcal{L}\left[\frac{d^n V_s}{dt^n}\right] \\ &= a_n \left[ p^n V_s(p) - p^{n-1} V_s(0) - p^{n-2} \frac{dV_s(0)}{dt} - p^{n-3} \frac{d^2 V_s(0)}{dt^2} \right. \\ &\quad \left. - \dots - \frac{d^{n-1} V_s(0)}{dt^{n-1}} \right] \end{aligned}$$

$$\mathcal{L}\left[a_n \frac{d^n V_s}{dt^n}\right] = a_n \left[ p^n V_s(p) - I_n(0) \right] \quad (2)$$

$$\text{avec } I_n(0) = \sum_{k=0}^{n-1} p^k \frac{d^{(n-1-k)} V_s}{dt^{n-1-k}} \quad (3)$$

En appliquant LAPLACE sur la formule (1) on aura :

$$\mathcal{L}\{V_e\} = a_n \mathcal{L}\left(\frac{d^n V_s}{dt^n}\right) + a_{n-1} \mathcal{L}\left(\frac{d^{n-1} V_s}{dt^{n-1}}\right) + \dots + a_0 \mathcal{L}(V_s)$$

L'expression (2) nous permet d'exprimer la forme précédente sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} V_e(p) &= a_n \left[ p^n V_s - I_n(0) \right] + a_{n-1} \left[ p^{n-1} V_s - I_{n-1}(0) \right] + \dots + \\ &\quad + a_1 \left[ p V_s(p) - V_s(0) \right] + a_0 V_s(p) \\ &= V_s \left( a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 \right) - \left[ a_n I_n(0) + \right. \\ &\quad \left. + a_{n-1} I_{n-1}(0) + \dots + a_1 I_1(0) \right] \\ &= V_s \left( a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0 \right) - I \\ &\quad \text{avec } I = \sum_{k=1}^n a_k I_k(0) \end{aligned}$$

de là on aura :

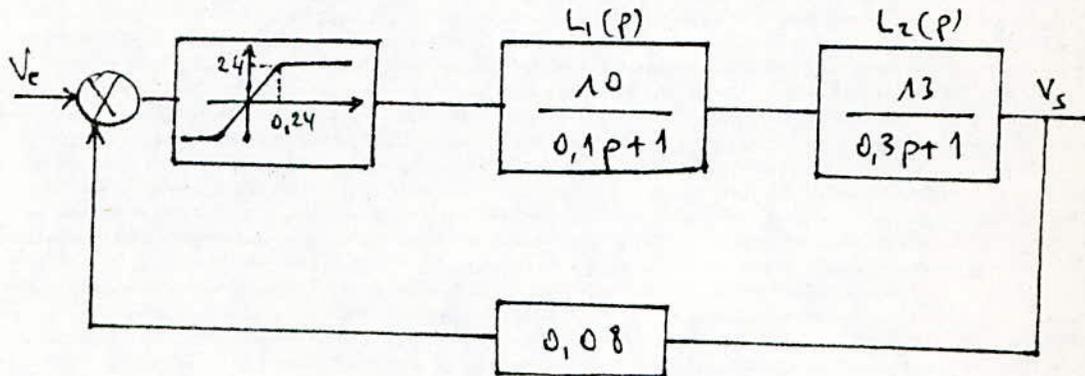
$$V_e(p) + I = V_s \left( a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0 \right)$$

$$\text{d'où : } V_s(p) = \frac{V_e(p) + I}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}$$

On utilise le processus de CARSON qui consiste à multiplier  $I$  par  $p$ , l'expression devient :

$$V_s(p) = \frac{V_e(p) + pI}{a_n p^n + \dots + a_1 p + a_0}$$

V.3.1.3. Utilisation de la méthode sur un système d'ordre 2  
Schéma de principe avec les valeurs utilisées



On prend comme valeur à l'entrée  $V_e = 1V$ . Donc au début notre système suivra la partie non linéaire avec la fonction de transfert :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{V_{sat}}{p} L_1 L_2$$

D'où :

$$V_s = \frac{V_{sat} V_e}{p} L_1 L_2$$

Avec les valeurs données on aura :

$$V_s = \frac{24}{p} \times \frac{10}{0,1p+1} \times \frac{13}{0,3p+1}$$

$$= \frac{3120}{p(0,1p+1)(0,3p+1)}$$

$$= \frac{3120}{p} \left[ \frac{-0,5}{0,1p+1} + \frac{1,5}{0,3p+1} \right]$$

$$\begin{aligned}
&= 3120 \left[ \frac{-0,5}{p(0,1p+1)} + \frac{1,5}{p(0,3p+1)} \right] \\
&= 3120 \left[ \left( \frac{1}{p} - \frac{0,1}{0,1p+1} \right) (-0,5) + 1,5 \left[ \frac{1}{p} - \frac{0,3}{0,3p+1} \right] \right] \\
&= 3120 \left[ \frac{1}{p} - 1,5 \frac{0,3}{0,3p+1} + 0,5 \frac{0,1}{0,1p+1} \right] \\
V_s(p) &= 3120 \left[ \frac{1}{p} - \frac{1,5}{p + \frac{10}{3}} + \frac{0,5}{p + 10} \right]
\end{aligned}$$

En passant au domaine temporel on aura :

$$V_s(t) = 3120 \left( 1 - 1,5 e^{-\frac{10}{3}t} + 0,5 e^{-10t} \right)$$

La partie linéaire est donnée par la fonction de transfert

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{100 \times \frac{10}{0,1p+1} \times \frac{13}{0,3p+1}}{1 + 0,08 \times 100 \times \frac{10}{0,1p+1} \times \frac{13}{0,3p+1}}$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{13 \cdot 10^3}{(0,1p+1)(0,3p+1) + 1040}$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{13 \cdot 10^3}{1040} \frac{1}{1 + \frac{3 \cdot 10^{-2} p^2 + 0,4p + 1}{1040}}$$

$$V_s = \frac{13 \cdot 10^3}{1040} \times 1^V \times \frac{1}{1 + \frac{3 \cdot 10^{-2} p^2 + 0,4p + 1}{1040}}$$

$$d'où : V_s = \frac{12,5}{2,88 \cdot 10^{-5} p^2 + 3,85 \cdot 10^{-4} p + 1}$$

Or pour une entrée de 1V on a à la sortie  $V_s = 12,5V$  pour la partie linéaire.

Donc  $\Delta U = 0,24V$  correspond à  $\Delta V_s = 0,24 \times 12,5 = 3V$ .

Ainsi notre système suivra la partie non linéaire jusqu'à atteindre la valeur  $12,5 - 3 = 9,5V$  et de là il va suivre l'expression linéaire qui sera prise avec ses conditions initiales.

Donc cette transition d'une forme à une autre se fera pour

$$3120 \left( 1 - 1,5 e^{-\frac{10}{3}t} + 0,5 e^{-10t} \right) = 9,5$$

Après le tracé de l'expression non linéaire et la recherche de l'intersection avec  $V_s = 9,5V$  (voir courbe C) on aura  $t_p = 14ms$ .

Le système étant d'ordre 2, on aura besoin des conditions initiales :

$$\begin{aligned} V_s(0) &= 9,5 \\ \text{et } \frac{dV_s(0)}{dt} &= 3120 \left( 1 - 1,5 e^{-\frac{10}{3}t} + 0,5 e^{-10t} \right) \\ &= 5 \left( e^{-\frac{10}{3}t} - e^{-10t} \right) 3120 \end{aligned}$$

Pour  $t = 14ms$

$$\frac{dV_s(0)}{dt} = 1326,74$$

La partie linéaire étant présentée par :

$$V_s = \frac{12,5}{2,88 \cdot 10^{-5} p^2 + 3,85 \cdot 10^{-4} p + 1}$$

On aura :

$$2,88 \cdot 10^{-5} \frac{d^2 V_s}{dt^2} + 3,85 \cdot 10^{-4} \frac{dV_s}{dt} + V_s = 12,5$$

$$\text{or : } \frac{d^2 V_s}{dt^2} = p^2 V_s - p^2 V_s(0) - p V_s'(0)$$

$$\frac{dV_s}{dt} = p V_s - p V_s(0)$$

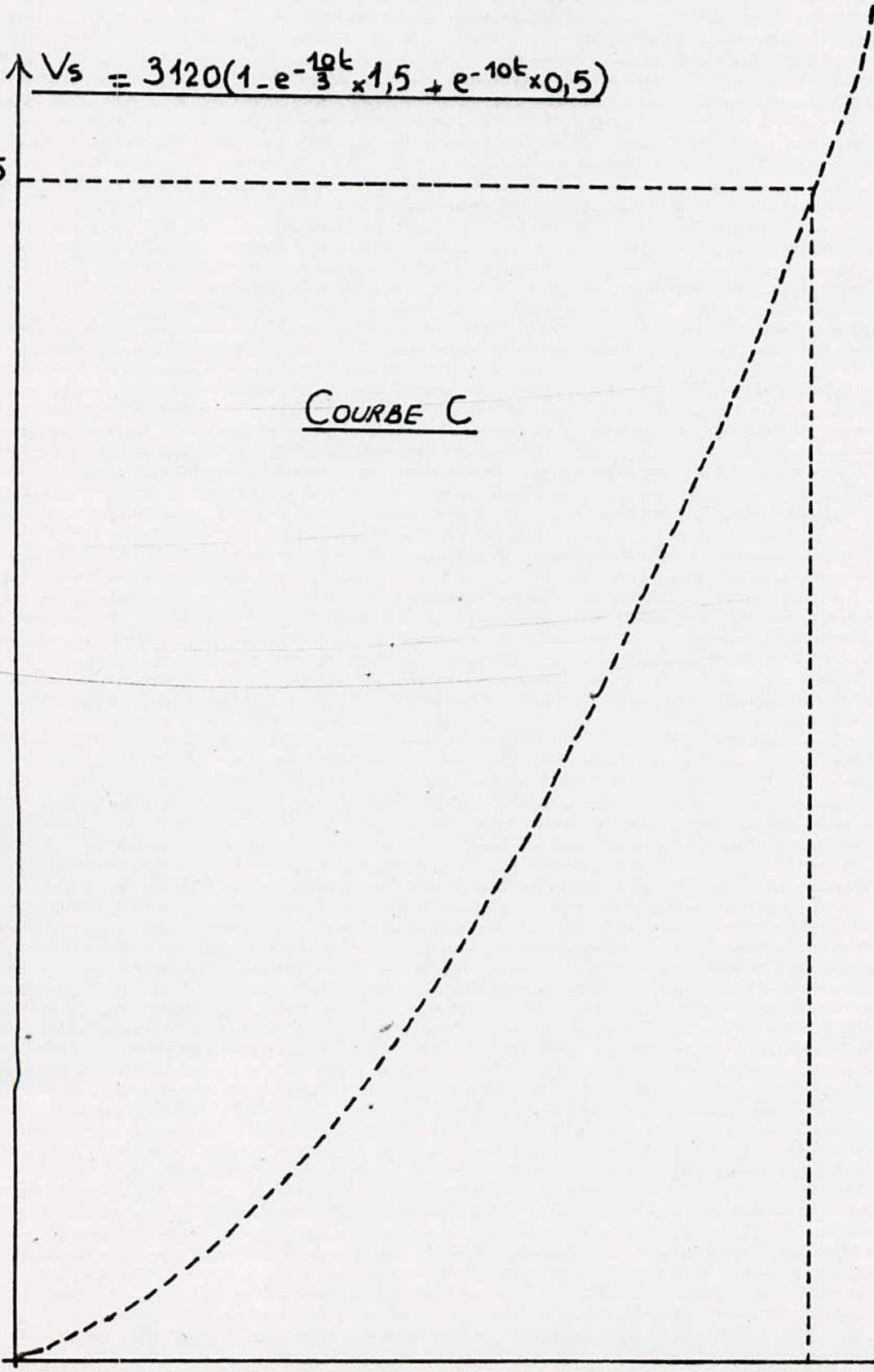
1 cm  $\longrightarrow$  0,5 V

1 cm  $\longrightarrow$  1 ms

$$V_s = 3120(1 - e^{-\frac{10t}{3}} \times 1,5 + e^{-10t} \times 0,5)$$

9,5

COURBE C



On aura donc :

$$12,5 = 2,88 \cdot 10^{-5} \left[ p^2 v_s - p^2 v_s(0) - p v_s'(0) \right] + 3,85 \cdot 10^{-4} (p v_s - p v_s(0)) + v_s$$

$$(2,88 \cdot 10^{-5} p^2 + 3,85 \cdot 10^{-4} p + 1) v_s = 2,88 \cdot 10^{-5} p^2 v_s(0) + p \left[ 3,85 \cdot 10^{-4} v_s(0) + 2,88 \cdot 10^{-5} v_s'(0) \right] + 12,5$$

d'où :

$$v_s = \frac{2,88 \cdot 10^{-5} v_s(0) p^2 + [3,85 \cdot 10^{-4} v_s(0) + 2,88 \cdot 10^{-5} v_s'(0)] p + 12,5}{2,88 \cdot 10^{-5} p^2 + 3,85 \cdot 10^{-4} p + 1}$$

En remplaçant  $v_s(0) = 9,5$

$$\text{et } v_s'(0) = 1326,74$$

On aura :

$$v_s = \frac{27,36 \cdot 10^{-5} p^2 + 4,18 \cdot 10^{-2} p + 12,5}{2,88 \cdot 10^{-5} p^2 + 3,85 \cdot 10^{-4} p + 1}$$

$$v_s = \frac{9,5 (p^2 + 152,8 p + 45687)}{p^2 + 13,37 p + 34722}$$

Remplaçons  $p$  par  $j\omega$  dans cette expression on obtient :

$$v_s(j\omega) = \frac{9,5 (-\omega^2 + 152,8 j\omega + 45687)}{-\omega^2 + 13,37 j\omega + 34722} = P(\omega) + jQ(\omega)$$

$$\Re[v_s(j\omega)] = 9,5 \frac{(45687 - \omega^2 + j152,8\omega)(34722 - \omega^2 + j13,37\omega)}{(34722 - \omega^2 + j13,37\omega)(34722 - \omega^2 - j13,37\omega)}$$

$$P(\omega) = \Re[v_s(j\omega)] = 9,5 \frac{(45687 - \omega^2)(34722 - \omega^2) - 152,8 \times 13,37 \omega^2}{(34722 - \omega^2)^2 + (13,37\omega)^2}$$

Finalemment :

$$P(\omega) = 9,5 \frac{(45687 - \omega^2)(34722 - \omega^2) - 2042,93 \omega^2}{(34722 - \omega^2)^2 + 172,76 \omega^2}$$

On obtient le tableau suivant :

$\omega$	$P(\omega)$		$P(\omega)$
0	12,5	250	7,22
10	12,51	300	8,14
20	12,54	500	9,11
30	12,59	1000	9,40
40	12,69	10000	9,50
50	12,77	100000	9,50
60	12,91		
100	13,99		
110	14,50		
120	14,64		
130	15,43		
140	16,86		
145	17,43		
146	17,62		
147	17,82		
148	19,74		
150	20,39		
155	22,46		
156	22,98		
157	23,53		
158	24,14		
159	24,78		
160	25,46		
170	38,13		
185	112,86		
185,5	112,23		
186	110,50		
190	68,86		
200	14,03		

A l'aide de ces valeurs on a construit la courbe D.

Bien sûr la formule de FOURRIER nous permet d'avoir la représentation temporelle à partir de la courbe  $P(\omega)$

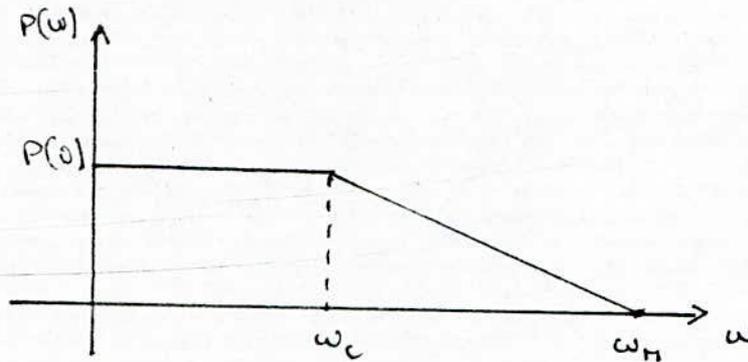
on aura :

$$\theta(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{P(\omega) \sin \omega t}{\omega} d\omega$$

mais une forme complexe pour  $P(\omega)$  nous pousse à éviter ce long calcul.

On représente alors notre courbe en une succession de trapèzes dont on peut avoir les représentations temporelles à partir de l'abaque.

Donc pour le trapèze suivant :



on a :  $x = \frac{\omega_c}{\omega_n}$

avec  $t = \frac{\tau}{\omega_n}$  et  $\theta(t) = hP(0)$

L'abaque nous donne pour certaines valeurs de  $x$ , les valeurs correspondantes de  $\tau$  et de  $h$ .

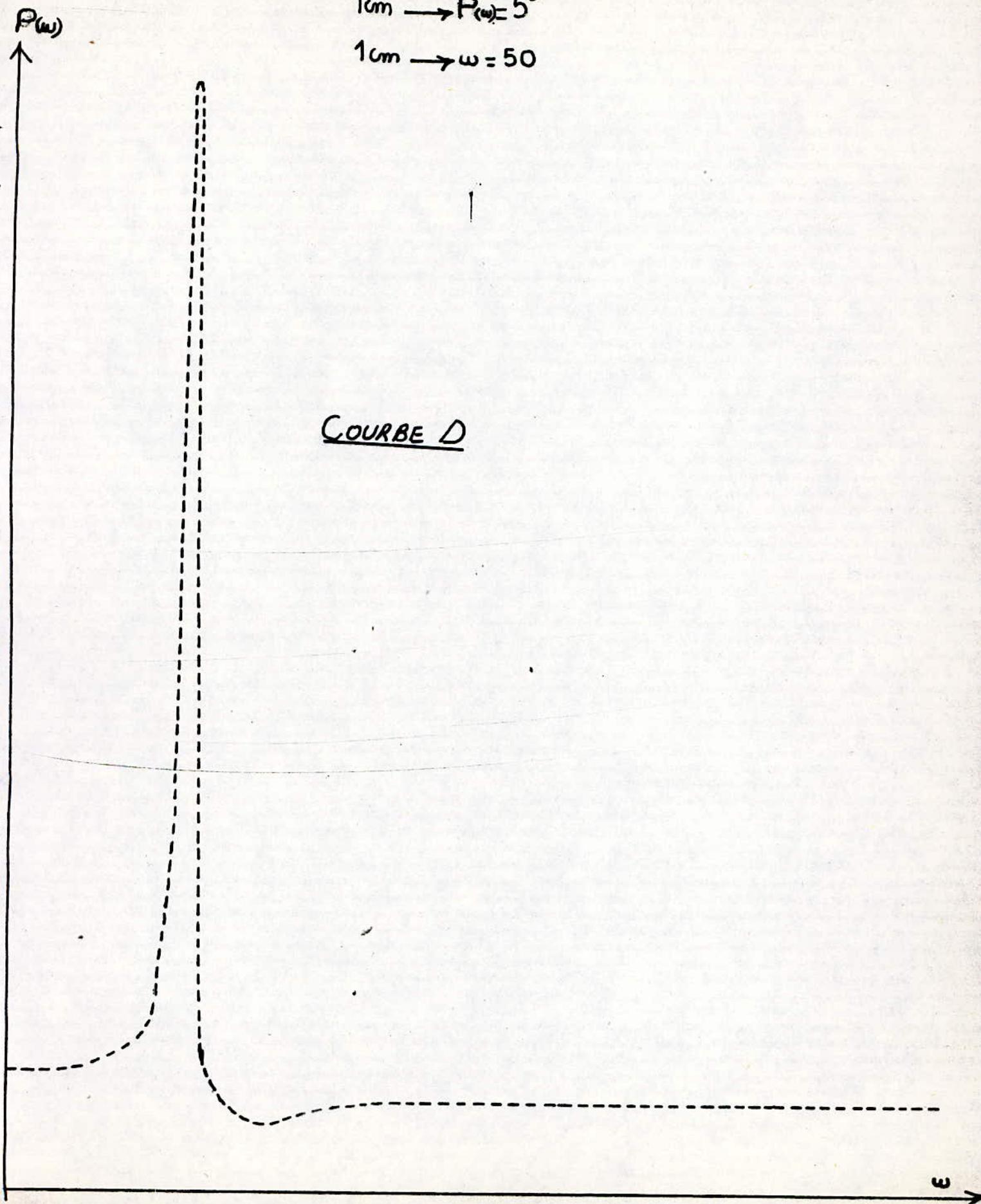
La courbe  $P(\omega)$  peut être assimilée à une succession de trapèzes ( courbe E ) et ainsi chaque trapèze donnera la courbe du régime transitoire correspondante.

Ensuite en faisant la somme graphique de ces régimes transitoires on aura la courbe du régime transitoire de notre système laquelle ajoutée à la courbe de la partie non linéaire ( à partir du temps de passage du non linéaire vers le linéaire calculé auparavant ) nous donne le processus d'augmentation de la tension du système étudié.

1cm  $\rightarrow$   $P(\omega) = 5^\circ$

1cm  $\rightarrow$   $\omega = 50$

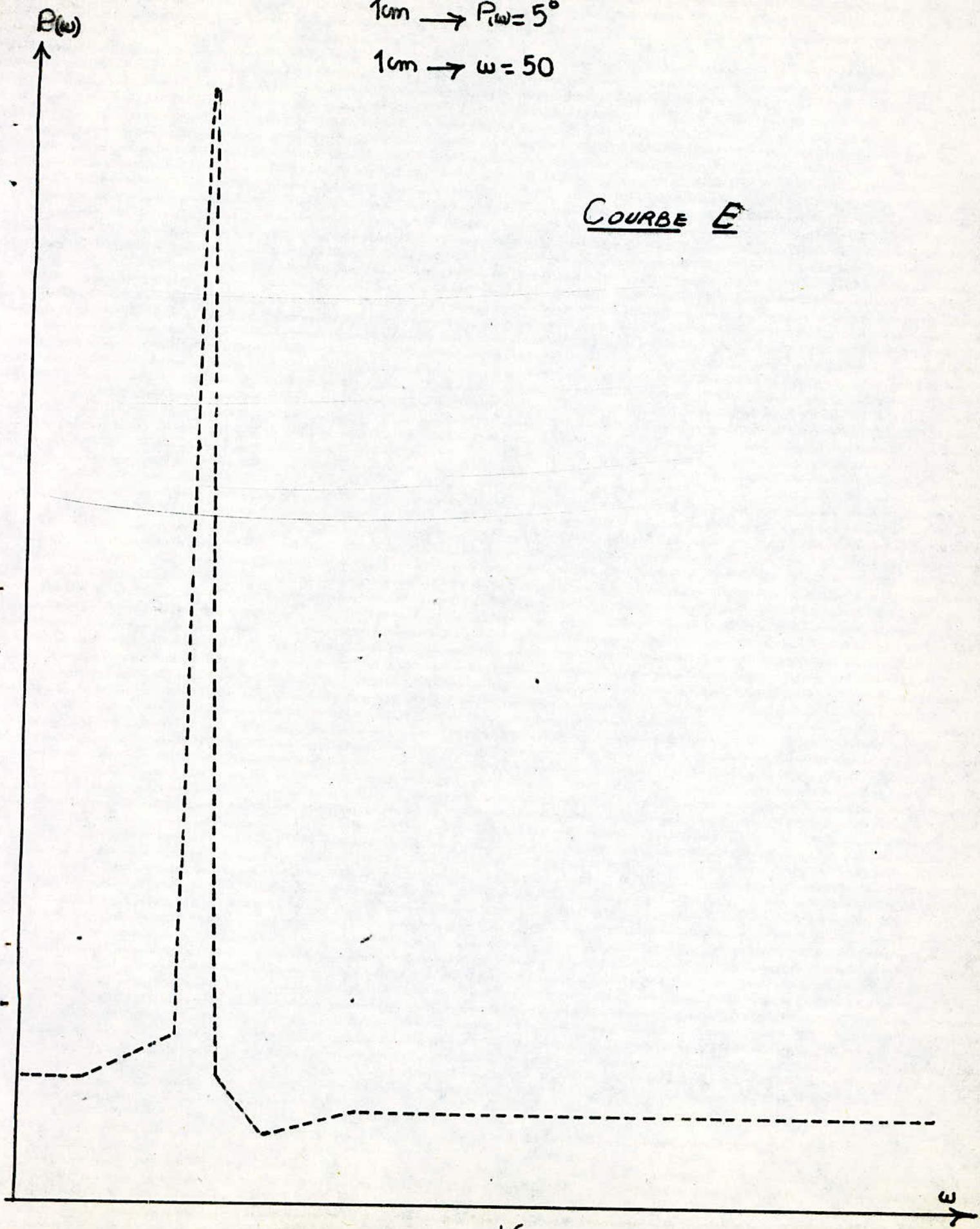
COURBE D



1cm  $\rightarrow$   $P_{\omega} = 5^{\circ}$

1cm  $\rightarrow$   $\omega = 50$

COURBE E



19. Таблица  $h$ -функций для трапеций

$\alpha$	0,0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,5	0,138	0,165	0,176	0,184	0,192	0,199	0,207	0,215	0,223	0,231
1,0	0,310	0,325	0,340	0,356	0,371	0,386	0,402	0,417	0,432	0,447
1,5	0,449	0,469	0,494	0,516	0,538	0,560	0,594	0,603	0,617	0,646
2,0	0,571	0,560	0,628	0,655	0,682	0,709	0,732	0,761	0,785	0,810
2,5	0,674	0,707	0,739	0,771	0,802	0,833	0,862	0,891	0,917	0,943
3,0	0,755	0,792	0,828	0,863	0,895	0,928	0,958	0,986	1,013	1,038
3,5	0,815	0,853	0,892	0,928	0,963	0,994	1,024	1,050	1,044	1,095
4,0	0,856	0,898	0,937	0,974	1,008	1,039	1,066	1,090	1,110	1,127
4,5	0,883	0,923	0,960	0,998	1,029	1,057	1,084	1,104	1,120	1,129
5,0	0,895	0,939	0,977	1,012	1,042	1,067	1,087	1,102	1,112	1,117
5,5	0,900	0,940	0,986	1,015	1,042	1,063	1,079	1,088	1,092	1,096
6,0	0,903	0,945	0,981	1,013	1,037	1,054	1,065	1,070	1,068	1,062
6,5	0,904	0,943	0,980	1,009	1,029	1,043	1,050	1,049	1,043	1,033
7,0	0,904	0,945	0,978	1,006	1,024	1,034	1,037	1,033	1,023	1,009
7,5	0,907	0,945	0,980	1,005	1,021	1,027	1,027	1,020	1,005	0,989
8,0	0,911	0,951	0,983	1,007	1,020	1,024	1,021	1,011	0,998	0,982
8,5	0,918	0,956	0,989	1,010	1,021	1,024	1,018	1,007	0,998	0,978
9,0	0,925	0,966	0,996	1,016	1,025	1,025	1,017	1,006	0,992	0,978
9,5	0,932	0,972	1,004	1,020	1,028	1,026	1,018	1,006	0,993	0,982
10,0	0,939	0,980	1,009	1,025	1,030	1,027	1,018	1,005	0,994	0,985
10,5	0,946	0,985	1,013	1,028	1,031	1,026	1,016	1,004	0,994	0,989
11,0	0,947	0,988	1,015	1,028	1,030	1,024	1,013	1,002	0,993	0,990
11,5	0,949	0,988	1,016	1,027	1,028	1,021	1,010	0,998	0,991	0,991
12,0	0,950	0,990	1,015	1,025	1,024	1,015	1,004	0,994	0,988	0,990
12,5	0,950	0,989	1,013	1,022	1,019	1,010	0,998	0,990	0,986	0,989
13,0	0,950	0,989	1,012	1,019	1,015	1,004	0,993	0,986	0,984	0,989
13,5	0,950	0,990	1,011	1,016	1,011	1,000	0,990	0,983	0,984	0,989
14,0	0,951	0,990	1,010	1,015	1,008	0,997	0,987	0,983	0,985	0,991
14,5	0,954	0,990	1,011	1,014	1,008	0,996	0,986	0,984	0,987	0,994
15,0	0,956	0,993	1,012	1,014	1,006	0,995	0,987	0,986	0,991	0,998
15,5	0,959	0,995	1,013	1,014	1,006	0,995	0,989	0,989	0,995	1,002

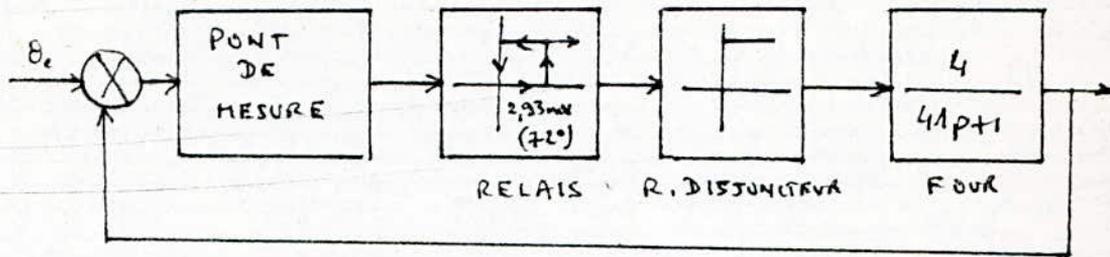
Окончание прил. 19

0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,09	0,95	1
1,010	1,008	1,001	0,994	0,990	0,993	1,003	1,018	1,031	1,040	1,038
1,011	1,008	1,001	0,995	0,995	1,001	1,014	1,027	1,035	1,037	1,029
1,012	1,007	1,000	0,996	0,999	1,008	1,020	1,030	1,032	1,026	1,012
1,009	1,005	0,998	0,997	1,002	1,012	1,023	1,027	1,023	1,013	0,994
1,008	1,001	0,997	0,997	1,004	1,014	1,020	1,018	1,008	0,993	0,978
1,005	0,999	0,995	0,997	1,005	1,012	1,014	1,007	0,993	0,978	0,969
1,001	0,995	0,993	0,997	1,004	1,009	1,006	0,995	0,981	0,970	0,976
0,998	0,992	0,992	0,997	1,003	1,005	0,998	0,985	0,973	0,967	0,973
0,995	0,991	0,992	0,998	1,003	1,001	0,991	0,980	0,972	0,975	0,986
0,994	0,991	0,994	0,999	1,002	0,998	0,987	0,978	0,977	0,990	1,001
0,993	0,992	0,996	1,001	1,002	0,996	0,987	0,982	0,989	1,001	1,015
0,994	0,995	0,999	0,995	1,002	0,995	0,988	0,988	0,998	1,013	1,025
0,995	0,997	1,000	1,004	1,002	0,995	0,991	0,997	1,010	1,024	1,029
0,996	1,000	1,005	1,005	1,002	0,996	0,996	1,006	1,018	1,028	1,028
0,997	1,002	1,007	1,007	1,002	0,997	1,001	1,001	1,022	1,025	1,016
0,998	1,003	1,008	1,006	1,001	0,998	1,004	1,015	1,021	1,016	1,002
0,999	1,004	1,007	1,004	1,000	0,999	1,007	1,015	1,016	1,006	0,990
1,000	1,001	1,006	1,002	0,998	0,999	1,007	1,012	1,022	0,997	0,979
1,000	1,001	1,001	0,997	0,997	1,000	1,007	1,003	0,993	0,981	0,973
1,000	1,003	1,002	0,997	0,995	1,000	1,005	1,001	0,989	0,978	0,977
1,000	1,002	0,999	0,995	0,995	1,000	1,002	0,997	0,984	0,978	0,983

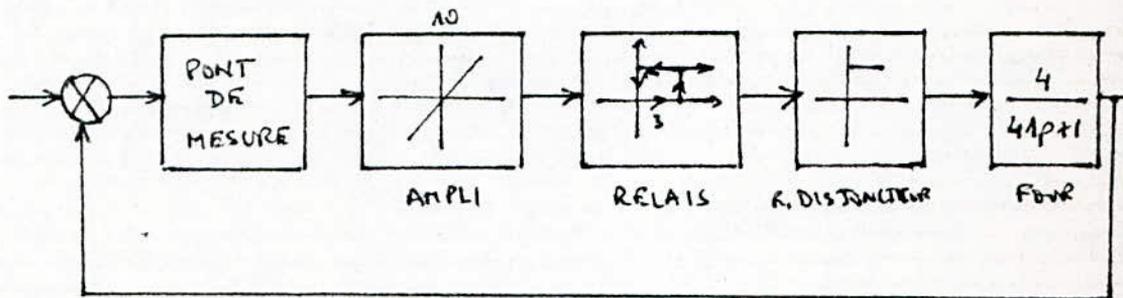


### V.3.2. Etude pratique.

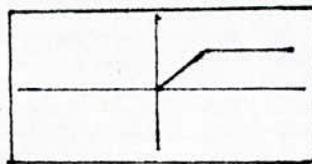
Notre four en général est représenté par le schéma suivant :



Avec la possibilité d'intégration d'un amplificateur de gain  $A=10$  pour la diminution de l'erreur constatée expérimentalement et qui était de  $72^\circ\text{C}$ , le schéma aura la forme suivante :



Le triplet ampli, relais, disjoncteur peut être représenté par le schéma global suivant :



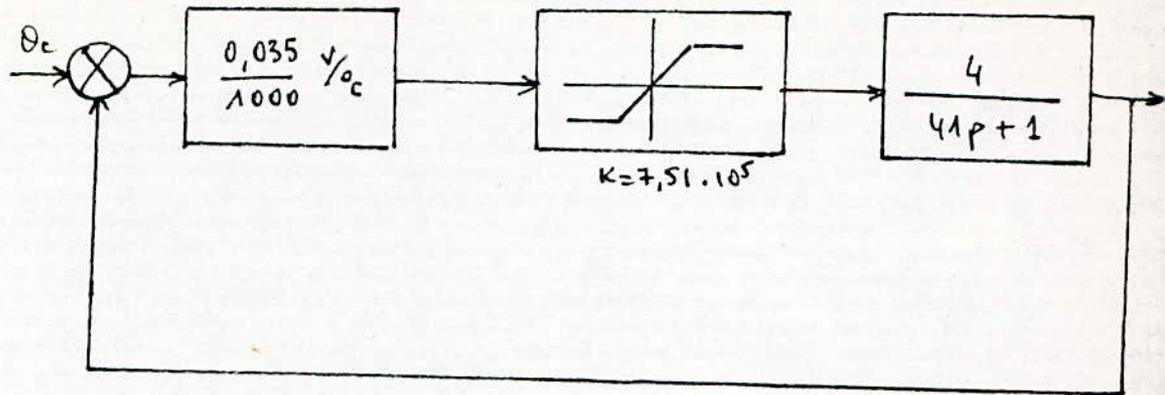
$$K = \frac{220}{0,293 \cdot 10^{-3}} = 7,51 \cdot 10^5$$

La consigne prise est de  $400^\circ\text{C}$

A la sortie du pont on aura une tension de 14mV, donc le pont sera représenté par :

$$P = \frac{14 \text{ mV}}{400^\circ\text{C}} = 0,035 \text{ mV/degre}$$

De là donc notre exemple sera représenté par le schéma suivant :



La partie <sup>non</sup> linéaire sera donnée par :

$$V_s = \frac{V_{sat}}{P} L(P)$$

dans notre cas :

$$\theta_s = \frac{800}{P(41P+1)}$$

D'où en passant au domaine temporel :

$$\theta_s = 800 \left( 1 - e^{-\frac{t}{41}} \right)$$

Par contre la partie linéaire sera donnée par :

$$\frac{\theta_s}{\theta_e} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\frac{0,035}{1000} \times 7,51 \cdot 10^5 \cdot \frac{800}{220(41P+1)}}$$

$$\frac{\theta_s}{\theta_e} = \frac{0,99}{1 + 0,42P}$$

Pour notre exemple on aura :

$$\theta_s = \frac{0,99 \theta_e}{1 + 0,42p} = \frac{0,99 \times 400}{1 + 0,42p}$$

$$\theta_s = \frac{395,86}{1 + 0,42p} \quad (p = 2\pi \text{ mn}^{-1})$$

ou :

$$\theta_s = \frac{395,86}{1 + 25,2p} \quad (p = 2\pi \text{ Hz})$$

Le système va suivre au début l'expression de la partie non linéaire et ceci jusqu'à atteindre la valeur  $395,86 - 7,2 = 388,6$  et de là il va suivre l'expression linéaire qui sera prise avec ses conditions initiales tirée de l'expression initiale.

Donc ce passage se fera pour  $800 (1 - e^{-\frac{t}{41}}) = 388,4$

$$\text{donc } e^{-\frac{t}{41}} = 0,5145 \Rightarrow t = 27,25 \text{ mn}$$

La partie linéaire étant présentée par :

$$\theta_s = \frac{395,86}{1 + 25,2p}$$

on aura :

$$25,2 \frac{d\theta_s}{dt} + \theta_s = 395,86$$

$$\text{or } \frac{d\theta_s}{dt} = p\theta_s - p\theta_s(0)$$

$$25,2 (p\theta_s - p\theta_s(0)) + \theta_s = 395,86$$

$$25,2 (p\theta_s(p) - 388,4p) + \theta_s = 395,86$$

$$\theta_s (25,2p + 1) = 395,86 + 9787,68 p$$

$$\text{d'où : } \theta_s = \frac{395,86 + 9787,68 p}{25,2p + 1}$$

Pour  $p = j\omega$

$$\begin{aligned} \theta_s &= \frac{395,86 + 9787,68 j\omega}{25,2j\omega + 1} \\ &= \frac{(395,86 + 9787,68 j\omega)(1 - j25,2\omega)}{1 + 635,04 \omega^2} \\ &= \frac{395,86 + 246650 \omega^2 - 188 j\omega}{1 + 635,04 \omega^2} \end{aligned}$$

$$\theta_s = P(\omega) + jQ(\omega)$$

$$\text{avec } P(\omega) = \frac{395,86 + 246650 \omega^2}{635,04 \omega^2 + 1}$$

Traçons cette courbe en prenant comme origine des valeurs de température  $\theta = 388,66 \text{ }^\circ\text{C}$  (valeur intermédiaire)

Nous obtenons le tableau suivant :

$\omega$	$P(\omega)$	$P(\omega)$
0	395,86	7,2
0,01	395,41	6,75
0,02	394,35	5,69
0,03	393,15	4,49
0,04	392,10	3,44
0,05	391,28	2,62
0,06	390,67	2,01
0,07	390,21	1,55
0,08	389,87	1,21
0,09	389,60	0,94
0,10	389,42	0,76
0,11	389,26	0,60
0,12	389,14	0,48
0,13	389,04	0,38
0,14	388,96	0,30
0,15	388,89	0,23
0,16	388,83	0,17
0,17	388,79	0,13
0,18	388,75	0,11
0,19	388,71	0,05
0,20	388,68	0,02
0,30	388,53	-0,13

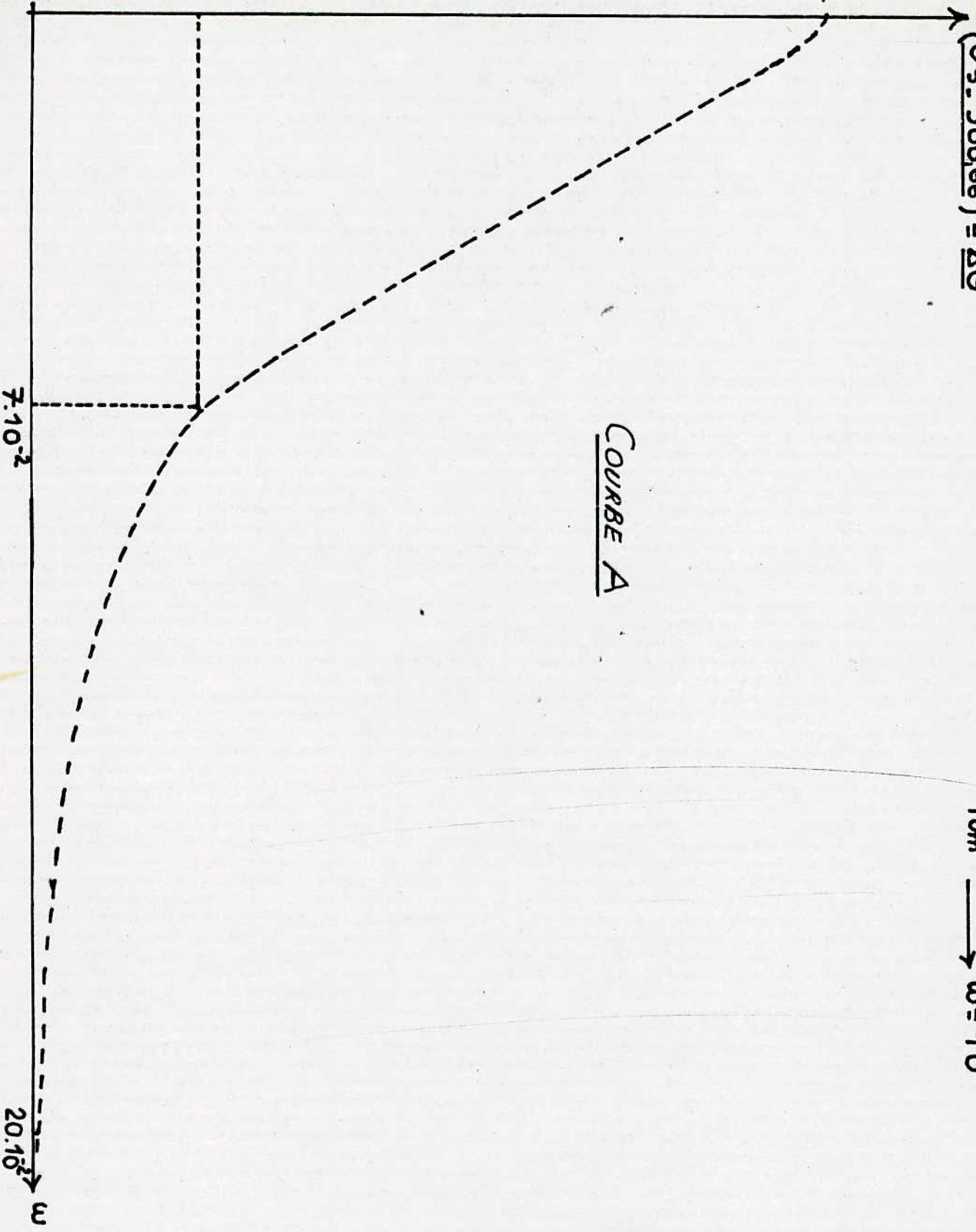
La fonction est représentée par la courbe A

On constate que notre courbe est constituée de trapèzes ; or on sait que pour chaque trapèze donné on peut avoir par des abaques ; le régime transitoire correspondant.

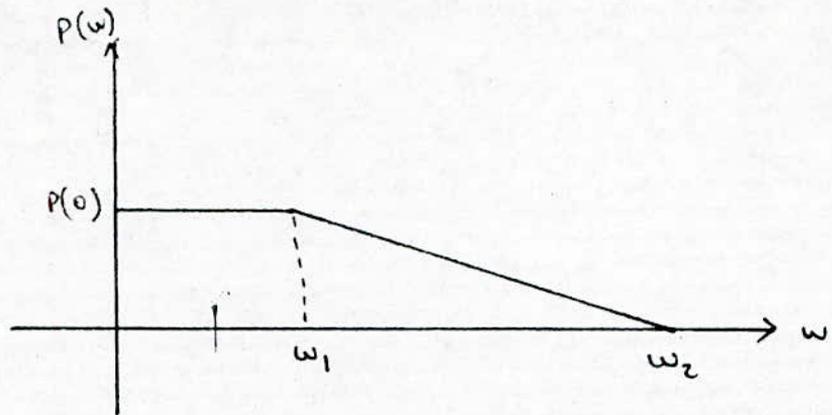
$(\theta_{s-388,66}) = \Delta\theta$

COURBE A

1 cm  $\longrightarrow$   $\Delta\theta = 0,5^\circ$   
1 cm  $\longrightarrow$   $w = 10^{-2}$



Soit par exemple le trapèze suivant :



Avec  $x = \frac{\omega_1}{\omega_2}$  on peut avoir grâce à l'abaque (ci-jointe) les valeurs :

$$\frac{Q(t) - h}{P(0) - h}$$

correspondant à des valeurs  $\zeta = \omega_2 t$ . Et de là on peut avoir le régime transitoire en fonction du temps.

Dans notre cas la courbe est constituée de deux trapèzes qui ont les paramètres suivants :

Trapèze 1  $x=0$   $P_1(0)=5,7$  (triangle)

Trapèze 2  $x = \frac{7}{20} = 0,35$   $P_2(0)=1,5$

On aura ainsi pour chaque trapèze le régime transitoire en fonction du temps.

Pour les paramètres des trapèzes 1 et 2 voir les tableaux à la page suivante :

Trapèze 1

$x=0$

$z = \omega_2 t$	$h$	$Q_y(t) = hP_A(0)$ $= 5,7h$	$t = \frac{z}{\sqrt{10} \cdot 2}$	
			(s)	(mn)
1	0,31	1,767	14,28	0,24
2	0,571	3,2547	28,56	0,48
3	0,755	4,3	42,85	0,72
4	0,856	4,88	57,60	0,96
5	0,895	5,10	72,00	1,20
6	0,903	5,15	86,40	1,44
7	0,904	5,153	100,80	1,68
8	0,911	5,193	115,20	1,92
9	0,925	5,2725	129,60	2,16
10	0,939	5,3523	144,00	2,40
11	0,947	5,3980	158,40	2,64
12	0,950	5,4150	172,80	2,88
13	0,950	5,4150	187,20	3,12
14	0,951	5,4200	201,60	3,36
15	0,956	5,4500	216,00	3,60

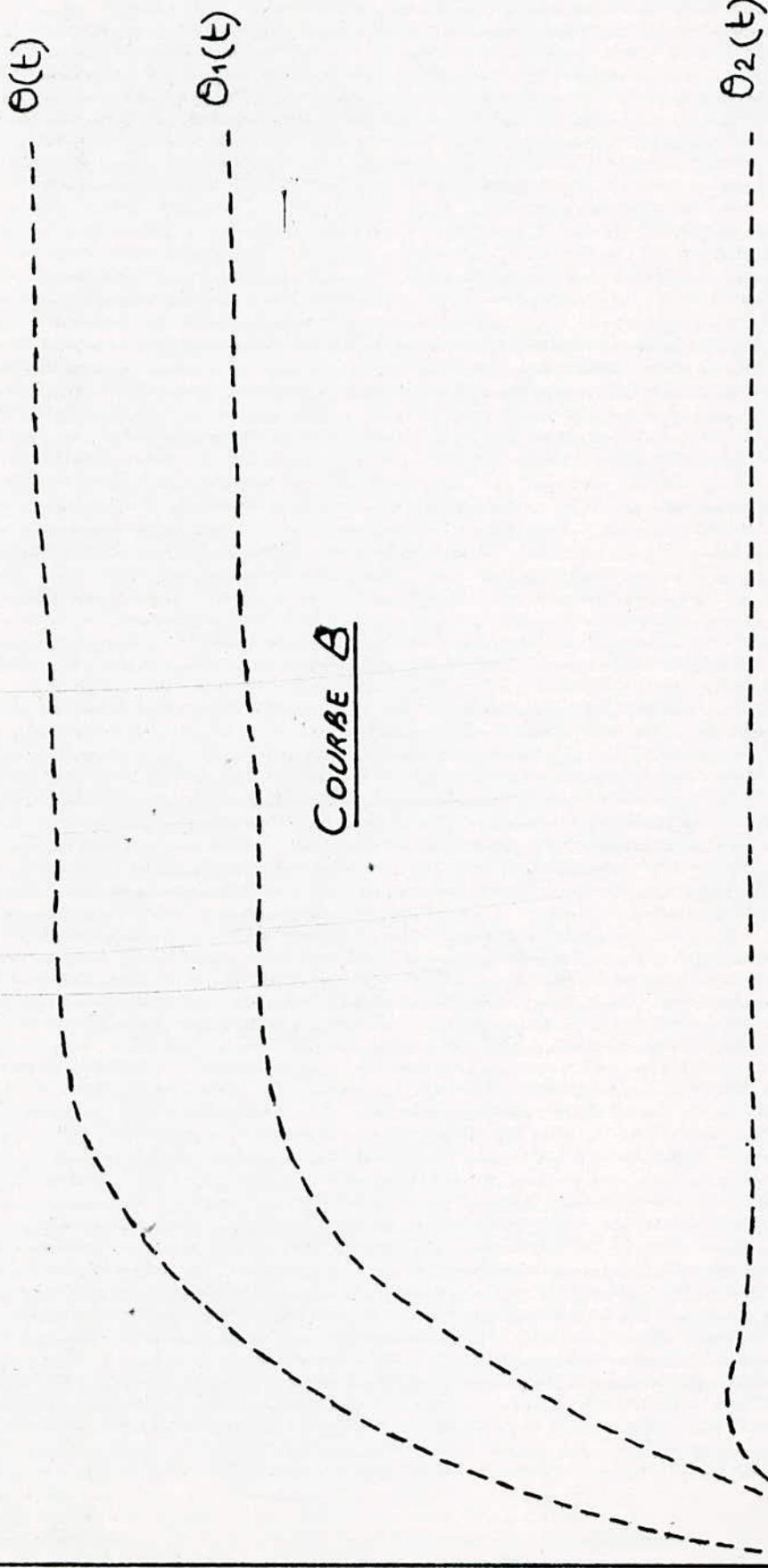
TRAPEZE 2  
 $\alpha = 0,35$

$\tau = \omega_2 t$	h	$Q_2(t) = hP(0) = 1,5h$	$t = \frac{\tau}{20 \cdot 10^{-2}}$ (s)
1	0,417	0,6225	5
2	0,761	1,1415	10
3	0,986	1,4800	15
4	1,090	1,6350	20
5	1,102	1,6530	25
6	1,070	1,6050	30
7	1,0330	1,5500	35
8	1,0110	1,5200	40
9	1,0060	1,5100	45
10	1,0050	1,5080	50
11	1,0020	1,5030	55
12	0,9940	1,4900	60
13	0,9860	1,4800	65
14	0,9830	1,4700	70
15	0,9860	1,4800	75
16	0,9920	1,4900	80
17	0,9980	1,4970	85
18	1,0000	1,5000	90
19	1,0010	1,5015	95
20	1,0010	-	100
21	1,0020	1,5030	105
22	1,0050	1,5075	110
23	1,0060	1,5090	115
24	1,0060	-	120
25	1,0040	1,5060	125
26	1,0010	1,5015	130

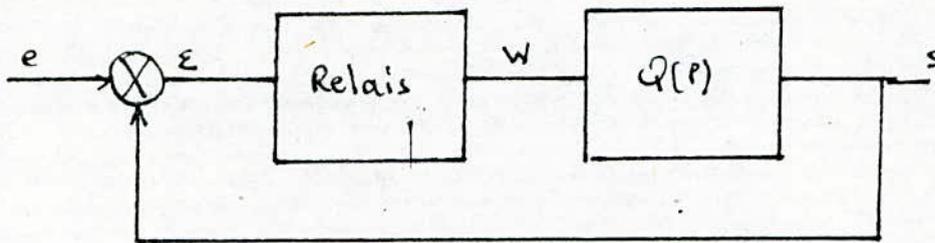
Avec ces valeurs on tracera séparément  $\theta_1(t)$  et  $\theta_2(t)$  puis on fera la somme graphique pour obtenir le régime transitoire.  
 ( voir courbe B )

1cm  $\longrightarrow$   $\theta = 0,5^\circ\text{C}$   
1cm  $\longrightarrow$   $t = 10 \text{ seconde}$

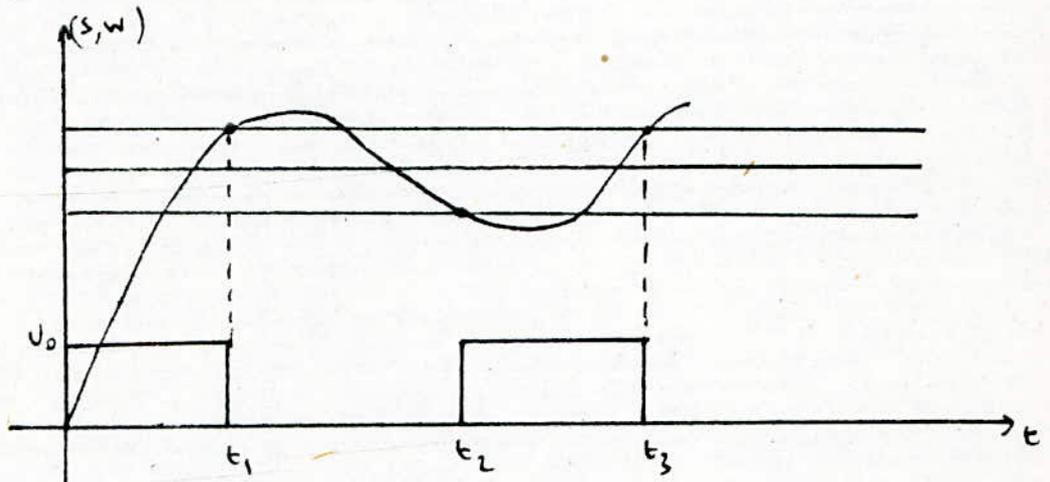
$\theta_1(t), \theta_2(t)$   
 $\theta(t) = \theta_1(t) + \theta_2(t)$



V.4. Construction de la courbe du régime transitoire à l'aide du théorème du retard.



Au vu de la courbe d'évolution du processus d'augmentation de la température qui a la forme suivante :



De là on aura :

$$W(t) = U_0 - U_0(t-t_1) + U_0(t-t_2) - U_0(t-t_3) \dots$$

$$\begin{aligned} \text{Avec } U_0(t-t_i) &= U_0 \text{ pour } t > t_i \\ &= 0 \text{ pour } t < t_i \end{aligned}$$

D'où :

$$\begin{aligned} W(p) &= \int_0^{\infty} w(t) e^{-pt} dt \\ &= \frac{U_0}{p} - \frac{U_0}{p} e^{-t_1 p} + \frac{U_0}{p} e^{-t_2 p} - \frac{U_0}{p} e^{-t_3 p} + \dots \end{aligned}$$

D'où :

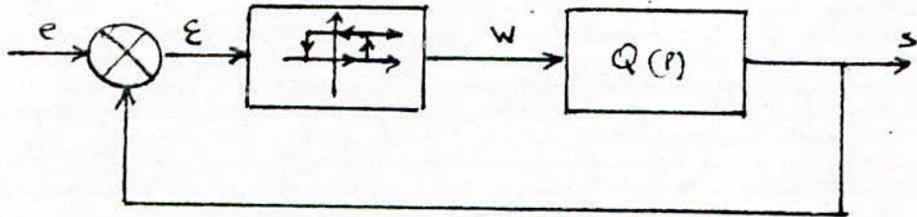
$$S(p) = Q(p) W(p) = \frac{U_0}{p} Q(p) - \frac{U_0}{p} Q(p) e^{-t_1 p} + \frac{U_0}{p} Q(p) e^{-t_2 p} - \dots$$

En passant au domaine temporel on aura :

$$s(t) = \left[ q(t) - q(t-t_1) + q(t-t_2) - q(t-t_3) + \dots \right] U_0$$

$q(t)$  étant la fonction de transfert du four

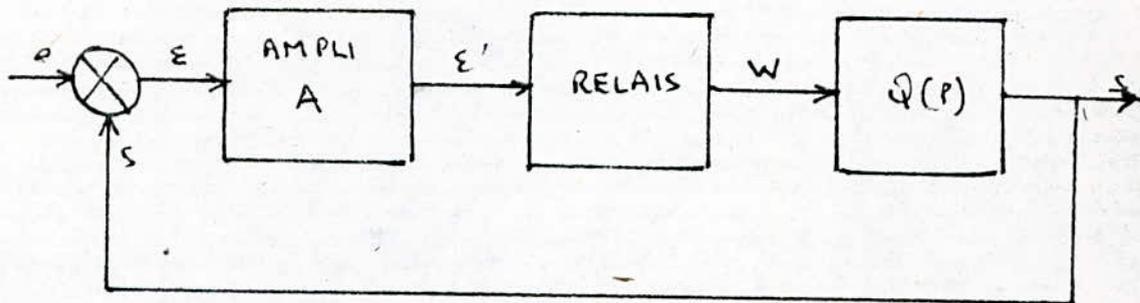
De là donc le schéma du dispositif devient :



Ainsi donc la méthode pour le tracé de la courbe établie auparavant dans le paragraphe du tout ou rien avec hystérésis est applicable dans le cas actuel, ce qui nous donne la courbe de la figure .

#### V.5. Analyse de la précision et synthèse d'un système pour son amélioration

La courbe de la figure nous montre que la valeur de la sortie  $s(t)$  transite entre les valeurs  $e(t) - h/2$  et  $e(t) + h/2$ . Donc la sortie est égale à la consigne demandée avec la variation de  $\pm h/2$ , ce qui a son importance lorsque  $h$  est assez grand. Cela nous pousse à essayer de minimiser cette valeur. On arrive à ce résultat en plaçant un amplificateur de gain  $A$  avant le relais, suivant le schéma :



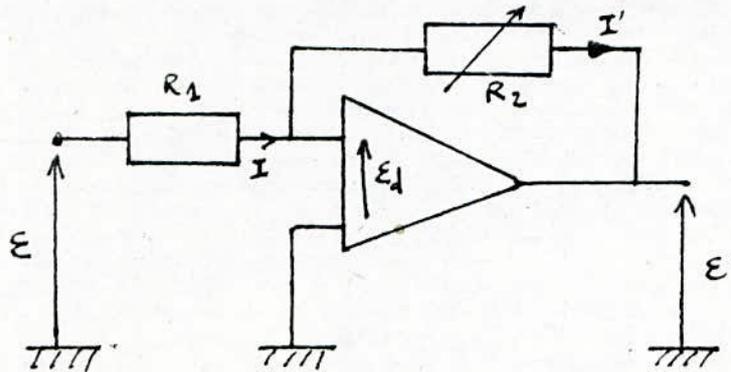
Le relais étant invariant, il commutera toujours lorsque son entrée serait égale à  $\pm h/2$  donc  $\mathcal{E}' = \pm h/2$  or  $\mathcal{E}' = A\mathcal{E}$ , donc les commutations se feront pour :

$$\mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}'}{A} = \pm \frac{h}{2A}$$

Le fait de placer cet amplificateur nous a donc permis la réduction du domaine de variation autour de la consigne.

Utilisons le graphe de la figure 9 avec  $A = 2$  on aura alors le graphe de la figure 12. On remarque que la sortie du four s'approche plus de la consigne.

De ce fait il suffit de l'insertion d'un amplificateur à gain variable avant le relais, un amplificateur opérationnel avec une résistance variable par exemple, suivant le schéma suivant :



En considérant que l'amplificateur opérationnel est idéal  $I_d=0$ ,  $G_d=\infty$  on peut écrire :

$$I = I' \Rightarrow \frac{\mathcal{E}_d - \mathcal{E}}{R_1} = \frac{\mathcal{E}' - \mathcal{E}_d}{R_2}$$

avec  $G_d = -\frac{\mathcal{E}'}{\mathcal{E}_d}$  donc  $\mathcal{E}_d = -\frac{\mathcal{E}'}{G_d}$ , on aura

$$\frac{\left(-\frac{\mathcal{E}'}{G_d} - \mathcal{E}\right)}{R_1} = \frac{\left(\mathcal{E}' + \frac{\mathcal{E}'}{G_d}\right)}{R_2} \Rightarrow \mathcal{E}' + \frac{\mathcal{E}'}{G_d} = \frac{R_2}{R_1} \left(-\frac{\mathcal{E}'}{G_d} - \mathcal{E}\right)$$

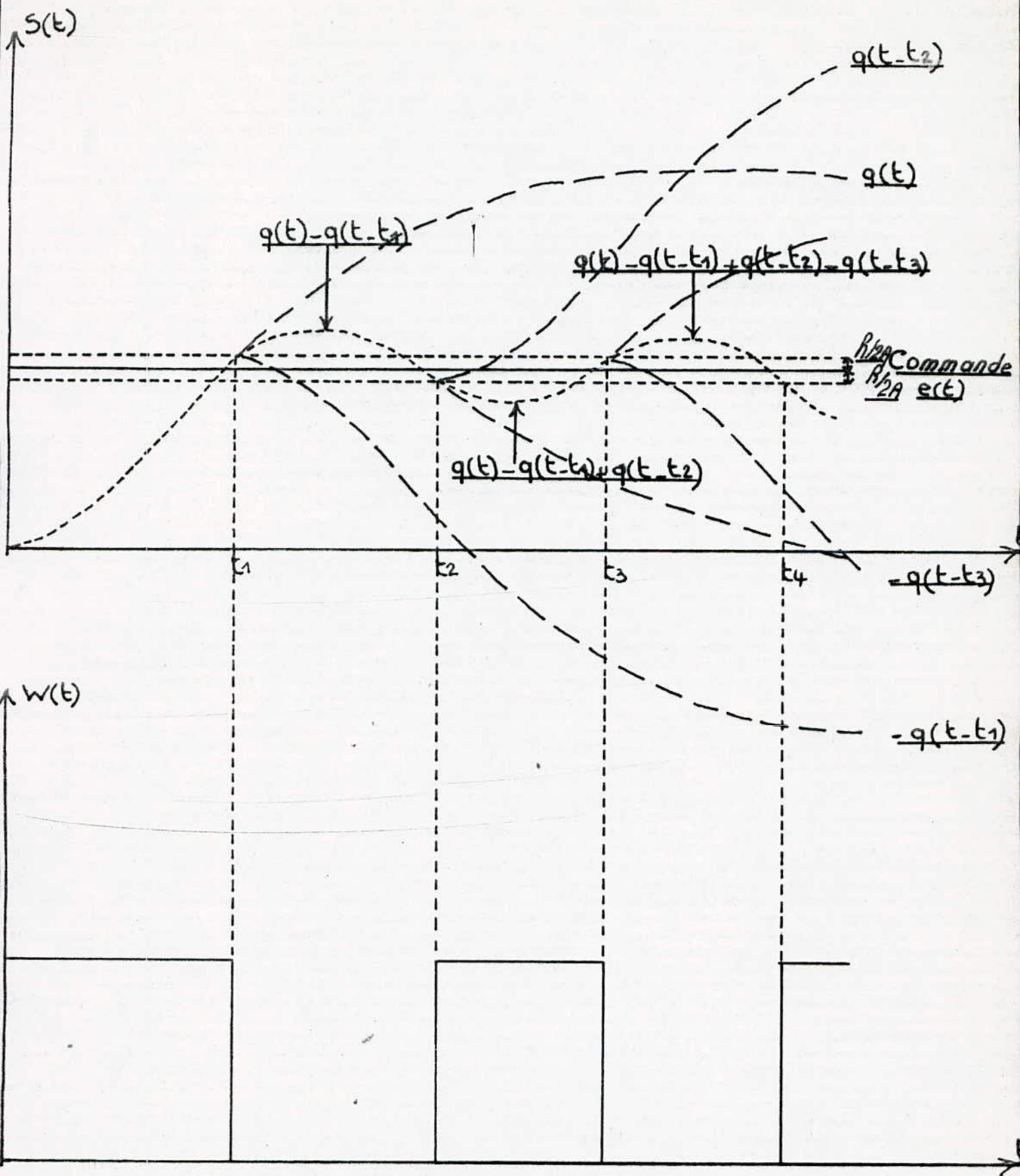
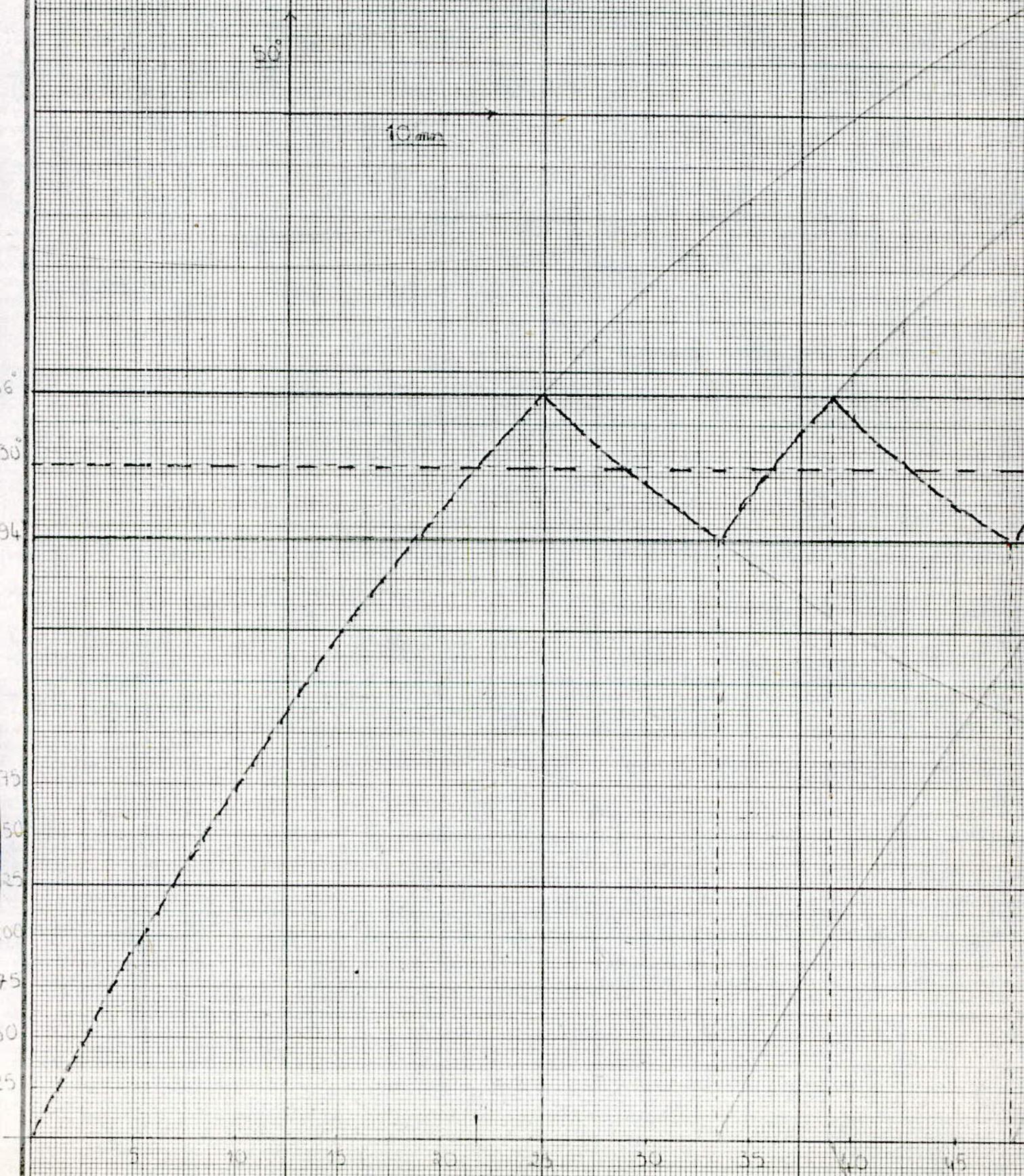
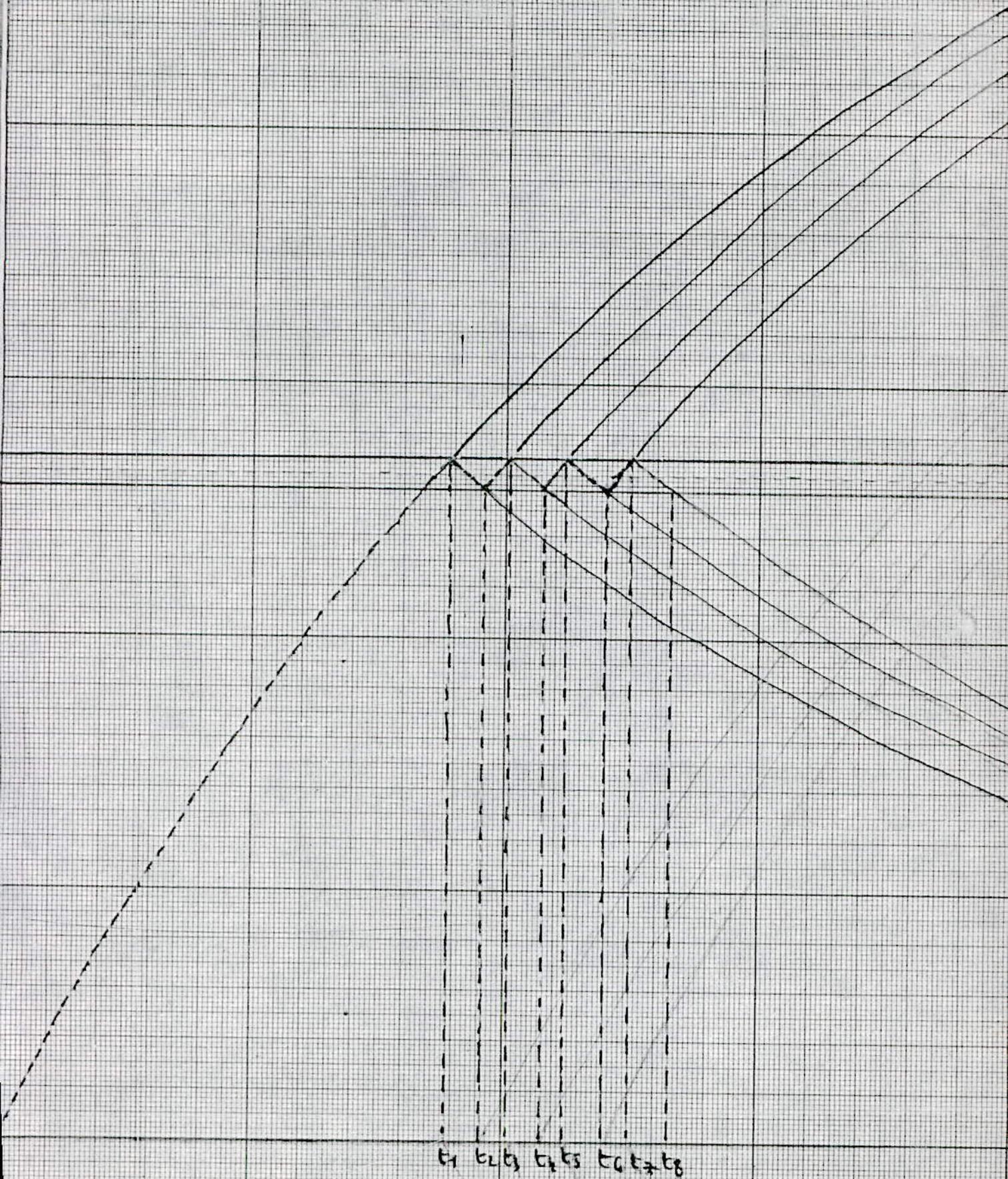


figure 12

# CONSTRUCTION DE LA COURBE SANS AMPLIFICATEUR



CONSTRUCTION DE LA COURBE (AVEC AMPLI)



$t_1 t_2 t_3 t_4 t_5 t_6 t_7 t_8$

$$\Rightarrow \frac{R_2}{R_1} \varepsilon = - \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \frac{\varepsilon'}{G_d} - \varepsilon'$$

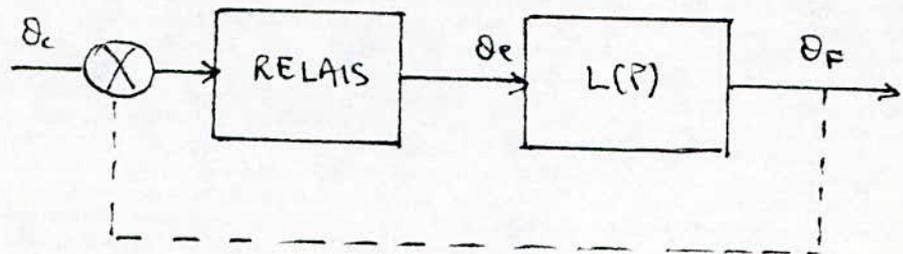
avec  $G_d \approx \infty$  on aura  $\varepsilon' \approx - \frac{R_2}{R_1} \varepsilon = A \varepsilon$

En faisant croître la valeur de la résistance  $R_2$  on fait augmenter le gain  $A$  et ainsi obtenir une bonne précision.

## VI. ETUDE EXPERIMENTALE.

### VI.1. Fonction de transfert.

On détermine en premier lieu l'évolution du processus d'augmentation de la f.e.m aux bornes du thermocouple (Nickel-Chrome-Nickel) expérimentalement et sans régulation;



On obtient le schéma de la figure 8 qui nous permettra le calcul de la constante de temps  $T$  du four ( correspondant à la valeur  $(1 - \frac{1}{e}) V_{max}$  avec  $V_{max} = 33,3 \text{ mV}$ ) on obtient  $T = 41 \text{ mn}$ .

Comme notre système est apériodique la fonction de transfert est donnée par la relation :

$$G(P) = \frac{K}{T_p + 1} \quad \text{avec} \quad K = \frac{800}{220} \approx 4\%$$

D'où la fonction de transfert :

$$G(P) = \frac{4}{41P + 1}$$

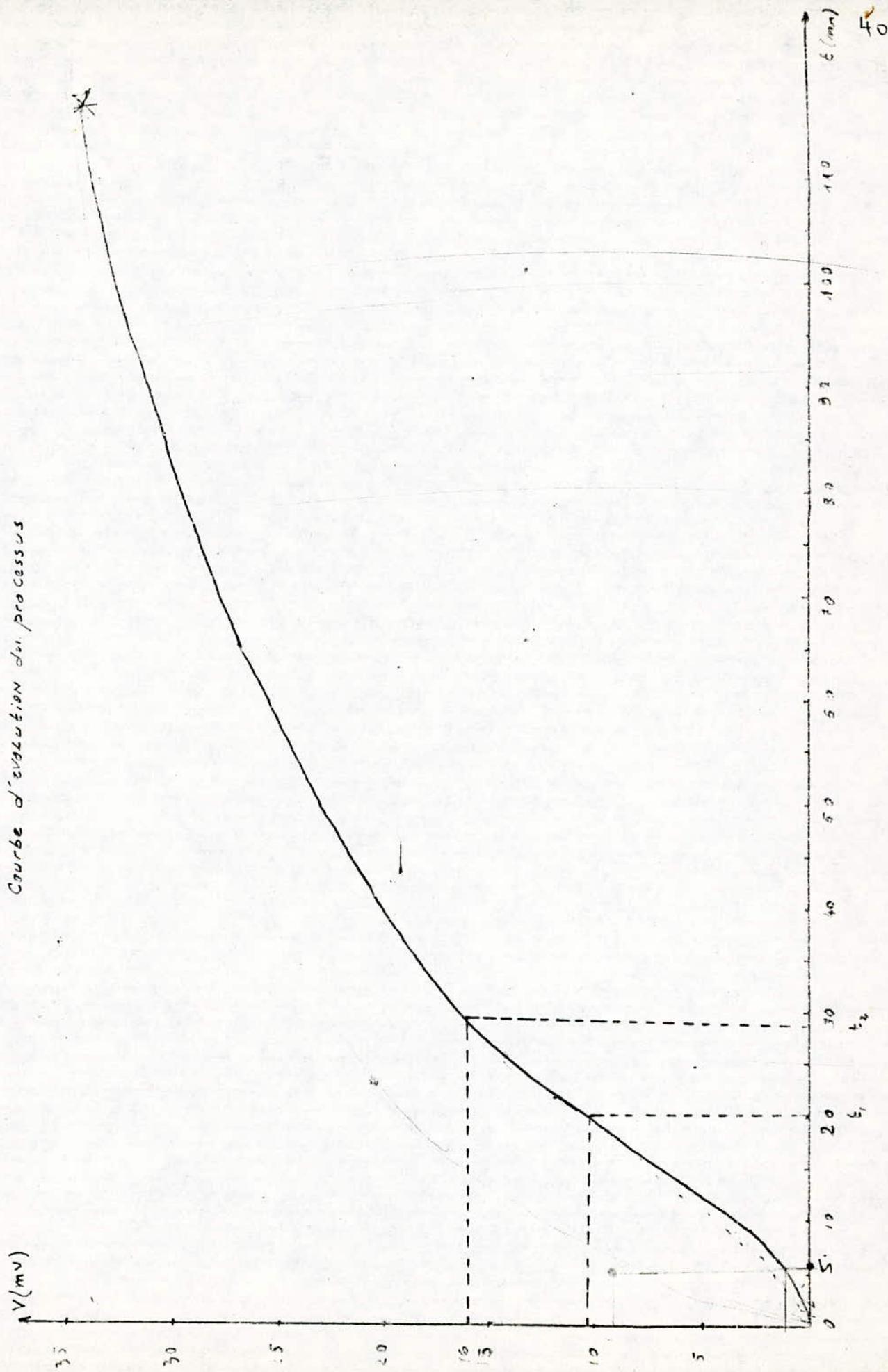
En passant dans le domaine temporel on obtient :

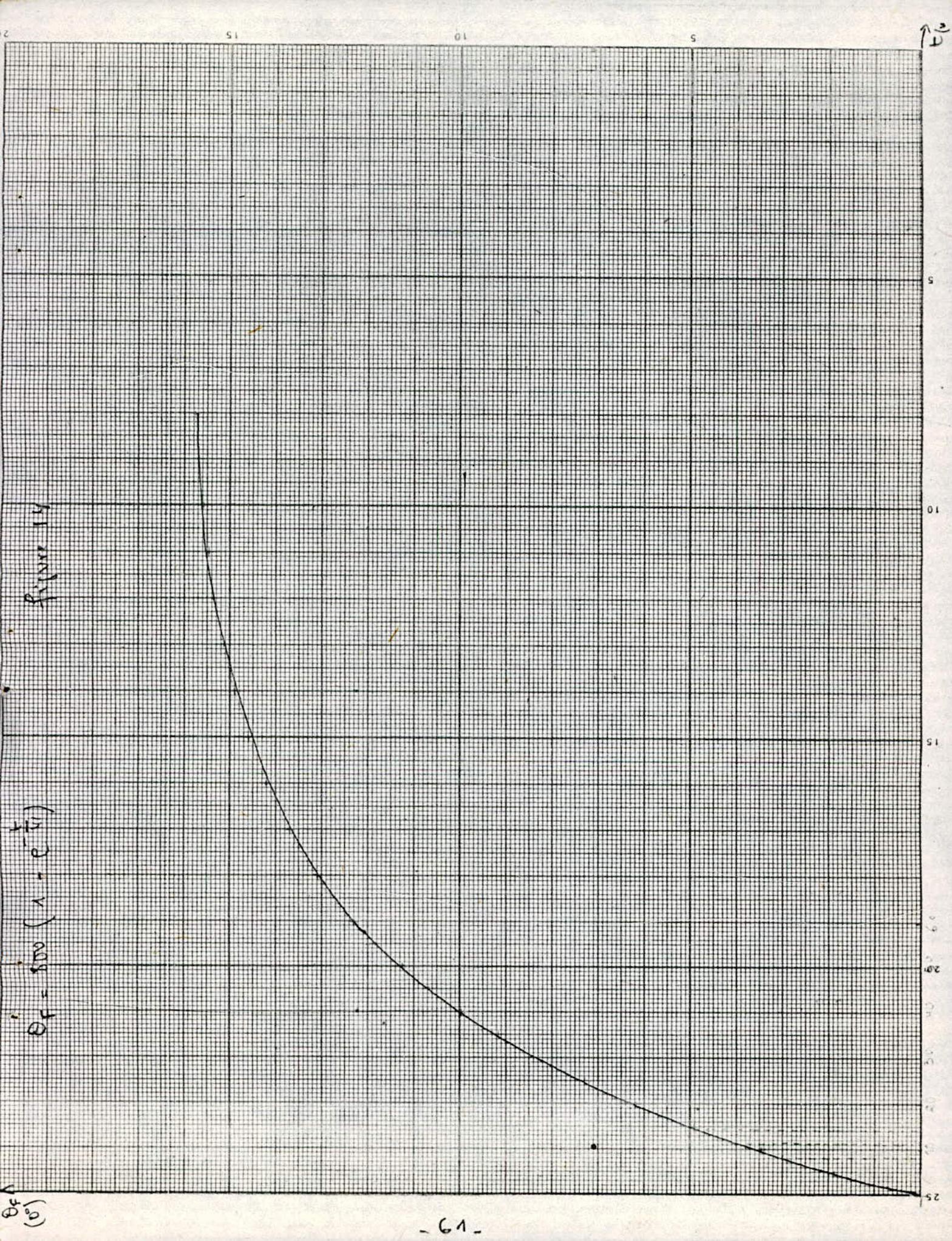
$$\theta_F = 800 \left( 1 - e^{-\frac{t}{41}} \right)$$

Le tracé de cette courbe est donné par la figure 14

fig 53

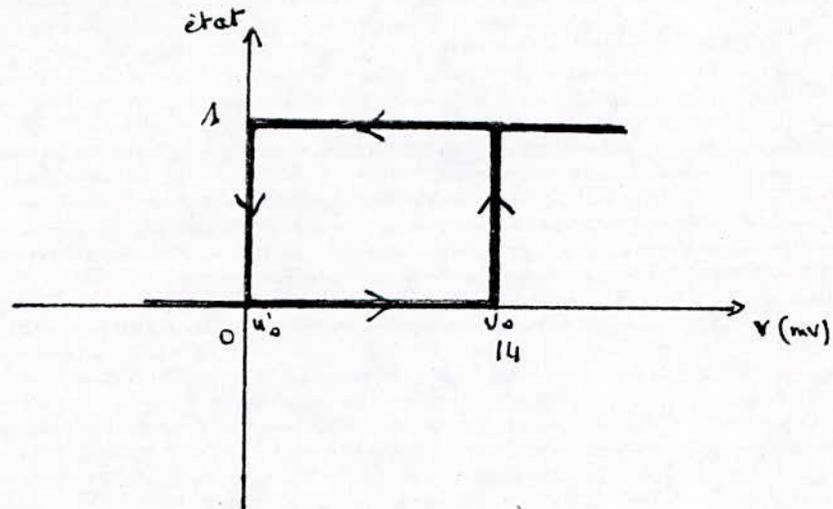
Courbe d'évolution du processus





## VI.2. Caractéristiques du relais

La caractéristique du relais utilisé est donnée par le schéma suivant :



Elle exprime la relation entre la commande (état de sortie) et le signal de commande (entrée).

Nous remarquons que quand le signal de commande atteint le seuil  $U_0=14$  mv la commande effectue un saut.

Et quand le signal de commande devient nul  $U_0=0$  la commande effectue un autre saut.

$U_0$  est appelé seuil de fonctionnement à l'aller.

$U_0'$  est appelé seuil de fonctionnement au retour.

Ces seuils sont dus aux phénomènes d'hystérésis du matériau ferromagnétique du relais; donc pour que le relais soit mis en position travail, il faut lui appliquer une tension supérieure ou égale à 14 mv, et pour le remettre en position de repos il faut lui délivrer une tension nulle.

Sur la figure on a représenté par l'état "1" la position de travail du relais et par "0" la position de repos.

### VI.3. Caractéristiques des éléments d'organe de mesure.

Les organes de mesure servent à la conversion d'une grandeur physique en une tension continue représentant normalement la valeur réelle à l'entrée d'un régulateur.

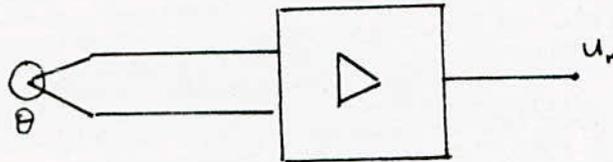
Ces organes de mesure sont en principe des convertisseurs analogiques-analogiques. A une grandeur d'entrée  $X$  ( grandeur physique ) correspond une grandeur de sortie, ou grandeur mesurée, sous forme d'une tension continue  $U_m$ .

Dans la plupart des cas, les organes de mesure se trouvent dans des circuits de réglage.

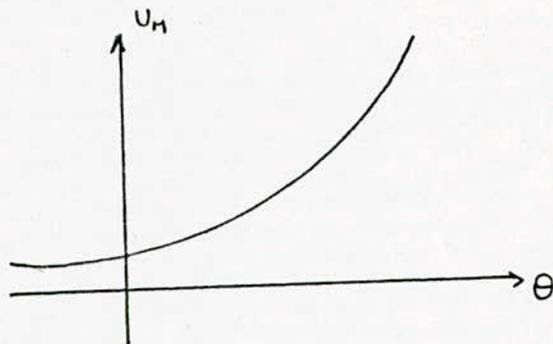
Dans notre système l'organe de mesure est un thermocouple.

Celui-ci fournit une tension continue de quelques millivolts variant en fonction non linéaire de la température  $\Theta$ . Il est nécessaire d'amplifier cette température.

Symbole :



Caractéristiques :



Un thermocouple constitué de deux conducteurs A et B formant entre eux deux jonctions aux températures  $T_1$  et  $T_2$  délivre une f.e.m  $E$  qui dépend d'une part de la nature des conducteurs A et B et d'autre part des températures  $T_1$  et  $T_2$ . En général la température de l'une des jonctions est fixe, connue et sert de référence ( $T_1 = T_{réf}$ ); celle  $T_2$  de l'autre jonction est la tempé-

rature  $T_c$  qu'elle atteint lorsque placée dans le milieu étudié de température inconnue  $T_x$ .

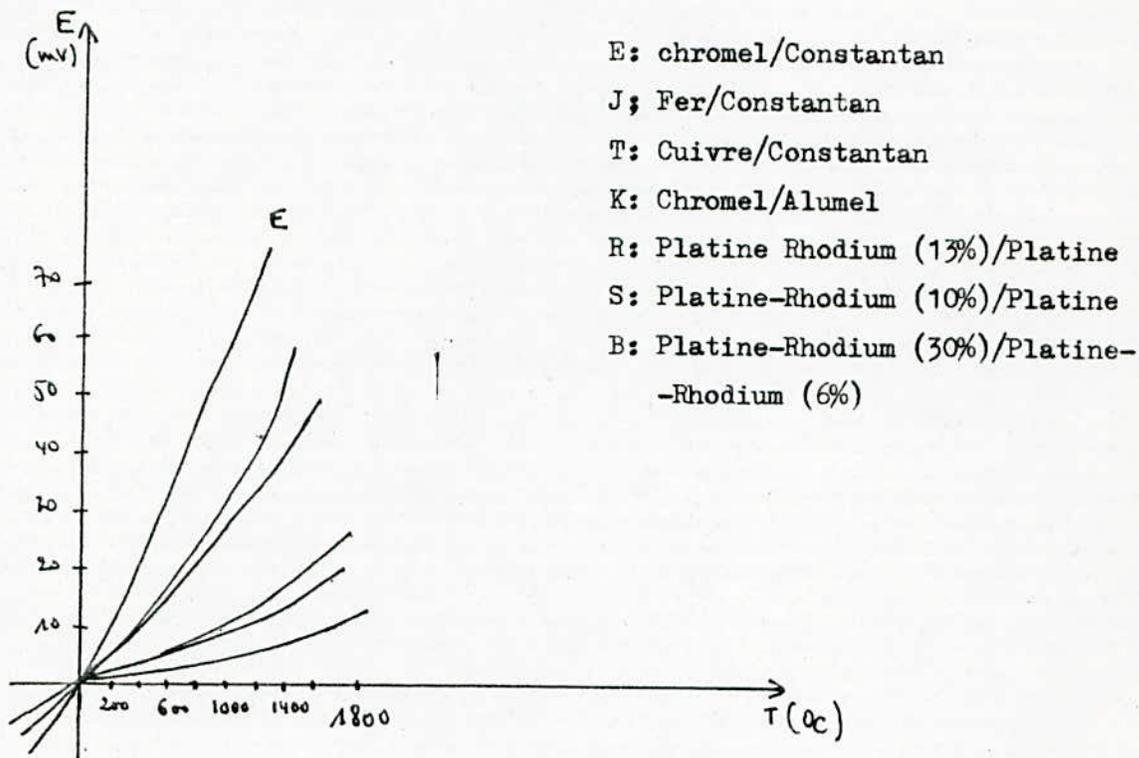
L'emploi d'un thermocouple est avantageux car :

- Il permet des mesures de températures pncuelles.
- La capacité calorifique du capteur peut être très réduite assurant une vitesse de réponse élevée.

De plus il permet de délivrer un signal, une f.e.m dont la mesure ne nécessite pas la circulation d'un courant dans le capteur.

Inconvénient: La mesure exige que la température de la jonction de référence soit parfaitement connue : toute incertitude sur  $T_{réf}$  entraîne une incertitude sur  $T_c$ .

La f.e.m du thermocouple est, sur de grands intervalles de température fonction non linéaire de  $T_c$ .



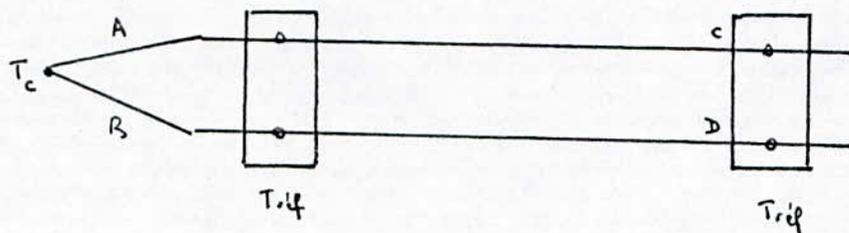
La non linéarité de la relation entre la f.e.m du thermocouple et la température est mise en évidence par la forme polynomiale de l'équation qui les lie.

Pour chaque type de thermocouple, une Norme définit : d'une part, une Table de valeurs de la f.e.m E en fonction de la température T.

d'autre part, une expression polynomiale qui traduit algébriquement et en conformité avec la table la relation entre E et T.

### VI.3.1. Câbles de compensation

Pour relier le thermocouple à l'appareil de mesure situé à une distance on le prolonge par deux câbles de compensation choisis afin que le couple qu'il forme ait des caractéristiques thermoélectriques très voisines de celles des caractéristiques des métaux constituant le thermocouple. Ceci a pour effet de reporter la jonction de référence à l'extrémité du câble de compensation où elle sera plus aisée de la maintenir à une température stable et connue de façon qu'elle ne soit pas influencée par la partie chaude.



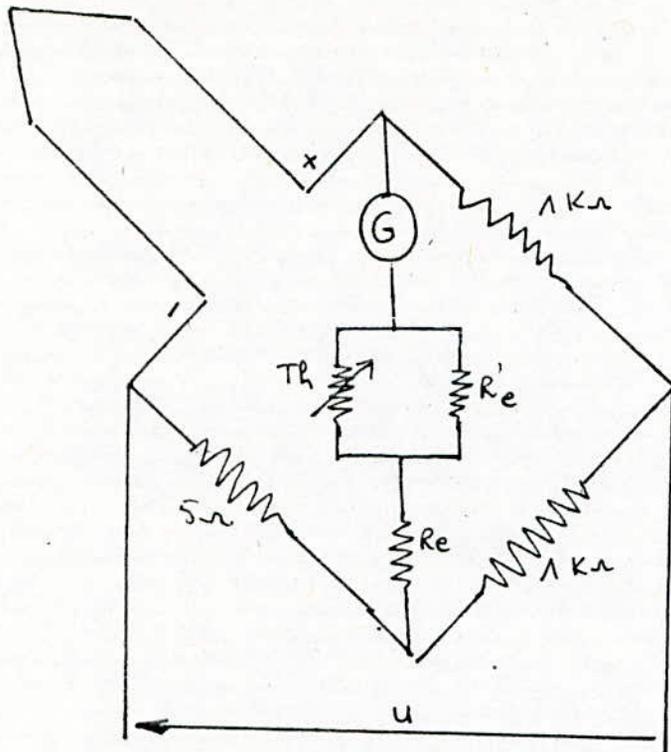
Câbles de compensation

Il y a une compensation lorsque la f.e.m développée par le couple A-B pour une température donnée est égale à celle délivrée par le couple C-D.

### VI.3.2. Circuit de correction de la soudure froide.

La f.e.m du thermocouple dépend à la fois de la température  $T_c$  de la jonction placée au point de mesure, et de la température  $T_{ref}$  de la soudure froide avec les fils de compensation.

Donc pour avoir aux bornes de l'appareil de mesure la f.e.m qui est seulement en fonction de la température à mesurer, on utilise des circuits dits " circuits de compensation de soudure froide ". (voir figure a )



(Figure a)

C'est un pont de WEASTONE , où :

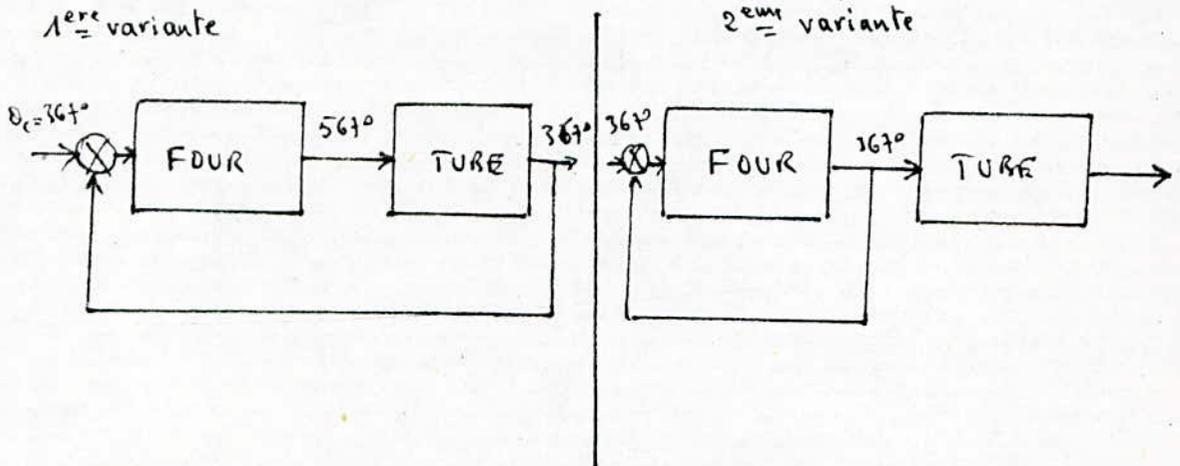
- Le galvanomètre est placé dans la diagonale en serie avec une résistance thermométrique  $T_h$  qui est fonction linéaire de la température.
- Les trois branches sont formées par des résistances fixées, qui ne dépendent pas de la température.
- La quatrième branche étant constituée par le circuit du thermocouple.
- Les valeurs numériques de ces résistances sont choisies de façon que le pont soit équilibré et aucun courant ne traverse le galvanomètre à la température  $0^\circ\text{C}$ .

Ce circuit a les avantages suivants:

- Si le circuit du couple s'ouvre, le pont est déséquilibré, un courant traverse le galvanomètre le faisant dévier au maximum et provoquant donc l'arrêt du four.
- Il permet une correction automatique de la soudure froide pour des variations de la température ambiante.

#### VI.4. Choix du placement de la réaction négative

A partir des courbes que nous avons obtenues expérimentalement (voir graphes L, M, N, O) représentant la variation de la température en fonction du temps du four et du tube; en utilisant les deux variantes représentées par les schémas suivants :



Nous avons pour la 1<sup>ère</sup> variante :  $t_f = 17\text{mn}$  et  $t_t = 20\text{mn}$

$t_f$  : temps de chauffage du four  
pour obtenir la température  
de  $367^\circ\text{C}$ .

$t_t$  : temps de chauffage du tube

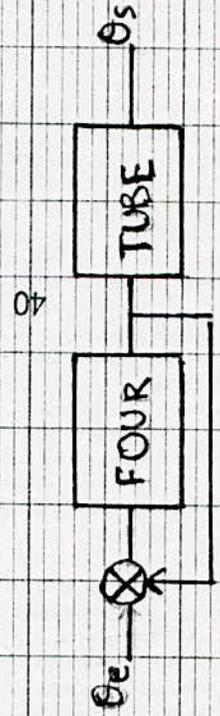
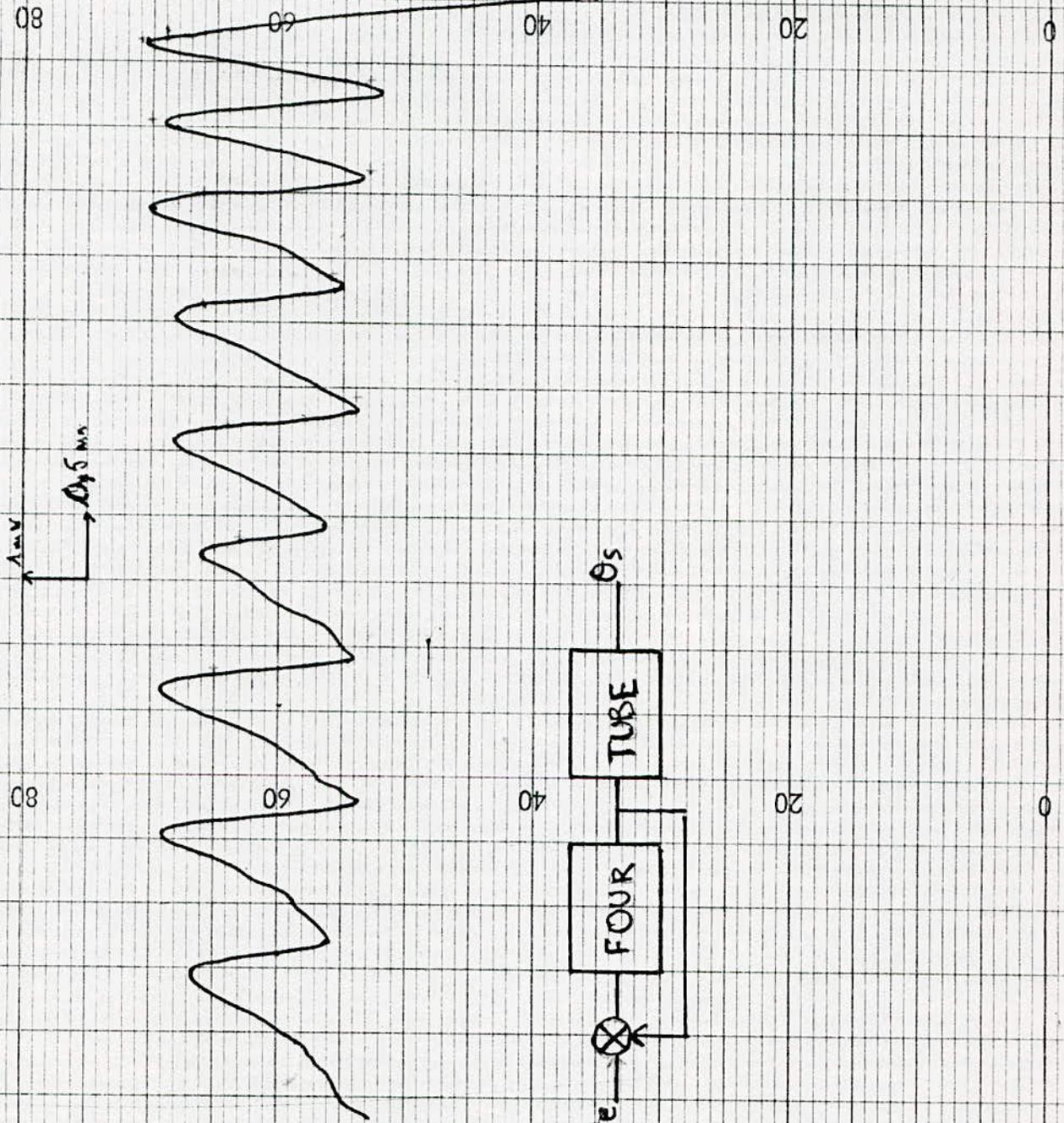
pour la 2<sup>ème</sup> variante :  $t_f = 9\text{mn}$  et  $t_t = 18\text{mn}$

Nous constatons que :

- Pour le four le temps de chauffage est presque le double dans la 1<sup>ère</sup> variante et cela pour une même température de consigne.
- Une dépense d'énergie beaucoup plus grande dans la 1<sup>ère</sup> variante.
- Le temps de chauffage du tube est le même dans les deux variantes cela peut s'expliquer à cause de l'espace (air + silice fondue du tube) qui existe entre le four et le tube.

Grâce à ces constatations nous pouvons conclure que le système à commande automatique pour le four il faut utiliser la réaction négative après le four (et non après le tube). C'est ainsi que dans les installations industrielles on utilise la réaction négative après le four.

Courbe de la Température du four en fonction du Temps

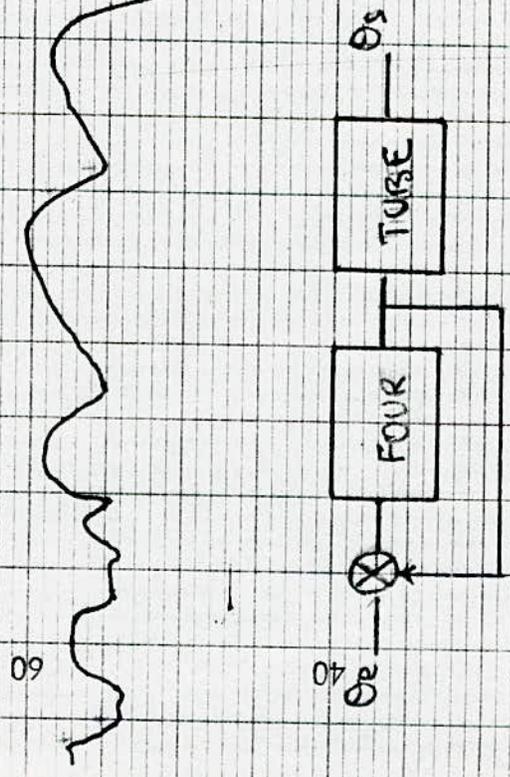
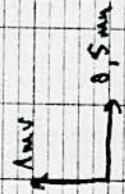


938 50 100

24m-c-18,6 2719-38

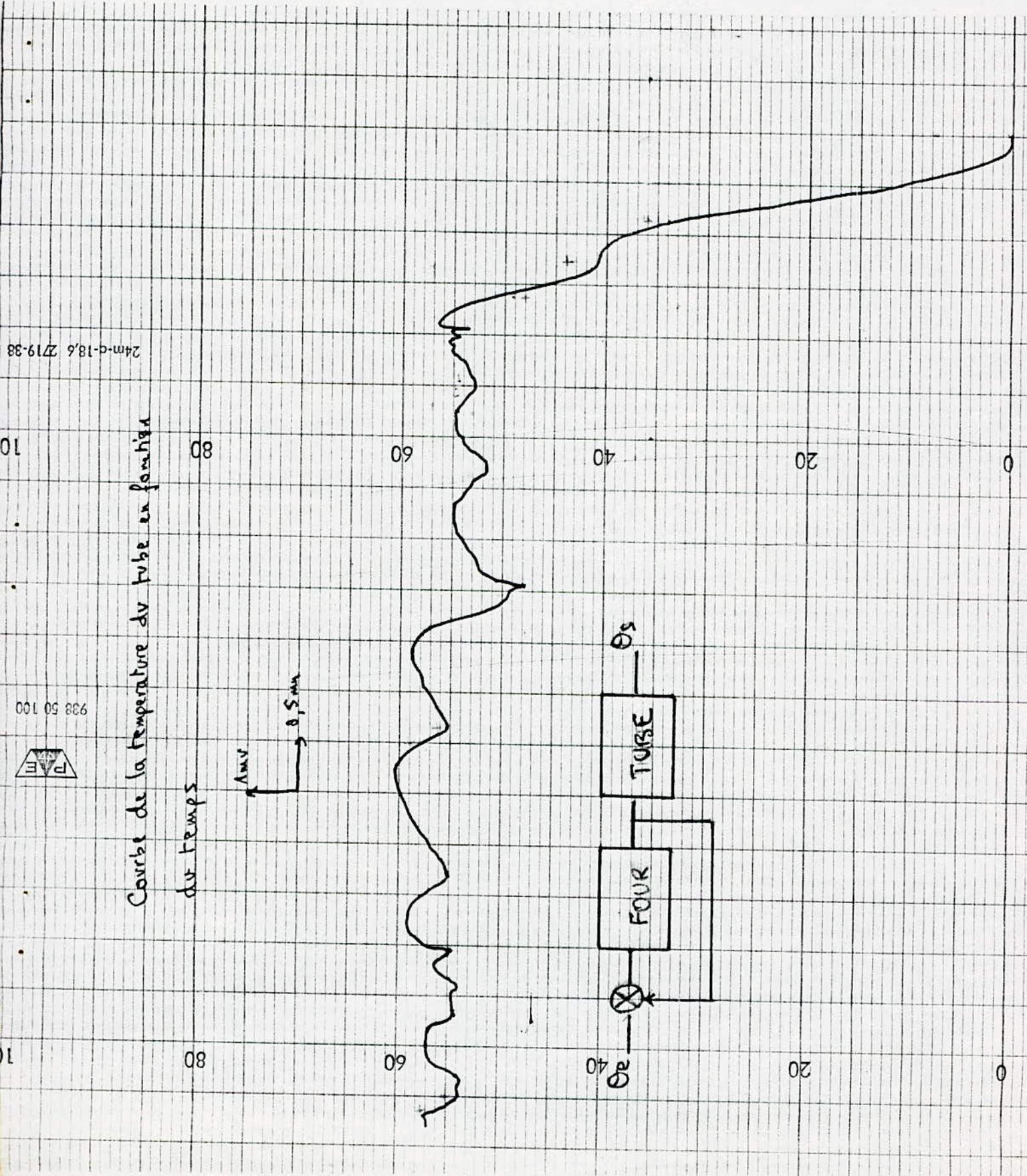
Courbe de la température du tube en fonction

du temps

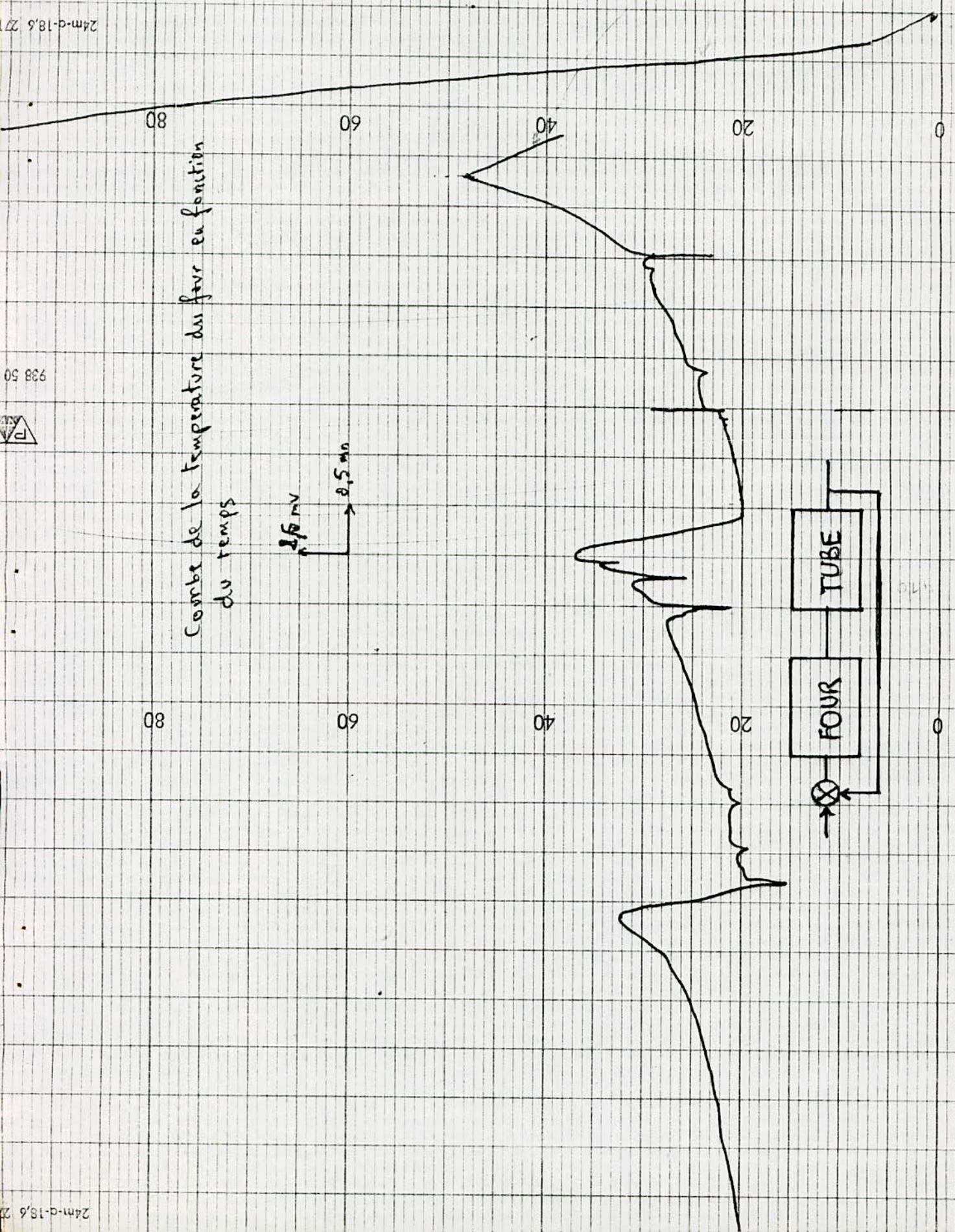
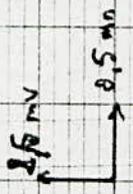


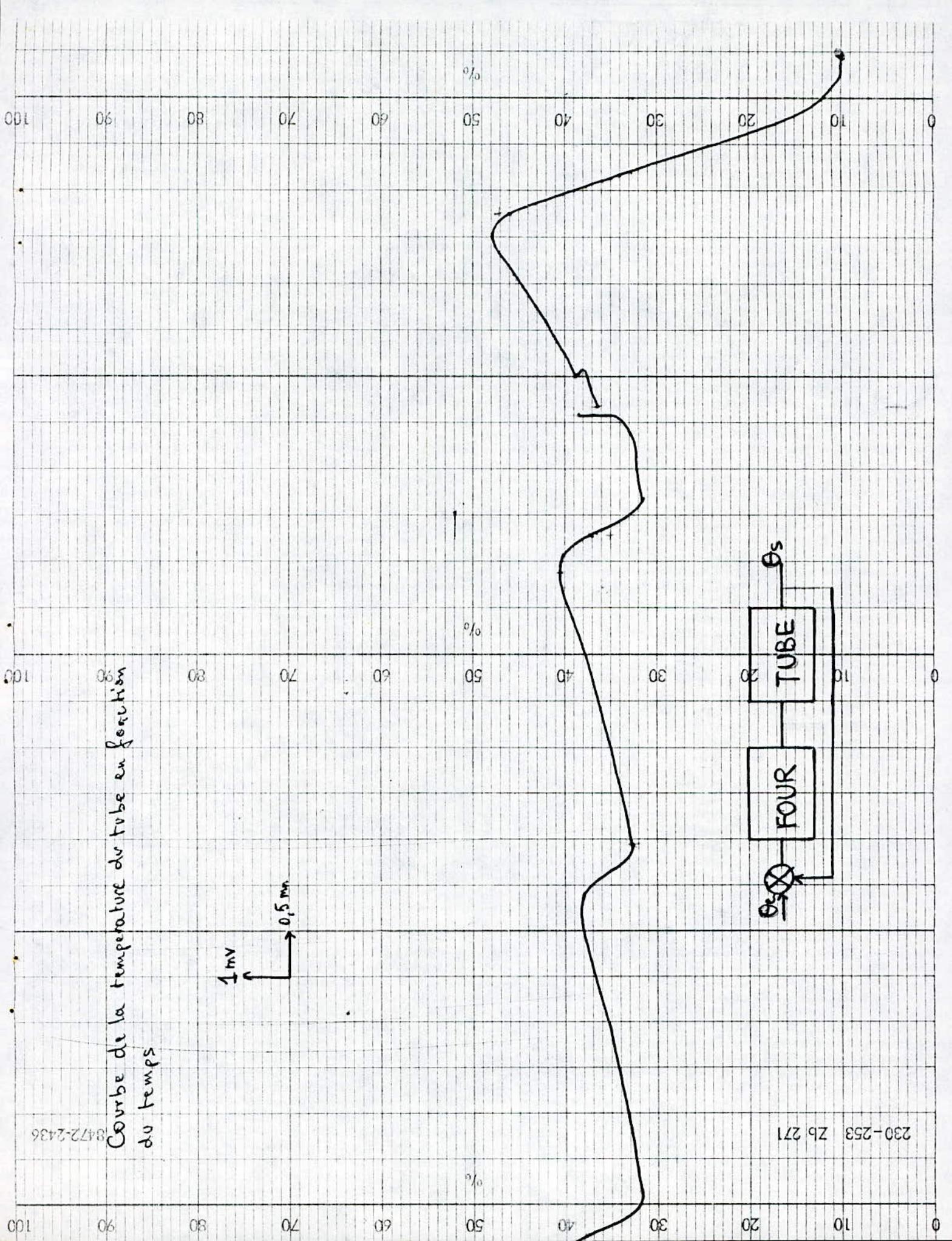
938 50 100

24m-d-18,6 Z719-38



Combe de la temperature du four en fonction du temps





Courbe de la température du tube en fonction du temps

1 mV  
0,5 mn

8472-2436

230-253 Zb 271

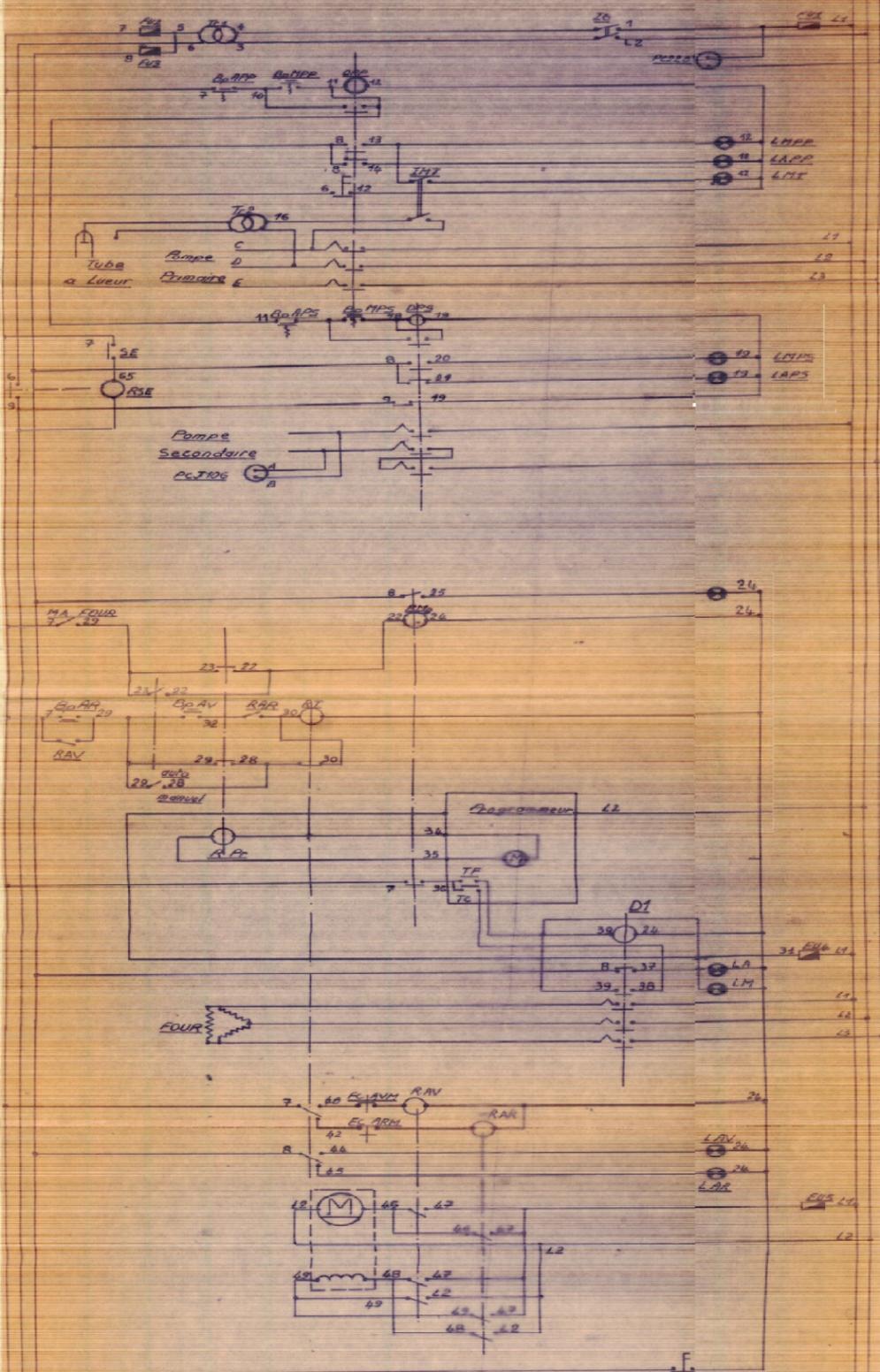
## VII. CONCLUSION

Les résultats obtenus au cours de notre étude sont les suivants :

- Obtention du modèle mathématique du processus intérieur du four. Le four est présenté comme un élément apériodique.
- Explication mathématique qui permet d'obtenir la structure de la commande automatique.
- La partie théorique et la partie expérimentale sont en corrélation.
- Réparation et mise en marche du four.
- Possibilité de diminuer l'écart entre la valeur de commande et la valeur de sortie.

## BIBLIOGRAPHIE

- V. PASCHKIS " Les fours électriques industriels" tome 1 et tome 2
- P.NASLIN " Les régimes variables dans les systèmes linéaires et non linéaires"  
Editions DUNOD.
- Thèse janvier 86 : "analyse d'un régulateur-programmateur électronique d'un  
four OPALINE " ( A. BENABDELKRIM ET H. ALLOUACHE ) ENPA.
- "Technique de régulation industrielle" par Daniel DINDELEUX Editions EYROLLES.
- Notice sur le présentation du four OPALINE. Editions LPA



### SCHEMA ELECTRIQUE DU FOUR LPA "OPALINE"

- |         |   |
|---------|---|
| F41     | Fusible 2A  |
| F42     | Fusible 10A                                       |
| F43     | Fusible 2A  |
| F44     | Fusible 2A  |
| F45     | Fusible 0,5A                                      |
| IG      | Interrupteur general a chef                       |
| Tc1     | Transfo 220/220V                                  |
| Bp APP  | Bouton poussoir arrêt pompe primaire              |
| DPP     | Bouton poussoir marche pompe primaire             |
| DSP     | Bouton poussoir marche pompe secondaire           |
| LAPP    | Voyant lumineux marche pompe primaire (sur Bp)    |
| LAPP    | Voyant lumineux arrêt pompe primaire (sur Bp)     |
| LMI     | Interrupteur marche tube à feu                    |
| LMI     | Voyant lumineux marche tube à feu                 |
| TS1     | Thermoprotecteur                                  |
| AP APS  | Appareil 220V 1500V                               |
| AP MPS  | Bouton poussoir marche pompe secondaire           |
| DPS     | Bouton poussoir arrêt pompe secondaire            |
| LAPS    | Disjoncteur pompe secondaire                      |
| LAPS    | Voyant lumineux marche pompe secondaire (sur Bp)  |
| LAPS    | Voyant lumineux arrêt pompe secondaire (sur Bp)   |
| MA FOUR | Marche Arrêt Four                                 |
| AMS     | Relais marche generale                            |
| Bo AR   | Bouton poussoir translation arriere               |
| Bo AV   | Bouton poussoir translation avant                 |
| RT      | Relais translation                                |
| Fin     | Fin de course                                     |
| Fin AV  | Fin de course AV moteur                           |
| Fin AR  | Fin de course AR moteur                           |
| LAV     | Voyant lumineux translation avant four (sur Bp)   |
| LAR     | Voyant lumineux translation arriere four (sur Bp) |
| SE      | Securité eau                                      |
| SE      | Relais securité eau                               |
| DI      | Disjoncteur four                                  |