

26/85



وزارة التعليم والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : Electronique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE ET REALISATION
D'UN THERMOMETRE DIGITAL POUR LA
REGULATION DE TEMPERATURE D'UN
BAIN CHIMIQUE

Proposé par :

Mr HAJEK

Etudié par :

M. FERDJALLAH

D. ARAMI

Dirigé par :

Mr HAJEK

PROMOTION : JUIN 85

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : Electronique

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

ETUDE ET REALISATION
D'UN THERMOMETRE DIGITAL POUR LA
REGULATION DE TEMPERATURE D'UN
BAIN CHIMIQUE

Proposé par :
Mr HAJEK

Etudié par :
M. FERDJALLAH
D. ARAMI

Dirigé par :
Mr HAJEK

PROMOTION : JUIN 85

///) E D I C A C E S

Je dédie ce modeste travail à :

- ma mère
- mon père
- ma famille
- mes frères
- mes soeurs
- mes amis

FERDJALLAH Mohammed

A mes soeurs,

- Fatiha
- Soraya

ARAMI Djahida

TABLE DE MATIERES

	Page
Introduction	1
1) Thermomètre digital	
-Déscription et principe	2
-Schéma synoptique	3
2) Capteur	
2-1) Influence de la température sur la jonction PN	4
2-2) Thermistance : Définition	6
2-3) Thermistance à CTN	
2-3-1) Constitution	7
2-3-2) Propriétés des thermistances à CTN	8
2-3-3) Caractéristique courant-tension d'une CTN	11
2-4) Thermistance à CTP	
2-4-1) Constitution	13
2-4-2) Caractéristique R(0)	13
2-4-3) Caractéristique courant-tension	15
2-5) Autres propositions	16
3) La sonde	
-Principe de fonctionnement	17
-Schéma de la sonde	18
4) Convertisseurs analogique-numérique	
4-1) Définition des CAN	20
4-2) Types de convertisseurs A/N	22
4-3) Convertisseurs A/N à simple rampe	
4-3-1) Schéma synoptique	23
4-3-2) Principe de fonctionnement	23
4-4) Convertisseurs A/N différentiel à simple rampe à auto-zéro	
4-4-1) Schéma synoptique	26
4-4-2) Principe de fonctionnement	26
5) Afficheurs	
5-1) Généralités	34
5-2) Les diodes électro-luminescentes	34
5-3) Les afficheurs à LED	36
6) Réalisation pratique	
6-1) Schéma électrique complet de thermomètre digital	42
6-2) Explication	42
6-3) Essais et résultats	44
7) Application du thermomètre dans une boucle de régulation	
7-1) Schéma synoptique	46
7-2) Principe de régulation de température	46
7-3) Le circuit de commande de température	47
7-4) La partie régulation	47
Conclusion	51
Bibliographie	52

REMERCIEMENTS .

Nous remercions exceptionnellement notre promoteur Monsieur HAJEK de nous avoir aidé à étudier et à réaliser ce projet .

Nous tenons aussi à remercier Messieurs FOUGHALI ATTI Touhami et AMMARI Merzoug et tous ceux qui ont aidé de loin ou de près à la réalisation de ce projet .

INTRODUCTION

Les thermomètres sont de genres très variés : les plus simples et les plus usuels utilisent la dilatation d'un solide ou d'un liquide . L'emploi de ces thermomètres est très commode et très sûr si on se contente de la précision de $0,5^{\circ}\text{C}^{\circ}$. Mais si on veut atteindre et surtout dépasser celle de $0,10^{\circ}\text{C}^{\circ}$, on se heurte à de grosses difficultés dues au manque de fidélité de l'appareil .

Cependant la réalisation d'un système asservi , la régulation de la température d'un bain chimique par exemple à l'aide des thermomètres usuels reste très complexe .

C'est pourquoi , nous proposons l'utilisation d'un thermomètre digital (numérique) .

LE THERMOMETRE DIGITAL

Déscription et Principe :

Le principe du thermomètre digital differt totalement du principe des thermomètres usuels , il utilise un élément purement électronique : capteur de température . Le capteur prélève la température du milieu ~~que~~ la sonde transforme en un signal électrique . Le signal électrique sera transformé , converti et décodé par le circuit intégré principal , pour être enfin affiché .

Le thermomètre digital est composé comme l'indique le schéma synoptique de la figure : 01 , de :

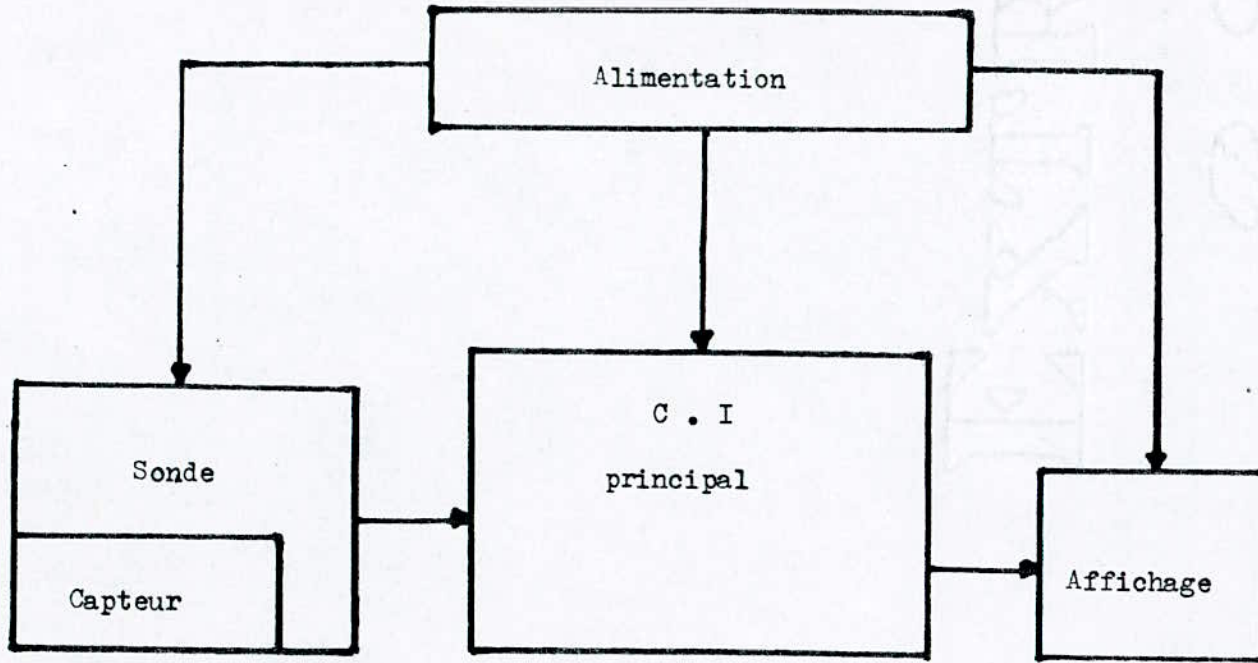
- un capteur : le capteur choisi étant une thermistance à CPTN ;
- une sonde ;
- un circuit intégré principal ;
- trois afficheurs , dont un indique le signe ;

L'alimentation des différentes parties du thermomètre est assurée par une pile de 9 Volts .

La gamme de mesure de l'appareil est prévue entre ($-39^{\circ}\text{C}^{\circ}$ et $+39^{\circ}\text{C}^{\circ}$) avec une précision de $01^{\circ}\text{C}^{\circ}$.

fig : 01

Schéma synoptique du thermomètre



LES CAPTEURS

Un capteur est un composant électronique qui permet de mesurer la température. Seulement, actuellement, on ne dispose pas de capteur de température bon marché et linéaire, ni même de circuit intégré spécialement conçu pour ce travail.

Le capteur que nous étudions, et que nous utilisons est une thermistance à CTN.

2-1) Rappels : Influence de la température sur une jonction PN :

Rappelons qu'une jonction PN est la mise en contact de deux semi-conducteurs de types différents (p ou n). Le courant des minoritaires appelé courant inverse; et le courant des majoritaires appelé courant direct sont fonctions de la température.

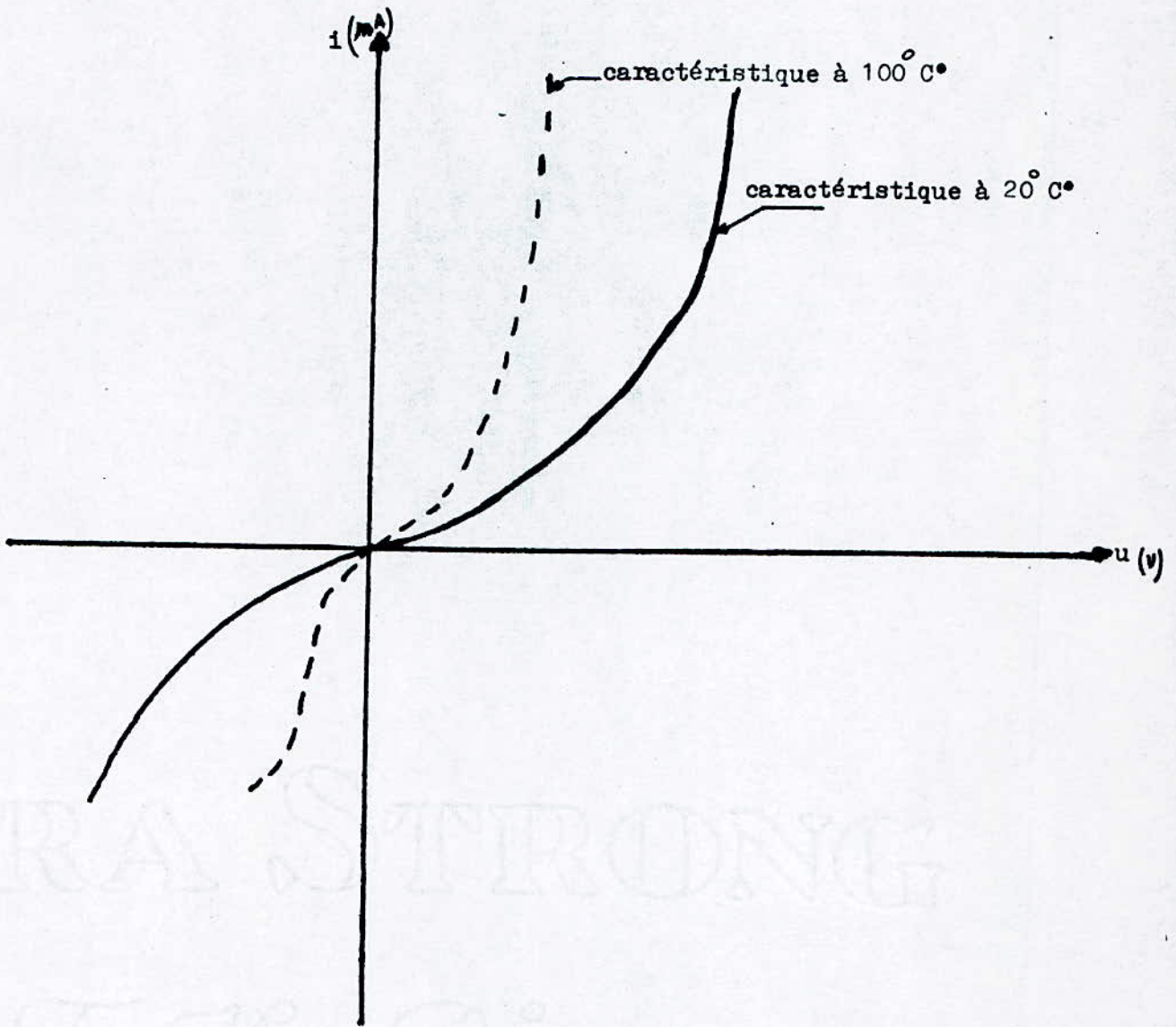
2-1-1) Influence de la température sur le courant inverse :

Ce courant dû aux porteurs minoritaires croît rapidement avec la température. Il est négligeable à $25^{\circ}\text{C}^{\circ}$ mais ne l'est pas à $100^{\circ}\text{C}^{\circ}$.

2-1-2) Influence de la température sur le courant direct :

Quand la température s'élève le nombre de porteurs majoritaires croît également et pour une même chute de tension qu'à $20^{\circ}\text{C}^{\circ}$, le courant direct sera plus grand à $100^{\circ}\text{C}^{\circ}$ qu'à $20^{\circ}\text{C}^{\circ}$. La résistance au contraire diminue quand la température augmente. (fig : 02)

C'est cette propriété vis à vis de la température qui a permis l'apparition d'un genre très particulier de jonction PN : les thermistances



(fig : 01)

2-2) Thermistance :

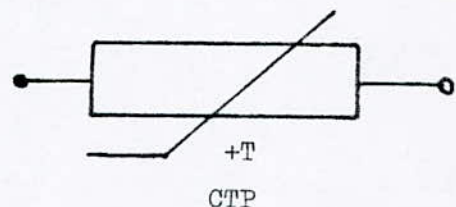
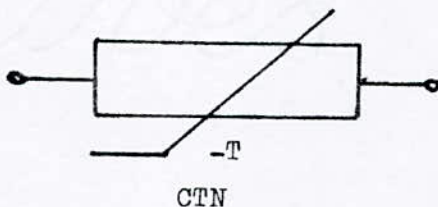
2-2-1) Définition :

Une thermistance est un complexe de semi-conducteurs caractérisé par un coefficient de température de valeur absolue relativement grand . En réalité tous les corps présentent une résistivité qui varie avec la température , mais pour quelques uns seulement cette variation est particulièrement grande .

Les thermistances sont dites alors des résistors thermosensibles . On distingue deux catégories de thermistances :

- a) Les thermistances à coefficient de température positif appelées des thermistances à CTP , ou tout simplement CTP .
- b) Les thermistances à coefficient de température négatif appelées thermistances à CTN , ou tout simplement CTN .

Elles sont représentées par un symbole comportant l'indication de la grandeur température (T ou θ) qui provoque la variation de la résistance . Cette indication est précédée du signe moins pour les thermistances à CTN et du signe plus pour les thermistances à CTP .



2-3) Thermistances à CTN :

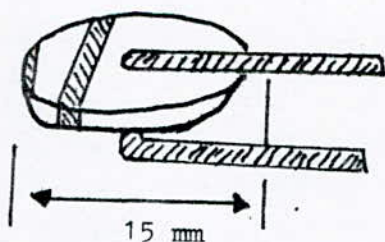
2-3-1) Constitution :

Les thermistances à CTN sont fabriquées à l'aide des semi-conducteurs qui sont des oxydes métalliques (magnésium , manganèse , fer , cobalt , nikel , etc . . .) dont la résistivité est comprise entre $1\Omega\text{m}$ et $100\Omega\text{m}$.

Ces oxydes sont réduits en poussière et mélangés dans des proportions déterminées , en suite comprimés , puis chauffés à une température inférieure à leur température de fusion (fritage) .

Les connections sont fixées sur les éléments et l'ensemble est recouvert d'un vernis ou d'un email . La propriété fondamentale de ces oxydes : c'est que , quand la température augmente le nombre de porteurs libres croit ainsi que la conductivité du corps , ce qui explique que les thermistances à CTN ont un coefficient de température négatif .

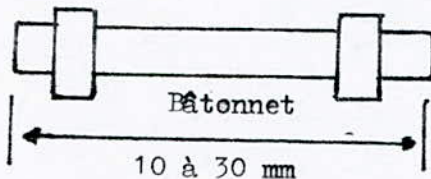
Les thermistances à CTN peuvent se présenter sous forme de disque , d'anneau de bâtonnet ou de perle . (fig : 03)



Disque



Thermistance miniature



(fig : 03)

2-3-2) Propriétés des thermistances à CTN :

2-3-2-1) Résistivité : Caractéristique $\rho(T)$:

La loi de variation de la résistivité du matériau en fonction de la température peut être représentée par la relation exponentielle suivante :

$$\rho(T) = b e^{\frac{k}{T}}$$

-k et b sont deux constantes positives dépendant du matériau utilisé .

-T est la température absolue en (kelvins) .

- ρ est en $\Omega \cdot m$: la résistivité à la température T .

2-3-2-2) Courbes de $\rho(T)$:

Pour des valeurs de T on trace la courbe $\rho(T)$, on obtient la courbe de la figure : 04 .

Cette courbe montre que la résistivité varie beaucoup à l'intérieur d'un domaine de température pourtant assez restreint : $(-20^{\circ}C^{\circ} , 140^{\circ}C^{\circ})$. A partir de $40^{\circ}C^{\circ}$ la représentation n'a pas de signification ; pour cette raison il est préférable d'employer une échelle logarithmique pour les valeurs de ρ . Elle devient :

$$\ln \rho = \ln b + \frac{k}{T}$$

C'est une fonction homographique de T .

Avec une température exprimée en degrés celsius ($\theta = T - 273$), on obtient la courbe de la figure : 05 .

2-3-2-3) Autre expression de ρ (T) :

Les fabricants de thermistances fournissent souvent la valeur de la résistivité ρ_{25} (ou celle de la résistance pour un composant déterminé) à la température de 25°C soit 298k ; il est donc pratique d'exprimer ρ en fonction de ρ_{25}

$$\rho = b e^{k/T} \Rightarrow \rho_{25} = b e^{\frac{k}{298}}$$

$$\Rightarrow \frac{\rho}{\rho_{25}} = \frac{e^{k/T}}{e^{\frac{k}{298}}}$$

$$\Rightarrow \boxed{\rho = \rho_{25} \cdot e^{k\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)}}$$

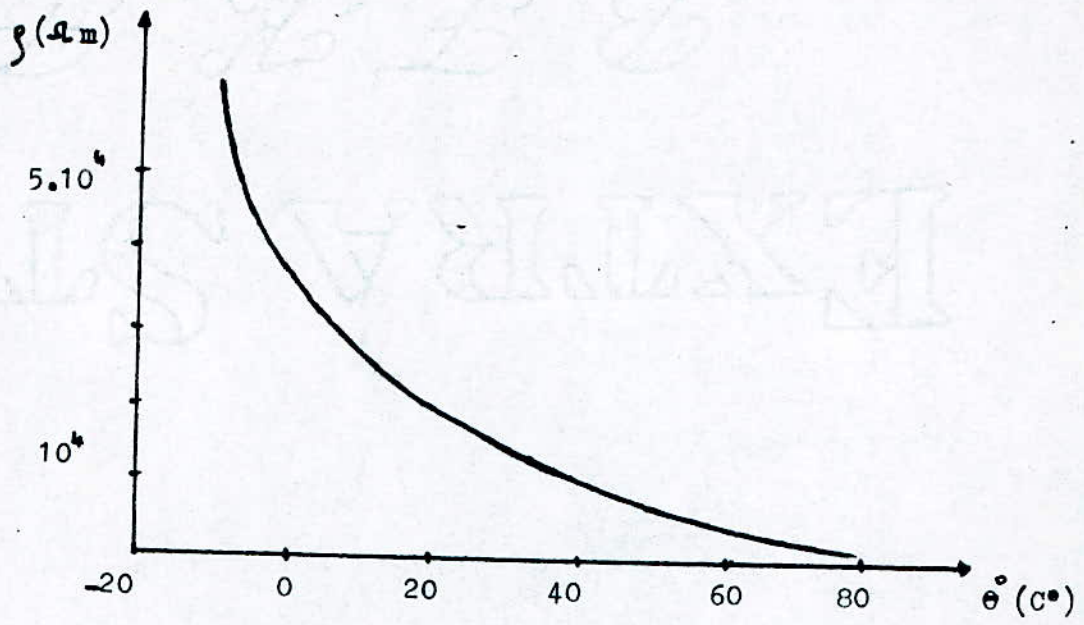
2-3-2-4) Coefficient de température :

C'est le quotient α de la variation relative de la résistivité par la variation de la température correspondante :

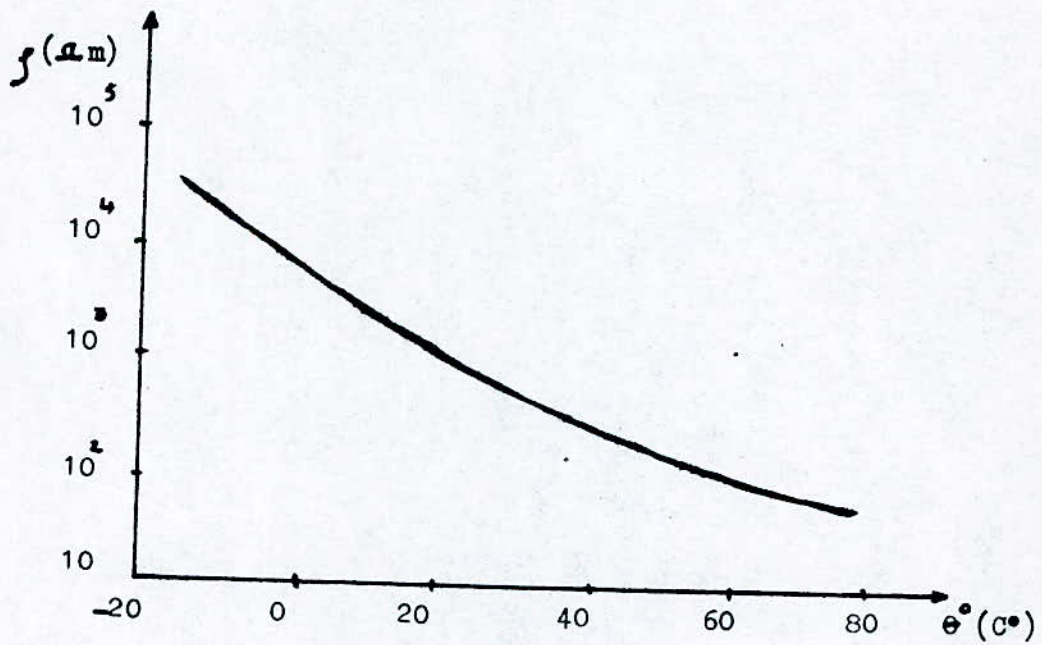
$$\boxed{\alpha = \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta T}{T}}}$$

l'expression qui s'écrit encore :

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$



(fig : 04)



(fig : 05)

2-3-3) Caractéristique courant - tension d'une CTN :

2-3-3-1) Montage :

La thermistance à CTN est placée en série avec une résistance de protection R et l'ensemble est alimenté par une source qui fournit une tension réglable . (figure : 06)

2-3-3-2) Courbe :

Pour de valeur de tension , on prélève la valeur de courant I , pour tracer la courbe de : $I(U)$. (figure : 07)

2-3-3-3) Interprétation physique de la courbe :

*§ de 0 à A : le courant est faible et l'échauffement dû à l'effet Joule est négligeable , la thermistance se comporte comme une résistance linéaire et la loi d'ohm est applicable : la courbe est pratiquement une droite .

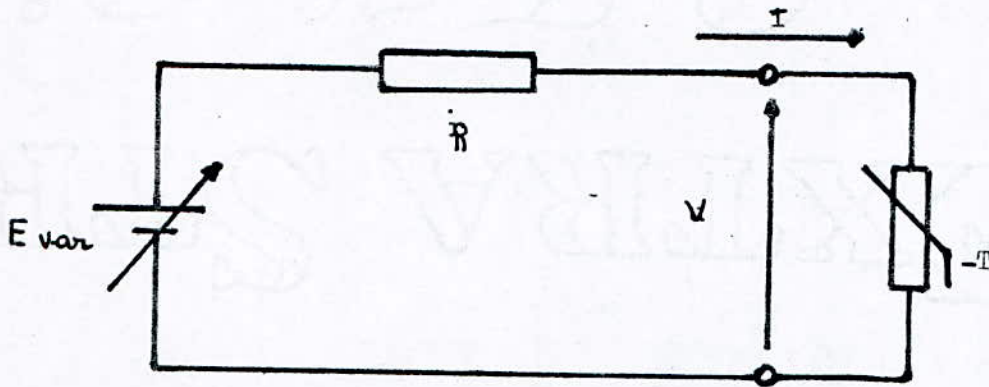
*§ au delà de S : le courant est important et il est de même de l'effet de Joule , la tension diminue bien que le courant augmente . Le passage d'une partie de la courbe à l'autre (point S) est appelé basculement .

2-3-3-4) Résistance :

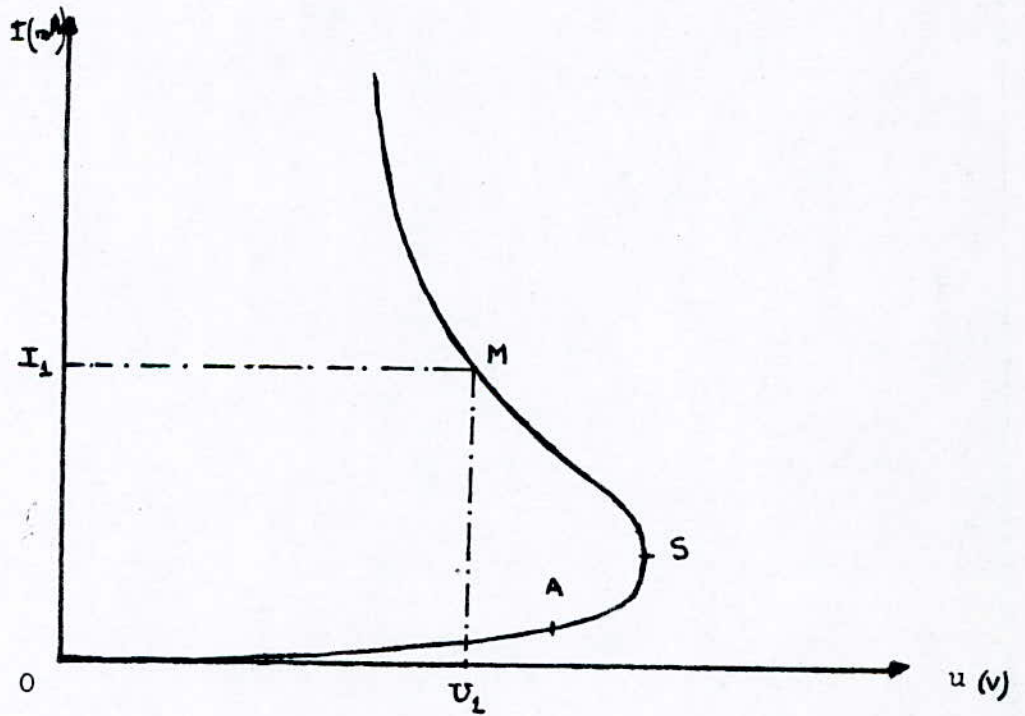
Comme pour tout composant , en chaque point M de la courbe , il est possible de définir une résistance statique R_s et une résistance dynamique R_d .

Au point M on aura :

$$R_s = U/I \quad ; \quad R_d = \Delta u / \Delta i$$



(fig : 06)



(fig : 07)

2-4) Thermistance à CTP :

2-4-1) Constitution :

Ces thermistances sont fabriquées à partir de titanate de baryum additionné de divers sels et oxydes métalliques . Le coefficient de température peut atteindre : $a = 0,6 \text{ k}$

2-4-2) Caractéristique : $R(\theta)$:

2-4-2-1) Montage :

La thermistance à CTP est placée en série avec une résistance de protection R et l'ensemble est alimenté par une source qui fournit une tension réglable . (figure : 08)

2-4-2-2) Courbe :

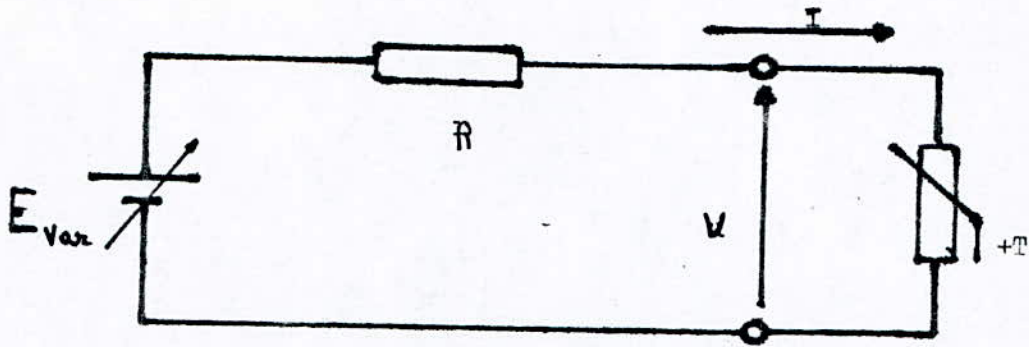
On la trace généralement en coordonnées semi-logarithmique . (figure : 09)

2-4-2-3) Interprétation de la courbe de $R(\theta)$:

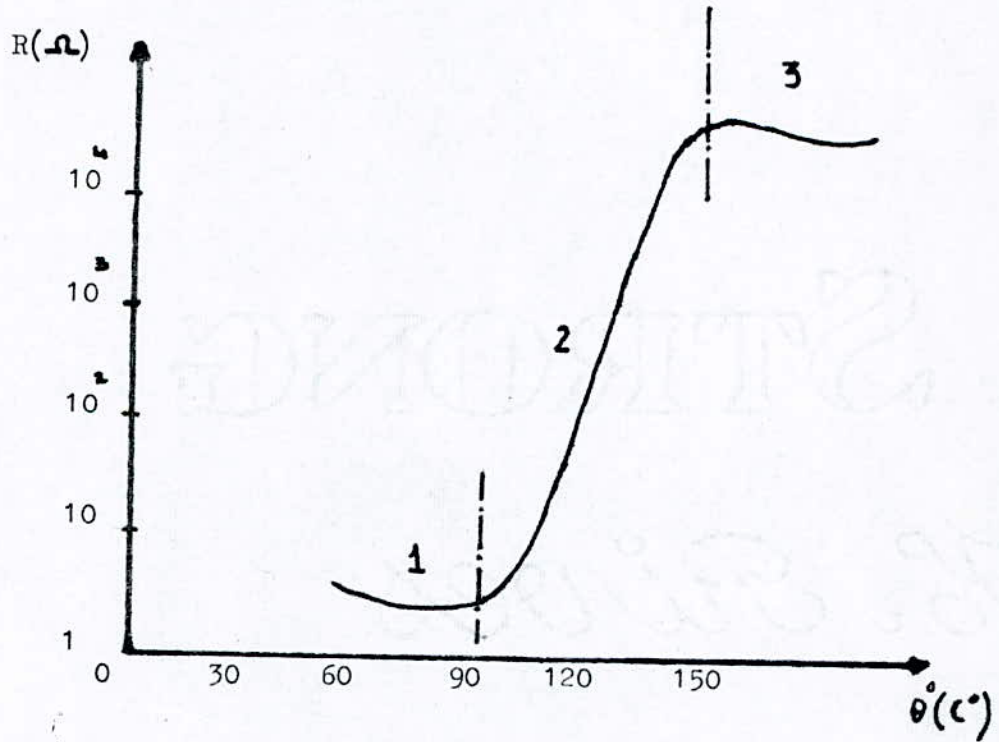
On peut distinguer trois zones :

- Zone 1 : le coefficient de température est négatif et sa valeur absolue est très faible .
- Zone 2 : le coefficient de température est positif et sa valeur est extrêmement très grande .
- Zone 3 : le coefficient de température est à nouveau négatif .

La caractéristique de la thermistance à CTP est intéressante dans la zone 2 ; la résistance varie alors très rapidement dans un intervalle de température très étroit . La résistance dynamique est positive entre 0 et S , et négative au delà de S . Elle est nulle au point de basculement .



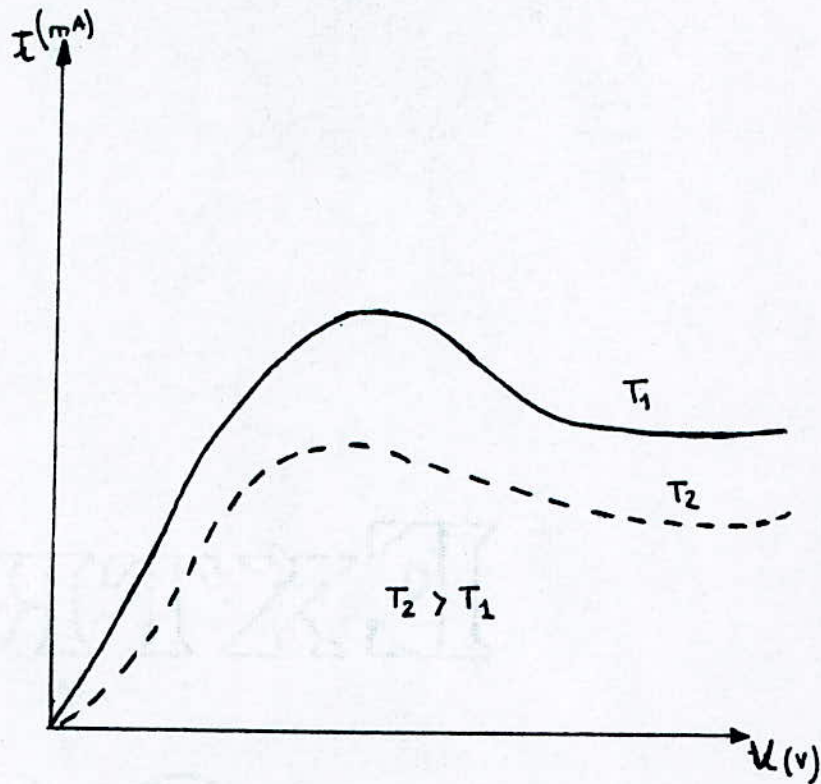
(fig : 08)



(fig : 09)

2-4-3) Caractéristique courant - tension :

Pour tracer cette caractéristique on utilise le montage (2-4-2-1) , la courbe doit être tracée à température ambiante ; quand celle-ci augmente , la courbe se déplace vers l'axe des abscisses . (figure : 10)



(fig : 10)

2-5) Autres propositions :

Le thermomètre digital est utilisé pour la mesure de la température dont la valeur ne dépasse pas généralement $200^{\circ}\text{C}^{\circ}$.

Pour la mesure des hautes températures par exemple celles des fournes dans la métallurgie , on utilise les thermocouples .

Les thermocouples sont des éléments qui utilisent l'effet thermoélectrique c'est à dire la f.e.m qui apparait dans un circuit lorsque celui-ci est constitué par deux conducteurs de nature différente dont les points de raccordement (soudures) à des températures différentes .

Un élément chauffant parcouru par un courant élève la température de l'une des soudures . La f.e.m qui apparait fait circuler un courant dans un galvanomètre inséré dans le circuit de thermocouple .

La f.e.m thermoélectrique est sensiblement proportionnelle au carré du courant de chauffage . Si on étalonne le galvanomètre en fonction de la température ; le thermocouple peut être utilisé comme un thermomètre qui mesure des températures dépassant $2000^{\circ}\text{C}^{\circ}$.

LA SONDE

Pour assurer la liaison entre l'élément sur lequel on effectue une mesure et l'entrée de l'appareil de mesure (thermomètre digital), on utilise un ensemble de deux conducteurs -recueillant aussi peu que possible les parasites extérieurs- terminés par une sonde . La sonde qu'on utilise pour notre thermomètre digital est constituée d'un capteur de température (thermistance à CTN) placée dans un pont de Wheatstone , afin d'améliorer la précision du thermomètre numérique . (fig: 11)

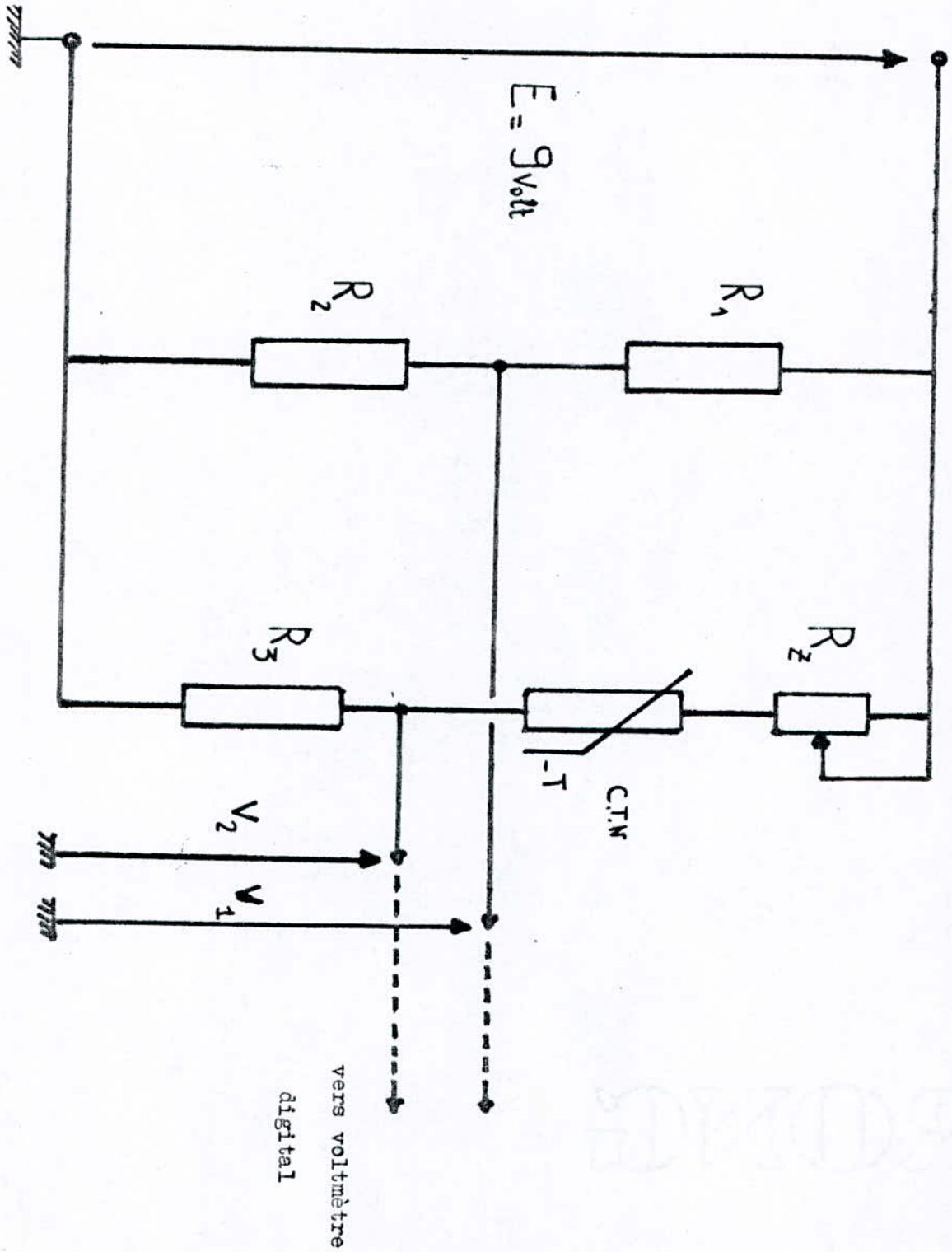
Principe de fonctionnement :

Un voltmètre digital mesure le déséquilibre du pont . Une branche de ce pont est constituée par deux résistances fixes : $R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega$ et $R_2 = 4,7 \text{ k}\Omega$. L'autre branche est constituée par la CTN en série avec un potentiomètre ajustable de $20 \text{ k}\Omega$ à $22 \text{ k}\Omega$ et la résistance $R_3 = 27 \text{ k}\Omega$. Lorsque la CTN est à 0 C° le pont doit être en équilibre et pour cela , on ajuste le potentiomètre R_z ; dans ces conditions , les tensions V_1 et V_2 sont égales et le voltmètre indique bien zéro . Lorsque la température augmente la résistance de la CTN diminue et la tension V_2 augmente le voltmètre indique donc une tension positive . Si la température baisse la valeur de la CTN augmente et la tension V_2 diminue le voltmètre indique alors une tension négative .

On a alors :

$$V_1 = \frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad ; \quad V_2 = \frac{E \cdot R_3}{R_2 + R_{CTN} + R_3}$$

(fig : 11)



Si : $R_1 = R_2$

\Rightarrow

$$V_2 - V_1 = \frac{E \cdot R_3}{R_2 + R_{CTN} + R_3} - \frac{1}{2}$$

Le voltmètre numérique indique la différence des tensions : $V_2 - V_1$. Son indication sera liée à la valeur de la CTN mais d'une façon non linéaire ; vu l'équation ci-dessus. Cette non-linéarité est voulue puisque nous nous rappelons par la suite à compenser celle de la CTN.

Le voltmètre digital est utilisé uniquement pour la mesure de la différence : $V_2 - V_1$, et l'étalonnage de la sonde.

Les composants :

Les résistances sont des modèles à couches de carbone 1/4 W ou 1/2 W, sauf celles de liaison avec les afficheurs qui sont impérativement de 1/2 W.

Les potentiomètres peuvent être des modèles au carbone classique mais, pour la stabilité des réglages dans le temps et pour la facilité de ceux-ci des modèles multitours sont recommandés.

La CTN est d'un modèle très répandu, la valeur de la CTN utilisée est de : $10 \text{ k}\Omega$ à 25°C .

- C H A P I T R E -4-

CONVERTISSEURS

ANALOGIQUE - NUMERIQUE

La conversion analogique - numérique fait correspondre une suite de nombre (a_n) au signal d'entrée $X(t)$, chaque nombre correspond en fait à l'amplitude d'un échantillon d'un signal $X^*(t)$.

L'amplitude de l'échantillon mémorisée est en suite convertie en un nombre qui ne peut prendre que des valeurs discrètes, on remplace donc l'amplitude exacte de l'échantillon par un entier de quantums, tels que l'amplitude soit la plus proche possible de la valeur réelle; c'est l'opération de quantification. On exprime en suite ce nombre au moyen d'un code: c'est ce qu'on appelle l'opération de codage. (figure : 12)

Remarque : Si E est l'amplitude maximale de signal à coder (n) le nombre de bits qu'on désire avoir :

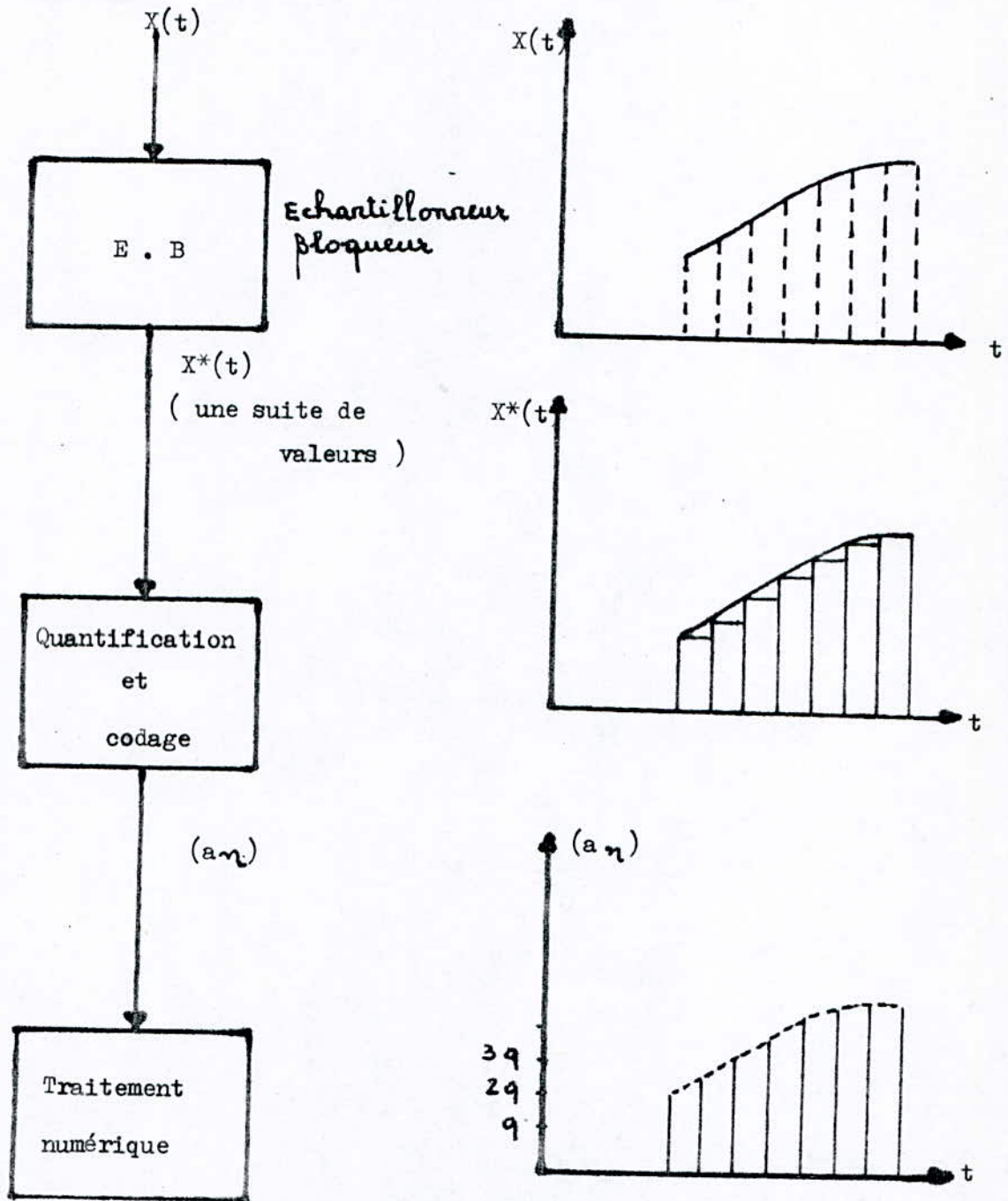
$$q = \frac{E}{2^n}$$

4-1) Définition d'un convertisseur analogique-numérique :

Un convertisseur analogique-numérique est un dispositif qui reçoit un signal analogique A et le transforme en un signal numérique N , en le comparant à une tension de référence U_{ref} .

Dans le cas idéal on a :

$$N = \frac{A}{U_{ref}}$$



(fig : 12)

$$A = N \cdot U_{ref} = U_{ref} \cdot \left[\frac{B_1}{2} + \frac{B_2}{2^2} + \frac{B_3}{2^3} + \dots + \frac{B_n}{2^n} \dots \right]$$

avec : $B_n \in [0, 1]$

Si on désire limiter le nombre de conversion à n , on ne prend alors que les tensions jusqu'à l'ordre n . On introduit une erreur de tous les autres termes de rang au delà de n telle que :

$$\epsilon = U_{ref} \cdot \frac{B_{n+1}}{2^{n+1}}$$

ou encore :

$$\epsilon = \frac{U_{ref}}{2^n} \cdot \frac{B_{n+1}}{2}$$

dans le cas le plus défavorable on aura :

$$B_{n+1} = 1$$

d'où l'erreur introduite est :

$$\epsilon = \frac{q}{2}$$

4-2) Types de convertisseurs analogique-numérique :

La plus grande partie des CAN fonctionnent en mode série, quelques uns cependant fonctionnent en mode série-parallèle ?

Dans cette étude nous nous intéressons qu'aux quelques CAN fonctionnant en mode série.

4-3) Convertisseur analogique-numérique à simple rampe :

4-3-1) Schéma synoptique : (figure : 13)

4-3-2) Principe de fonctionnement :

Le principe consiste à déclencher au temps t une rampe linéaire et en même temps à envoyer des impulsions d'horloge dans un compteur . La tension de la rampe étant délivrée par l'intégrateur est connectée à l'une des entrées d'un comparateur , l'autre entrée recevant la tension à mesurer E_x . Lorsque la tension de la rampe devient égale (ou plus exactement très légèrement supérieure) à la tension E_x , la sortie de comparateur bascule , ce qui bloque le passage des impulsions d'horloge vers le compteur . Ainsi ce dernier a emmagasiné un nombre d'impulsions N de période T directement proportionnel à la tension E_x : tels que :

$$t_1 - t_0 = N.T$$

Or la tension de l'intégrateur est :

$$V_s = -\frac{1}{C} \int i dt = -\frac{1}{C} \cdot \left(\frac{E_{ref}}{R} \right) dt = -\frac{1}{R.C} \cdot E_{ref} \cdot \int dt$$

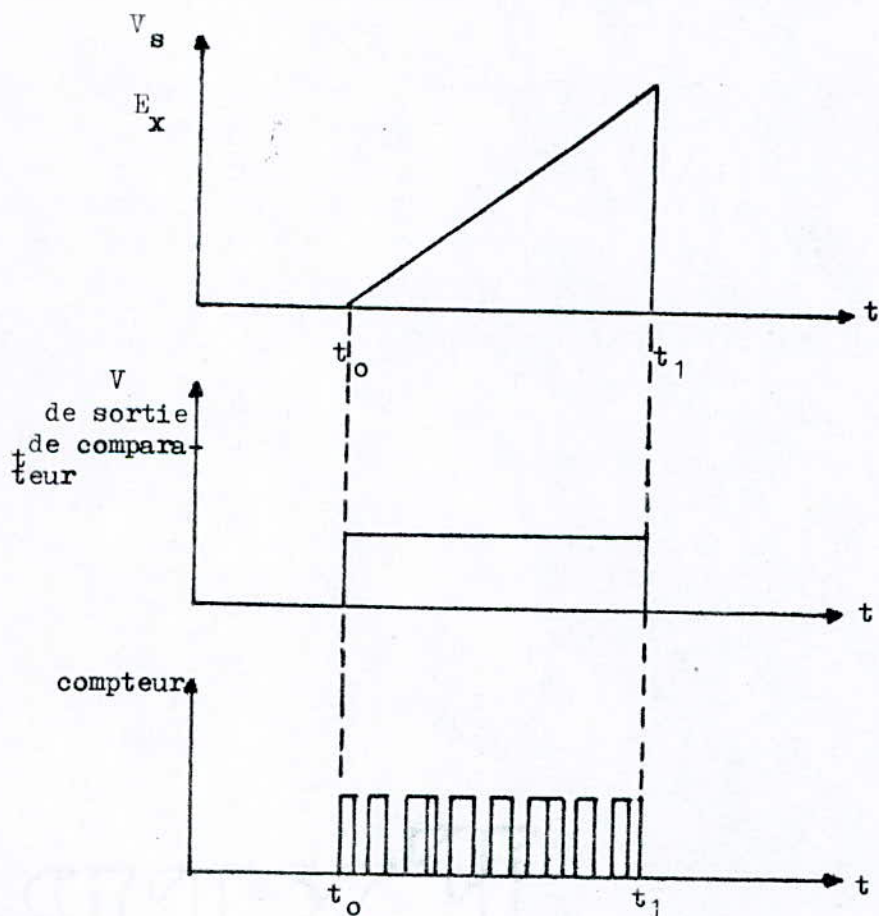
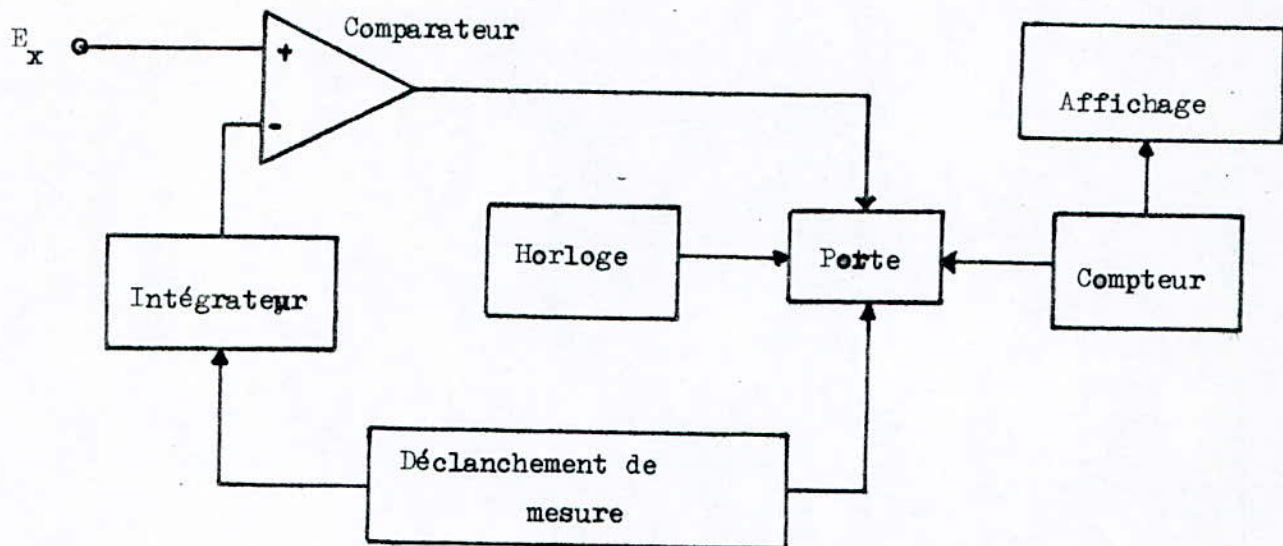
Lorsque la tension de rampe V_s atteint la valeur E_x , nous aurons :

$$E_x = -\frac{E_{ref}}{R.C} \int_{t_0}^{t_1} dt = -\frac{E_{ref}}{R.C} (t_1 - t_0)$$

puisque : $t_1 - t_0 = N.T$

l'égalité ci-dessus s'écrit :

$$E_x = -E_{ref} \cdot \frac{T}{C} \cdot N$$



(fig : 13)

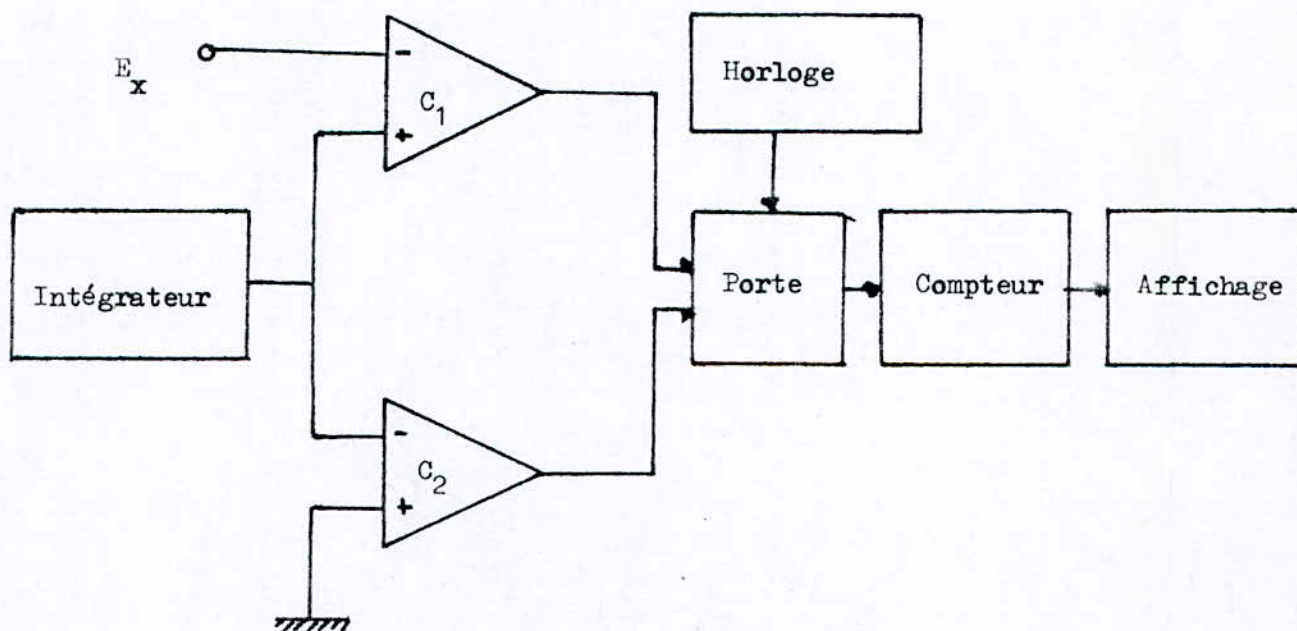
où E_{ref} , R , C , et T sont des valeurs connues, N étant la seule inconnue et caractéristique de E_x .

Pour que E_x soit directement proportionnelle à N , il suffit que la valeur connue $-E_{ref} \cdot T/RC$, soit l'inverse du nombre de point de mesure du convertisseur.

Le schéma synoptique précédent est valable pour une tension E_x de même polarité que V_s .

Pour une polarité quelconque de E_x le convertisseur à utiliser sera à double polarités.

Le schéma synoptique d'un tels convertisseur est le suivant :



4-4) Convertisseur A/N différentiel à rampe (à auto-zéro) :

Le voltmètre digital utilisé pour la mesure de $V_2 - V_1$ doit être évidemment réalisé par nos soins pour que notre thermomètre soit autonome . Il est constitué par un circuit intégré que nous décrivons en détail ci-après , circuit intégré qui renferme , entre autre chose , un convertisseur analogique-numérique différentiel simple rampe à auto-zéro .

4-4-1) Schéma synoptique : (figure : 14)

4-4-2) Principe de fonctionnement :

Le schéma synoptique nous présente comment pouvoir à l'aide d'un voltmètre différentiel mesurer $V_2 - V_1$. Le principe de ce convertisseur est analogue à celui à simple rampe , sauf les deux comparateurs utilisés sont suivis par une porte logique (ou exclusif) n'autorisant le comptage que sous certaines conditions ,

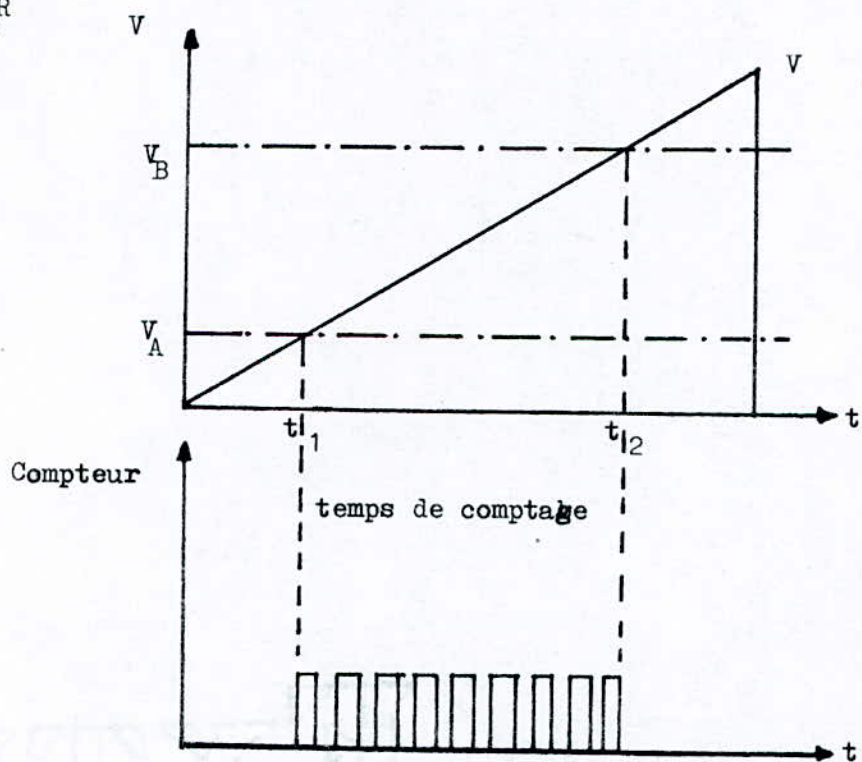
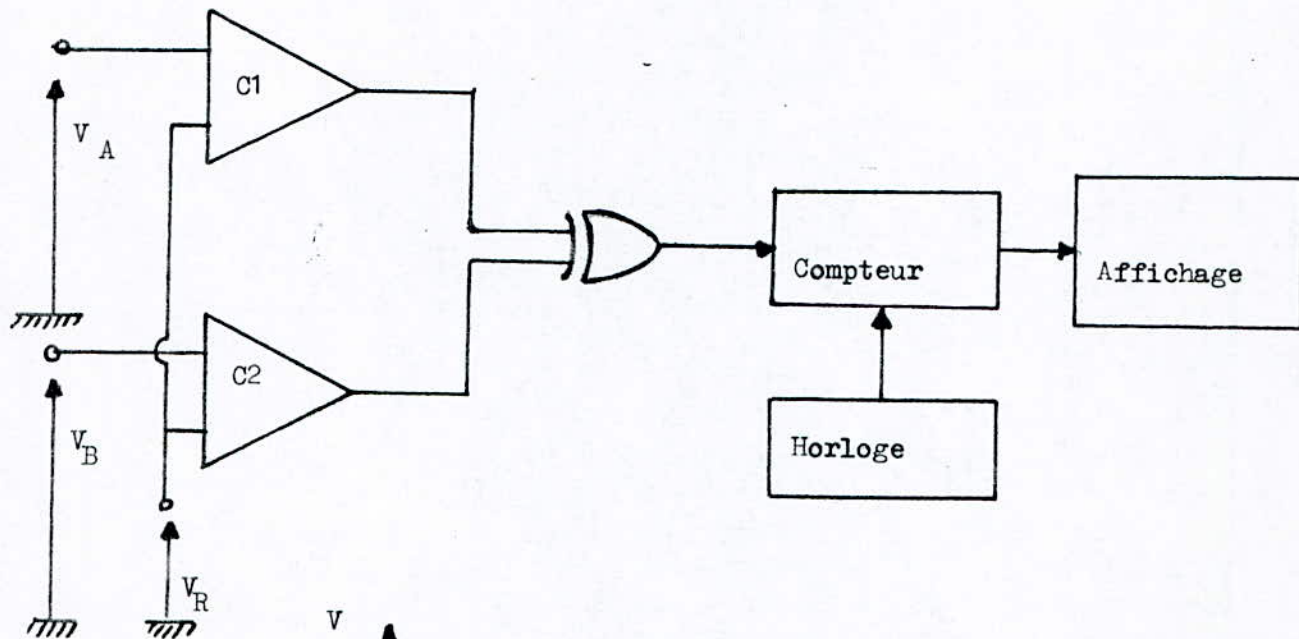
Un comparateur reçoit une des tensions inconnues , l'autre reçoit l'autre tension et les deux comparateurs reçoivent la même tension à rampe :

$$V_R = k.T$$

La logique et la polarité des entrées des comparateurs sont faites de telle façon que le compteur ne puisse compter que tant que V_R est comprise entre V_A et V_B .

En sortie du compteur on a :

$$N = H \cdot (t_2 - t_1)$$



(fig : 14)

ou si $V_R = K.T$; nous aurons :

$$t_1 = V_A / K \quad ; \quad t_2 = V_B / K$$

Donc la valeur affichée en sortie du compteur est :

$$N = (V_B - V_A) \cdot \frac{H}{K}$$

-K : est une constante dépendant du circuit générant V_R .

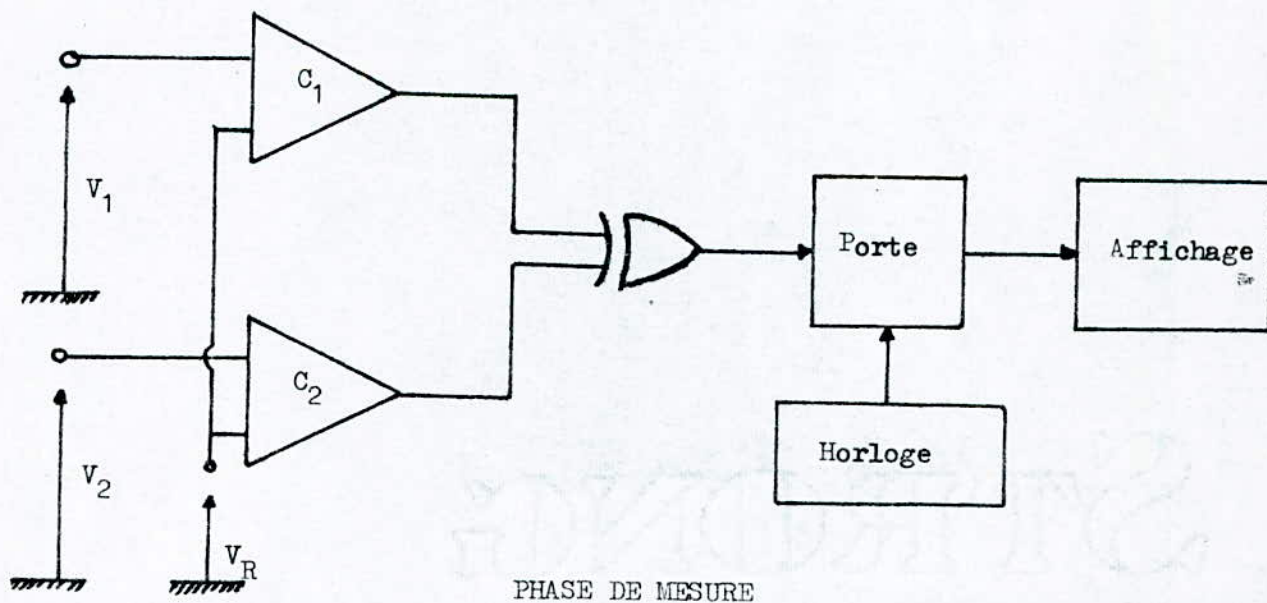
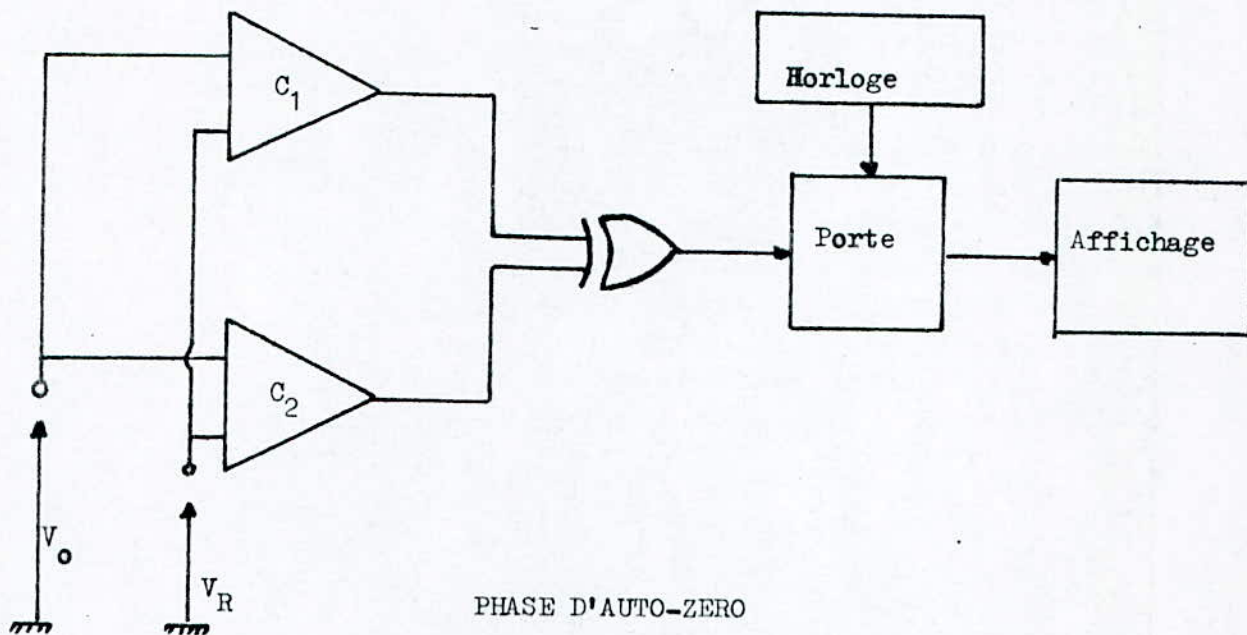
-H : est une constante dépendant de la fréquence du signal appliqué au compteur .

La valeur affichée est proportionnelle à la différence de tension entre V_B et V_A .

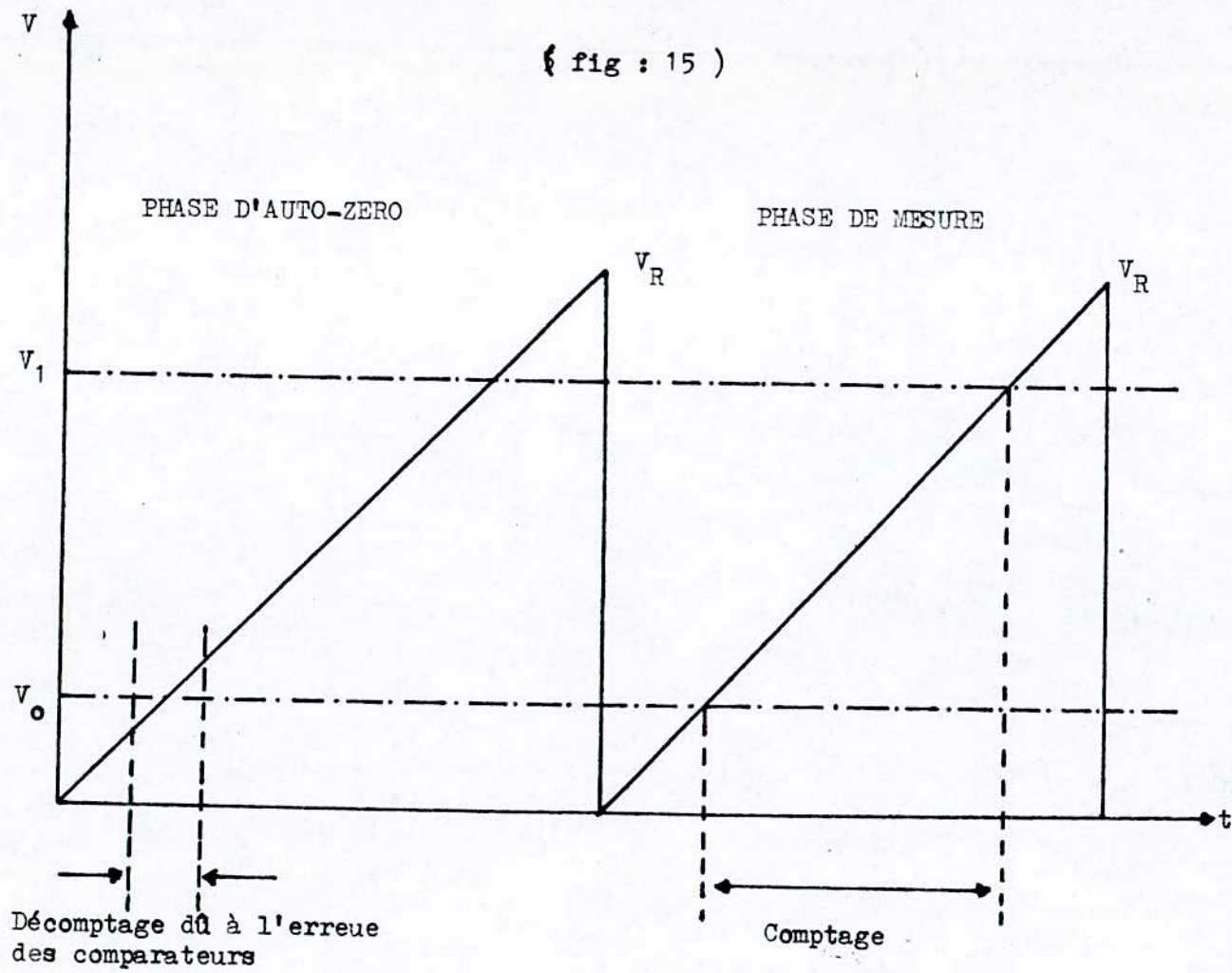
Le défaut majeur des deux types de convertisseurs précédents vient des erreurs des comparateurs . En effet , ceux-ci ne peuvent être parfaits et commettent des erreurs de comparaison de quelques mV à quelques dizaines de mV , erreurs qui de plus varient avec beaucoup de paramètres dont un est la température . Il faut donc pour réaliser un montage précis , s'affranchir de ces défauts , ce qui est fait au moyen du principe exposé en figure : 15 .

Supposons que , en raison des erreurs de nos comparateurs , le compteur compte un petit peu plus longtemps qu'il ne devrait . L'auto-zéro va en venir à bout de la façon suivante : toute la phase de mesure est en réalité l'association d'une phase d'auto-zéro et d'une phase de mesure proprement dite . Pendant la phase d'auto-zéro un commutateur électronique court-circuite les entrées des deux comparateurs : s'ils

(fig : 15)



(fig : 15)



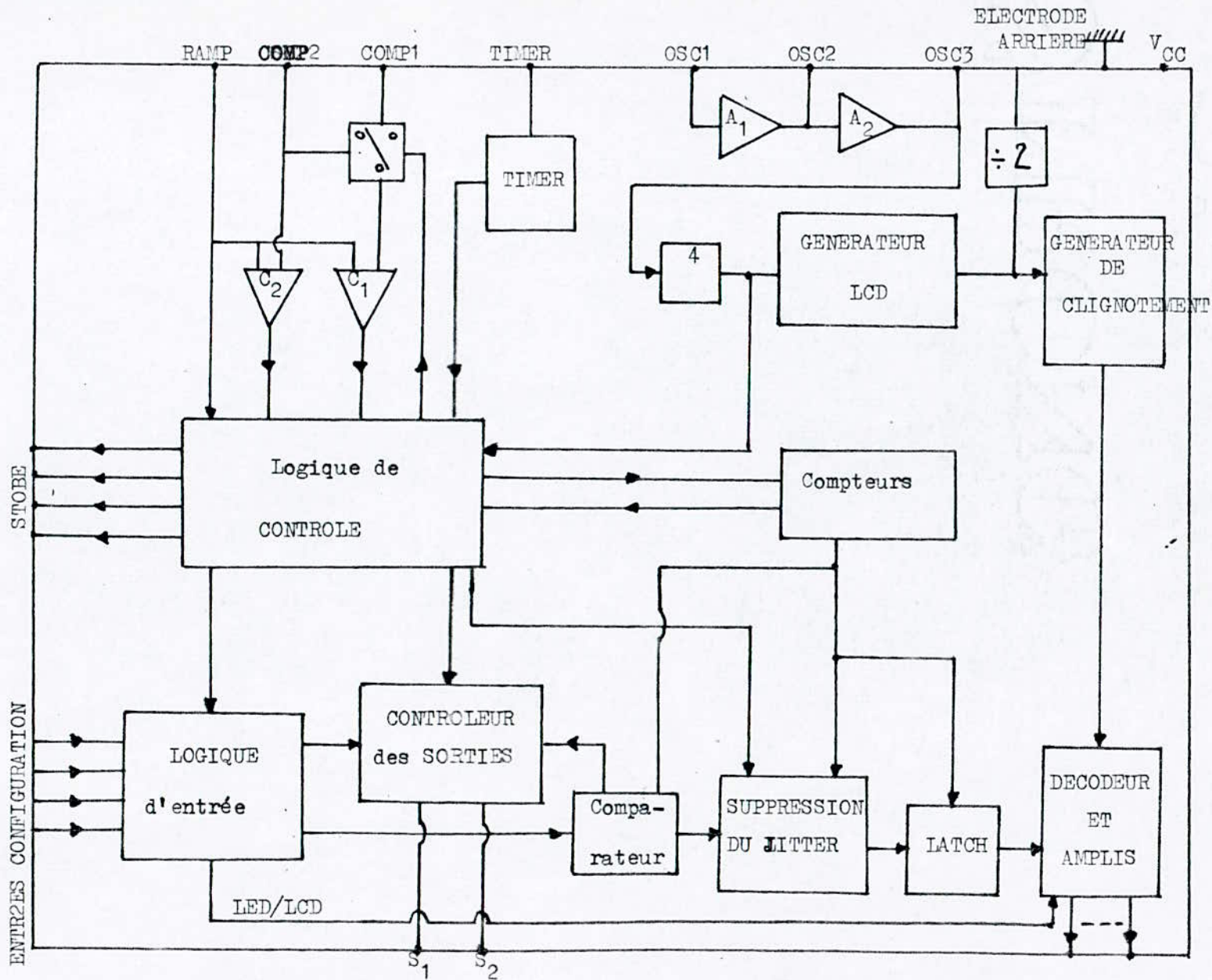
sont parfaits le fait de leur appliquer V_R ne doit pas faire démarer le compteur, puisqu'il doit démarer et s'arrêter instantanément lorsque $V_R = V_0$. Par contre, si les comparateurs ont des défauts le compteur démarrera quand V_R sera égale à V_0 pour C_1 et s'arrêtera quand V_R sera égale à V_0 pour C_2 . En fait, on s'arrangera pour que, pendant cette phase, le compteur décompte. Dans la phase de mesure qui fait suite et qui fonctionne exactement comme exposé dans la figure 15, le compteur ne part pas de zéro mais d'une valeur qui est directement liée à l'erreur des comparateurs, et qui va donc se soustraire de l'erreur identique qui va se reproduire lors de la mesure. Par ce procédé, on compense donc à chaque instant les erreurs dues aux composants de montage. Il va de soi que la fréquence de répétition des phases de mesure et d'auto-zéro est telle que le montage n'a pas le temps de dériver entre une phase d'auto-zéro et la phase de mesure qui y fait suite.

4-5) Application : Le circuit intégré : AY - 3 - 1270 :

Il faut savoir que ce circuit ne sert pas que de thermomètre mais qu'il dispose aussi d'une fonction thermostat double, et programmable de surcroît : fonction qui n'est pas utilisée ici.

La partie la plus importante est le convertisseur analogique-numérique que l'on reconnaît par ses deux comparateurs C_1 et C_2 et par son interrupteur d'auto-zéro ; la logique de contrôle se charge des fonctions expliquées ci-dessus tandis que le compteur-décompteur est visible au milieu du schéma synoptique. Deux amplis A_1 et A_2 permettent de réaliser un oscillateur d'horloge qui va piloter la logique interne ainsi qu'une partie du circuit d'affichage. En effet, ce circuit peut piloter des afficheurs à LED, et aussi des afficheurs à cristaux liquides qui nécessitent des tensions rectangulaires.

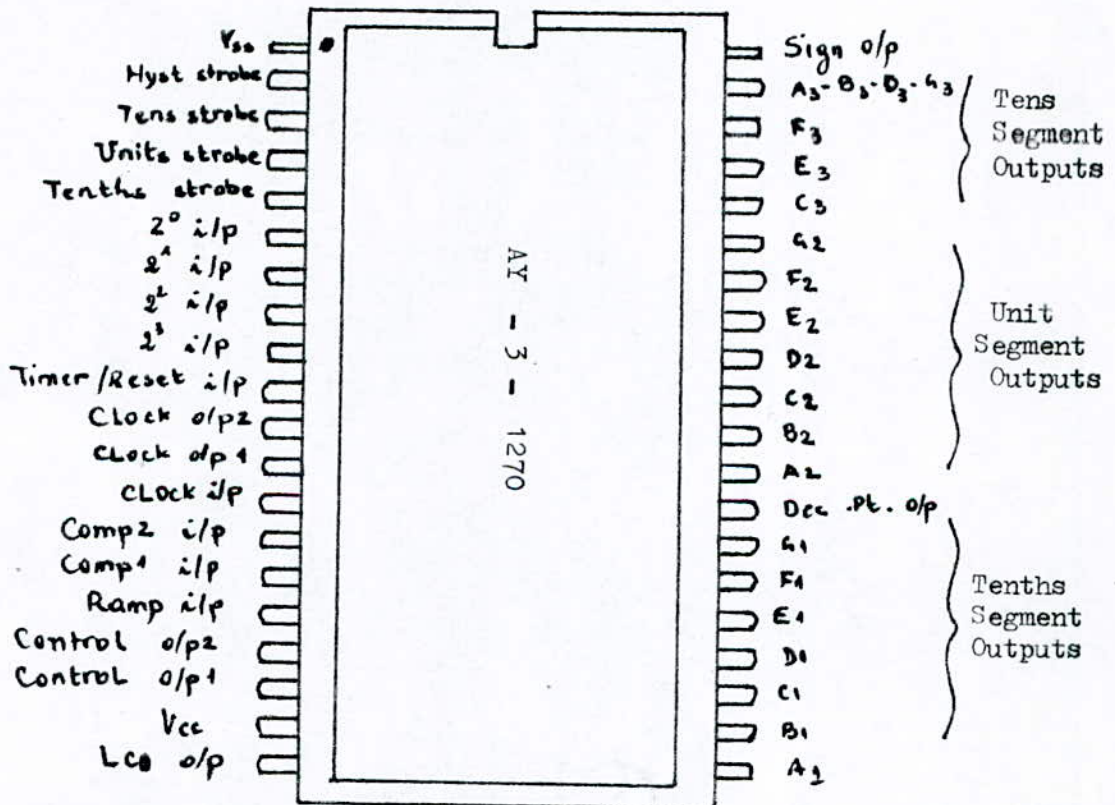
SCHEMA SYNOPTIQUE DU : AY - 3 - 1270



Role de bloc " Suppression du Jittre " :

Le défaut de tout voltmètre digital est le mouvement constant du chiffre de poids le plus faible de l'affichage à la moindre variation de la tension mesurée et , surtout , à la fréquence de répétition des mesures qui peut être élevée ce qui conduit à un affichage désagréable . Ici , le circuit anti-jitter se charge de minimiser cet effet et rend ainsi la lecture plus reposante .

BROCHAGE DU : AY - 3 - 1270



LES AFFICHEURS

5-1) Généralités :

Les composants opto-électroniques sont principalement de deux types : les composants semi-conducteurs et les ((autres)) .

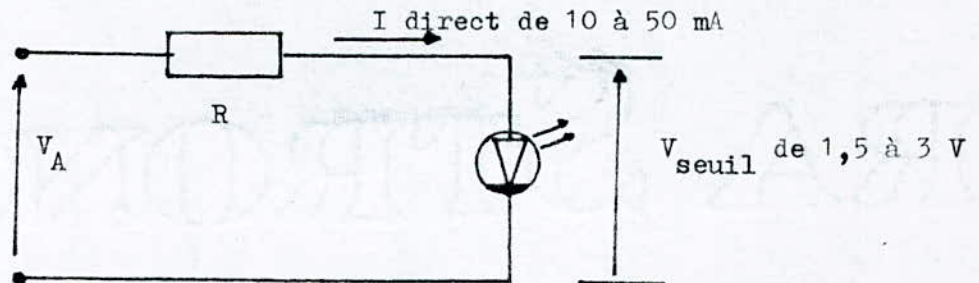
Les composants semi-conducteurs sont ceux réalisés avec une technologie du type de celle employée pour fabriquer les transistors et les circuits intégrés et de ce fait , ils présentent des caractéristiques et des conditions d'utilisation analogues à celles des composants électroniques classiques .

Les ((autres)) sont les dispositifs d'affichage faisant appel à des techniques et des technologies particulières telles que , par exemple , tubes à gaz , afficheurs à plasma , afficheurs à cristaux liquides etc ... Dans ce chapitre nous ne considérons que les composants opto-électroniques semi-conducteurs .

5-2) Les diodes électro-luminescentes :

Des composants sont à la base de tous les dispositifs opto-électroniques à semi-conducteurs car quel que soit le composant choisi une ou plusieurs LED (Light Emitting Diode) entre dans sa conception .

Une LED n'est autre qu'une diode qui émet de la lumière lorsqu'elle est traversée par un courant .

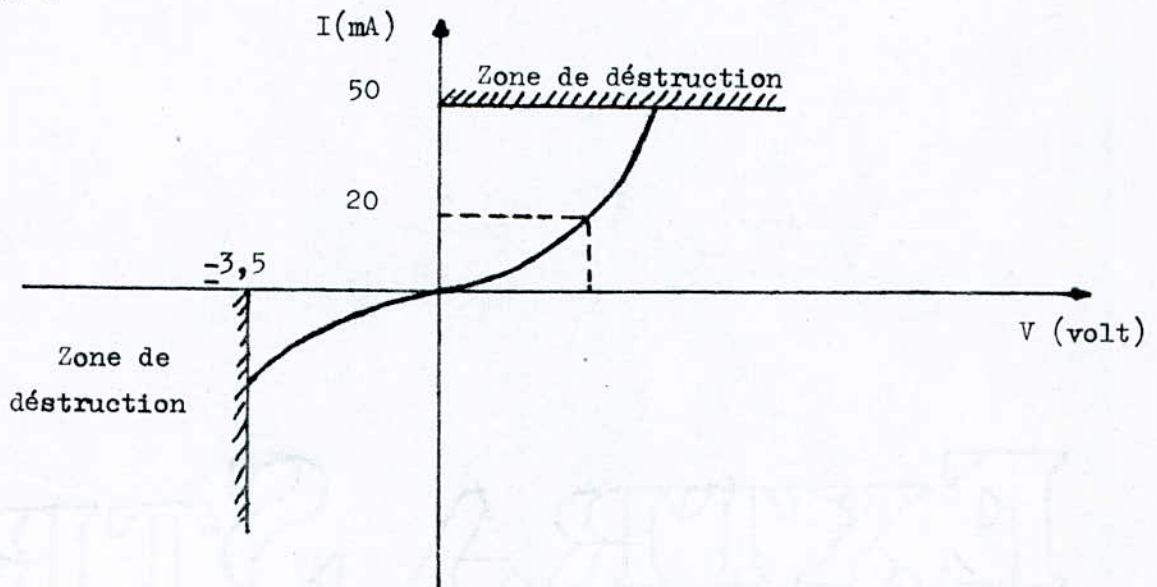


La LED s'utilise polarisée en direct , c'est à dire dans le sens passant , elle est donc assimilable à une diode normale .

Par contre la tension à ses bornes lorsqu'elle conduit ce que l'on appelle la tension de seuil , n'est pas de 0,6 V comme dans une diode au silicium classique mais varie entre 1,5 et 3 V selon la couleur de la diode , par ailleurs , et c'est là un paramètre très important qui conduit souvent à la destruction de LED , la tension inverse que peut supporter une LED est généralement faible et se situe entre 3 Volts et 7Volts .

Le courant qui doit traverser une LED pour obtenir une luminosité normale sans nuire à la vie de la diode dépend de la couleur de celle-ci , il est de 10 mA pour lesmoins consommables (rouges) et de 20 mA pour les plus consommable (les vertes , et les jaunes) .

Ce courant ne doit pas dépasser la valeur maximale qui se situe aux environs de 50 mA .



Courbe caractéristique d'une LED rouge

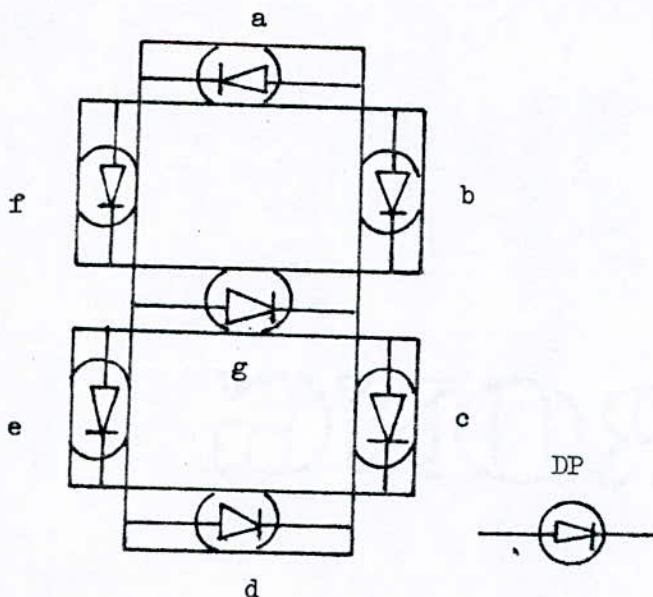
Les LED qui existent en trois couleurs de base : rouge , jaune , vert , ont un temps de réponse très court . Leur durée de vie , dans les conditions normales d'utilisation est pratiquement infinie à l'échelle humaine .

Enfin , pour des raisons de protection , il est indispensable d'insérer en série avec la LED une résistance de protection . Cette résistance R est généralement de quelques centaines d'ohms . Elle se calcule facilement par la loi d'ohm , telle que :

$$R = \frac{U_a - U_{seuil}}{I_{direct}}$$

5-3) Les afficheurs à LED :

Ces afficheurs ne sont , comme le montre la figure 16 , qu'un assemblage de 7 LED en forme de bâtonnet disposées de façon à pouvoir former des chiffres plus ou moins stylisés .

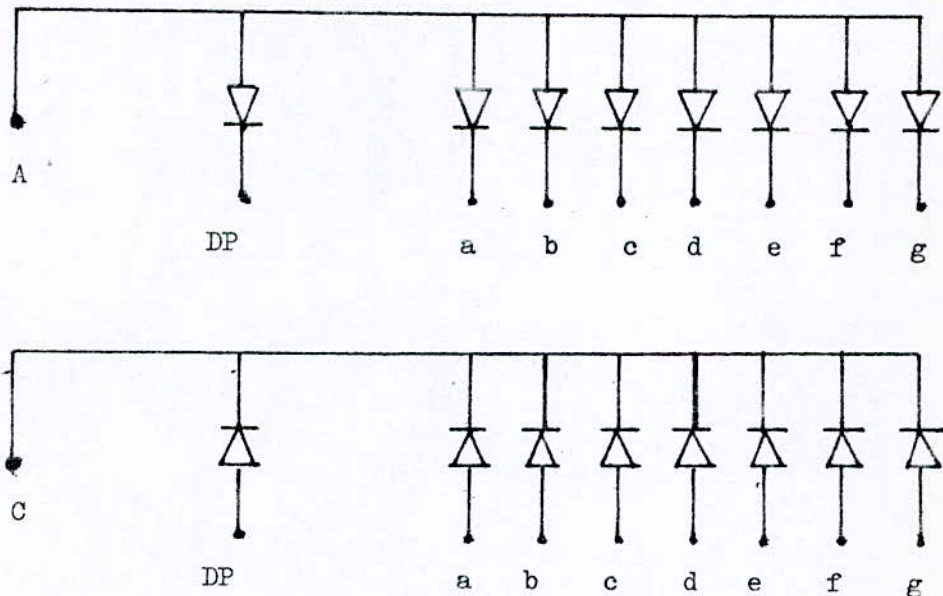


(fig : 16)

En conséquence , les caractéristiques de ces afficheurs sont rigoureusement identiques à celles des LED qui les composent et les conditions d'utilisation sont aussi identiques .

Pour pouvoir se comprendre , les appellations des segments ont été normalisées et les lettres de a à g indiquées sur la figure : 16 , sont valables quel que soit le type et le fabricant de l'afficheur 7 segments .

De plus , pour ne pas avoir à sortir 14 fils de l'afficheur , les fabricants ont décidé de rendre certains de ceux-ci commun , ainsi trouve-t-on des afficheurs dits ((à cathodes communes)) où toutes les cathodes des LED sortent sur un point commun et des afficheurs dits ((à anodes communes)) où toutes les anodes des LED sortent sur un point commun , la figure 17 montre l'allure du ((brochage)) de tels afficheurs .



(fig : 17)

La logique nous permettait de compter et d'exprimer des nombres en binaire, par contre, comme le montre la figure : 18, l'allumage des segments correspondants à un chiffre donné n'a rien à voir avec du binaire.

Cette considération a amené les constructeurs des circuits intégrés à mettre sur le marché des circuits spécialisés appelés décodeur BCD-7 segments ou décodeurs binaire-7 segment. Le plus répandu est le 7447 dont nous donnons uniquement le mode de connection (figure : 19). Ce circuit est à même de réaliser seul le transcodage entre un code binaire et les segments à allumer, pour représenter les chiffres ainsi exprimé.

Le circuit intégré 7447 présente des possibilités qui se retrouvent sur de nombreux circuits L.S.I et même sur certains microprocesseurs spécialisés lorsqu'il y a une commande d'affichage à réaliser.

Notons que les seules différences existant entre les différents modèles des afficheurs 7 segments proposés sur le marché ne portent pas sur les caractéristiques de base mais essentiellement sur la taille, le groupement par deux ou plusieurs chiffres, la couleur et le brochage.

Précisions, qu'un afficheur 7 segments en comporte généralement 8 car de très nombreux afficheurs disposent d'un point décimal le segment supplémentaire est câblé comme les autres (anode ou cathode commune) et son autre électrode est accessible sur une patte généralement appelée DP (pour Decimal point).

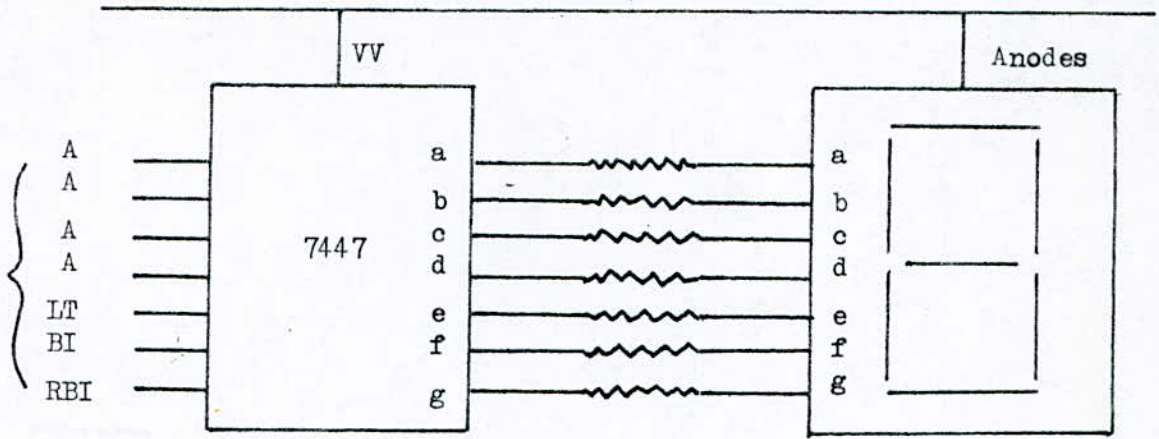
Considérons la figure : 20 sur laquelle nous avons représenté un affichage à quatre chiffres. Nous constatons qu'il faut réaliser, entre les afficheurs et l'électronique de commande 29 liaisons. C'est beaucoup, de plus, il faut prévoir un décodeur binaire-7 segments par chiffre à afficher, c'est encore beaucoup cela occupe de la place et consomme de courant.

(fig : 18)

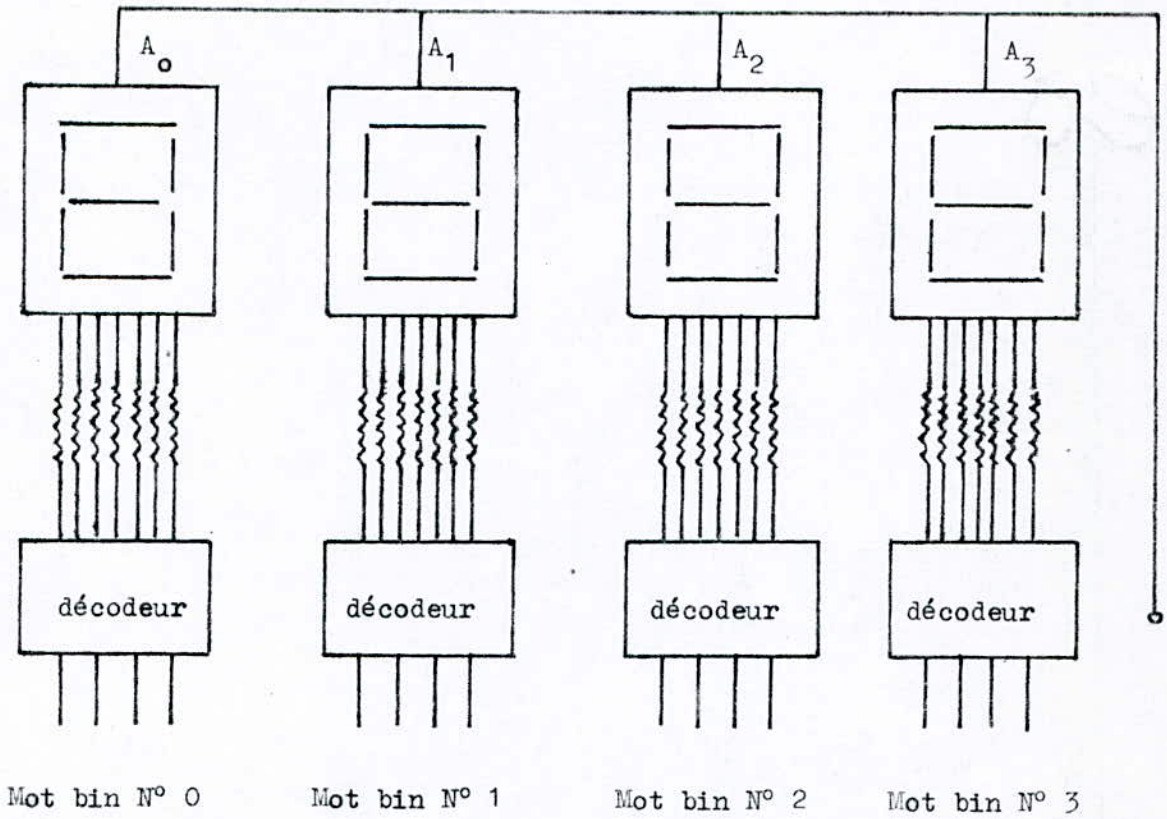
SEGMENTS A ALLUMER							
Chiffre	a	b	c	d	e	f	g
0	1	1	1	1	1	1	0
1	0	1	1	0	0	0	0
2	1	1	0	1	1	0	1
3	1	1	1	1	0	0	1
4	0	1	1	0	0	1	1
5	1	0	1	1	0	1	1
6	0	0	1	1	1	1	1
7	1	1	1	0	0	0	0
8	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	0	1	1

Ces remarques , si elles ne sont pas trop graves au niveau d'un affichage à quatre chiffres de viennent impressionnantes si l'on pense aux afficheurs de calculatrices qui comportent jusqu'à 12 chiffres , soit dans le cas précédent 85 fils de liaison et 12 circuits de décodage binaire-7 segments .

Pour palier ces inconvénients , on fait appel au mode d'affichage multiplexé que nous étudions pas pour ce projet .



(fig : 19)



(fig : 20)

REALISATION PRATIQUE

6-1) Schéma électrique complet du thermomètre digital : (figure: 21)

6-2) Explication :

Nous voyons au centre le AY-3-1270 qui commande directement trois afficheurs 7 segments à LED à anodes communes .

L'afficheur de gauche (AF2) n'est utilisé que pour le signe . Il s'agit d'un afficheur ordinaire dont seul le segment G est utilisé , (AF1) possède un câblage particulier où les segments A,B,D et G sont reliés . En effet , cet afficheur n'aura à afficher que 1 , 2 ou 3 puisque la gamme de mesure va de -39 à +39 C° .

Il est donc possible de commander ces quatre segments simultanément .

Les résistances sont calculées pour laisser passer 10 mA par segment environ pour des afficheurs rouges (FND 507) de (Fairchild) . Si vous voulez monter des afficheurs jaunes ou verts , qui , à luminosité égale , demandent plus de courant , il faut déduire ces valeurs , mais il ne faut pas ~~oublier~~ oublier que le AY-3-1270 ne peut pas fournir plus de 12,5 mA .

La diode D1 indique au AY-3-1270 que l'on travaille avec des afficheurs à LED et non à cristaux liquides . Les pattes COMP1 et COMP2 représente le pont (la sonde) . Les résistances R₁ et R₂ font ici 4,7 k Ω tandis que R₃ est de 27 k Ω et R_z un potentiomètre multitours de 20 à 22 k Ω . Ce potentiomètre sert à régler le zéro .

Sur la patte RAMPE ; un reseau R-C permet de générer la tension V_R . Comme nous utilisons un simple réseau R-C cette rampe ne sera pas linéaire mais expo-

entielle , c'est voulu et cela compense presque exactement la caractéristique non linéaire de la thermistance . Le potentiomètre de 470 k Ω sert à régler la pleine échelle .

Sur les pattes OSC1 et OSC2 on branche un résonateur céramique de 455 kHz . On utilise ce résonateur (filtre céramique) pour des raisons de stabilité du montage .

Un condensateur de 47 μ F découple l'alimentation constituée par une pile de 9 Volts .

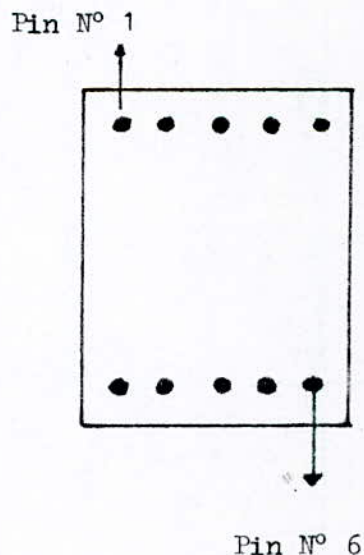
Remarque :

Au lieu d'utiliser des afficheurs FND 507 de Fairchild , nous avons utilisé des afficheurs de type : D350 PAG que nous donnons le brochage : figure : 22 .

Les résistances de liaison avec les afficheurs ont été recalculées et sont de 820 Ω ou de 1 k Ω .

BROCHAGE DE L'AFFICHEUR D350 PAG

- Pin N° 1 : G
- Pin N° 2 : F
- Pin N° 3 : Anode commune
- Pin N° 4 : A
- Pin N° 5 : B
- Pin N° 6 : DP
- Pin N° 7 : C
- Pin N° 8 : Anode commune
- Pin N° 9 : D
- Pin N° 10 : E



Vu de dessus de
l'afficheur D350 PAG

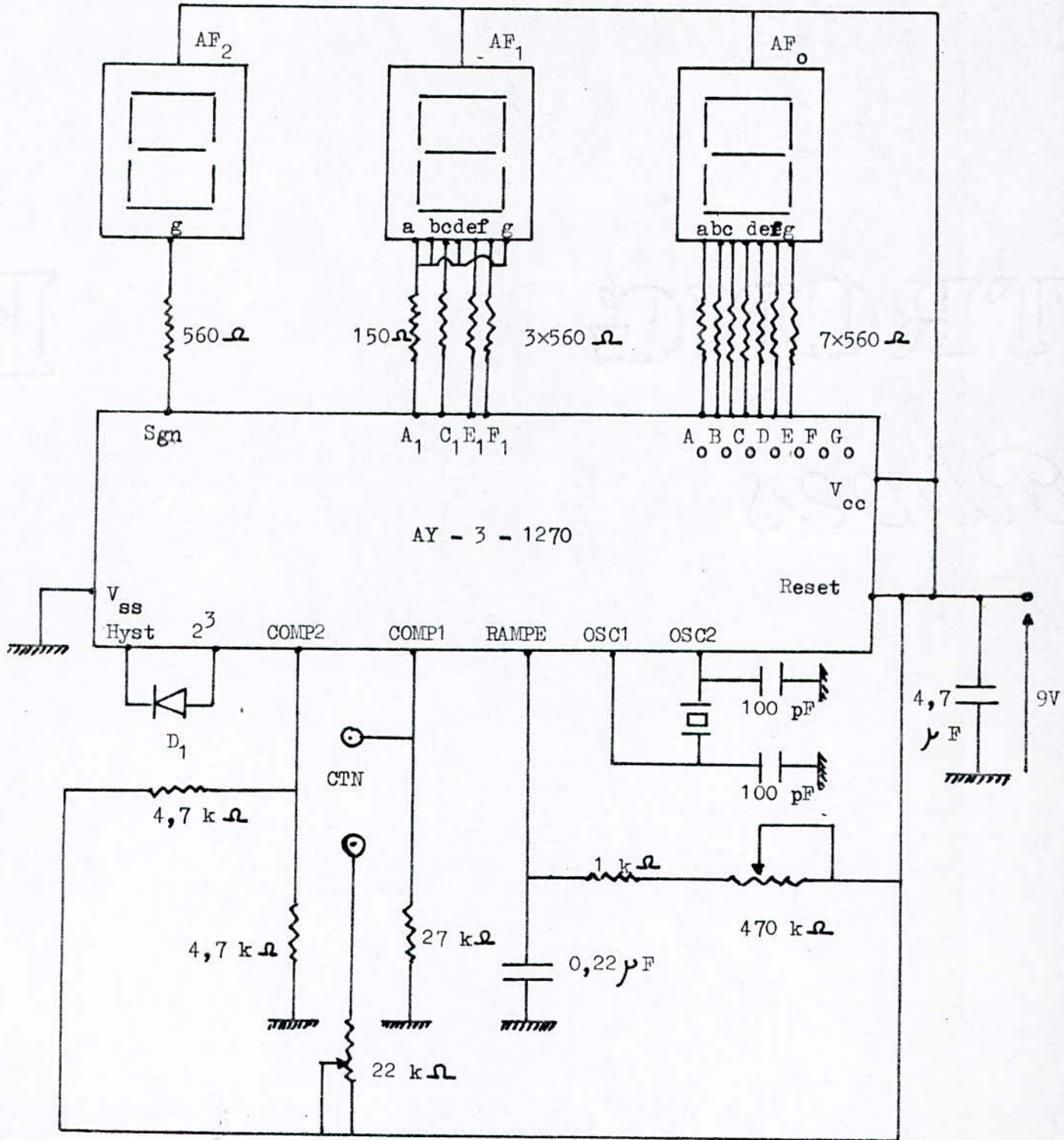
6-3) Essais et résultats :

Après avoir réalisé le schéma complet du thermomètre digital nous avons fait les essais suivants : à l'aide de l'oscilloscope nous avons visualiser la rampe et la fréquence du résonateur .

Résultats :

- l'amplitude de la rampe est de : 8 Volts en viron .
- la fréquence de la rampe est de : est variable à l'aide de potentiomètre de 450 K
- la fréquence de résonateur est de : 454,54 kHz .

(fig : 21)



APPLICATION DU THERMOMETRE DIGITAL
DANS UNE BOUCLE DE REGULATION DE TEMPERATURE

Un des avantages les plus importants du thermomètre digital c'est la possibilité d'être utilisé dans une boucle fermée de régulation de température .

Nous proposons pour finir cette étude une régulation de température pour bain chimique photographique utilisant le thermomètre digital étudié .

7-1) Schéma synoptique de la régulation de température : (figure : 23)

7-2) Principe de régulation de température :

On voit sur le schéma synoptique une résistance chauffante et un capteur de température immergés dans une cuve contenant de l'eau .

L'élément chauffant est électriquement isolé du liquide . Le capteur est une thermistance , comme on le rencontre habituellement dans les régulations de température . Le capteur reçoit la température du bain et agit sur les circuits de commande pour l'afficher . Le signal du circuit intégré est appliqué à l'amplificateur A et puis envoyé à l'entrée du régulateur . Le régulateur n'est autre qu'un comparateur comportant deux entrées . Sur l'une on applique un seuil de référence réglable par le potentiomètre P . Sur l'autre , on connecte la sortie de circuit intégré principal (AY-3-2270) . La sortie du régulateur déclanche ou bien arrête le passage du courant dans la résistance chauffante . Simultanément une diode électro-luminescente est allumée lors des périodes de chauffage , et éteinte dans les temps de repos .

Au démarrage , le courant est envoyé dans l'élément chauffante et le voyant

est allumé . Lorsque la température de l'eau approche de la valeur de la température de consigne , l'indicateur lumineux se met à clignoter , puis quand les deux températures sont égales le voyant s'éteint et le chauffage est coupé .

Quand les pertes de chaleur auront évacué suffisamment de calories le système alimentera à nouveau la résistance chauffante et le voyant clignotera . Cela correspond à la période d'établissement de la température qui s'effectue toujours avec un ou plusieurs dépassements , suivis d'une ou plusieurs baisses de la température autour de la température de consigne . L'aspect de ce phénomène rappelle quelque peu la forme d'une oscillation amortie . Après un certain délai , qui est fonction de linéarité thermique du bain et aussi de la puissance de chauffage de la résistance . Le système s'équilibre , c'est à dire que l'élément chauffant ne fonctionne uniquement que pour compenser les pertes de chaleur .

7-3) Le circuit de commande de température :

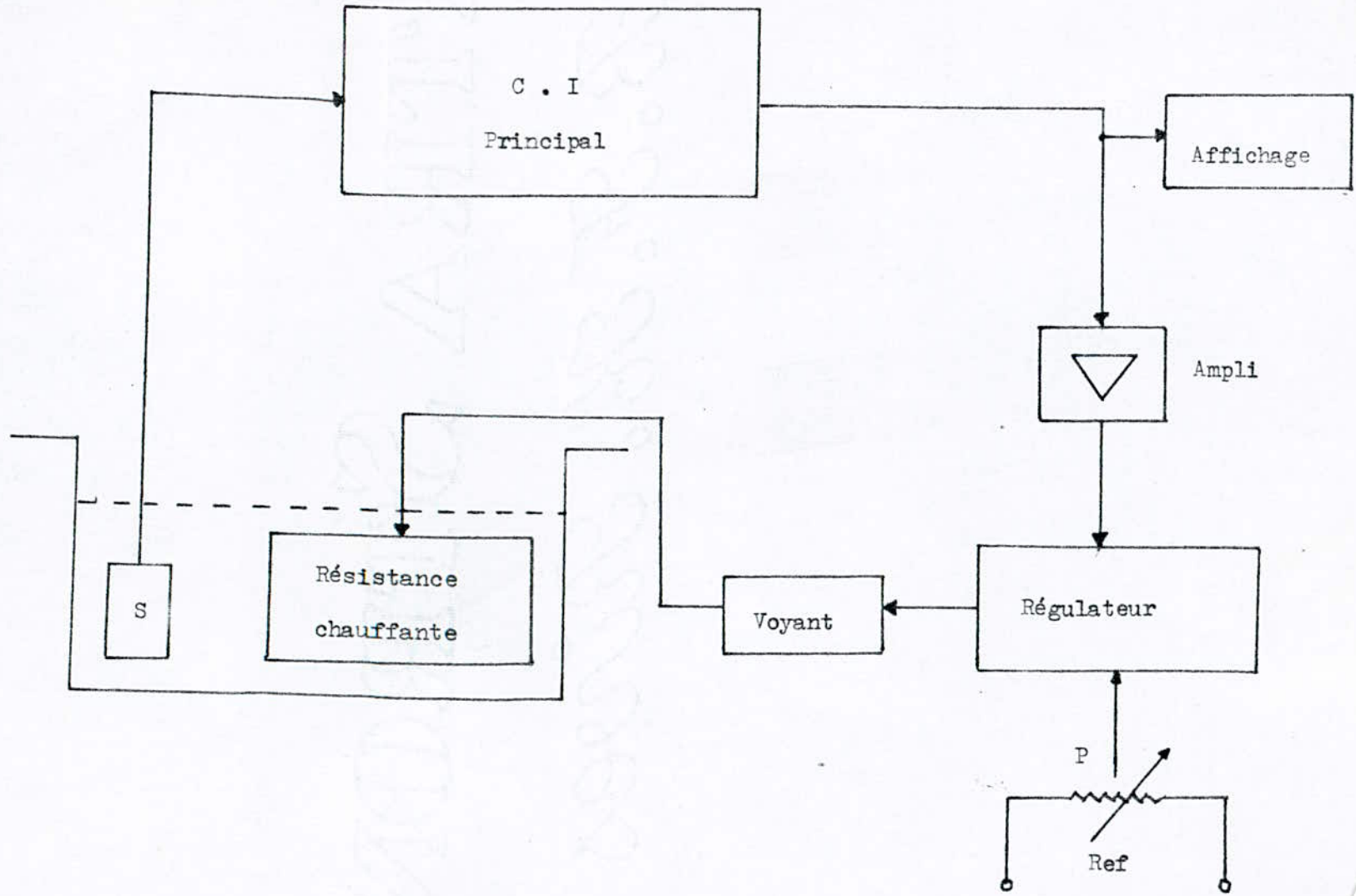
Il est composé d'un circuit intégré le AY-3-1270 , déjà étudié dans la première partie . Il est spécifiquement destiné à la mesure de la température . Il constitue le coeur du thermomètre digital .

7-4) La partie régulation /

Il existe deux types de régulation de température , l'un appelé régulation en tout ou rien , l'autre régulation proportionnelle .

Le premier type de régulation est celle qu'on obtient , par exemple avec un thermostat mécanique à bilame . Lorsque la température du bain atteint la température de consigne affichée sur le bilame , ce dernier coupe le chauffage . C'est lui qui prend la décision d'application ou non la tension aux bornes de la résistance .

(fig : 23)



Quand le chauffage doit être mis en route , le thermostat applique la pleine puissance , même si l'écart entre les températures est faible . Avec cette méthode , il peut y avoir des fluctuations importantes de la température du bain au-dessus et en dessous de la température de consigne , ces variations sont dues à la constante de temps thermique du liquide et celle de thermostat lui même .

Une bonne régulation de température , avec peu de variations autour de la température de consigne , peut être obtenue en utilisant une régulation proportionnelle . Pour réaliser ce type de régulation l'élément chauffant est alimenté puis coupé périodiquement . La fréquence de répétition limite le temps de réponse , il est nécessaire d'avoir un comparateur relativement rapide . La constante de temps du capteur doit rester faible pour éviter des retards importants dans le système . Le nombre de C° que doit descendre la température du bain au-dessous de la température de consigne pour déclencher l'application de toute la puissance à la résistance chauffante est appelé bande proportionnelle .

Aussi longtemps que la température du bain est située au-dessous de la bande proportionnelle , l'élément chauffant est alimenté en permanence .

Quand la température du bain arrive à l'intérieur de la bande proportionnelle , il y a commutation périodique de la puissance . Au début le facteur de forme est grand , c'est à dire que la puissance est appliquée la majeure partie du temps . Plus la température du bain se rapproche de celle de consigne , moins longue est la durée pendant laquelle la résistance reçoit de l'énergie . Lorsque les deux températures deviennent identiques , il y a cessation complète de l'alimentation de la résistance chauffante .

Si le bain se refroidit , la démarche est inverse . Au début ont lieu de

brèves périodes de chauffage qui vont augmenter en durée au fur et à mesure que le bain se refroidit . Si l'écart entre les deux températures devient trop grand, la puissance est appliquée à nouveau-de façon continue .

CONCLUSION

Nous pouvons dire en conclusion que la réalisation du thermomètre digital fut une réussite pour l'électronique qui s'étale dans tous les domaines et bouscule de plus en plus les autres thermomètres usuels (à alcool , à mercure ...)

Notons que la précision du thermomètre digital peut être rendue excellente en utilisant un capteur spécialisé et d'autant d'afficheurs nécessaires .

La gamme de mesure peut s'étaler de $-150^{\circ}\text{C}^{\circ}$ à $+150^{\circ}\text{C}^{\circ}$.

Son utilisation en boucle fermée , le thermomètre digital rend la régulation de température facile et simple .

Pour en ce qui concerne la réalisation pratique du thermomètre , nous disons que nous avons eu beaucoup de difficultés ; la plus grosse est que la majeure partie des composants de notre réalisation (même une CTN) sont introuvables ni au niveau de l'école ni au niveau du territoire national . Nous étions obligés d'envoyer quelqu'un les chercher en FRANCE .

En fin nous espérons que l'école fera le nécessaire pour réduire ces difficultés

BIBLIOGRAPHIE

Livres :

- Cours d'électronique ; F-Milsant ; T 01 ; Ed EYROLLES .
- Electronique ; J-NIARD ; NATHAN TECHNIQUE .

Revues :

- Haut parleur : N° 1658 - Juillet 80
- " " : N° 1675 - Décembre 81
- " " : N° 1676 - Janvier 82
- " " : N° 1679 - Avril 82
- Radio plan : N° 441 - Aout 84
- " " : N° 448 - Mars 85
- ELECTRIQUE PRATIQUE : N° 40 - Juillet 81
- " " : N° 63 - Septembre 83
- " " : N° 79 - Fevrier 85
- " " : N° 80 - Mars 85