

1984

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : D'ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

INGENIORAT D'ETAT EN ELECTRONIQUE

SUJET

MESURE NUMERIQUE DES TEMPERATURES

Proposé par :

Mr: IMAN LAZAROV IVANOV

Docteur Ingénieur.

Etudié par :

Joachim KAYA

Dirigé par :

Mr: IMAN LAZAROV IVANOV



PROMOTION : JUIN 1984

“ Le pessimisme de la
raison, c'est l'optimisme de
la volonté.”

GRAMSCI

DEDICACE

Tout ce que j'ai été
et tout ce que je suis, je le dois
tout d'abord à mes parents pour
tous les sacrifices consentis à
mon égard. Ainsi, ce modeste
travail leur est dédié.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer toute ma profonde gratitude à l'endroit de Monsieur IVAN LAZAROV IVANOV Docteur Ingénieur et Responsable du module F.E.N. 174 - Mesures en électronique - au sein du département; pour sa sollicitude sans dimension et ses conseils judicieux dont j'ai pu bénéficier tout au long de la suivie de ce travail.

Mes remerciements vont également à l'endroit de ma sœur bien-aimée Céline KENGUE, à mon beau-frère Clément MOUAMBA, à mon oncle Hubert KOKOLO puis à messieurs: Bernard PENDI, Raphaël M'BAYA, Jean M'BOUNGOU et sa petite famille pour toute l'aide morale et matérielle qu'ils m'ont apportée des années durant.

Des remerciements particuliers sont dus à mes amis: Abel Richelot M'PIKA-M'BOUNGOU, Albert MANTSOUNGA et à Norbert MASSALA pour avoir réalisé respectivement avec diligence le manuscrit de ce Mémoire; puis à monsieur Mustapha BELKATEB pour s'être occupé du tirage.

Enfin, pour terminer, j'aimerais remercier tous mes amis pour qui les amitiés n'ont jamais été démenties; et

que ces derniers veuillent trouver par le biais de
ces phrases le témoignage d'une profonde reconnais-
sance.

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE I - INTRODUCTION	PAGE
I.1 - Généralités	
I.1.1 - Notion de la température	1
I.1.2 - Echelles thermométriques	2
I.1.3 - Echelles de températures absolues	3
I.1.4 - Echelles thermodynamique	4
CHAPITRE II - ETUDE DES CAPTEURS DE TEMPERATURE	
II.1 - NOTION de Capteur	7
II.1.1 - Définition	
II.1.2 - Caractéristiques principales des instruments de mesure de températures	8
II.1.3 - Rappels sur les Capteurs de température	9
II.2 - Développement détaillé de chaque type de Capteur thermique	10
A/ II.2.1 - Thermomètres à dilatation	11
a) Thermomètre à dilatation de liquide à enveloppe en verre	
b) Thermomètre à dilatation de liquide à enveloppe métallique	
c) Thermomètre à dilatation de gaz	
d) Thermomètre à dilatation de solide	

II-2-2- Thermomètres à changement d'état	12
a)- Thermomètres à pression de Vapeur	
b)- Thermomètres à repères	
c)- Thermomètres à changement de forme	
d)- Thermomètres à changement de Couleur	
II-3- Thermomètres électriques	14
a)- Thermomètres à Résistance	
b)- Thermomètres à thermistance	
c)- Thermomètres à couple thermoélectrique	
d)- Thermomètres à effet piézoélectrique	
II-4- Thermomètres Optiques (Pyromètres)	23
a)- Pyromètres à Radiation totale	
b)- Pyromètres monochromatiques	
c)- Pyromètres Bichromatiques ou de couleur	
d)- Lunette à disparition de filament	
e)- Pyromètres à dilatation	
B/1. AUTRES TYPES DE CAPTEURS THERMIQUES	
II-2-1- Transducteurs à jonction PN	27
II-2-2- Transducteurs exploitant la variation d'une Capacité en fonction de la température	28
II-2-3. ELECTRONIQUE DU CAPTEUR	29
a)- Série : LM134 , LM234 , LM334	
b)- Série : LM135 , LM235 , LM335	
c)- REF - 02	
d)- Capteur AD590	

CHAPITRE III - SCHEMAS DE MESURES et MONTAGES POUR CAPTEURS

III-1. Thermomètres à Résistance	31
III-2. Thermomètres à thermistance	39
III-3. Thermomètres à effet thermoélectrique	42
III-4. Les Pyromètres	52

CHAPITRE IV - TECHNIQUES D'AFFICHAGE NUMERIQUE DE LA TEMPERATURE

IV-1. Rappels	62
IV-2. Perturbations dues aux signaux parasites à l'entrée	66
IV-2-1. Facteur de réjection en mode commun (RMC)	
IV-3. Différents types de C.A.N.	
A%. TYPES USUELS	
B%. AUTRES TYPES DE CONVERTISSEURS	73
IV-3-5. Linéarisation	77

CHAPITRE V - REALISATION

V-1. Préliminaires	81
A%. V-2. Montage utilisé : Capteur Résistif (Platine)	
V-2-2. Appareils utilisés	83
V-2-4. Graphes et Conclusions	
B%. V-2. Montage utilisé : Capteur thermoélectrique (Cas du couple Chromel - Alumel)	
V-2-2. Appareils utilisés	87
V-2-3. Graphes et Conclusions	

C/ V-2 - Montage utilisé : Capteur Résistif (cas du Platine)

V-2-2 - Appareils utilisés

91

V-2-3 - Graphes et Conclusions

CONCLUSION

ABREVIATIONS

- E.I.P.T (68) : Echelle Internationale Pratique 1968
- CTN : Résistance à Coefficient de température négatif
- P.P. m/°C : Unité par million par degré Celsius
- TC : Thermocouple
- S.F. : Soudure froide
- S.C. : Soudure chaude
- F.E.M. : Force électromotrice
- d.d.p. : différence de potentiel
- R.M.C. : Rapport de Réjection en Mode Commun
- C.F.T. : Convertisseur Fréquence - Tension
- V.C.O. : Oscillateur Commandé par une tension
- C.A.N. : Convertisseur Analogique - Numérique
- C.N.A. : Convertisseur Numérique - Analogique
- G : Galvanomètre
- R.A.Z. : Remise à Zéro
- A : Amplificateur

TABLEAUX et FIGURES

NATURE DU TABLEAU OU FIGURE	N°	PAGE
- Corrélations entre différents points fixes		3
- Conversion entre différentes échelles		4
- Valeurs tabulées de la Résistance en fonction de la température		15
- Linéarisation de la CTN		
* Premier principe	II-1	19
* Deuxième -" -	II-2	-"-
* Troisième -" -	II-3	-"-
* Remarque	II-4	-"-
* Courbes de réponse de la CTN		20
- Etude Comparative des caractéristiques techniques des Capteurs		30
* Résistance		
- Principe de mesure	III-1	34
- Mesure par galvanomètre à cadres croisés	III-2	34
- Mesure avec Pont de Wheatstone équilibré	III-4 a et b	34-35
- Mesure avec Pont de Wheatstone non équilibré	III-5 a et b	35
- Compensation de la Résistance de ligne	III-6	38

- Pont de Wheatstone à équilibre automatique	III - 7	38
* Thermistance		
- Cas du galvanomètre	III - 8	40
- Montages utilisant un pont	III - 9 a et b	40
* Thermocouple		
- Avec galvanomètre	III - 10	43
- Compensation de la SF	III - 11	-"-
- Méthode du Zéro	III - 12 a et b	-"-
- Méthode du Zéro pour TC	III - 13	-"-
- Méthode de Zéro (Tarage)	III - 14	46
- Compensation de la SF par décalage	III - 15	46
- Compensation par potentiomètre	III - 16	-"-
- Compensation automatique	III - 17	49
- Appareil à équilibrage automatique	III - 18	-"-
- Tarage automatique discontinu	III - 19	-"-
- Tarage automatique continu	III - 20	51
- Etalonnage du TC	III - 21	-"-
* Les Pyromètres		
- Lunette de Féry	III - 22	53
- Lunette à disparition de filament	III - 23	-"-
* Montages divers		
- Amplificateur pour capteur piézo-électrique	III - 24	55

- Thermomètre utilisant une diode Comme capteur	III-25	56
- Sonde de température à jonction base-émetteur d'un transistor	III-26	-/-
- Capteur Capacitif	III-27	58
- Capteur LM335	III-28	60
- REF. 02	III-29	-/-
- Série: LM134, LM234, LM334	III-30 a, b, c, d	61
* Organisation d'une chaîne industrielle	IV-1	64
- Convertisseur simple rampe	IV-2	68
- Convertisseur double rampe	IV-3	-/-
- Convertisseur Tension-Fréquence	IV-4	71
- Convertisseur par pesées successives	IV-5	71
- Convertisseur Résistance-Fréquence	IV-6	74
- Convertisseur °K-Fréquence	IV-7	-/-
- Convertisseur °C-Fréquence	IV-8	76
- Interface avec Capteurs Résistifs	IV-9	-/-
- Voltmètre numérique	IV-10	78
- Thermomètre à TC	IV-11	79
- Etude Comparative de différents CAN		80
* Schéma de Principe	V-1	82
- Tableau de mesure	V-2-4	84
* Schéma de Principe	V-1	85
- Tableau de mesure	V-2-4	88
* Schéma de Principe	V-1	89
- Tableau de mesure	V-2-4	90

PREAMBULE

Les dernières décennies ont été marquées par une évolution permanente de la technique industrielle, laquelle technique s'est engagée dans une course effrénée à la précision des contrôles et à une automatisation plus poussée des processus de fabrication; La mesure des températures n'échappe pas à ce phénomène. Un examen superficiel de l'histoire tend à accréditer l'idée que cette aventure est le fruit du triomphe aussi brusque qu'inexpliqué d'une pensée technique accomplissant en trois ou quatre siècles un bon prodigieux hors du néant. Ce thème, que nous-nous proposons de débattre ici à travers ces lignes, trouve ses jalons depuis la haute antiquité où l'on s'accorde généralement à admettre que c'est au savant physicien Italien Galilée (1564-1642) que l'on doit, vers 1592, la réalisation du premier appareil permettant de substituer aux perceptions sensorielles, le repérage d'une grandeur physique d'un corps témoin avec la température. L'instrument qu'il conçut au départ et qu'il convient d'appeler thermoscope, car celui-ci ne permettait pas de représenter numériquement les températures, était composé d'un ballon

surmonté d'un étroit tube de verre. La rationalité occidentale en fait n'est pas tombée du ciel. Elle est née, à la Renaissance, à la suite de la transgression des Lois divines. Le sort de L'homme n'a t-il pas toujours été lié à la nature de ses outils ?

Aujourd'hui, de l'industriel au particulier, un grand nombre de personnes doit employer le thermomètre pour atteindre des performances optimales d'un système, ou pour respecter les normes édictées par l'Agence pour l'économie de l'énergie. L'appareillage classique, galvanomètre, potentiomètre, enregistreur, ne suffit plus; dans bien des cas, et il cède la place à un nouveau venu : le thermomètre numérique.

CHAPITRE I

GENERALITES

INTRODUCTION

I.1. GENERALITES

I.1.1. NOTION DE LA TEMPERATURE

Avant d'aborder le vif du sujet, une esquisse assez brève mérite d'être faite sur le concept température. Tout objet que nous touchons nous semble plus ou moins chaud ou froid; mais c'est une notion vague et subjective. Nous la remplacerons par la lecture précise d'un thermomètre, c'est-à-dire d'une colonne de verre emplie de mercure et mise au contact de l'objet. On disait que deux corps étaient à la même température lorsqu'ils étaient aussi chauds l'un que l'autre. Ces expressions, fondées sur l'expérience de nos sens, définissent ce qu'il faut entendre par température, mais conduisent parfois à un jugement entaché d'erreur. D'un point de vue de l'état moléculaire d'un corps tel qu'il soit: nous dirons que la température caractérise l'état thermique du corps. Soit un corps, solide, liquide ou gazeux au repos. En fait le repos n'est qu'apparent car il se produit en tout point une agitation moléculaire: les molécules sont précipitées les unes contre les autres à grande vitesse et il y a transformation de l'énergie cinétique en énergie thermique. Alors, eu égard à cette proposition, La température apparaît comme un paramètre

susceptible de caractériser le niveau énergétique. Entre autres détails, nous dirons par ailleurs que la température est une grandeur physique pouvant être traduite en un signal électrique moyennant un dispositif approprié.

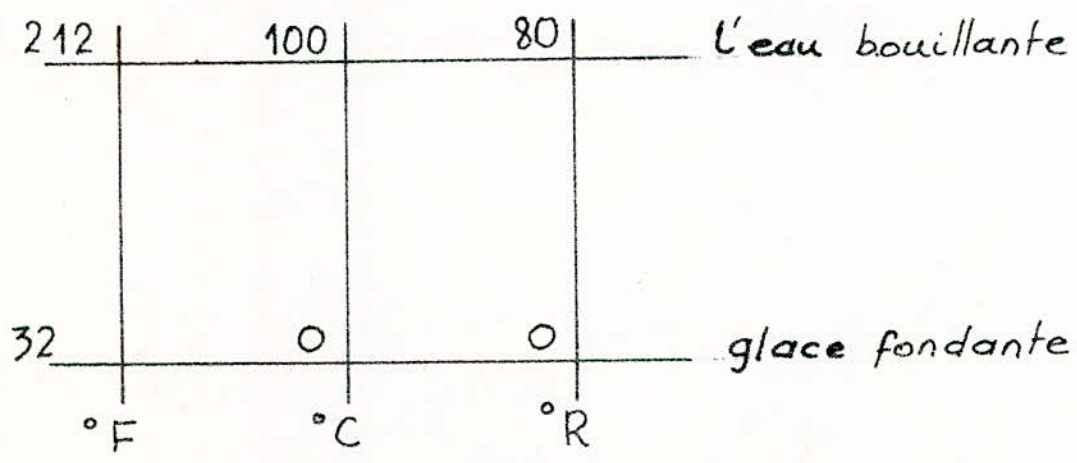
I.1.2_ ECHELLES THERMOMETRIQUES

Puisque les propriétés physiques des substances dépendent plus ou moins de leur température, on peut utiliser, en qualité de thermomètre, un appareil basé sur une mesure précise et facilement reproductible de ces propriétés. Chaque appareil employé pour la mesure des températures doit être gradué (calibré) conformément à une échelle rigoureusement définie.

— Vers 1714, Farenheit, médecin Allemand, construisit un thermomètre à mercure en prenant pour 32 la température la plus basse connue à cette époque : Celle d'un mélange de neige et de sel ammoniac. Il attribua la valeur 212 à la température de l'eau bouillante. Cette échelle est linéaire et est utilisée jusqu'aujourd'hui dans des pays Anglo-Saxons.

— En 1742, un physicien Suédois : A. Celsius construit un thermomètre sur le même principe, mais attribua la valeur 0 à la température de la glace fondante et la valeur 100 à celle de l'eau bouillante. Cette échelle est également linéaire, celle-ci est utilisée par la France et d'autres pays.

— Cependant, le thermomètre du physicien français R.A. Ferchaut de Réaumur (1683-1757) indiquait dans les mêmes conditions c'est à dire à la pression atmosphérique, 0 pour la glace fondante et 80 pour l'eau bouillante.



Ce tableau ainsi dressé, nous donne les corrélations entre ces différents points fixes de ces trois échelles envisagées. Désignons par °F, °C, et °R respectivement le nombre de degré Fahrenheit, Celsius et Réaumur.

I.1.3. ECHELLES DE TEMPERATURES ABSOLUES

Dans les calculs ou dans les formules physiques, les températures sont données souvent par rapport au zéro de la température absolue. On est amené à substituer au °C ou °F les degrés de température correspondant à une échelle absolue dite aussi échelle thermodynamique.

a) — L'échelle absolue correspondant à l'échelle celsius est l'échelle Kelvin et le degré correspondant : le degré kelvin que l'on désigne par °K. La correspondance entre °C et °K est la suivante :

$$1^{\circ}\text{C} = 1^{\circ}\text{K}$$

$$0^{\circ}\text{C} = 273,15^{\circ}\text{K} \quad \text{ou encore} \quad 0^{\circ}\text{C} = -273,15^{\circ}\text{K}$$

b)- L'échelle absolue qui correspond à l'échelle Fahrenheit est l'échelle Rankine (utilisée dans les pays slaves), le degré correspondant : le degré Rankine que l'on désigne par $^{\circ}\text{Ra}$. La correspondance entre $^{\circ}\text{F}$ et $^{\circ}\text{Ra}$ est la suivante:

$$1^{\circ}\text{F} = 1^{\circ}\text{Ra}$$

$$491^{\circ}\text{Ra} = 32^{\circ}\text{F}$$

$$0^{\circ}\text{F} = 459^{\circ}\text{Ra} \quad \text{ou encore} \quad 0^{\circ}\text{Ra} = -459^{\circ}\text{F}$$

c)- CONVERSION D'UNE UNITE A UNE AUTRE SUIVANT LES ECHELLES : Celsius, Rankine, Fahrenheit et Réaumur.

Echelle	Celsius $t^{\circ}\text{C}$	Rankine $T^{\circ}\text{Ra}$	Fahrenheit $t^{\circ}\text{F}$	Réaumur $t^{\circ}\text{R}$
Celsius $^{\circ}\text{C}$	—	$\frac{5}{9} T^{\circ}\text{Ra} - 273,15$	$\frac{t^{\circ}\text{F} - 32}{1,8}$	$1,25 t^{\circ}\text{R}$
Rankine $^{\circ}\text{Ra}$	$1,8(t^{\circ}\text{C} + 273,15)$	—	$t^{\circ}\text{F} + 459$	$1,8(1,25 t^{\circ}\text{R} + 273,15)$
Fahrenheit $^{\circ}\text{F}$	$1,8 t^{\circ}\text{C} + 32$	$t^{\circ}\text{Ra} - 459$	—	$\frac{9}{4} t^{\circ}\text{R}$
Réaumur $^{\circ}\text{R}$	$0,8 t^{\circ}\text{C}$	$0,8\left(\frac{5}{9} T^{\circ}\text{Ra} - 273,15\right)$	$\frac{4}{9}(t^{\circ}\text{F} - 32)$	—

I-1.4. ECHELLE THERMODYNAMIQUE

A l'opposé de l'échelle centésimale (celsius) qui est fondée sur une substance particulière, ici l'échelle thermody-

namique a pour souci majeur d'être indépendante à cette dernière. Le grand mérite de l'échelle thermodynamique est de considérer les températures comme grandeurs mesurables, mais a l'inconvénient de ne pas pouvoir être utilisée facilement, car il n'existe pas d'instruments simples susceptibles de donner la température directement dans l'échelle kelvin. Cette échelle est basée sur le principe de Carnot; Cet artifice permet de la définir : en partant du rendement thermique η_{th}

$$\eta_{th} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

η_{th} ne dépend que de T_1 et T_2 et ne dépendra pas de la substance utilisée; supposons que T_1 soit supérieure à T_2 , nous avons donc :

$$\eta_{th} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Cette échelle possède un seul point fixe, en attribuant à T_2 la valeur de $273,16 \text{ }^\circ\text{K}$. Ce point n'est autre que la température du point triple de l'eau ($0,01^\circ\text{C}$). Ainsi, pour effectuer la conversion entre les deux échelles centésimale et thermodynamique, il suffit d'appliquer la relation suivante :

$$T(^{\circ}\text{K}) = 273,15 + t(^{\circ}\text{C})$$

Ce faisant, nous pouvons ainsi définir les deux unités de température couramment utilisées.

* DEFINITIONS

a) - KELVIN : Le Kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction $\frac{1}{273,16}$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau.

b) - Degré Celsius : La température Celsius t est définie par la différence $t = T - T_0$ entre deux températures thermodynamiques T et T_0 avec $T_0 = 273,15 \text{ } ^\circ\text{K}$. La température Celsius s'exprime en $^\circ\text{C}$.

En dépit de cet our d'horizon qui est ainsi fait sur cette séquence concernant les échelles thermométriques, il en découle que deux unités : ($^\circ\text{K}$) et ($^\circ\text{C}$) ont été retenues et constituent par conséquent l'échelle légale de température.

CHAPITRE II

ETUDE DES CAPTEURS DE
TEMPERATURE

II.1. NOTION DE CAPTEUR

Avant donc d'avancer dans notre exposé, nous avons jugé mieux d'exempter tous les chapitres à venir de tous développements mathématiques ordus et souvent fastidieux. Cependant, un bref rappel s'avère nécessaire à ce sujet. On distingue à cet effet tout un amalgame de Capteurs dont les plus courants sont: Capteurs de pH, Capteurs de pression; Capteurs d'humidité, Capteurs de débit, Capteurs de température, etc.

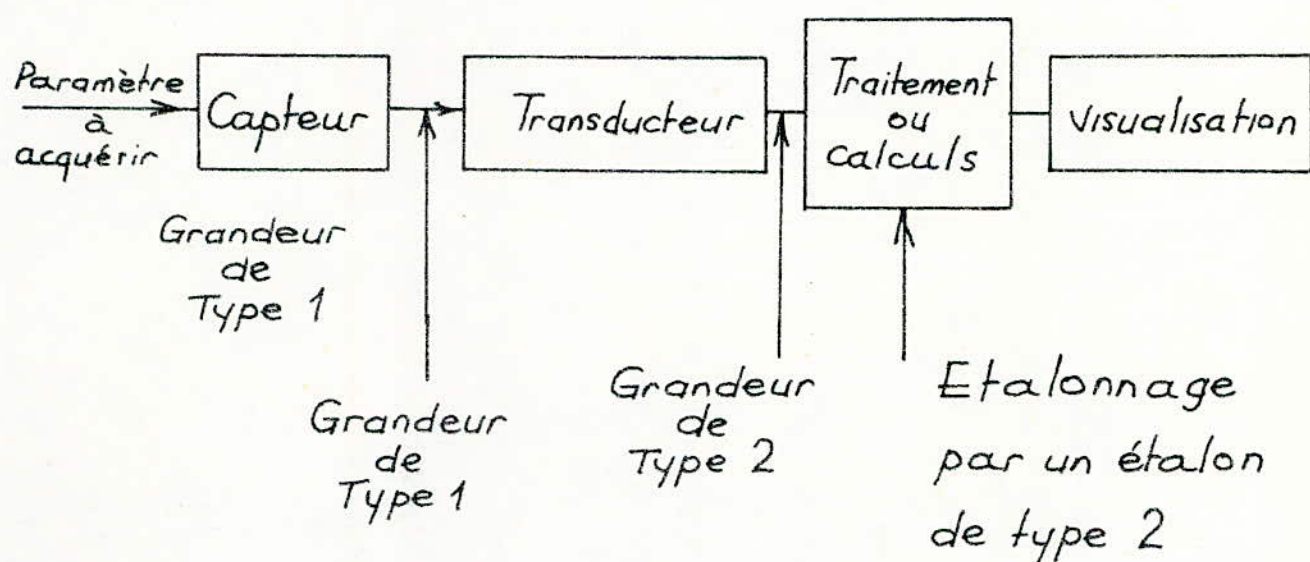
II.1.1. DEFINITION.

On appelle Capteur, tout organe de transformation d'une grandeur physique en une autre. Ce faisant, trois exemples d'illustration ont été suggérés pour essayer de fixer les idées :

- Un potentiomètre transforme une position en une tension électrique;
- Une dynamo tachymétrique transforme une vitesse en une tension électrique;
- Un thermocouple transforme une température en une tension électrique.

En guise de remarque, nous pouvons constater que le capteur se trouve généralement inséré au sein d'une chaîne que nous appellerons par la suite "Chaîne de mesure". Celle-ci n'est autre que l'ensemble des moyens mis en œuvre pour acquérir un paramètre, mesurer

La valeur ou ses variétés, le visualiser ou visualiser les résultats des calculs, traitement, ou mesures effectués. A priori, dans la quasi totalité des procédés de mesure, une chaîne comprend essentiellement les maillons ci-dessous représentés.



II. 1.2. CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES INSTRUMENTS DE MESURE DE TEMPERATURES

Nous n'allons pas ici détailler toutes les caractéristiques relevant de ces appareils de mesure ; car ceci n'est pas le but de cette étude. Mais, il est opportun de rappeler les trois caractéristiques essentielles régissant ce type d'appareil destiné à la mesure de température. Ce sont :

- La précision ;

- _ La Fidélité;
- _ La Sensibilité.

II. 1.3. RAPPELS SUR LES CAPTEURS DE TEMPERATURES

Les procédés de mesure de températures utilisent les thermomètres électriques qui sont constitués par un Capteur susceptible de fournir une grandeur électrique dépendant de la température. Actuellement, la mesure de température exploite la variation de la résistance électrique (aux basses et moyennes températures), La thermoélectricité (températures moyennes et élevées) et les lois du rayonnement du corps noir (températures élevées). Parmi tous ces processus qui nous permettent la mesure de température, un constat peut être fait: les capteurs sont en général constitués par des corps solides ayant la propriété d'être sensibles à la température. Plusieurs dispositifs sont donc à retenir :

- _ Thermomètres à dilatation;
- - - à changement d'état ;
- - - électriques ;
- - - Optiques .

Cette esquisse que nous venons de dresser constitue sommairement le nœud de ce travail.

II. 2. DEVELOPPEMENT DETAILLE DE CHAQUE TYPE DE CAPTEUR THERMIQUE

A%. II.2.1_ THERMOMETRES A DILATATION

Ils sont fondés sur le phénomène de la dilatation apparente d'un liquide dans une enveloppe fermée. On distingue à cet effet un sous ensemble constitué de thermomètres suivants:

- A enveloppe en verre;
- A enveloppe métallique.

a)_ THERMOMETRE A DILATATION DE LIQUIDE, A ENVELOPPE EN VERRE

On utilise la propriété des liquides de se dilater avec la température. Celle-ci est donnée suivant la Loi ci-dessous:

$$V_t = V_0 (1 + \alpha.t)$$

avec :

V_t - Volume à la température t

V_0 - " " " " " " 0°

α - Coefficient de dilatation

t - température

Comme nous le constatons cette loi est linéaire, ce qui confère une linéarité à l'échelle pour ce type de thermomètres. Ceux-ci sont utilisés dans l'industrie

Où ils exigent qu'ils soient placés dans une gaine métallique, afin que ces derniers soient protégés contre les chocs. Leur usage est plus marqué dans les laboratoires du fait de la fragilité et de l'impossibilité d'enregistrer leurs indications.

Exemples: - Thermomètre médical;
- Thermomètre en verre à maximum et minimum.

b) - THERMOMETRES A DILATATION DE LIQUIDE A ENVELOPPE METALLIQUE

Dans ce type de thermomètres, le liquide remplit entièrement l'appareil. Sous l'effet d'une augmentation de température, ce liquide se dilate et déforme un élément extensible. La mesure de la température se ramène alors, à la mesure de la déformation de cet élément.

c) - THERMOMETRES A DILATATION DE GAZ

Dans l'industrie, on utilise celui à volume constant lequel avait permis de définir en 1889 l'échelle centésimale. Le détecteur utilisé est un récipient rempli de gaz pur sous une pression de 20 à 50 bars pour la température minimale à mesurer. Son principal avantage est d'effectuer la mesure de très basses températures. L'échelle est égale-

ment linéaire en dépit de la loi :

$$P_t = P_0 (1 + K.t)$$

avec :

P_t : - Pression à la température t ($^{\circ}\text{C}$) ;

P_0 : - Pression à la température 0°C ;

K : - Coefficient d'augmentation de pression ;

t : - température .

d°. THERMOMETRES A DILATATION DE SOLIDE

On utilise :

- Soit la variation d'une tige métallique ;

- Soit la variation différentielle de longueur de lames minces accolées l'une à l'autre (bilames)

La loi suivie par la tige est du type :

$$l_t = l_0 (1 + \alpha.t)$$

avec :

l_t : - longueur à la température t ($^{\circ}\text{C}$) ;

l_0 : - longueur à la température $t = 0^{\circ}\text{C}$;

α : - Coefficient de dilatation ;

t : - température .

La graduation est quasiment linéaire sur toute l'étendue de l'échelle .

II. 2-2. THERMOMETRES A CHANGEMENT D'ETAT

a°. THERMOMETRES A PRESSION DE VAPEUR.

Lorsqu'on chauffe un liquide sous une pression

donnée, un équilibre s'établit entre les phases liquide et gazeuse à une température déterminée. En mesurant cette pression, on dispose donc d'une mesure de température.

b) - THERMOMETRES A REPERES

Ces Thermomètres sont constitués par une matière dont l'aspect change à une certaine température. A l'aide de plusieurs thermomètres dont les transformations s'effectuent à différentes températures, on peut situer un point de température par rapport aux repères.

c) - THERMOMETRES A CHANGEMENT DE FORME

Ce sont des éléments solides qui fluent sous l'action de leur propre poids à une température connue (montres fusibles utilisées couramment dans l'industrie des céramiques.). Ce sont des mélanges au nombre de quatre qui se présentent sous différentes formes : rectangle, losange, triangle isocèle et cercle. Ceux-ci fondent respectivement à 625°C , 1150°C , 1200°C et à 1320°C .

d) - THERMOMETRES A CHANGEMENT DE COULEUR

Ce sont en général des éléments solides dont la couleur change à une certaine température connue.

II-3. THERMOMETRES ELECTRIQUES

On distingue à cet effet plusieurs types de thermomètres électriques dont les plus courants sont :

- A résistance ;
- à Couple thermoélectrique ;
- à effet piézoélectrique.

a) THERMOMETRES A RESISTANCE

La thermométrie à résistance est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour la mesure industrielle de la température. Ce type de thermomètres exploitent le phénomène de la forte variation de la résistivité de certains métaux (platine) en fonction de la température. La fonction $R=f(t)$ pour le cas du platine se présente comme suit :

* de 0°C à $+850^{\circ}\text{C}$

$$R_t = R_0 (1 + A.t + B.t^2)$$

Avec: $A = 3,90802 \times 10^{-3}$

$B = 5,80195 \cdot 10^{-7}$

En effet, le platine est le plus utilisé pour diverses raisons :

- Celui-ci est facile à purifier chimiquement ;
- La variation de sa résistance en fonction de la température est une courbe facile à linéariser.

$t_{68}^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$R \ \Omega$	100	103,9	107,79	111,67	115,54	119,4	123,24	127,07	130,89	134,70	138,50

110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220
142,29	146,06	149,82	153,58	157,31	161,04	164,76	168,46	172,16	175,84	179,51	183,17

230	240	250	260	270	280	290	300
186,82	190,45	194,07	197,69	201,29	204,88	208,45	212,02

$$R_0 = 100 \Omega$$

$$\frac{R_{100}}{R_0} = 1.3850$$

Ces valeurs tabulées pour les sondes à résistance de platine ont été proposées par l'E IPT ($t_{68}^{\circ}\text{C}$) A. NIETO et F. PAUL Pages 82, 83

b) - THERMOMETRES A THERMISTANCE

Un détecteur de température encore plus sensible est la thermistance ou "thermistor". Celle-ci est constituée d'une partie poreuse d'oxyde d'uranium, de manganèse, de cobalt ou de nickel, placée entre deux conducteurs. Ici, le conducteur électrique est un semi-conducteur dont la résistance décroît de façon exponentielle en fonction de la température d'après la loi :

$$R_T = R_0 \cdot \exp B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

où :

R_T : Résistance à la température T

R_0 : " " " " " " " T_0

$$B = -4 \div -6 \cdot 10^{-2} / ^\circ\text{C}$$

(Selon le matériel constitutif)

$$T_0 = 273^\circ\text{K} \text{ soit } 0^\circ\text{C}$$

La caractéristique de cette résistance étant non linéaire, nous avons donc envisagé des procédés de linéarisation.

* PREMIER PRINCIPE : LINEARISATION PAR RESISTANCE SHUNT (Fig. II - 1)

Ce principe repose sur la mesure de la température, en passant par la mesure d'une tension aux bornes du thermistor, celui-ci étant parcouru par un courant constant. La linéarisation est ainsi obtenue en shuntant le thermistor par une résistance R_p

Ce principe présente un inconvénient car la linéarisation n'est obtenue que sur une plage limitée de la température. De plus, il y a perte de sensibilité à cause du shunt.

* DEUXIEME PRINCIPE : LINEARISATION PAR RESISTANCE SERIE
(Fig. II - 2)

Celui-ci consiste plutôt à une mesure de la température par la mesure du courant dans le thermistor alimenté à tension constante. On linéarise la caractéristique en ajoutant en série avec R_T une résistance R_S . Ce principe débouche sur les mêmes inconvénients que précédemment.

* TROISIEME PRINCIPE : INSERTION DU THERMISTOR DANS UN PONT
(Fig. II - 3)

Le pont peut être alimenté en courant continu ou en courant alternatif. L'intensité traversant le thermistor est choisie la plus faible possible de façon à éviter son auto échauffement par effet Joule. La linéarisation de l'ensemble peut être obtenue :

- Par des réseaux à diodes au niveau de l'ampli;
- plus simplement en équilibrant le pont au milieu de la plage de mesure souhaitée et en prenant $R_1 = R_2 \gg 10 R_T$ (Valeur de la Résistance du thermistor pour l'équilibre du pont). Cette solution est

Couramment usitée et permet d'obtenir des écarts de linéarisation inférieurs à $0,1^{\circ}\text{C}$ sur les plages $15^{\circ} + 20^{\circ}$.

D'autres procédés plus complexes sont également envisagés ; par exemple un thermistor double. Leurs performances sont bien sûr plus accrues (linéarité de $0,2^{\circ}\text{C}$ sur une plage de 80°C) ; mais à la complexité plus grande du circuit correspond un coût plus important du capteur.

- REMARQUE : (Fig. II - 4)

Deux thermistors de valeurs différentes soumis à la même température remplacent un thermistor avec une meilleure linéarité.

* LINEARISATION DE LA COURBE DE REPONSE DE LA CTN

Ce procédé de linéarisation utilise l'outillage mathématique appelé " Translation orthonormée ". En effet, la courbe de réponse d'une CTN peut être assimilée du moins pour une partie de sa définition à une hyperbole équilatère.

$$f = \frac{1}{T_c} = \frac{1}{R.C} = k.t$$

où :

f - fréquence de comptage ;

k - Coefficient de proportionnalité ;

t - Température en $^{\circ}\text{C}$

T_c - Période de comptage

R - Résistance de la CTN

INSERTION DU THERMISTOR DANS UN PONT

Fig II.3

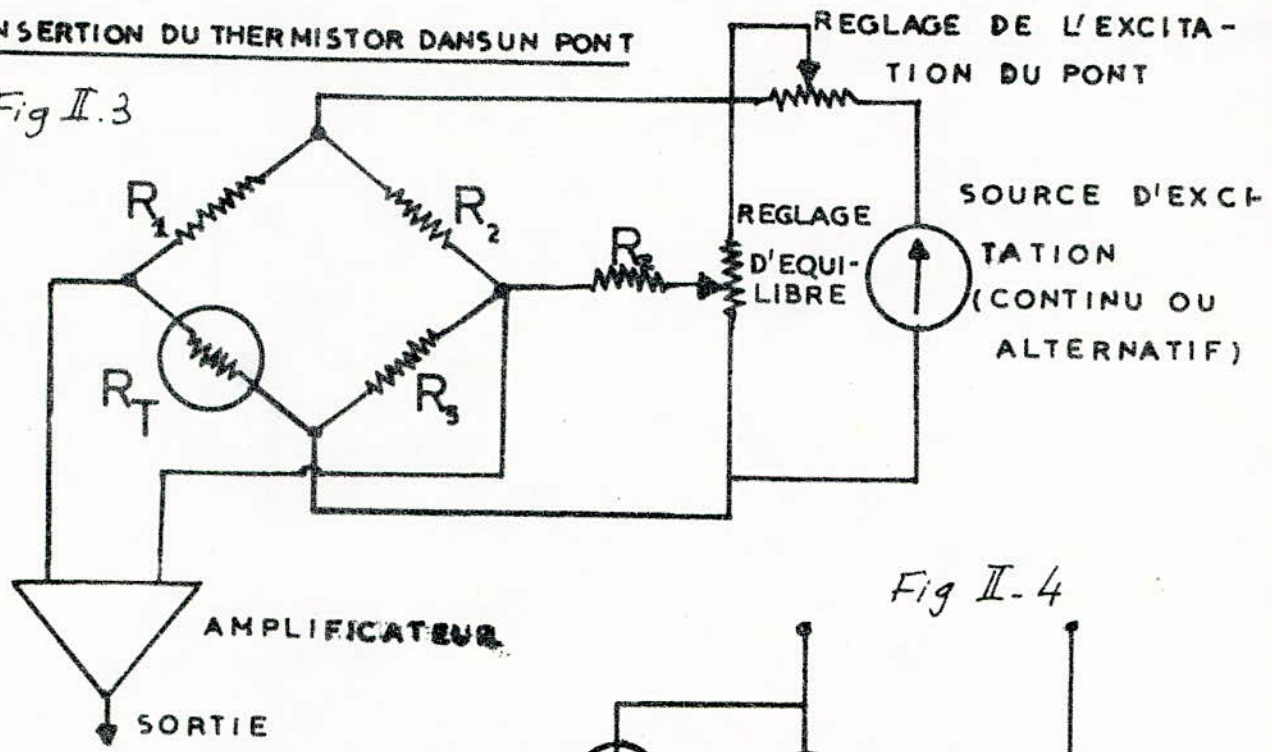


Fig II-4

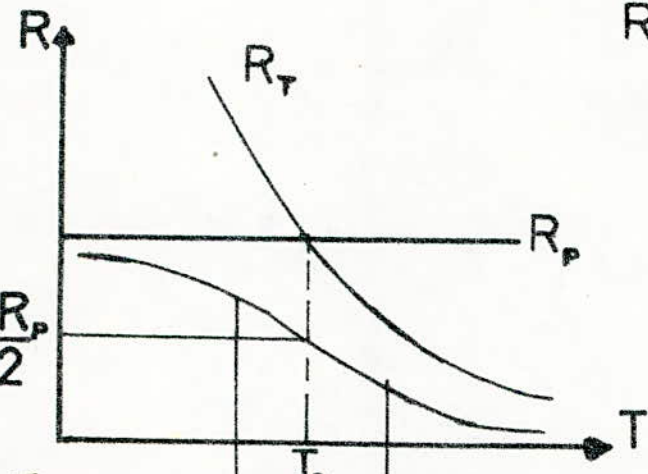
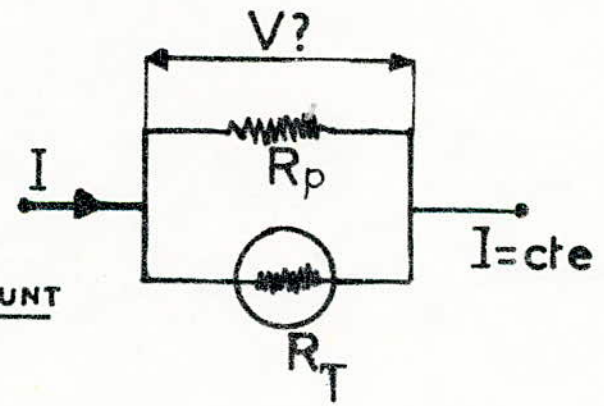
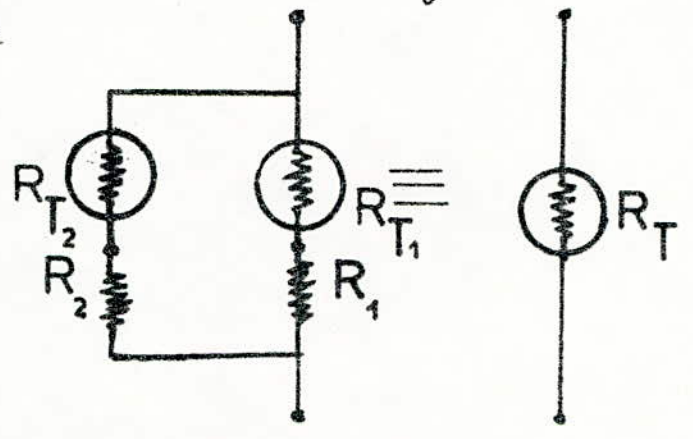


Fig II.1

LINEARISATION PAR RESISTANCE SHUNT

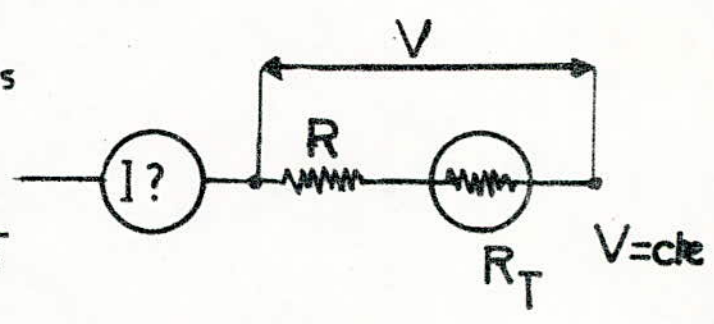
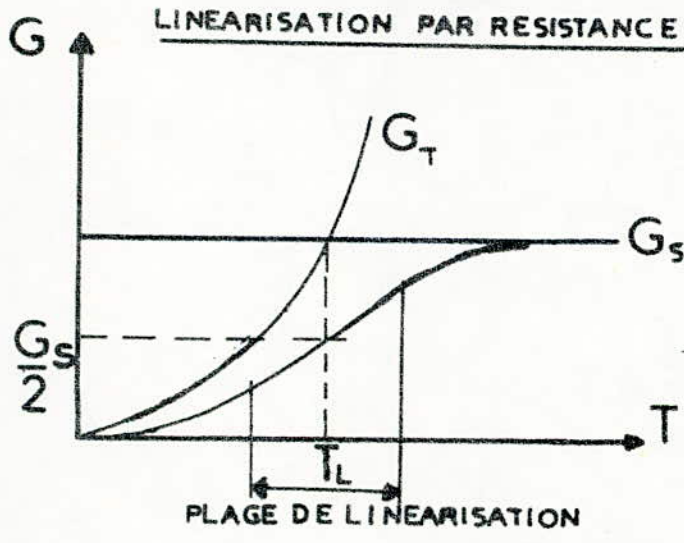
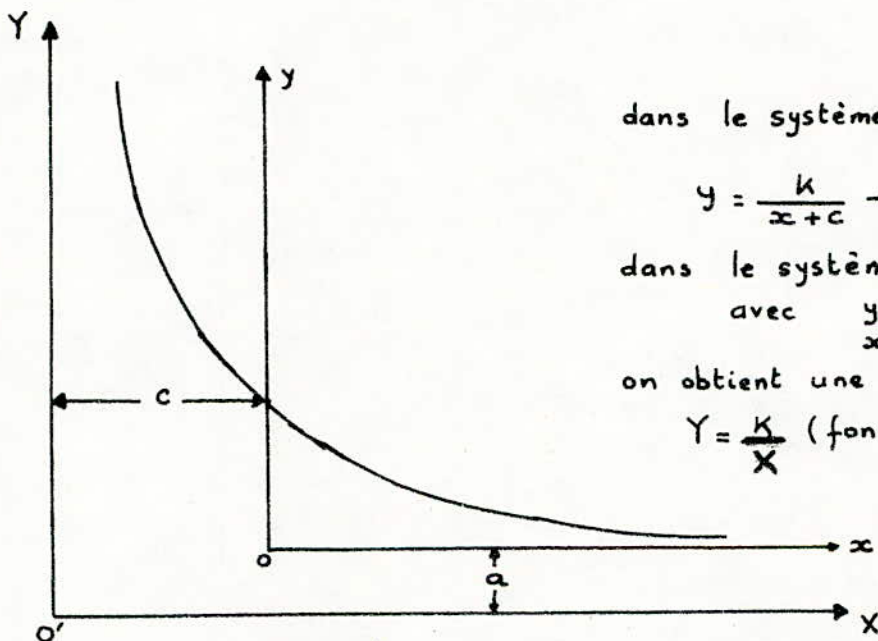
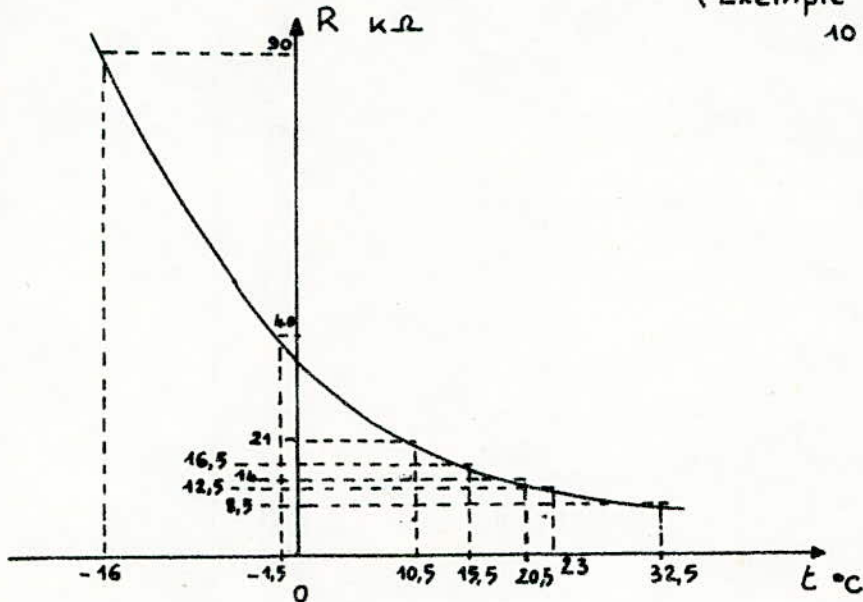


Fig II.2

LINEARISATION PAR RESISTANCE SERIE

courbe de réponse d'une CTN:

(Exemple d'une CTN de $10\text{ k}\Omega$)



dans le système xoy

$$y = \frac{k}{x+c} - a$$

dans le système $XO'Y$

$$\text{avec } y+a = Y$$

$$x+c = X$$

on obtient une "linéarisation"

$$Y = \frac{K}{X} \text{ (fonction hyperbole équilatère)}$$

Linéarisation par assimilation à une hyperbole équilatère

$$t_1 = -1,5^{\circ}\text{C}$$

$$R_{\text{CTN}_1} = 40\text{ k}\Omega$$

$$t_2 = 10,5$$

$$R_{\text{CTN}_2} = 21$$

$$t_3 = 23$$

$$R_{\text{CTN}_3} = 12,5$$

$$a = 4,35\text{ k}\Omega$$

$$c = 15^{\circ}\text{C}$$

Ces hypothèses ainsi faites concernent le système de comptage pour les thermomètres à affichage numérique devant avoir lieu en un temps donné et fixé. Les conclusions de cette exploitation mathématique sont les suivantes: une bonne linéarité est obtenue.

$$T = t + c \quad (\text{pour l'axe des températures})$$

$$R = R_{CTN} + a \quad (\text{pour l'axe des Résistances})$$

Ces expressions ainsi déduites nous amènent à conclure:

- 1)- d'insérer dans le circuit de la CTN une résistance en série de valeur équivalente à environ $4,35 \text{ k}\Omega$.
- 2)- d'ajouter systématiquement à l'affichage en degrés une valeur fixe de 15°C . Tout se passe comme si le Zéro absolu de la CTN correspondait à -15°C .

c°)- THERMOMETRES A COUPLE THERMOELECTRIQUE

Le principe du thermocouple est le suivant: le thermocouple constitue une application de l'effet Seebeck (1821) puis enfin de l'effet Peltier (1834). En effet, deux matériaux homogènes A et B dont les soudures sont portées à des températures différentes T_1 et T_2 sont parcourues par un courant. Toute coupure de ce circuit fermé créera une F.e.m. entre les deux extrémités de la coupure, quel que soit l'endroit de la coupure. En choisissant cet endroit à l'une des soudures nous obtenons un thermocouple apte à délivrer une d.d.p. .

$$V = k(T_2 - T_1)$$

avec: k - pouvoir thermoélectrique du couple A, B ; il n'est pas constant et dépend de la température.

Les thermocouples ont de nombreux avantages:

- Petite taille;
- Simplicité de fabrication et robustesse;
- Linéarisation pas nécessaire pour les faibles variations de température, ce qui facilite l'affichage numérique direct;
- Bonne stabilité à long terme.

En revanche, on peut leur reprocher:

- Leur faible tension de sortie;
- La nécessité d'une température de référence.

L'Inconvénient de la faible tension de sortie peut être facilement contourné en employant plusieurs thermocouples en série. Le couple est choisi en fonction de sa gamme de température, de sa sensibilité et, dans une moindre mesure, de sa linéarité. Comme exemple, le fer-constantan est le plus linéaire, le Cuivre-Constantan est le moins linéaire. Cette non linéarité peut être corrigée à l'aide d'un circuit électronique adéquat de Caractéristique non linéaire appelé: Linéarisateur. Nous avons à ce sujet proposé un schéma qui consiste à linéariser un thermocouple (chromel-alumel) dans

la partie traitant les problèmes de techniques numériques.

d) - THERMOMETRES A EFFET PIEZOELECTRIQUE

Le capteur est cette fois-ci constitué d'une lame de quartz, du même type que celles employées dans la stabilisation des oscillateurs. En effet, on sait que les fréquences de résonance d'une lame de quartz sont fonction de la température; d'où la relation :

$$f_T = f_0 (1 + aT + bT^2 + cT^3)$$

avec :

$$\begin{array}{l} f_T \text{ - fréquence à la température } T \\ f_0 \text{ - " " " " " " } 0^\circ\text{C} \end{array}$$

Les termes b et c peuvent être annulés par une taille particulière de la taille de quartz et par le choix d'un mode de vibration particulier. Ces conditions aboutissent donc à la formule ci-après :

$$f_T = f_0 (1 + a.T)$$

où :

$$a = 35,4 \text{ ppm}/^\circ\text{C} \quad (35,4 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C})$$

La linéarité est assurée par une plage de mesure.

L'information obtenue est donc exploitable directement par un affichage numérique. Cet instrument reste malgré tout un instrument de laboratoire.

II.2.4 - THERMOMETRES OPTIQUES

Les thermomètres à résistance et les thermocouples sont difficiles à utiliser au-delà de 1500°C ,

On les remplace par des systèmes de mesures optiques. Autrement dit, on utilise la loi de rayonnement des corps en fonction de la température; celle-ci étant connue sous la loi de Stefan - Boltzmann.

$$q_2 = A_1 \sigma T_1^4 ; [\text{kcal/h}]$$

avec:

A_1 - La surface en m^2 ;

T_1 - Température en $^\circ\text{K}$;

σ - Constante de Stefan - Boltzmann ($\sigma = 4,88 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kcal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot (^\circ\text{K})^4}$)

- Pour un corps noir (ou radiateur idéal) nous avons:

$$q_2 = A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

où: T_2 - température superficielle de l'enceinte.

- Pour un corps gris:

$$q_2 = A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \cdot \epsilon_1 ; \epsilon_1 - \text{Coefficient d'émissivité}$$

Le Rayonnement thermique est généralement considéré comme une émission désordonnée de photons entre les longueurs d'ondes 10^{-7} à 10^{-4} mètre. Ce bref rappel nous permet ainsi de définir ces thermomètres (Pyromètres) qui se divisent en trois grandes classes.

- Pyromètres à radiation totale;
- Pyromètres optiques monochromatiques;
- Pyromètres de couleur.

a°) - PYROMETRES A RADIATION TOTALE

Ils sont fondés sur la mesure du rayonnement total chaud, celui-ci est concentré par une lentille ou

des diaphragmes placés en série sur la soudure chaude d'un ou plusieurs thermocouples raccordés en série. C'est à Fery que revient l'honneur d'avoir conçu le premier pyromètre à radiation totale. Un avantage à souligner: l'enregistrement à distance.

b) - PYROMETRES MONOCHROMATIQUES

Ceux-ci, quant à eux, sont fondés sur la mesure du rayonnement partiel. On ne s'intéresse qu'à une bande étroite du spectre de rayonnement. Le capteur est alors un capteur optique sensible à cette bande de fréquences. Ces pyromètres possèdent un filtre qui permet d'être sensible au rayonnement seulement dans une bande étroite de longueur d'onde. La loi de Wien s'écrit :

$$L_{\lambda T}^{\circ} = C_1 \lambda^{-5} \cdot \exp(-C_2/\lambda T) \quad [W/m^2 \cdot str.]$$

avec :

λ : longueur d'onde en mètre

T : Température en $^{\circ}K$

$L_{\lambda T}^{\circ}$: Luminance monochromatique du corps noir, à la température T

C_1, C_2 : constantes énergétiques

Ce type de pyromètre fut étudié par Le Chatelier. Ils permettent un étalonnage rapide et facile avant la mesure, et se prêtent bien à l'enregistrement.

c) - PYROMETRES BICHROMATIQUES OU DE COULEUR

Ces pyromètres sont fondés sur la mesure du

rapport des luminances. Ils effectuent ainsi deux mesures de luminances relatives à deux longueurs d'ondes sélectionnées grâce à deux filtres optiques.

$$L_{\lambda_1 T} = \varepsilon_{\lambda_1 T} \cdot L_{\lambda_1 T}^{\circ}$$

$$L_{\lambda_2 T} = \varepsilon_{\lambda_2 T} \cdot L_{\lambda_2 T}^{\circ}$$

L'Application de ces pyromètres peut être étendue à des corps "non gris" en introduisant la notion de "température de couleur" de ces corps qui est la température du corps noir donnant des luminances telles que :

$$\frac{L_{\lambda_1 T}}{L_{\lambda_2 T}} = \frac{L_{\lambda_1 T_c}^{\circ}}{L_{\lambda_2 T_c}^{\circ}}$$

L'intérêt principal de ces pyromètres repose sur la détermination de T_c (Température de couleur) qui dépend de λ_1 et λ_2 . Le passage à la température vraie se fait par la formule :

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_c} + \frac{\text{Log}(\varepsilon_{\lambda_1 T} / \varepsilon_{\lambda_2 T})}{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}$$

Les pyromètres à couleur offrent l'avantage d'éliminer l'influence des coefficients d'émission, et se prêtent à l'enregistrement.

d°)- LUNETTE A DISPARITION DE FILAMENT

Cet appareil est portatif lorsqu'il est équipé avec des piles, de plus il est précis. L'Ampèremètre comporte deux graduations correspondant au réglage avec ou

Sans écran. Il se place à n'importe quelle distance de la pièce chaude.

e°)- PYROMETRES A DILATATION

Ils présentent l'inconvénient de ne pas permettre la lecture à distance et d'être assez fragiles.

CONTROLE DES PYROMETRES

Ces appareils sont très précis mais délicats, ce qui nécessite un contrôle régulier. On emploie généralement une canne étalon ou un appareil à disparition de filament. On peut également utiliser des bains métalliques dont on connaît le point de fusion ou d'ébullition. Ce type d'appareils, rappelons-le, sont utilisés dans l'industrie en l'occurrence dans les traitements thermiques.

B°)- AUTRES TYPES DE CAPTEURS THERMIQUES

II.2.1- TRANSDUCTEURS A JONCTION SEMI CONDUCTEUR

Les jonctions PN des diodes et des transistors constituent la gamme des composants thermosensibles. Si l'on fait subir une variation de température à une jonction PN traversée par un courant constant, on constate que la variation de tension à ses bornes est rigoureusement proportionnelle à la variation de température. La linéarité du phénomène est quasi parfaite, ce qui facilite d'une part l'étalonnage, et d'autre part l'affichage (possibilité d'affichage numérique sans linéarisation)

Ils sont utilisés en électronique médicale, par exemple:

- Cas des diodes au Silicium ou au germanium ;
- Cas d'une jonction PN d'un transistor

II.2.2 - TRANSDUCTEUR EXPLOITANT LA VARIATION D'UNE CAPACITE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE

Le Capteur est cette fois-ci constitué d'un condensateur à diélectrique céramique. En effet, on maîtrise parfaitement, à la fabrication, le coefficient de température de ce type de condensateur.

$$C = 0,0885 \frac{K.S}{d} \quad [pF]$$

avec:

- S - Surface d'une plaque en cm^2 ;
- d - distance entre plaques parallèles en Cm ;
- K - Constante diélectrique de ce qui se trouve entre les plaques ($K=1$ pour l'Air).

Ce condensateur fait partie d'un circuit oscillant, si les ΔT sont petits ($\pm 5^\circ C$), la fréquence de résonance du circuit oscillant linéairement avec la température. Une détection synchrone suivie d'un fréquence-mètre permet l'affichage direct du ΔT .

II.2.3 - ELECTRONIQUE DU CAPTEUR

Certaines firmes utilisent des circuits intégrés comme capteurs de température.

a) - SERIE : LM 134 | LM 234 | LM 334

Cette famille constitue des sources de courant

ajustables. Elles sont alimentées en inverse sous plus 20 volts et ont de plus un faible débit de courant (de l'ordre de quelque micro ampère). La tension utilisée est de l'ordre de 64 mV à 25°C pour le cas de LM 134. La caractéristique liant la tension et la température absolue est quasiment linéaire :

$$I_{set} = \frac{227 \mu V / ^\circ K \cdot T}{R_{set}}$$

b°)- SERIE : LM 135 / LM 235 / LM 335

Cette famille n'est plus "grand public" à cause de leur prix élevé et par conséquent rare. Heureusement la firme Siemens sortait un capteur de température particulièrement intéressant : Le KTY 10. Celui-ci est très économique et possède deux fils seulement ; ce qui simplifie beaucoup la liaison avec l'électronique de conversion et d'affichage. Cependant, toutefois nous parlerons du LM 335 qui est employé pour envoyer un signal en fonction de la température dans une Serre, au régulateur de température. En simplifiant son étude, celui-ci est assimilé à une diode Zener dont la tension de coude est alors une fonction linéaire de la température absolue.

c°)- REF - 02

Ce type de capteur est constitué par une source de courant constant. La variation du courant en fonction de la température est une fonction linéaire. A cet égard, nous citerons

un autre type de capteur Le LX5700 qui a existé, mais celui-ci a disparu. Ce capteur travaillait dans la même gamme que le REF-02, celui-ci en revanche avait l'inconvénient d'un branchement à trois fils.

d.)- CAPTEUR : AD590

Ce capteur, dont le rôle est similaire à celui d'une sonde de température, délivre un courant proportionnel à la température absolue. Il n'est autre qu'une source de courant, celui-ci travaille dans la même gamme de température que le LM 135. Avec ce type de capteur, on n'a pas besoin de linéarisation, d'amplificateur de précision, du pont de mesure ou de compensation de jonction froide. La plus simple des applications ne nécessite qu'une source de tension, une résistance et un voltmètre. La haute impédance de la source de courant rend l'AD 590 insensible aux chutes de tension dans les câbles de liaison, ce qui confère au capteur une grande souplesse pour les mesures éloignées.

En conclusion, nous dressons ainsi de différents tableaux où sont insérés les différents paramètres nécessaires pour chaque type de Capteur envisagé.

Identification du capteur de t :	Gamme d'utilisation	Précision	Linéarité	Sensibilité	Temps de réponse
Thermomètres à dilatation de <ul style="list-style-type: none"> • liquide (enveloppe en verre) <ul style="list-style-type: none"> - pentane - toluène - alcool - alliage de gallium 	<ul style="list-style-type: none"> -200°C ÷ +30°C -80°C ÷ +100°C -80°C ÷ +70°C -35°C ÷ +750°C 	faible	Oui	0.001 degré pour 1 mm Hg	Celui-ci est d'autant plus court suivant que : <ul style="list-style-type: none"> - la température est élevée - les courants de convection augmentent. - la conductibilité est grande. - les dimensions sont réduites.
Exemple : type médical <ul style="list-style-type: none"> • liquide (enveloppe métallique) <ul style="list-style-type: none"> - alcool - xylène - mercure 	<ul style="list-style-type: none"> -50°C ÷ +150°C -40°C ÷ +400°C -35°C ÷ +540°C 	//	Oui	//	
<ul style="list-style-type: none"> • de gaz (gaz utilisés : He, H₂, N₂, CO₂) 	-100°C ÷ +600°C	± 2 %	Oui	//	
<ul style="list-style-type: none"> • de solide 	-50°C ÷ +550°C	± 2 %	//	//	

Identification du capteur de t°	Gamme d'utilisation	Précision	Linéarité	Sensibilité	Temps de réponse
- Thermomètres électriques a/- à résistance <ul style="list-style-type: none"> . Platine . Nickel . Cuivre 	- $260^{\circ}\text{C} \div 850^{\circ}\text{C}$ - $80^{\circ}\text{C} \div 300^{\circ}\text{C}$ - $200^{\circ}\text{C} \div 260^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,01 \text{ deg.}$ $+ 0,12 \%$ $- 1,61 \%$ 0	$+ 0,38^{\circ}\text{C}$ $- 3,2^{\circ}\text{C}$ 0	\equiv	1 à 2 mn dans un liquide. 15 à 16 mn dans l'atmosphère gazeuse
b/ A thermistor ou à CTN	$- 80^{\circ}\text{C} \div 700^{\circ}\text{C}$	$1/10^{\circ}\text{C}$	$0,2^{\circ}\text{C} \text{ à } 80^{\circ}\text{C}$	$1/100^{\circ}\text{C}$	fonction de la matière (masse de la CTN) Exemple: la perle de la grosseur d'une tête d'épingle atteint l'équilibre thermique en quelques secondes, tandis qu'il faut des minutes pour les autres 10s par exemple.
Thermomètres à couple thermo-électrique. Exemples: <ul style="list-style-type: none"> . Cuivre / constantan . Fer / constantan 	- $100^{\circ}\text{C} \div -40^{\circ}\text{C}$ - $40^{\circ}\text{C} \div 100^{\circ}\text{C}$ $100^{\circ}\text{C} \div 350^{\circ}\text{C}$ $0^{\circ}\text{C} \div 400^{\circ}\text{C}$ $400^{\circ}\text{C} \div 800^{\circ}\text{C}$	$\pm 4^{\circ}\text{C} \text{ à } 200^{\circ}\text{C}$ $\pm 2 \%$ $0,8^{\circ}\text{C}$ $\pm 0,75 \%$ $\pm 3 \%$ $\pm 0,75 \%$	\equiv	$45 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ $52 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	fonction de sa configuration mécanique et peut être ramené à 10ms pour un couple non protégé. $0,1 \text{ s} < t < 5 \text{ s}$

Identification du capteur de t°	Gamme d'utilisation	Précision	Linéarité	Sensibilité	Temps de réponse
<ul style="list-style-type: none"> • chromel/constantan - Groupe Nickel chrome - nickel allié • Platine rhodié 10% - Platine 	<ul style="list-style-type: none"> 0°C ÷ 500°C 0°C ÷ 400°C 400°C ÷ 1250°C 0°C ÷ 600°C 600°C ÷ 1600°C 	<ul style="list-style-type: none"> ± 3°C ± 0.75 % ± 2,5°C ± 0.4 % 	<ul style="list-style-type: none"> // // 	<ul style="list-style-type: none"> 80 μV/°C 40 μV/°C 6.5 μV/°C 	<ul style="list-style-type: none"> //
Thermomètres à effet piézoélectrique	-40°C ÷ 250°C	± 0.05 %	//	1000 Hz/°C	//
Pyromètres optiques <ul style="list-style-type: none"> • monochromatiques Exemple : type P.E 3N S.A.P.E • à radiation totale • lunette à disparition de filament • à dilatation 	<ul style="list-style-type: none"> 700°C ÷ 3500°C -40°C ÷ 2000°C 800°C ÷ 2500°C 200°C ÷ 1000°C 	<ul style="list-style-type: none"> très précis plus précis moins précis très précis 	<ul style="list-style-type: none"> // // 	<ul style="list-style-type: none"> plus sensible (0.5°C) moins sensible 	<ul style="list-style-type: none"> 2s < t < 6s 0.01s extrêmement court
Jonction PN <ul style="list-style-type: none"> • diode (silicium) • transistor a/- Germanium b/- silicium 	<ul style="list-style-type: none"> 75°C ÷ 100°C 150°C ÷ 200°C 	//	//	<ul style="list-style-type: none"> -2,8 mV/°C pour I₁₀^{μA} -2 mV/°C pour I₂^{1mA} - 2 mV/°C 	//

Identification du capteur de t°	Gamme d'utilisation	Précision	Linéarité	Sensibilité	Temps de réponse
- Famille : LM 134 / LM 234 / LM 334 • LM 134 • LM 234 • LM 334	-55 °C ÷ 125 °C -25 °C ÷ 100 °C 0 °C ÷ 70 °C	± 3 % //	//	//	//
- Famille : LM 135 / LM 235 / LM 335 • LM 135 • LM 235 • LM 335 • KTY 10	-55 °C ÷ 150 °C -40 °C ÷ 125 °C -70 °C ÷ 100 °C -50 °C ÷ 150 °C	//	1 °C de 0 °C à 100 °C	//	20s et descend à 1s dans un bain d'huile
- REF - 02 - LX 5700	-55 °C ÷ 125 °C -55 °C ÷ 125 °C	0.75 % //	± 0.4 % //	2.1 mV/°C //	5 µs //
AD-590 AD-590 JH AD-590 KH AD-590 LH	-55 °C ÷ 150 °C	± 5 °C ± 2 °C ± 1 °C	non linéarité ± 2 % - " - ± 2 % - " - ± 0.5 %	//	//

CHAPITRE III

SCHEMAS DE MESURE ET
MONTAGES POUR CAPTEURS

Ce chapitre a pour souci majeur de mettre en évidence la quasi-totalité des procédés susceptibles de mesurer la température. A priori, eu égard au chapitre antérieur, nous pouvons affirmer que les moyens électriques sont peut-être les plus utilisés dans ce cas de mesures. Ces dispositifs en effet peuvent être divisés en trois catégories :

— La première utilise la variation des dimensions physiques d'un matériau lorsque sa température change ; Ce matériau peut être un liquide (Mercure) ou un solide (languette bimétallique) ;

— La deuxième fait appel aux variations des propriétés électriques de certains matériaux : Cas précis des résistances et des thermocouples ;

— Enfin, la dernière se compose de pyromètres qui observent les corps chauds pour en mesurer leur température. Cette séquence qui renferme ces dispositifs ne comportera guère la première catégorie ci-dessus rappelée compte tenu de leur faible précision.

III. 1. THERMOMETRES A RESISTANCE

Ces thermomètres utilisent essentiellement :

- les galvanomètres ;
- les ponts de Wheatstone.

III-1-1 PRINCIPE DE MESURE (Fig-III-1)

L'Appareil est composé d'une résistance R_s soumise à la température à mesurer. Le courant i qui circule dans le circuit est de l'ordre quelque milli ampère et a pour expression :

$$i = \frac{E}{r + r_l + R_g + R_s}$$

Avec :

- r - Résistance du générateur ;
- r_l - Résistance de la ligne ;
- R_g - Résistance du galvanomètre ;
- R_s - La sonde ;
- E - La F.e.m. de la pile .

Ce montage présente des inconvénients qui engendrent les causes d'erreurs qui faussent ainsi la valeur de i . R_g et r_l varient avec la température et font varier le courant i . Entre autre, la pile se décharge dans le temps d'où la diminution de la F.e.m., ce qui suscite la variation de i . Pour obvier à ces inconvénients, des modifications sont nécessaires :

- Alimentations stabilisées, donc toujours constantes ;
- Lignes et cadres constitués par des métaux de résistance constante. Mais, il est à souligner que ces procédés sont très onéreux, d'où l'usage d'autres systèmes

a.) MESURE PAR GALVANOMETRE A CADRES CROISES

Il importe que l'instrument ait une faible consomma-

tion de courant. Car, une intensité trop élevée risque de provoquer un échauffement supplémentaire du thermomètre à résistance. D'après la théorie du galvanomètre, il en résulte que l'équipage mobile s'équilibre à une angulaire fonction du rapport $\frac{I_1}{I_2}$ (Fig III - 2)

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2 + L_1 + F_1 + F_2}{R_1 + L_2}$$

avec: R_2 - Résistance thermométrique variable avec la température;

R_1 - Résistance invariable avec la température;

E - Source (transformateur - redresseur)

III.1.2 MONTAGES UTILISANT LES PONTS DE WHEATSTONE

Ces montages reposent sur deux procédés, à savoir:

- Ponts de Wheatstone équilibrés;
- Ponts de Wheatstone non équilibrés.

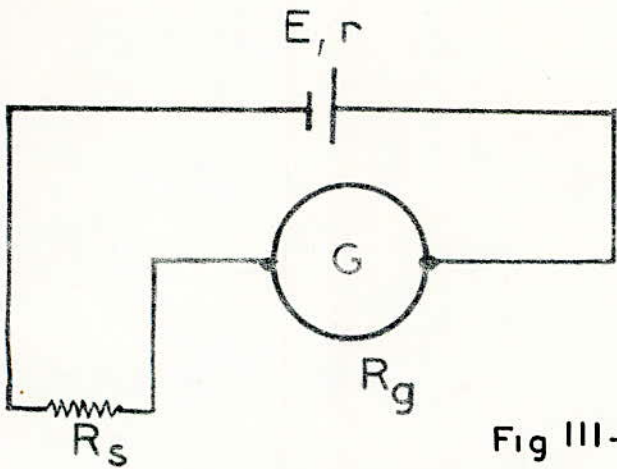
a°. MESURE AVEC PONT DE WHEATSTONE EQUILIBRE

(Fig III - 4 - a et b)

Lorsque le galvanomètre est parcouru par aucun courant, un même courant I_2 passe dans la résistance. Les deux points: A et B sont au même potentiel, d'où l'expression:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_5}$$

Un autre type de montage peut être utilisé, dans celui-ci R_1 et R_2 sont de même valeur. Ce qui est généralement



THERMOMETRE A RESISTANCE

GALVANOMETRE A CADRES CROISES

Fig III-2

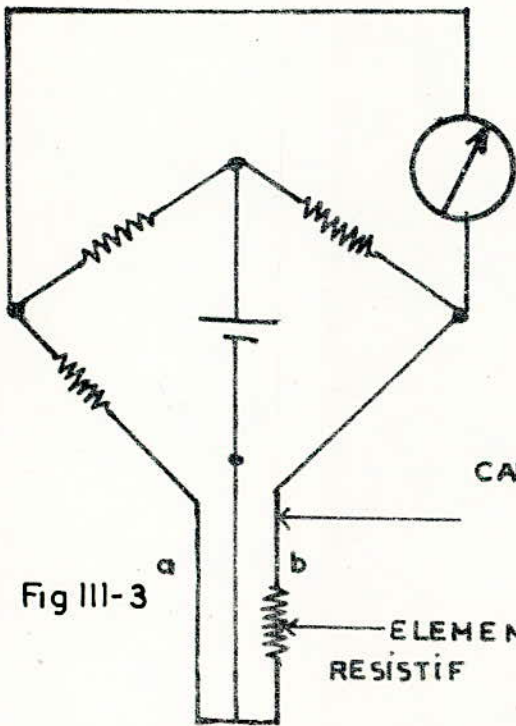
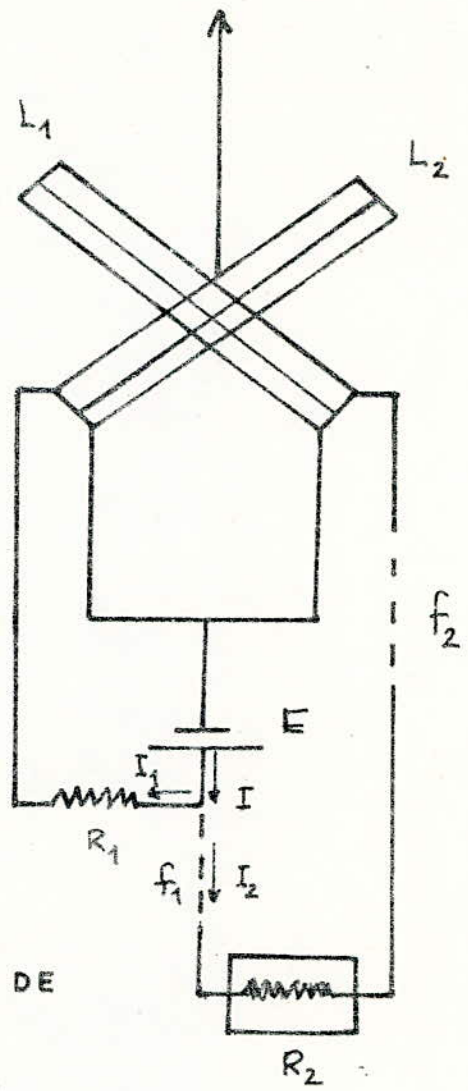
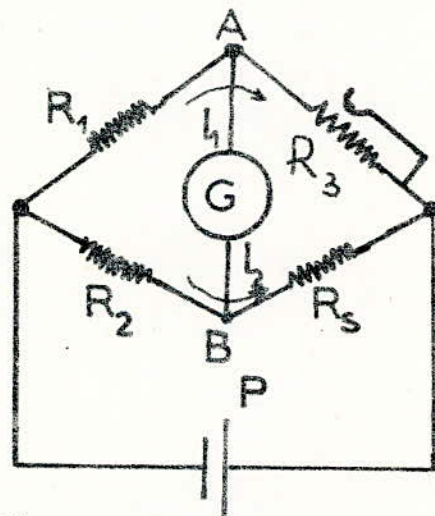


Fig III-3

MONTAGE CLASSIQUE D'UN THERMOMETRE A RESISTANCE



(a)

PONT DE WHEATSTONE E QUILIBRE

Fig III-4

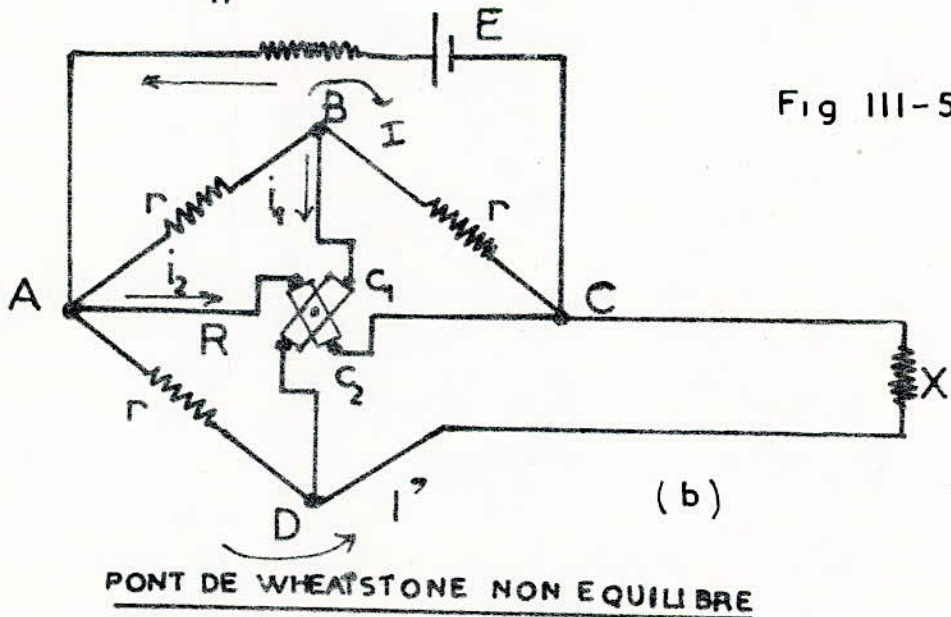
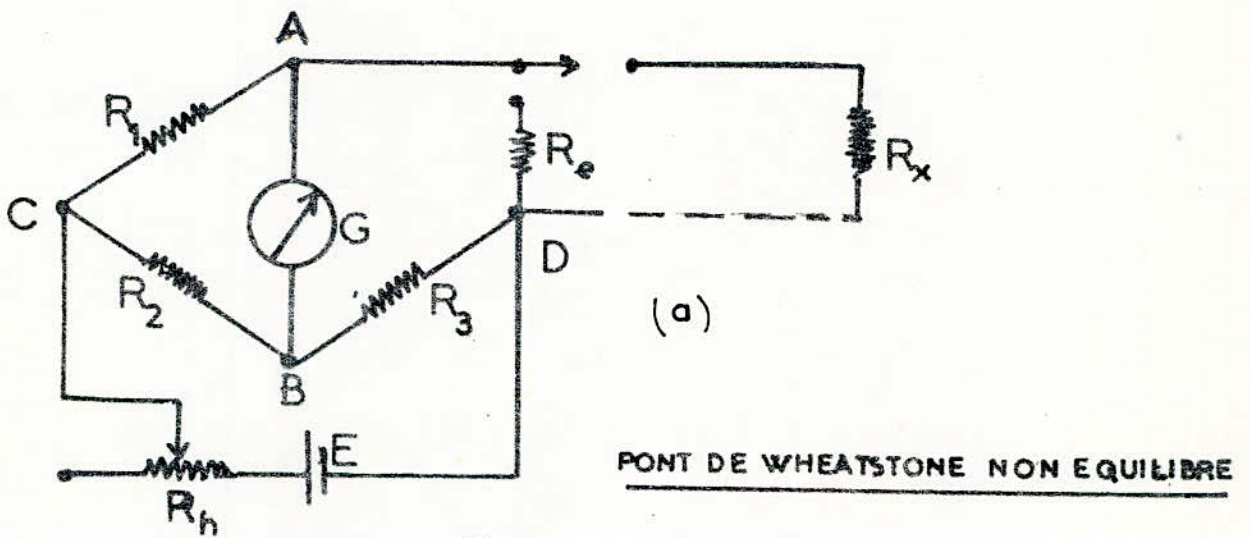
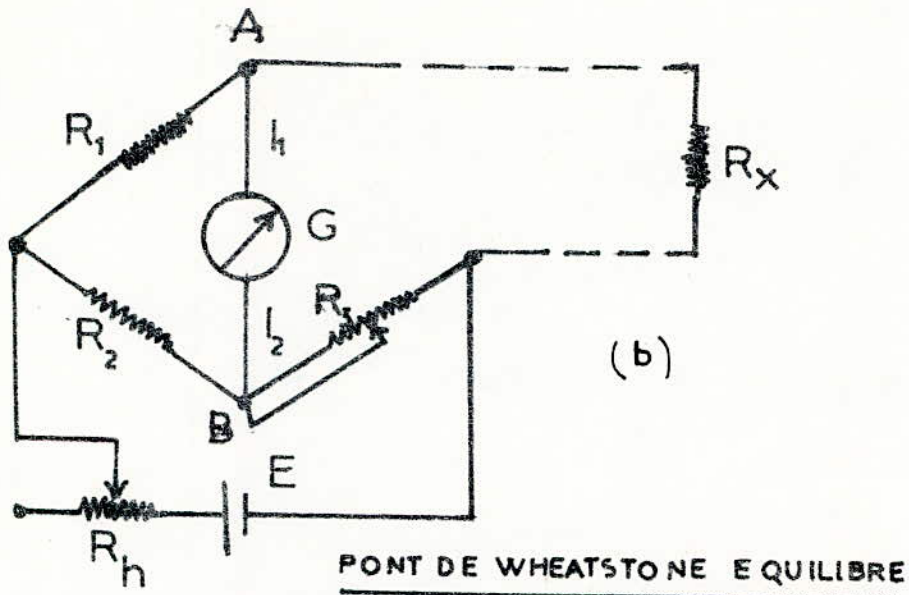


Fig III-5

le cas dans ce genre d'appareil. R_x serait égale à R_3 lorsque le pont est en équilibre :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_3}$$

Citons à titre d'exemple un dispositif qui avait été mis en œuvre reconnu sous l'appellation du Pont de mesure "Tempavi" (construit par la S.A. Camille Bauer de Bâle). Celui-ci permet la détermination avec précision des températures comprises entre -22°C à $+182^\circ\text{C}$. Son seul inconvénient inhérent est de nécessiter une exposition prolongée de la sonde sur l'objet dont la température doit être mesurée.

b) - MONTAGE AVEC PONT DE WHEATSTONE NON-EQUILIBRE

Le montage est identique au précédent. Mais ici, on remplace la résistance R_3 ajustable par une résistance fixe. Le Thermomètre à résistance variable R_x est intercalé dans une branche du pont, alors que les trois autres branches sont constituées de résistances fixes R_1, R_2, R_3 insensibles aux variations de la température. Ces trois résistances sont calculées de telle façon que la température minimale à mesurer avec le thermomètre R_x (par exemple 0°C) le galvanomètre ne dévie pas. La tension appliquée entre les points C et D doit avoir une valeur bien déterminée, pour cela on insère le rhéostat R_h servant au réglage de celle-ci.

(Fig. III - 5 a et b)

c). MESURE AVEC PONT DE WHEATSTONE NON EQUILIBRE EN PRESENCE D'UN GALVANOMETRE A CADRES CROISES

Dans ce montage, la tension d'alimentation E et la résistance des cadres sont sans influence sur la mesure. Cet instrument fonctionne comme voltmètre, La Résistance de chacun des cadres du galvanomètre devra être très grande. Par ailleurs, la résistance R des cadres étant très grande vis à vis des résistances r et X , on peut admettre que les courants i_1 et i_2 circulant dans les cadres C_1 et C_2 sont très petits vis à vis des courants circulant dans r et X , d'où l'équation :

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{1}{2r} - \frac{1}{r+X} = \frac{1}{2} - \frac{r}{r+X}$$

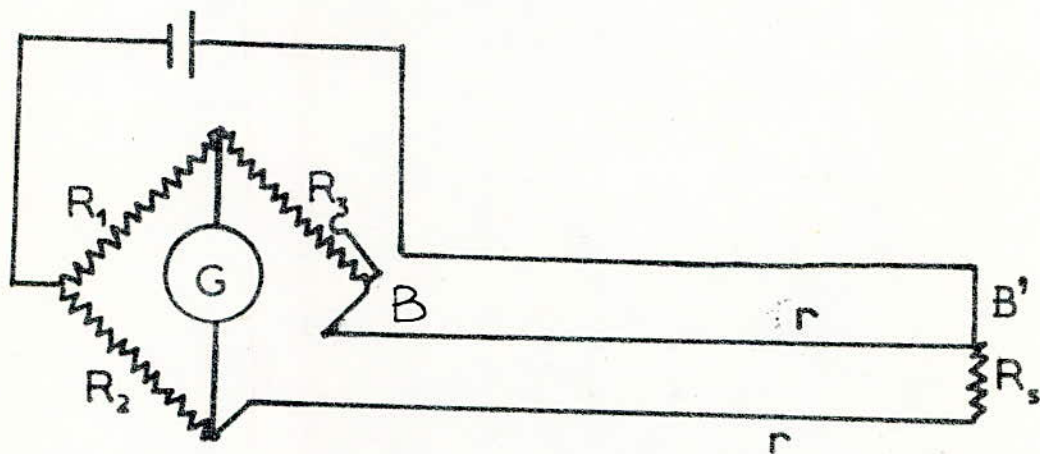
On constate que le déplacement du galvanomètre à cadres croisés est proportionnel au rapport $\frac{i_1}{i_2}$, de plus ce rapport est indépendant de R et de E .

III- 1-3- MONTAGES PRATIQUES

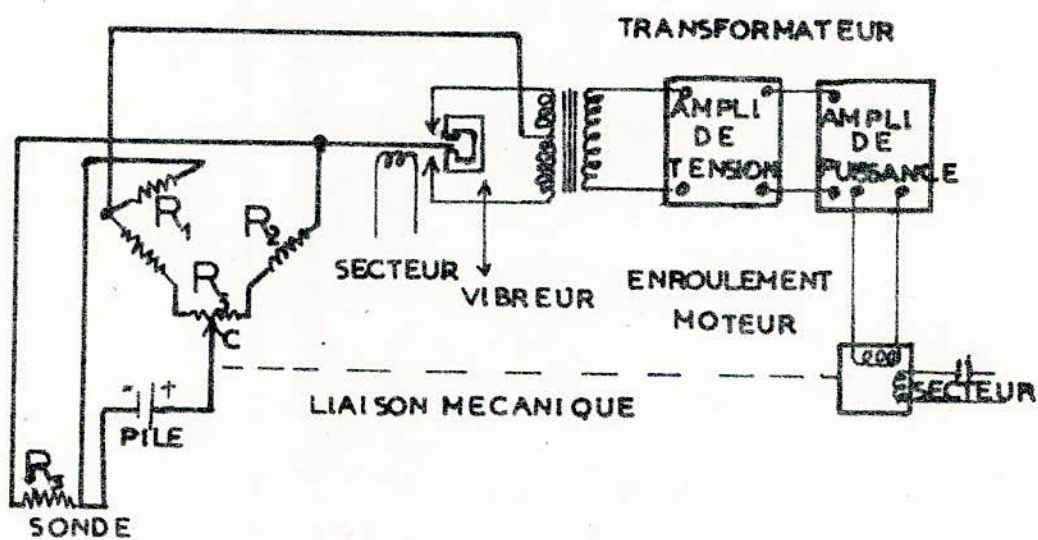
a.)- COMPENSATION DE LA RESISTANCE DE LIGNE

(Fig. III- 6)

On déplace le fil de liaison de l'alimentation de B en B' . En faisant cette opération, on ajoute à la résistance R_3 du point une longueur de ligne de résistance r_2 . On ajoute également à la résistance de la sonde R_5 une longueur de ligne de résistance r_1 . Comme $r_1 = r_2$ (même dimension de fils), ces résistances variant en même temps, de la même



COMPENSATION DE LA RESISTANCE DE LIGNE Fig III-6



PONT DE WHEATSTONE A EQUILIBRAGE AUTOMATIQUE Fig III-7

valeur, et étant placées dans des branches opposées du pont l'équilibre n'est pas faussé.

b) - APPAREIL A EQUILIBRAGE AUTOMATIQUE (Fig. III-7)

On utilise un pont équilibré, avec résistance d'équilibrage. Le galvanomètre est remplacé par un système de détection dont le but est double :

Premièrement, elle transforme le courant continu de déséquilibre en courant alternatif, ceci pour faciliter l'amplification.

Deuxièmement, l'étage détecte le sens de déséquilibre.

Le moteur électrique d'équilibrage est un moteur diphasé.

En conclusion, contrairement aux thermocouples, où la température mesurée dépend de la température de référence, pour les sondes à résistance, seule la température de l'élément sensible est prise en compte. C'est un avantage considérable par rapport aux thermocouples car cela contribue à rendre les mesures plus simples, et partant plus précises.

III - 2 THERMOMETRES A THERMISTANCE

Ce type de thermomètres, comme nous l'avions vu pour ceux à résistance, utilisent quasiment les mêmes procédés à quelque chose près :

- les galvanomètres ;
- les ponts de Wheatstone.

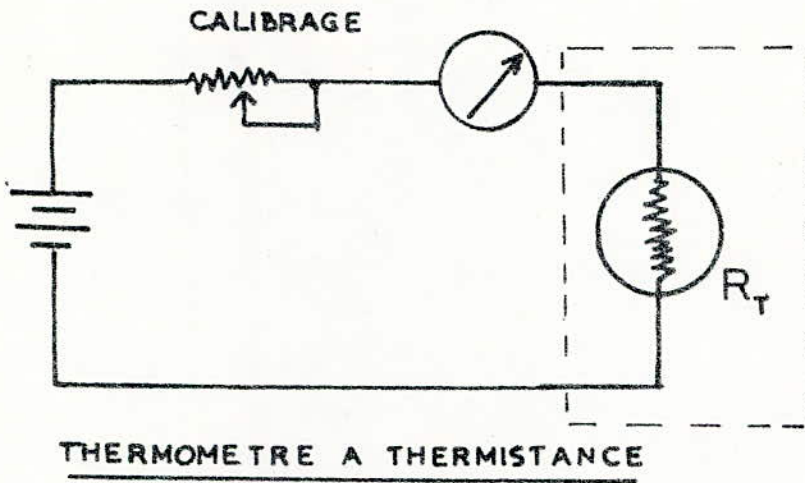


Fig III-8

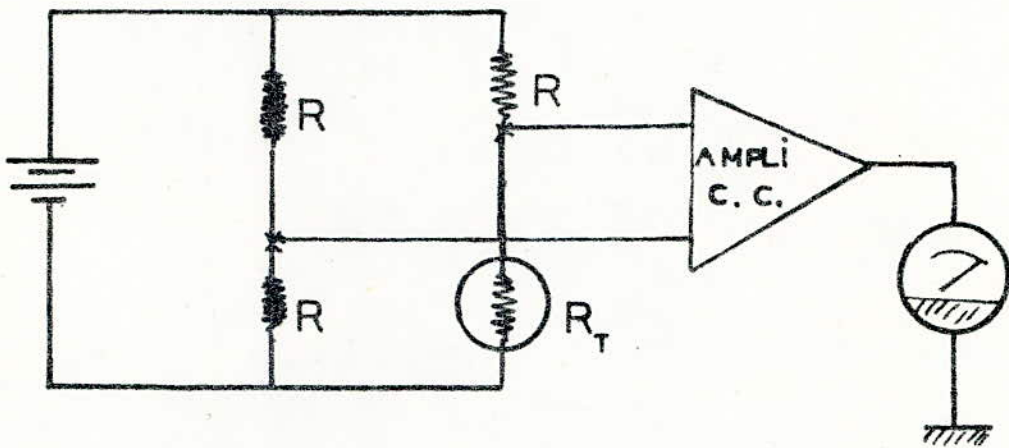
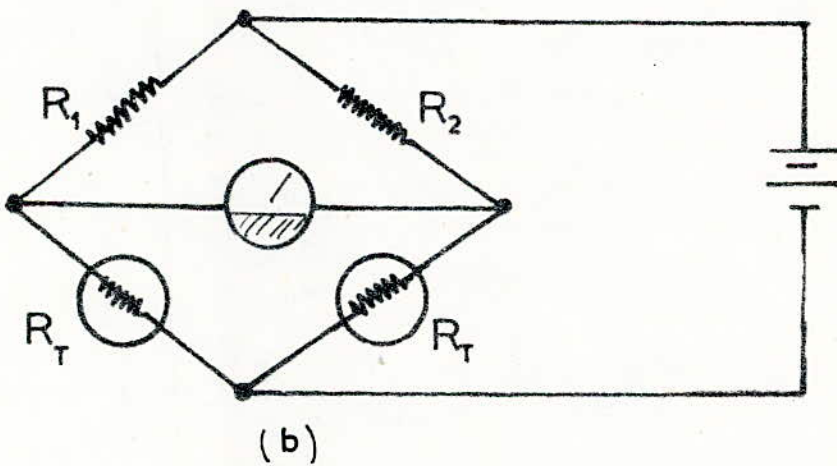


Fig III-9 (a)



MONTAGE DE MESURE DE TEMPERATURES DIFFERENTIELLES
A L'AIDE DES THERMISTORS MONTES DANS UN PONT

a°)- CAS DU GALVANOMETRE (Fig. III-8)

Le fonctionnement de ce circuit est facile à comprendre: une variation de la température entraîne celle de la résistance de la thermistance qui se traduit à son tour par une variation du courant dans le circuit. L'indicateur de courant (micro ampère mètre) peut alors être calibré en température. La résistance variable placée dans ce circuit permet de compenser le vieillissement de la pile. Ce montage présente un défaut: c'est le manque de linéarité (le courant dans le circuit n'est pas proportionnel à la température).

b°)- MONTAGES UTILISANT UN PONT (Fig. III-9 a et b)

La fig (a) est généralement utilisée pour augmenter la sensibilité c'est-à-dire on adjoint au circuit un amplificateur. Ces montages sont plus évolués, plus sensibles aussi et plus précis. L'Accent doit être porté essentiellement sur l'utilisation du pont de Wheatstone comme détecteur. Lorsqu'on désire comparer deux températures, ou mesurer leur différence, il suffit de remplacer une résistance du pont par une deuxième thermistance (Fig. (b)). Par cette méthode, des différences de températures de l'ordre de $0,001^{\circ}\text{C}$ peuvent être détectées avec un galvanomètre sensible. Les thermistances s'utilisent dans des montages similaires à ceux des résistances, et ont permis de multiplier la précision des mesures de températures. On mesure à $0,01^{\circ}\text{C}$ près les températures entre -80°C à 300°C environ.

III.3. THERMOMETRES A EFFET THERMOELECTRIQUE

Les thermocouples utilisent quant à eux les dispositifs comprenant :

- les galvanomètres ;
- les potentiomètres .

III.3.1. MESURES AVEC GALVANOMETRE (Fig. III.10)

a°. On réalise ce circuit, en plaçant la Soudure chaude à l'endroit de la température à mesurer. Si la soudure chaude est à la température t_2 , la F.e.m. des soudures chaudes correspondant à t_2 et la F.e.m. mesurée par le galvanomètre est égale à :

$$\text{F.e.m. mesurée} = \text{F.e.m.}_{t_2} - \text{F.e.m.}_{SF}$$

$$\text{F.e.m. mesurée} = \text{F.e.m.}_{t_2} - \text{F.e.m.}_0$$

Il suffit de graduer le cadran non pas en mV, mais en degrés celsius correspondants à la F.e.m.. Si la température de la Soudure froide est différente de 0°C , ce qui est généralement le cas ; soit t_1 la température de la Soudure froide. La F.e.m. de soudure froide dans ce cas est celle correspondant à t_1 , d'où :

$$\text{F.e.m. mesurée} = \text{F.e.m.}_{t_2} - \text{F.e.m.}_{t_1}$$

Comme t_1 est plus grand que 0°C , on a la F.e.m. mesurée qui est plus petite que la F.e.m. de t_2 ; on ne mesure plus t_2 . Il faut donc trouver un système permettant de compenser la température de la Soudure froide.

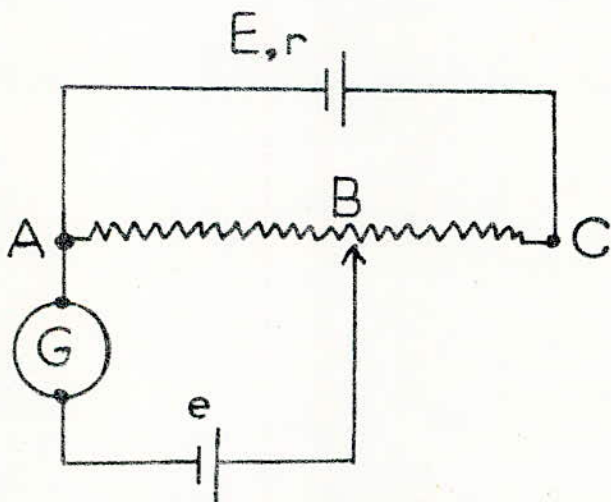
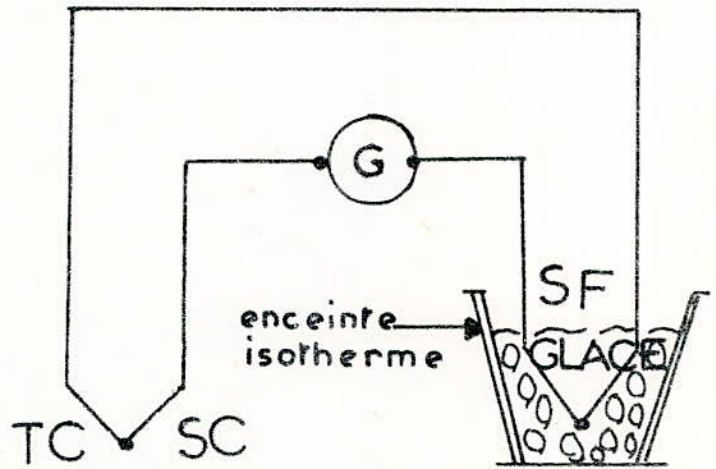
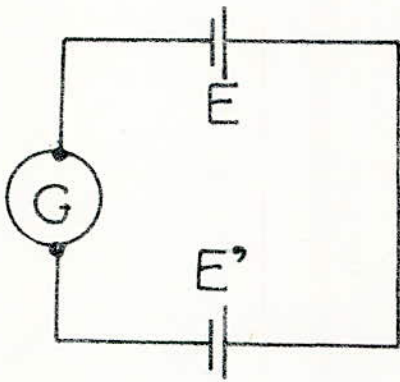
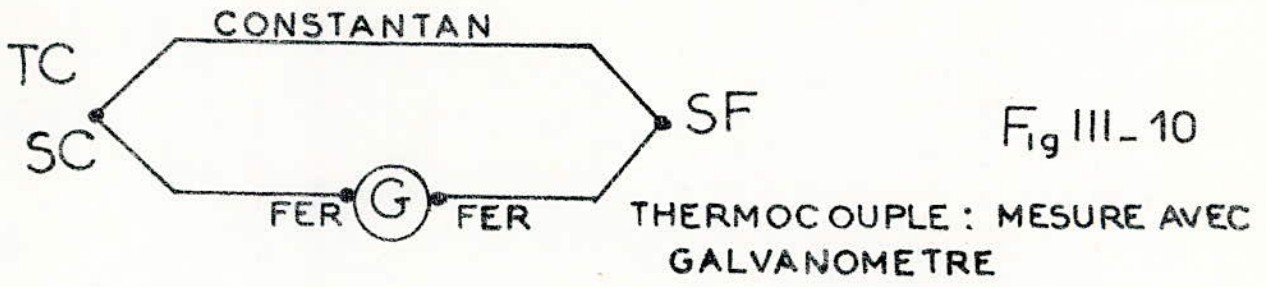
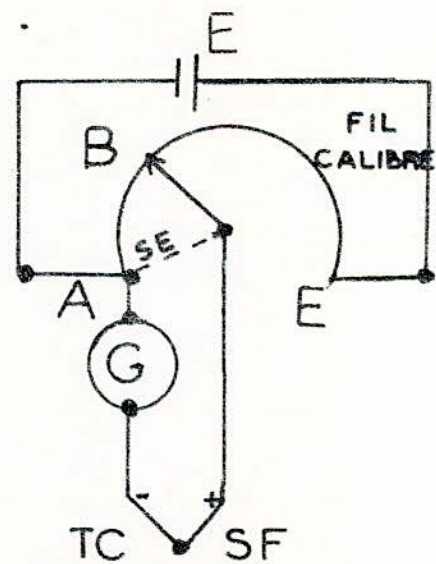


Fig III-12 b

Fig III-13



b°)- COMPENSATION DE LA SOUDURE FROIDE (Fig. III-11)

Ce dispositif consiste à placer la Soudure froide dans un vase de Dewar mais, il est à souligner que ce vase n'est guère pratique pour les mesures industrielles où l'on préfère utiliser comme température de référence, celle qui est fournie par une enceinte isotherme portée la plupart du temps à une température supérieure à l'ambiante. Le principal inconvénient des galvanomètres tient au fait qu'ils mesurent le courant circulant dans le thermocouple. En cas de changement de thermocouple, il sera nécessaire de procéder à un nouvel étalonnage.

III.3.2 PRINCIPE DU POTENTIOMETRE OU METHODE DU ZERO (Fig. III-12 a et b)

* Si on monte deux piles E et E' en opposition (le plus au plus et le moins au moins) avec dans le circuit un galvanomètre, on constate que si $E = E'$ le galvanomètre indique 0 (aucun courant ne circule). Partant de ce fait, on réalise donc le montage de la fig. III-12 b. Si la tension de e montée en opposition de la tension entre A et B soit V_{AB} sont égales, le galvanomètre indique zéro. Si le galvanomètre n'indique pas zéro, on déplace le curseur jusqu'à ce que e et V_{AB} soient égales, le galvanomètre n'indique plus le passage de courant. Connaissant V_{AC} qui s'écrit :

$$V_{AC} = \frac{R_{AC}}{R_{AC} + r} \cdot E$$

avec: r - Résistance de la pile E ;
 R_{AC} - Résistance entre A et C ;
 E - F.e.m. de la pile.

En repérant la position du curseur sur AC , on peut trouver la valeur de V_{AC} . Cette méthode dite aussi d'opposition ou de Zéro, par le simple fait qu'on oppose à la grandeur connue une grandeur inconnue et quand elles sont égales, leur différence est nulle.

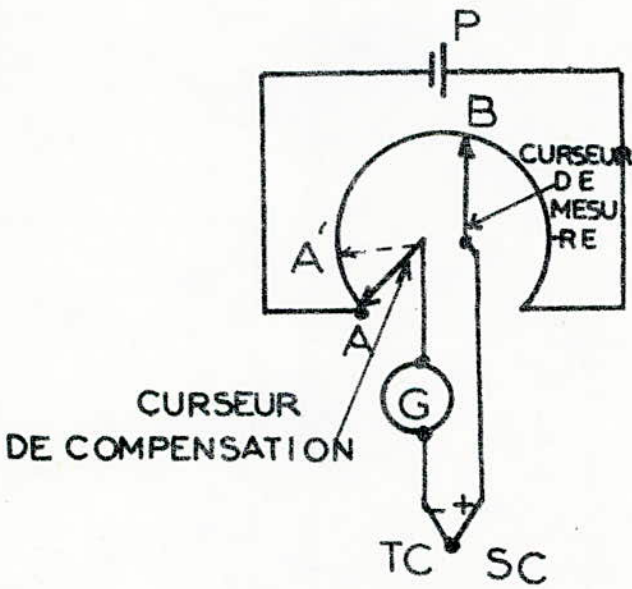
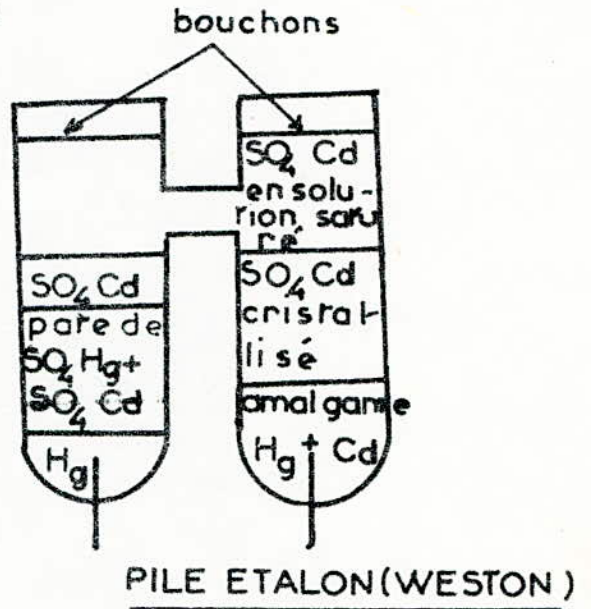
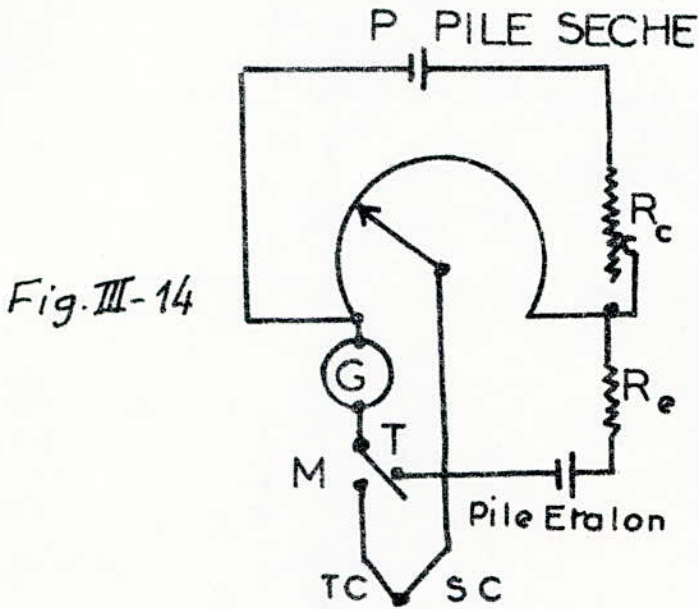
* METHODE DE ZERO POUR THERMOCOUPLE (Fig. III-13)

Le principe reste le même, mais dans ce montage la pile e est remplacée par le thermocouple. On oppose à la F.e.m. du couple, la F.e.m. prise entre A et B . Lorsque la F.e.m. du thermocouple et celle prise entre A et B sont égales, le galvanomètre indique Zéro. Un premier inconvénient à cet appareil: nous avons supposé que la F.e.m. de la pile E était constante, en fait elle varie dans le temps, la tension V_{AE} varie aussi, ainsi que V_{AB} . Pour avoir l'équilibre, il faut déplacer un peu plus loin le curseur et la mesure indiquée est fautive. On remédie à cet inconvénient en réalisant le montage (Fig. III-14)

* METHODE DE ZERO (TARAGE) Fig. III-14

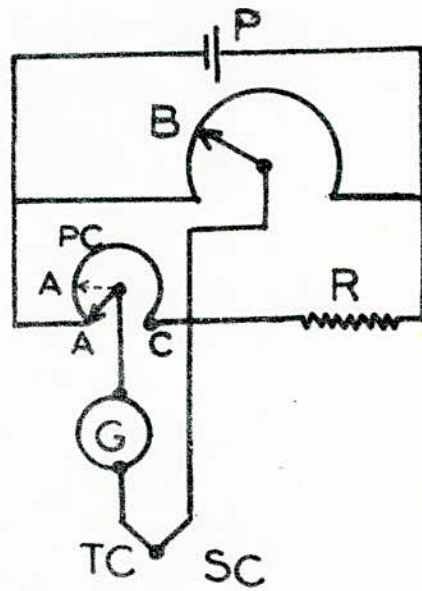
On chute une partie de la tension à travers un rhéostat de Tarage R_c . La pile étalon constituée par un élément Weston capable de délivrer une tension invariable de

METHODE DE ZERO (TARAGE)



COMPENSATION DE LA SF PAR DECALAGE

Fig. III-15



COMPENSATION PAR POTENTIOMETRE

Fig. III-16

1,0183 volts ; permet de tarer la pile P. La pile étalon ne doit pas débiter, pour cela on place en série avec elle une résistance R_e . A titre d'information, la pile étalon est désuète en ce moment et a cédé sa place à la diode Zener.

* COMPENSATION DE LA SOUDURE FROIDE PAR DECALAGE (Fig. III - 15)

Le montage est ainsi simplifié en supprimant la pile étalon. Lorsque la soudure froide est à zéro, nous avons le curseur de compensation qui est au point A, et la F.e.m. de Soudure froide est égale à 0 mV.

$$\text{F.e.m. mesurée} = \text{F.e.m. SC} - 0 \text{ mV} = V_{AB}$$

Si la Soudure froide est différente de zéro, nous avons dans ce cas : $\text{F.e.m. SF} = V_{AA'}$

On décale le curseur de compensation de A en A' et le F.e.m. mesurée s'écrit :

$$\text{F.e.m. mesurée} = \text{F.e.m. SC} - \text{F.e.m. SF}$$

$$V_{A'B} = \text{F.e.m. SC} - V_{AA'}$$

donc :

$$V_{A'B} + V_{AA'} = \text{F.e.m. SC} = V_{AB}$$

L'indication donnée par le curseur indicateur est toujours la même tant que la soudure chaude n'a pas changé.

* COMPENSATION PAR POTENTIOMETRE (Fig. III - 16)

Le potentiomètre de compensation PC est monté en série avec une résistance R. Entre les points A C, on chute une

tension correspondante à la F.e.m. maximum que peut donner la soudure froide à la température ambiante. Le point B ne bouge pas tant que la température de soudure chaude reste la même. L'inconvénient qui émane de ce type de compensation réside dans le fait qu'on est obligé, pour compenser la soudure froide, d'effectuer une opération manuelle.

* COMPENSATION AUTOMATIQUE (Fig. III-17)

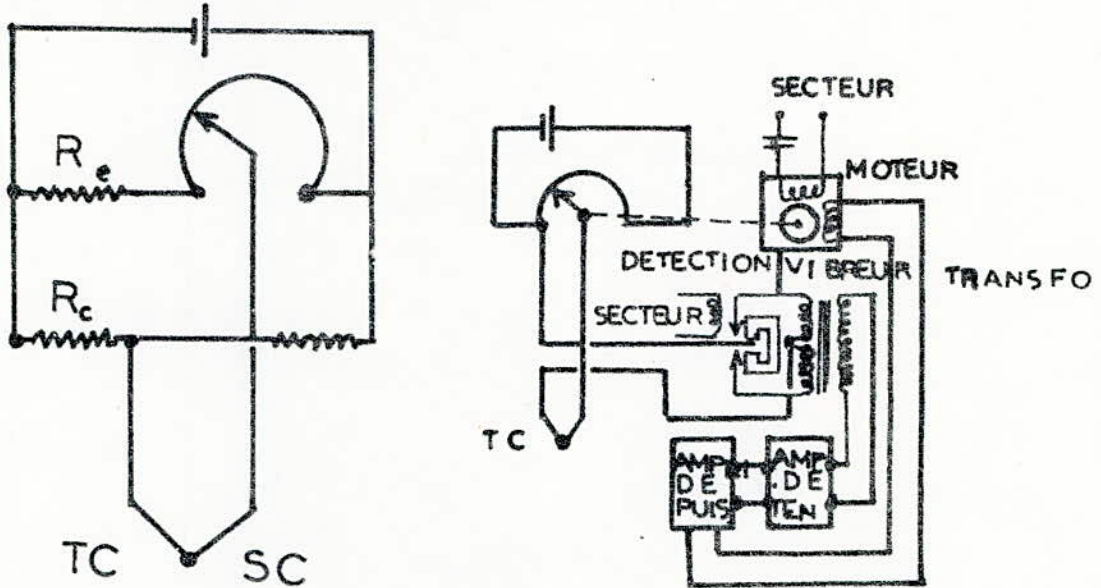
Dans ce montage, on remplace le potentiomètre de Compensation par une résistance R_c , celle-ci n'est pas réglable, mais sa valeur varie avec la température. La Résistance R_e est une résistance d'étalonnage invariable avec la température, dont la valeur est identique à R_c à 0°C . Dans cet appareil, il n'y a plus de compensation à effectuer pour compenser la soudure froide. Les inconvénients communs à tous ces appareils existent au niveau de la lecture où il faut manipuler le curseur du fil calibré jusqu'à équilibre. Ainsi, on y apporte un perfectionnement supplémentaire pour que ces appareils s'équilibrent automatiquement.

* APPAREIL A EQUILIBRAGE AUTOMATIQUE (Fig. III-18)

On a remplacé le galvanomètre par un étage de détection qui attaque un amplificateur. Le vibreur qui est polarisé permet de déterminer le sens du déséquilibre. L'amplificateur étant commandé, délivre à la sortie une tension qui fait tourner un moteur diphase dans le sens convenable pour rattraper l'équilibre, en déplaçant le

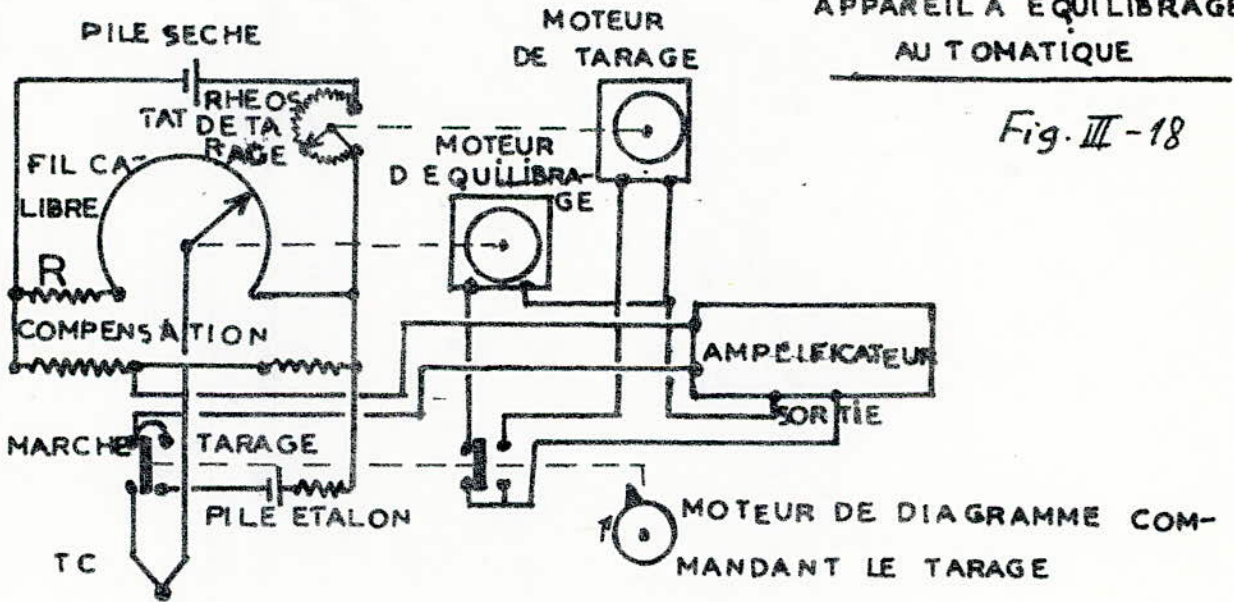
Fig. III-17

COMPENSATION AUTOMATIQUE



APPAREIL A EQUILIBRAGE AUTOMATIQUE

Fig. III-18



TARAGE AUTOMATIQUE DISCONTINU

Fig. III-19

curseur du fil calibré. Il subsiste encore un inconvénient dans cet appareil: le tarage manuel.

* TARAGE AUTOMATIQUE DISCONTINU (Fig. III-19)

Un deuxième moteur peut être commandé par l'amplificateur pour entraîner le curseur du rhéostat de tarage. Un troisième moteur, le même qui sert à entraîner le diagramme en général dans les appareils enregistreurs, commande périodiquement à des intervalles de 20 à 30 mn par exemple le basculement d'un double inverseur qui permet de passer de la position " Marche " à la position " Tarage ". Cet appareil dit de Tarage discontinu présente également un inconvénient: pendant que dure le tarage, on est privé de mesure. Dans les appareils plus perfectionnés, on supprime la pile étalon et on remplace la pile de service par une alimentation stabilisée. Cette simplification supprime du coup le dispositif de tarage.

* TARAGE AUTOMATIQUE CONTINU (Fig. III-20)

Dans ces montages, il s'opère plusieurs simplifications: on remplace le vibreur électromécanique par un dispositif équivalent électronique, ce qui supprime du même coup pas mal de causes d'ennuis.

La Fig. III-21 représente respectivement:

1)- L'ETALONNAGE DU COUPLE

On mesure n mV et l'on a:

$$n \text{ mV} = m \text{ V TC} - m \text{ V } t^{\circ}$$

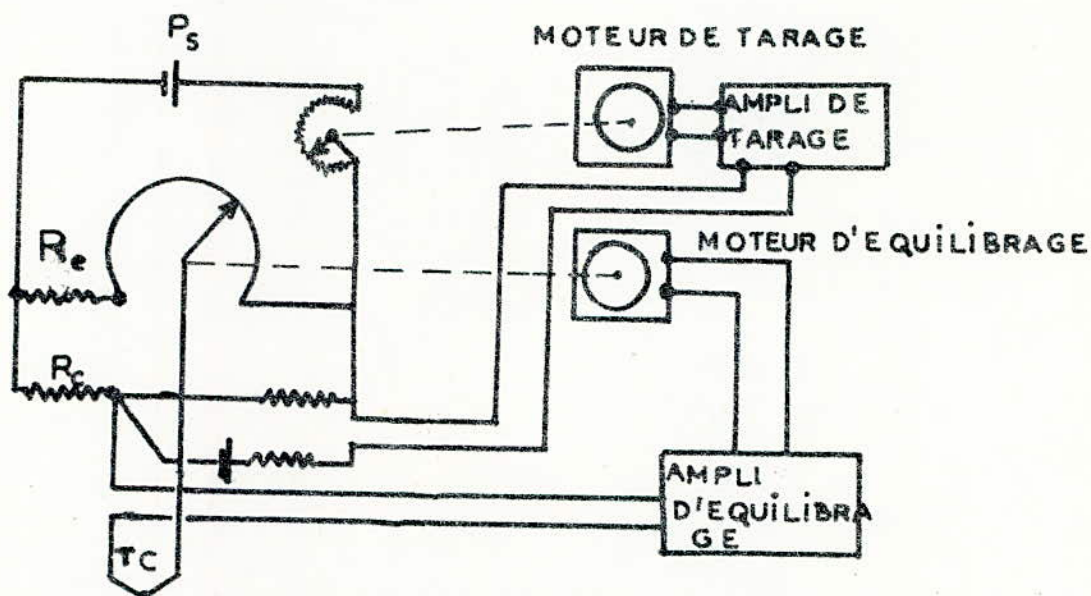


Fig. III - 20 TARAGE AUTOMATIQUE CONTINU

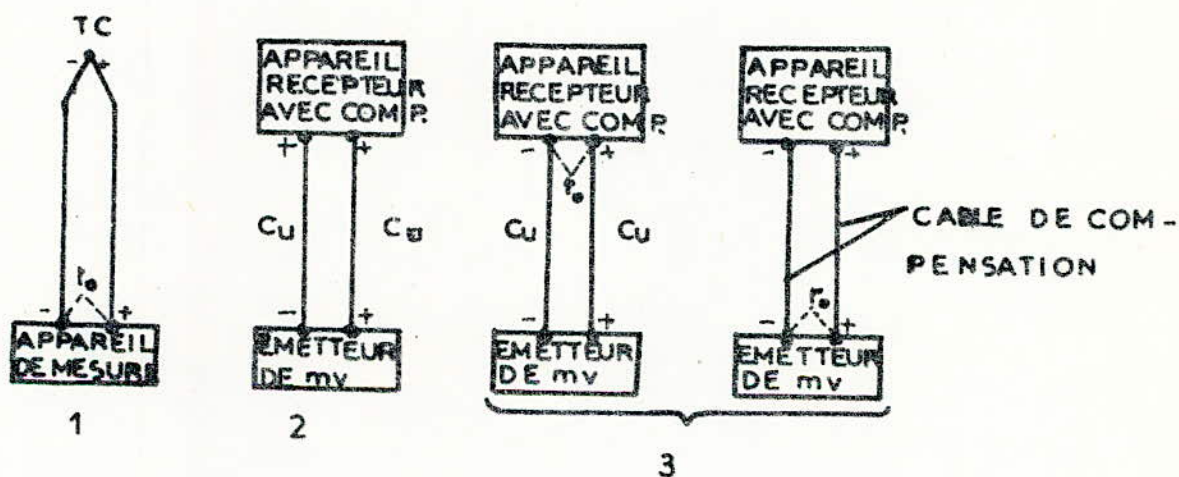


Fig. III - 21

2)- ETALONNAGE DU RECEPTEUR SANS COMPENSATION

On ne mesure pas t° ne pas utiliser de câble de Compensation.

$$mV \text{ indiqués} = mV \text{ émetteur.}$$

3)- ETALONNAGE DU RECEPTEUR AVEC COMPENSATION DE SF

- a) $mV \text{ indiqués} = n mV$

et $n mV = mV t^\circ + mV \text{ émetteur}$

- b) $mV \text{ indiqués} = n mV$; et $n mV = mV t^\circ + mV \text{ émetteur}$

En conclusion, on dispose avec les thermocouples d'appareils ayant de grandes possibilités.

- Appareils enregistreurs à multiples points
- Régulation
- Appareils automatiques
- Distance entre appareils et point de mesure très grande.

A l'heure actuelle, ce type d'appareil est l'un des plus utilisés dans la plupart des procédés industriels.

III.4. LES PYROMETRES

III.4.1. LUNETTE DE FÉRY A RADIATION TOTALE

L'Appareil repose sur un trépied analogue à ceux utilisés en photographie, à deux mètres environ du four, face à la porte qui est entrouverte ou au droit du trou de regard. La lunette de Féry, qui peut être utilisée à partir de $600^\circ C$, n'est pas d'une très grande précision

(Fig. III - 22)

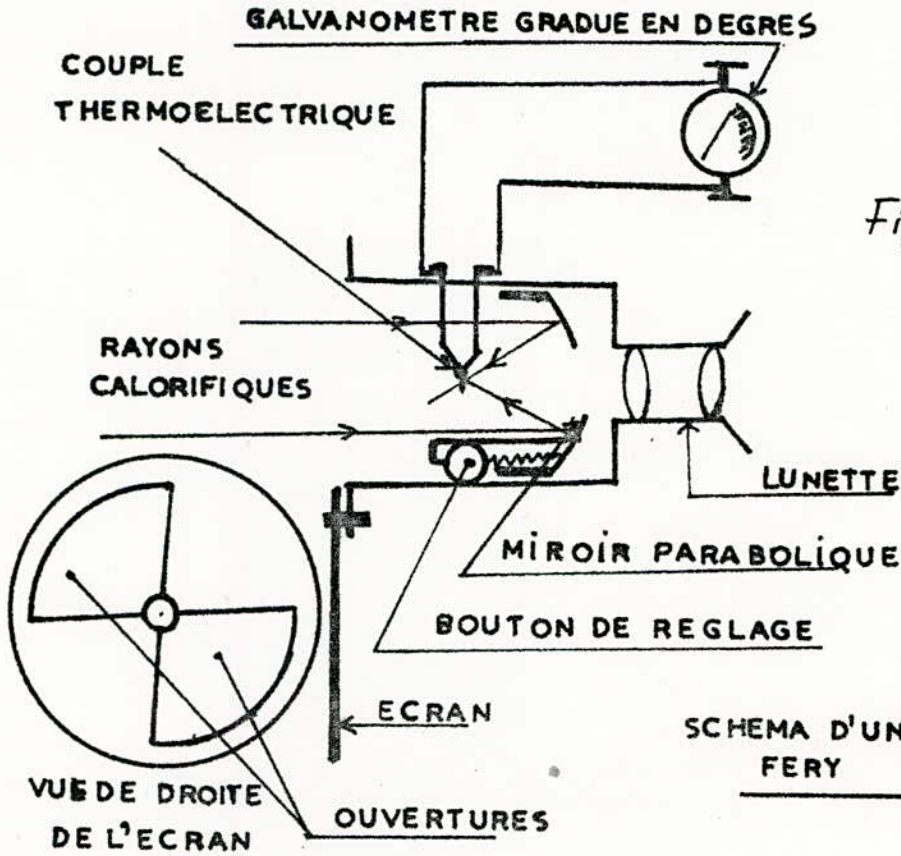


Fig. III-22

SCHEMA D'UNE LUNETTE DE FERY

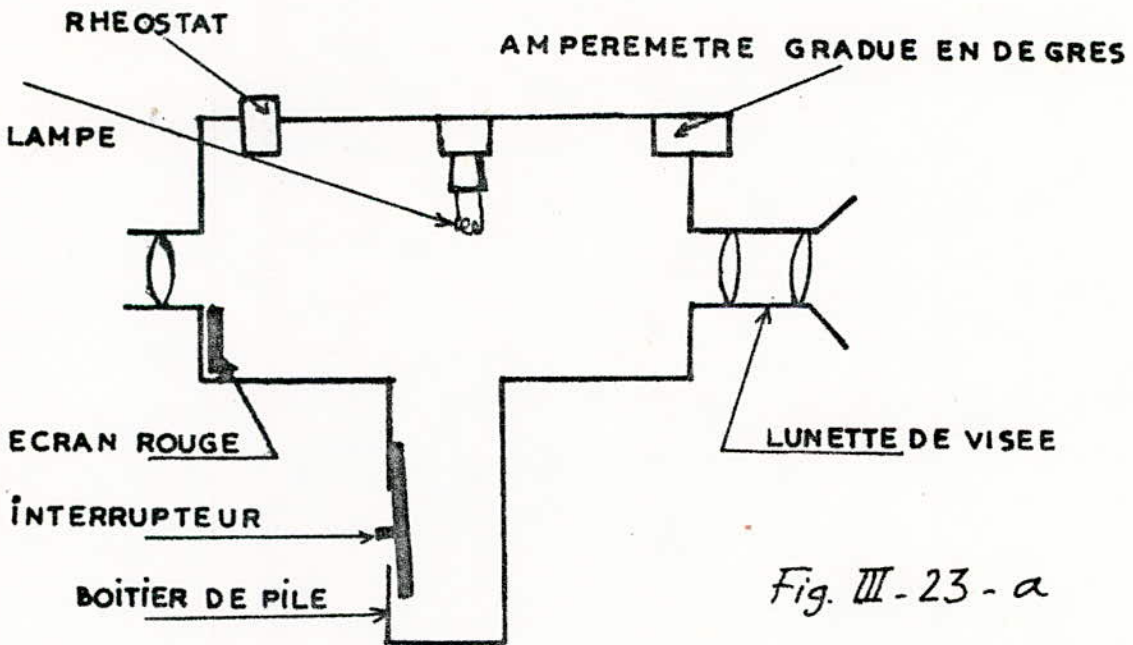


Fig. III-23-a

COUPE SCHEMATIQUE D'UNE LUNETTE A DISPARITION DE FILAMENT

La Radiotechnique a proposé un schéma qui n'est autre qu'un pyromètre permettant de mesurer la température d'objets qui ne peuvent être mise en contact avec le thermomètre classique, par exemple les électrodes d'un tube électronique.

III-4.2 - LUNETTE A DISPARITION DE FILAMENT (Fig. III-23)

Un Rhéostat, disposé en série avec la lampe, permet de faire varier l'intensité du courant et, par suite, la brillance du filament. Un ampèremètre, gradué en températures, mesure l'intensité du courant. On règle le rhéostat de façon à égaler les deux brillances; alors l'image du filament disparaît. La température de la pièce est lue directement sur le cadran de l'ampèremètre.

III-5-1 - AMPLIFICATEUR POUR CAPTEUR PIEZOELECTRIQUE

Une grande impédance d'entrée est recherchée lorsque c'est un capteur piézoélectrique qui attaque l'amplificateur.

Le gain en alternatif est de : $G(\text{alt}) = \frac{R_2 + R_1}{R_1}$

Pour assurer une bonne stabilité thermique et un minimum de tension de décalage, R_3 était choisie telle que :

$R_3 \approx R_2 - R_1$, l'impédance de source tendant vers l'infini. (Fig. III-24)

III-5.2. SCHEMA D'UN APPAREIL DE MESURE DE TEMPERATURE UTILISANT UNE DIODE COMME CAPTEUR (Fig. III-25)

La tension prélevée entre l'anode et la cathode de

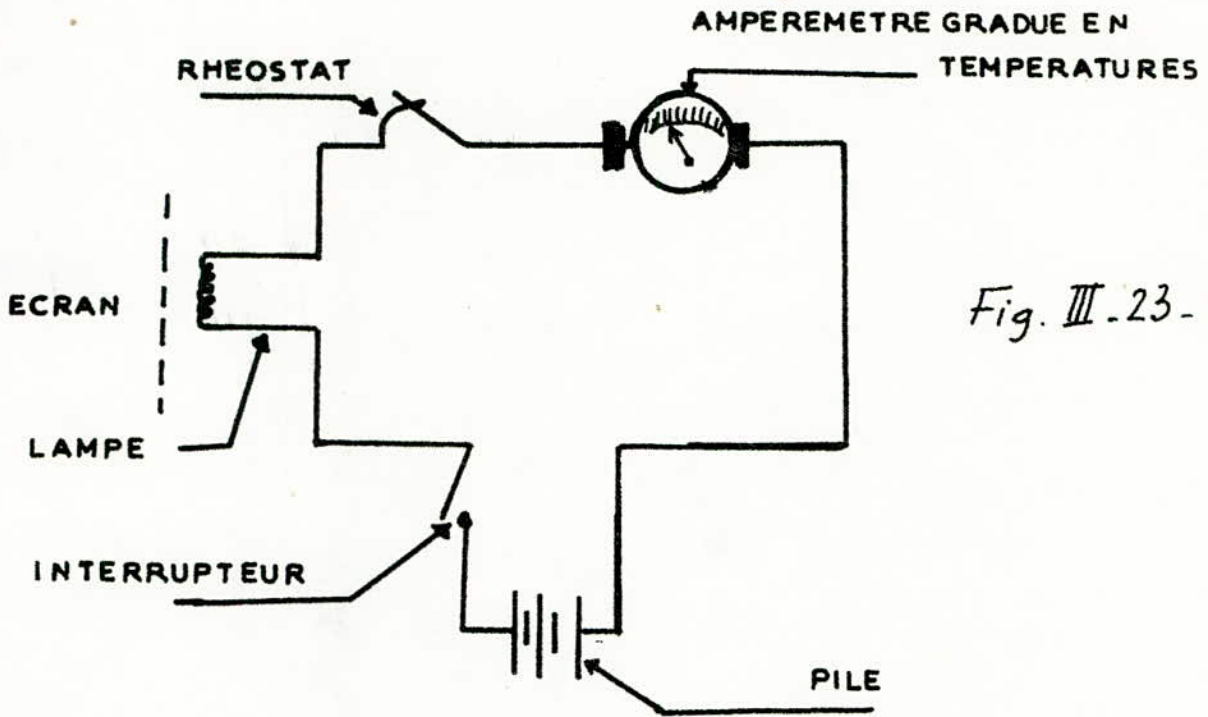


Fig. III-23-6

SCHEMA DE PRINCIPE DUNE LUNETTE A DISPARITION DE FILAMENT

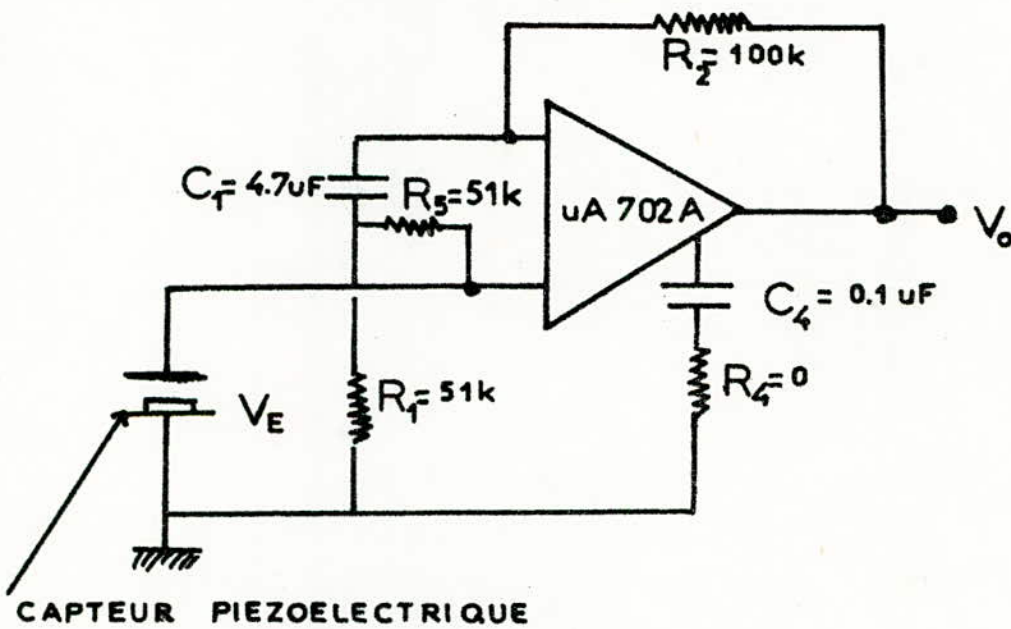
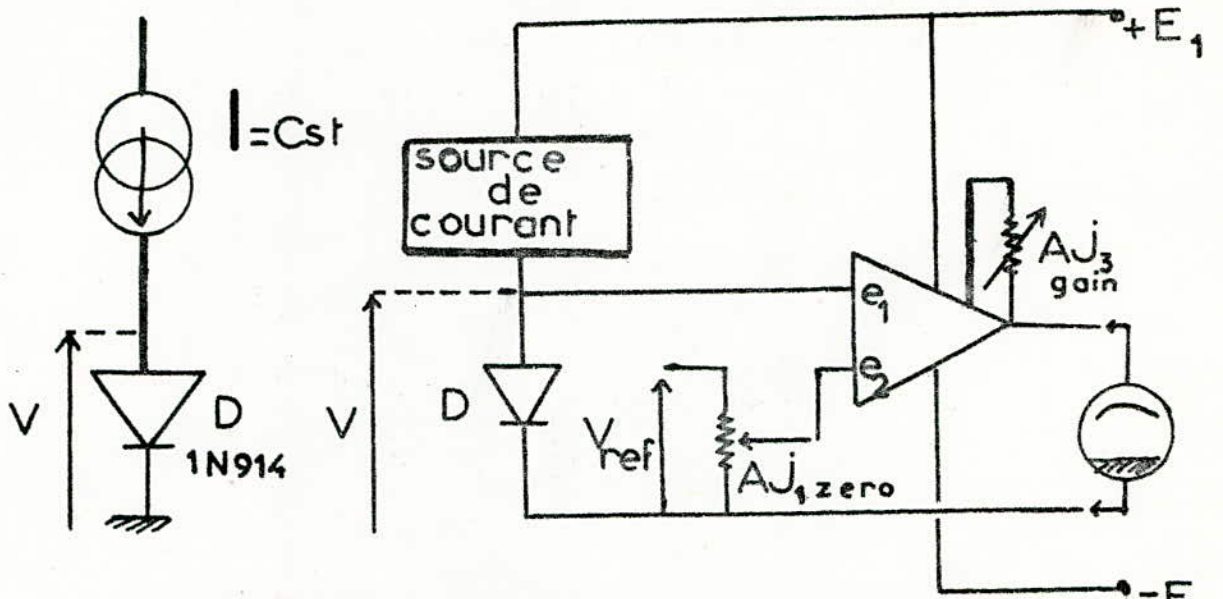


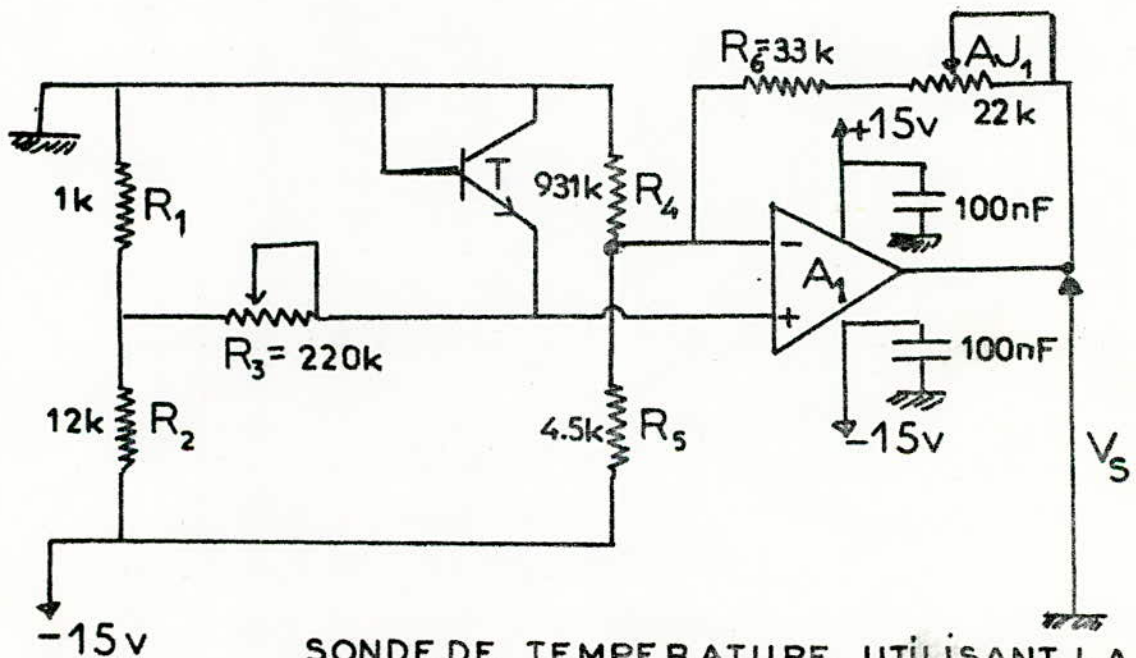
Fig. III - 24

AMPLIFICATEUR POUR CAPTEUR PIEZOELECTRIQUE

Fig. III - 25



SYNOPTIQUE DU THERMOMETRE UTILISANT COMME CAPTEUR UNE DIODE



SONDE DE TEMPERATURE UTILISANT LA JONCTION BASE-EMETTEUR D'UN TRANSISTOR COMME CAPTEUR

Fig. III - 26

T (type 2N2484 ou BC 414 B)

A₁ (type LM101A ou SFC 2101A)

de D est appliquée à l'entrée e_1 d'un amplificateur différentiel. Enfin, il est commode que le zéro du voltmètre de mesure, corresponde à la température 0°C . Or, pour cette dernière, la tension V aux bornes de D n'est évidemment pas nulle, d'où la tension d'offset.

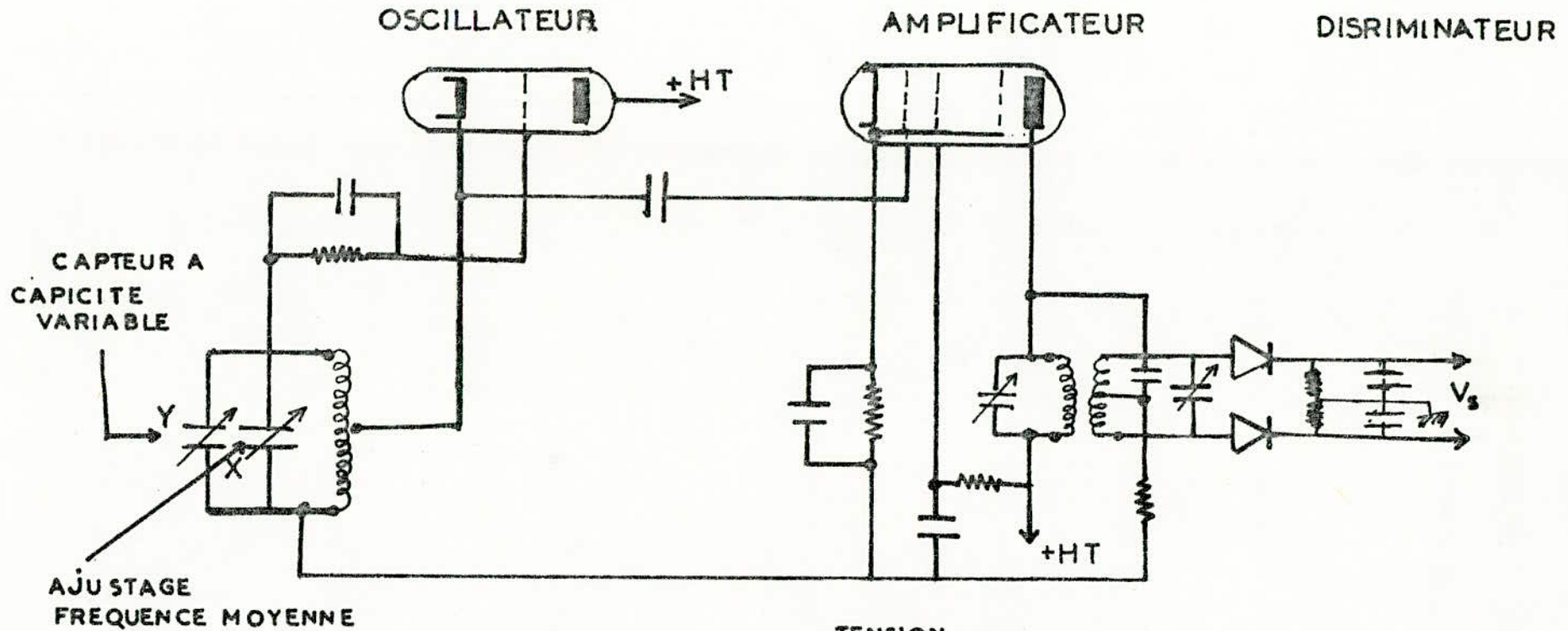
III. 5.3. SCHEMA D'UNE SONDE DE TEMPERATURE AVEC UNE JONCTION BASE-EMETTEUR (Fig. III-26)

Le seuil de conduction (environ $0,56\text{ V}$) est représenté sur l'entrée (-) d'un amplificateur opérationnel à l'aide d'un pont de précision constitué par R_5, R_4 ; R_5 permet de régler le courant transitant dans la jonction de façon à régler la tension de sortie à 0 volt pour 0°C . L'association R_6 et AJ_1 en contre-réaction règle en sortie. Le transistor devra être un modèle petits signaux, très faible bruit et l'ampli opérationnel, un type à faible dérive thermique et faible courant de polarisation.

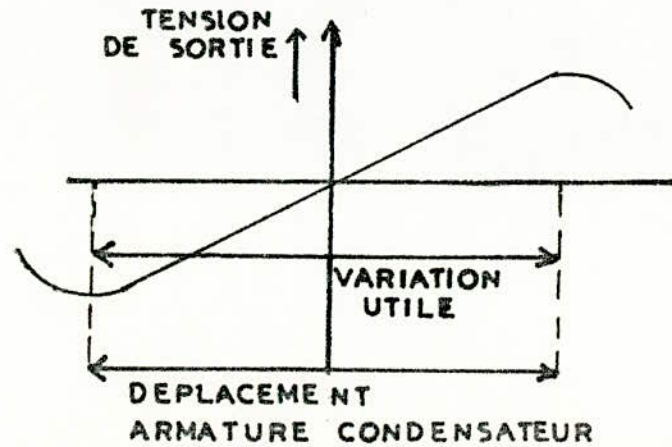
III. 5.4. SCHEMA D'UN CAPTEUR THERMIQUE UTILISANT UNE CAPACITE.

Pour convertir la grandeur à mesurer en une grandeur corrélée de capacité, on peut donc faire varier la distance entre armatures, ou encore la composition du milieu diélectrique. Dans la plupart des capteurs capacitifs, la variation de capacité est obtenue

Fig. III - 27



CAPTEUR CAPACITIF



en agissant sur l'écartement ou le recouvrement des armatures. Le Schéma proposé, constitué de tubes électroniques peut-être réalisé à l'aide des semi-conducteurs.

III. 5.5. CAPTEUR THERMIQUE LM 335

La présence du potentiomètre P de $10\text{K}\Omega$, destiné à calibrer la sortie de façon à obtenir $2,982\text{V}$ à 25°C dans ces conditions à 0°C , La tension de sortie vaudra :

$$2,982\text{V} - 0,01 \cdot 25 \cdot \text{V} = 2,732\text{V}$$

III. 5.6. CAPTEUR THERMIQUE REF-02 (Fig. III-29)

Celui-ci n'est autre qu'un amplificateur opérationnel.

III. 5.7. SERIE : LM 134, LM 234, LM 334 (Fig. III-30)

Le montage (c) est utilisé en adaptation de montage.

Dans ce cas, l'impédance de sortie est proportionnelle à $R_o/16\Omega$
 $-R_o$ est la résistance équivalente vue aux bornes de V^- et R . Le montage (d) est également très utilisé pour adapter un montage de mesure

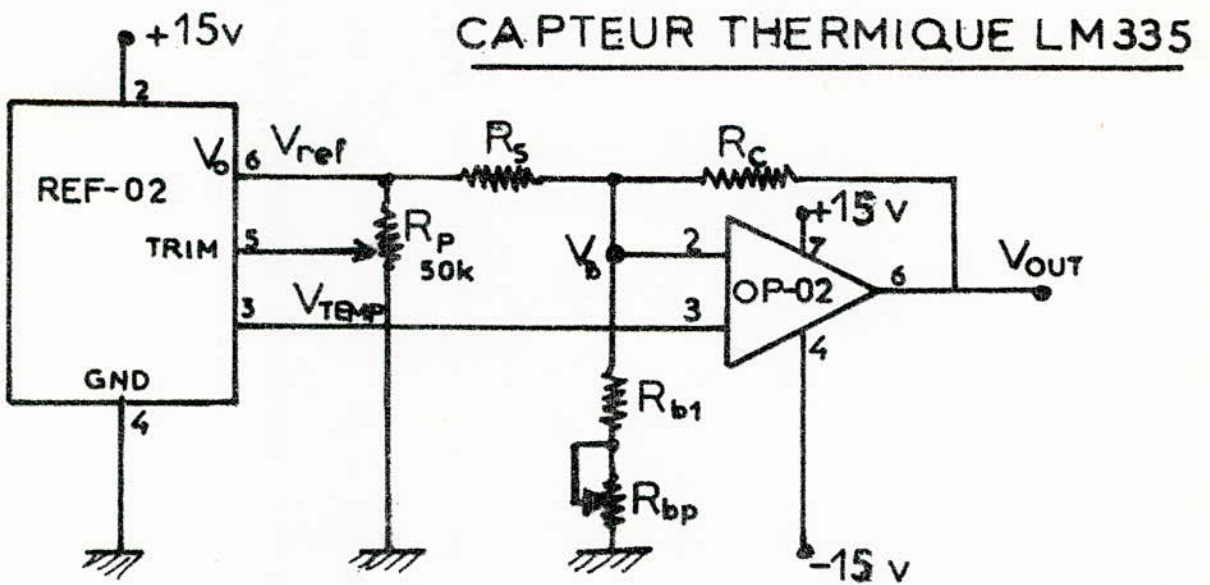
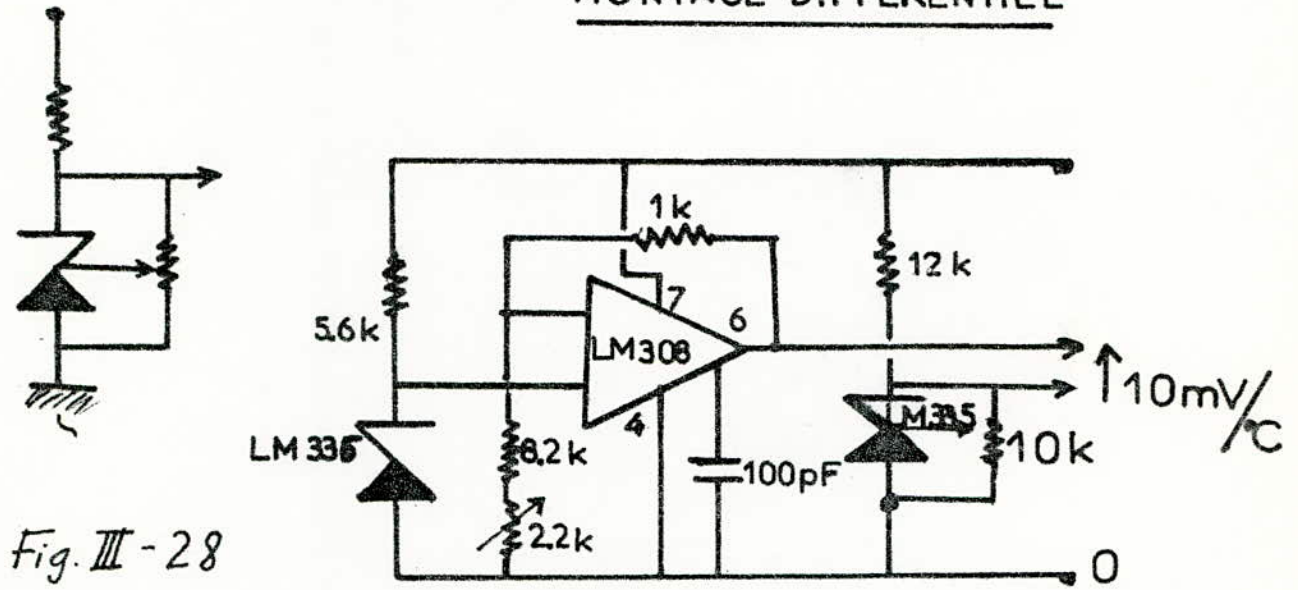
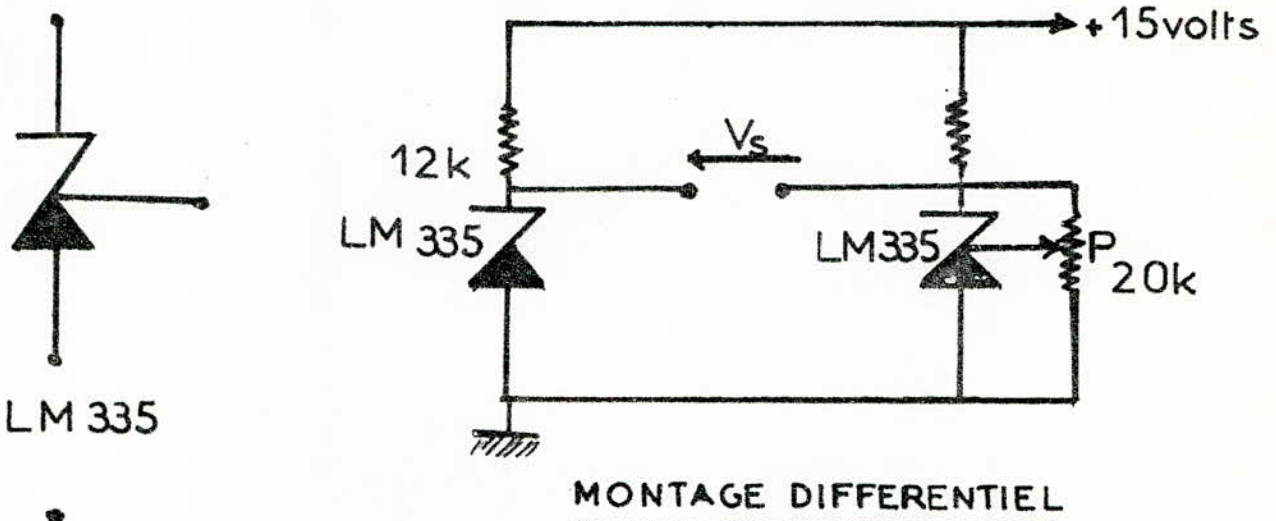
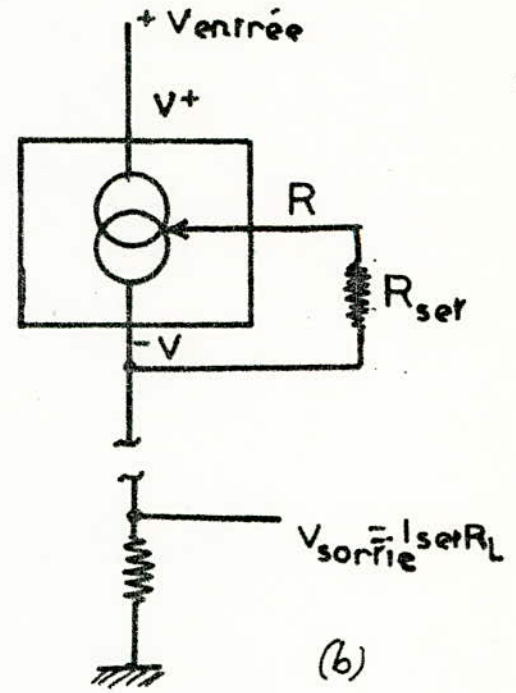
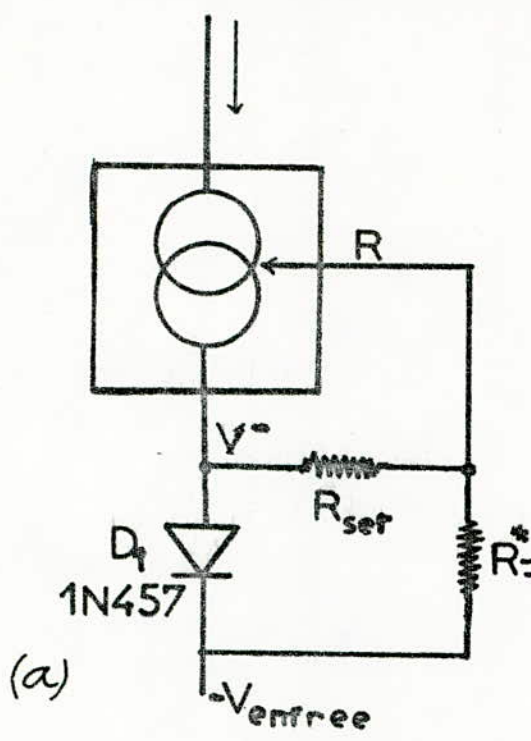
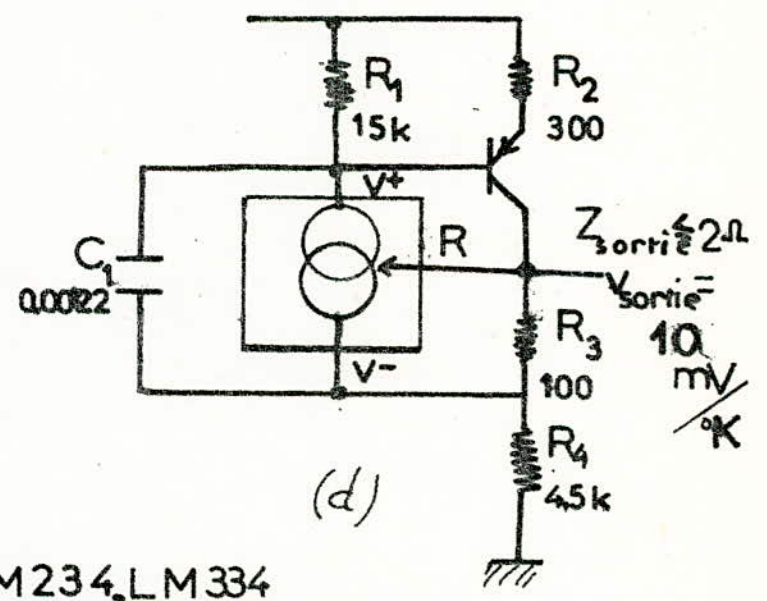
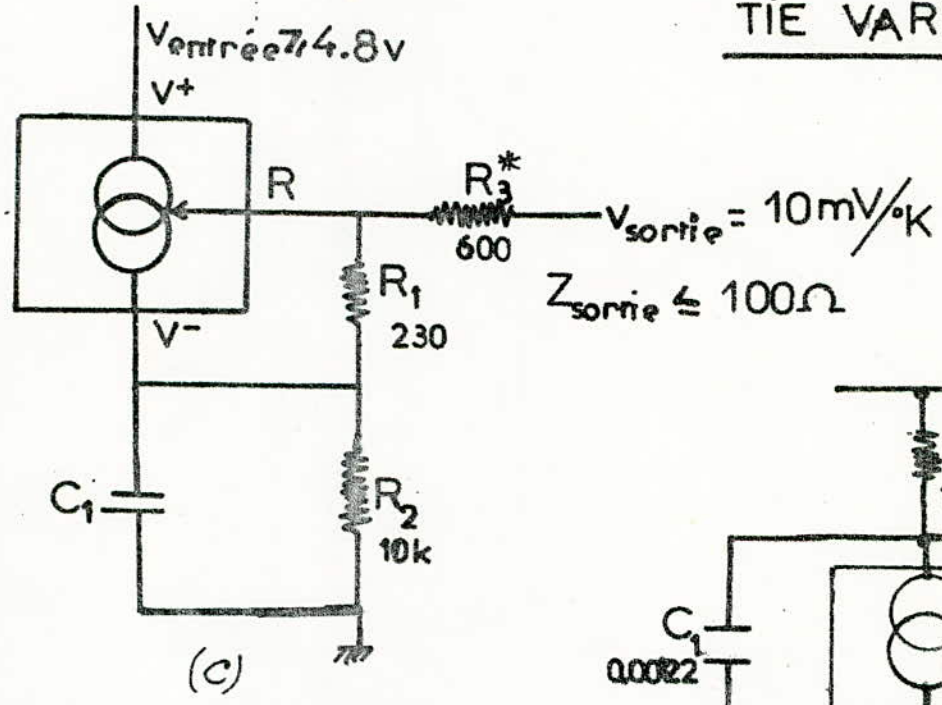


Fig. III - 29 CAPTEUR THERMIQUE REF-02

CAPTEUR DE TEMPERATURE



CAPTEUR A TENSION DE SORTIE VARIABLE



THERMOMETRES A IMPEDANCE DE SORTIE FAIBLE

SERIE: LM134, LM234, LM334

Fig. III - 30 (a, b, c, d)

CHAPITRE IV

LES TECHNIQUES D'AFFICHAGE
NUMÉRIQUE DE LA TEMPÉRATURE

IV-1. RAPPELS

Les premiers convertisseurs ont été développés pour servir d'interface avec des calculateurs numériques; il ne faut pas croire qu'ils restent limités dans ce seul domaine. Tout comme l'amplificateur opérationnel, le convertisseur a quitté le domaine du laboratoire pour entrer dans le domaine industriel. Il trouve sa place chaque fois qu'il est intéressant de faire un passage d'analogique en numérique ou réciproquement. Les Capteurs les plus utilisés dans le système d'acquisition de données sont les thermocouples qui sont en fait des capteurs analogiques, ce qui leur confère un signal électrique analogue à la grandeur mesurée. Ce chapitre qui couvre les problèmes d'affichage numérique revêt une importance particulière due aux perfectionnements qu'ont connus les appareils analogiques dont les avantages sont:

- Élimination de l'erreur d'interprétation due au facteur humain ;
- Conservation de la précision au cours des différentes transformations ;
- Transmission aisée à distance ;
- Multiplexage ;
- Stockage .

Dans un instrument numérique, le signal délivré

par le capteur est transformé au moyen d'un convertisseur analogique numérique (CAN) en une série de niveaux haut ou bas exprimant dans un code convenu un nombre représentant l'amplitude du signal analogique du capteur. Nous avons ainsi représenté une chaîne industrielle faisant intervenir des convertisseurs (Fig IV-1)

IV. 1. 2. CONVERTISSEUR ANALOGIQUE-NUMERIQUE

a) - DEFINITION

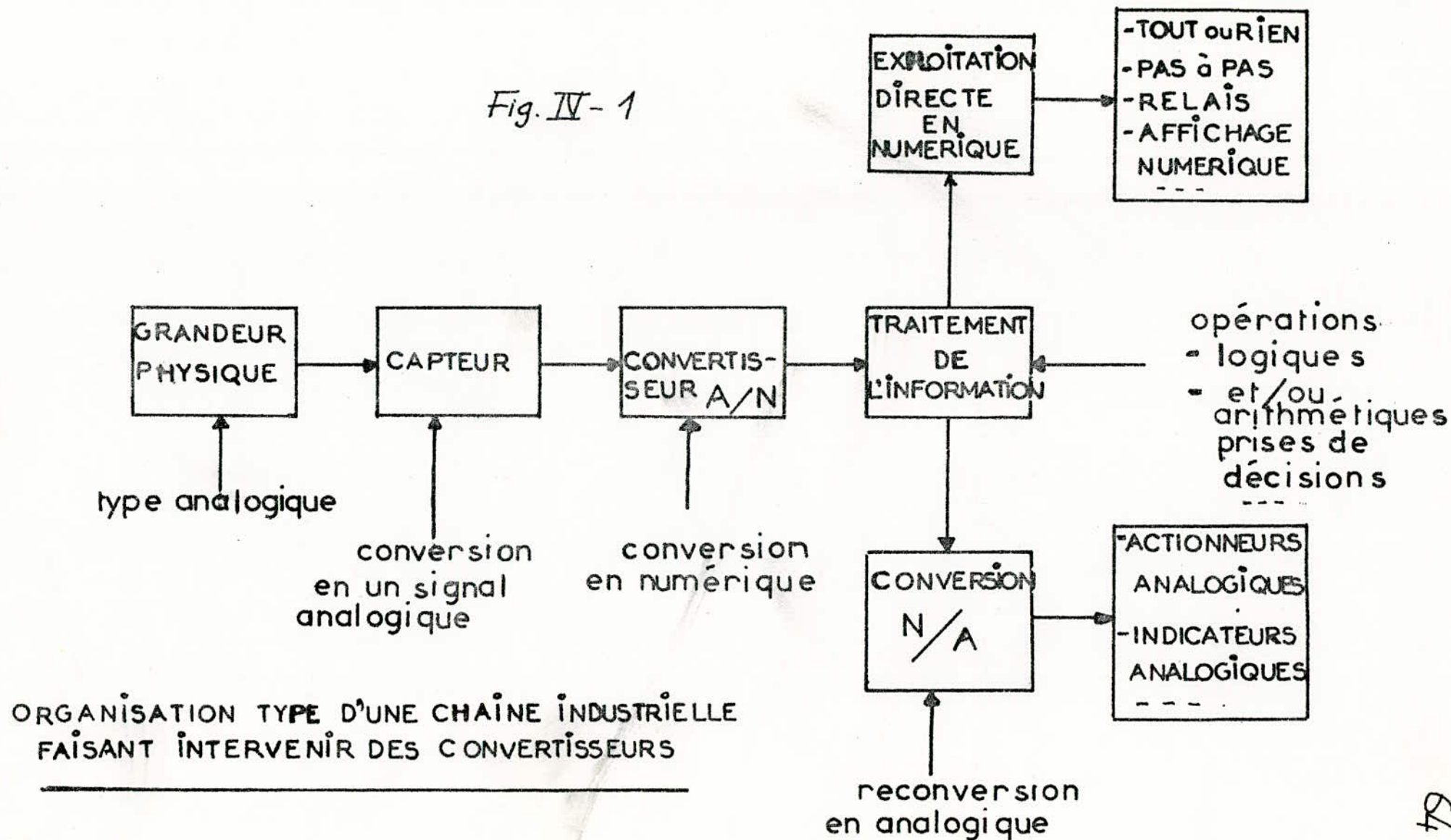
On désigne sous le vocable CAN, toute opération permettant de convertir une grandeur physique à variation continue dans le temps en un nombre défini dans un système d'énumération donné. Pour assurer une lecture directe de la grandeur physique, notamment lorsqu'il s'agit d'un Capteur de température, il est généralement nécessaire d'associer au CAN un dispositif de linéarisation qui permet de tenir compte de la relation liant le signal du Capteur à la température.

b) - QUANTIFICATION D'UNE GRANDEUR PHYSIQUE

- Soit A : un signal analogique ;
- Soit N : un signal numérique ;
- Soit $U_{\text{réf}}$: une tension de référence .

Dans le cas d'un CAN idéal, c'est à-dire :
Sans erreur, le signal de sortie N est relié au

Fig. IV-1



Signal d'entrée A par la relation : $N = \frac{A}{U_{\text{réf.}}}$

$$A = U_{\text{réf.}} \left\{ \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2^2} + \dots + \frac{b_n}{2^n} + \frac{b_{n+1}}{2^{n+1}} \right\}$$

où :

A est le signal à convertir, la longueur du mot binaire obtenu après conversion étant limitée à n bits, nous avons donc :

$$A \approx U_{\text{réf.}} \left\{ \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{4} + \dots + \frac{b_n}{2^n} \right\}$$

On a ainsi négligé les termes b_{n+1}, b_{n+2}, \dots , ceux-ci représentent l'erreur de conversion appelée aussi de quantification. Cette opération consiste donc, à remplacer la tension A par une tension discrète multiple appelée quantum de valeur $U_{\text{réf.}}/2^n$, de sorte que l'on ait : $\left| A - N \frac{U_{\text{réf.}}}{2^n} \right| \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{\text{réf.}}}{2^n}$.

La fonction de transfert d'un convertisseur analogique numérique idéal peut se définir comme suit :

- les tensions d'entrée nominales (pour lesquelles l'erreur est nulle) sont données par l'égalité :

$$E_{\text{nom.}} = U_{\text{réf.}} \left(\frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{4} + \dots + \frac{b_n}{2^n} \right)$$

les différents b_i valent "0 ou 1"

- L'ensemble des tensions d'entrée qui fournit une valeur particulière du signal de sortie vérifie les inégalités suivantes :

$$E_{\text{nom.}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{\text{réf.}}}{2^n} < A < E_{\text{nom.}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{\text{réf.}}}{2^n}$$

IV-2. PERTURBATIONS DUES AUX SIGNAUX PARASITES A L'ENTREE

IV-2.1. FACTEUR DE REJECTION EN MODE COMMUN

Il désigne la sensibilité à l'interférence d'un signal parasite de mode série. On le désigne par le rapport:

$$RMC = 20 \log \frac{V_c}{V_E}$$

où:

V_c - valeur crête de la tension d'interférence ;

V_E - Modification de valeur de l'information de sortie.

Pour réduire ces influences, plusieurs méthodes peuvent être envisagées dont nous citerons principalement :

- les filtres : Ceux-ci présentent un inconvénient majeur qui est celui de la détérioration du temps de réponse du système.

- Système de conversion par intégration : Dans les applications industrielles, la distance qui sépare l'indicateur du Capteur est souvent très grande

Une des Caractéristiques principales et importantes des thermomètres numériques est de rejeter l'influence de ce signal parasite.

IV-3. DIFFERENTS TYPES DE CAN

A. TYPES USUELS

Les méthodes de CAN se ramènent généralement à l'un des quatre types suivants :

- Conversion par simple rampe ;

- Conversion par double rampe ;
- Conversion tension - fréquence ;
- Conversion par pesées successives.

Notons que chaque méthode offre des avantages et des inconvénients (vitesse de conversion, précision, facilités, ...).

IV-3-1. CONVERSION PAR SIMPLE RAMPE

Ce type de convertisseur se situe dans le bas de la gamme des appareils numériques. Néanmoins, il trouve de nombreuses applications dans l'industrie, par leur faible coût, et par la possibilité qu'il offre de régler simplement le coefficient de conversion K ou pente du générateur. Soit:

$$V_t = V_{t_0} + K(t - t_0)$$

A l'instant t_1 , la tension V_t atteint la tension V_x à mesurer ; le comparateur A bascule et détermine un temps. $(t_1 - t_0) = \frac{V_x - V_{t_0}}{K}$ (1)

A l'instant t_2 , V_t atteint la valeur zéro ; le Comparateur B bascule et détermine un temps.

$$(t_2 - t_0) = - \frac{V_{t_0}}{K} \quad (2)$$

Un comparateur logique effectue l'opération (1) - (2) qui donne ainsi :

$$t_2 - t_1 = T_x = \frac{V_x}{K}$$

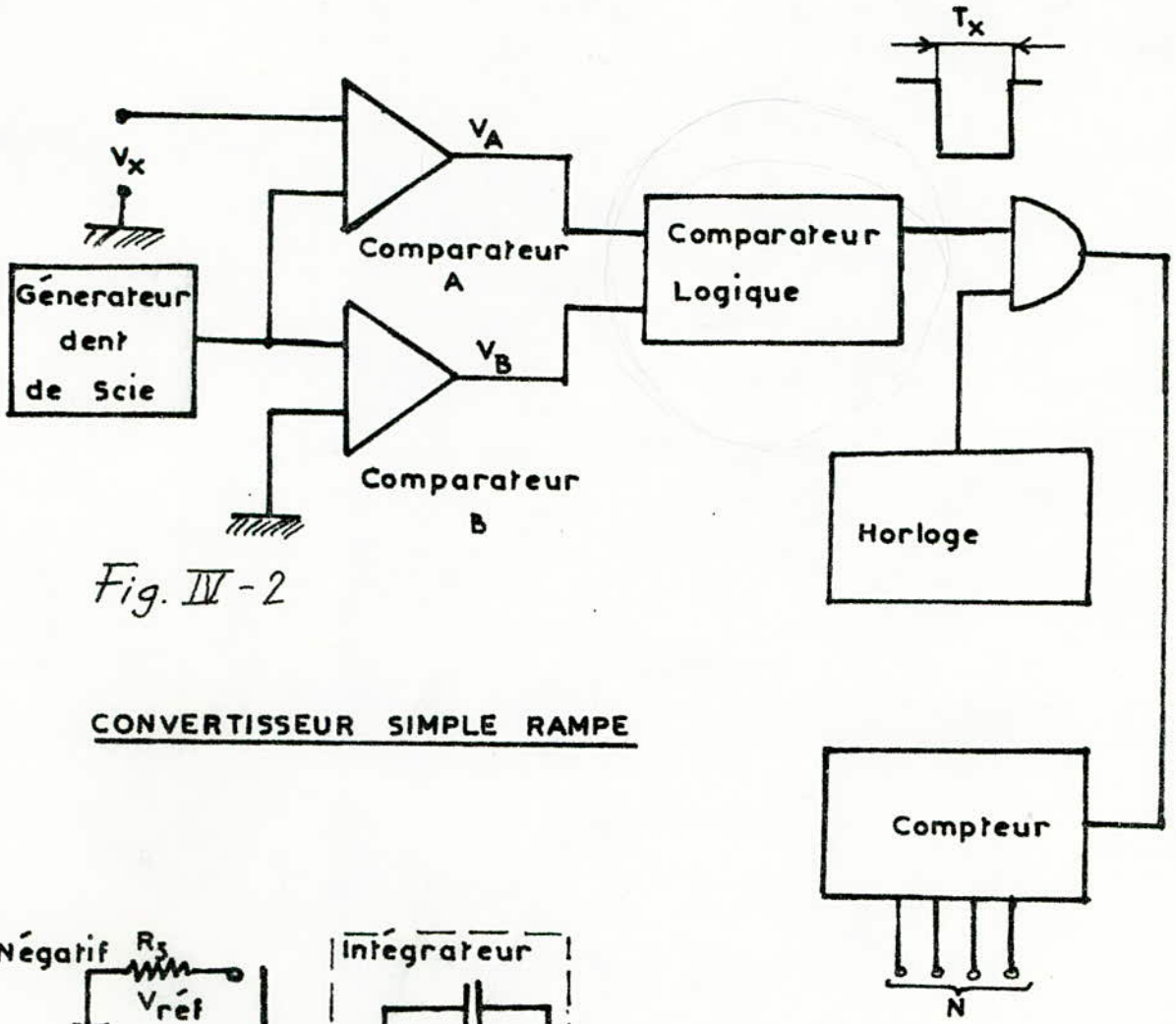


Fig. IV-2

CONVERTISSEUR SIMPLE RAMPE

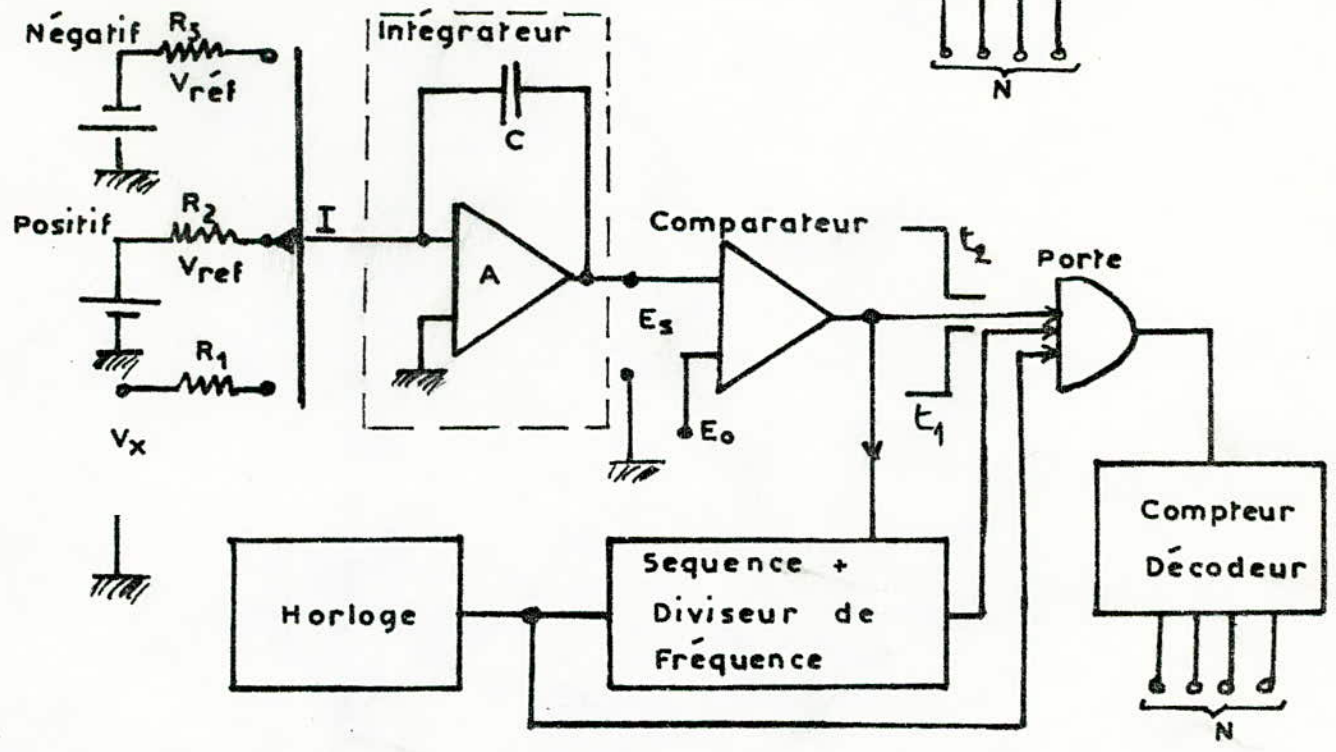


Fig. IV-3

CONVERTISSEUR DOUBLE RAMPE

IV.3.2. CONVERTISSEUR DOUBLE RAMPE (Fig. IV-3)

Celui-ci constitue un perfectionnement du simple rampe. La précision devient indépendante de la capacité et de la fréquence d'horloge. La conversion s'effectue ici en deux temps. Toute la séquence de conversion est contrôlée par un sous-ensemble séquence et un diviseur de fréquence. Au temps $t = t_0$ l'interrupteur I est positionné sur l'entrée V_x à travers R_1 et cette tension charge C .

— A l'instant t_1 , le condensateur C est porté à un potentiel E_{t_1} donné par :

$$E_{t_1} = E_{t_0} + \frac{V_x}{R_1} \cdot \frac{(t_1 - t_0)}{C} \quad (1)$$

— A l'instant t , le potentiel E_t pendant l'intervalle de comptage s'écrit :

$$E_t = E_{t_1} - \frac{V_{\text{réf}}}{R_2} \cdot \frac{(t - t_1)}{C} \quad (2)$$

En éjectant (1) dans (2), on obtient :

$$E_t = E_0 + \frac{V_x}{R_1} \cdot \frac{(t_1 - t_0)}{C} - \frac{V_{\text{réf}}}{R_2} \cdot \frac{(t - t_1)}{C}$$

Nous savons que : $E_{t_0} = E_0$; et $E_t = E_0$ pour $t = t_2$

En prenant : $t_1 - t_0 = T_r$ (Constante propre de l'appareil)

et : $t - t_1 = T_x$; où : T_x est ce qu'il faut calculer.

$$T_x = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{T_r}{V_{\text{réf}}} \cdot V_x$$

Le nombre N affiché est alors exprimé comme suit :

$$N = T_x \cdot \text{Fréq. horloge} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{T_r}{V_{\text{réf}}} \cdot V_x \cdot \text{Fréq. horloge}$$

Le principal avantage de ce système par rapport à la simple rampe est que le coefficient de conversion ne dépend plus du condensateur de l'intégrateur; et ne dépend que d'éléments dont les caractéristiques comme Coefficient de température, précision, stabilité à long terme, peuvent être très bien maîtrisés. Un autre avantage est la réjection des bruits.

IV-3-3. CONVERTISSEUR TENSION - FREQUENCE

(Fig. IV-4)

Il existe plusieurs types de convertisseurs tension-fréquence, l'un des plus connus est le "VCO" (Oscillateur Commandé par une tension). La mesure de la fréquence de ce dernier fournit la valeur de la tension V_x à mesurer. Les systèmes les plus précis sont les convertisseurs ayant une boucle de réaction; convertisseur tension-fréquence ou Convertisseur à double rampe. Ceux-ci possèdent de plus une bonne réjection des signaux de perturbation. Ce critère régissant le Convertisseur tension-fréquence l'assimile à un Voltmètre intégrateur qui rejette les bruits superposés au signal utile. L'Amplification opérationnelle permet d'effectuer d'une part l'interface entre VCO et la tension d'entrée; et d'autre part de jouer le rôle de sommateur de courant entre I_1 , est proportionnel à V_x et I_2 proportionnel à F . Le CFT permet d'obtenir l'équilibre; $I_1 = I_2$

C.F.T - Convertisseur fréquence tension

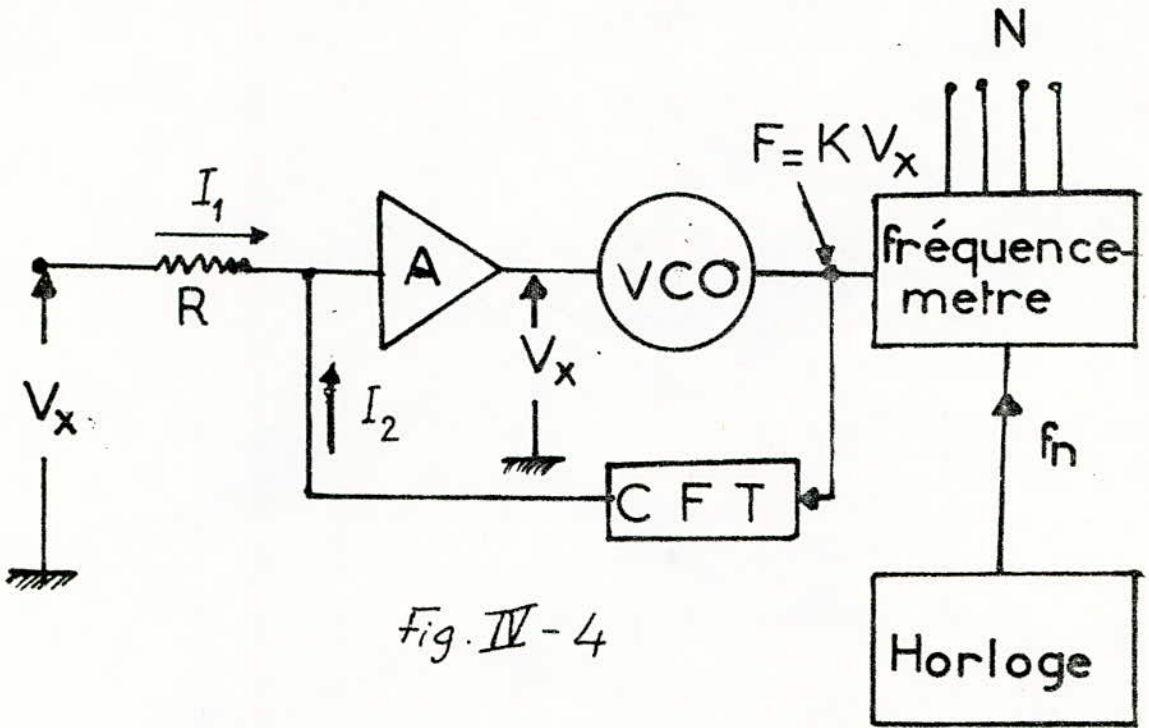


Fig. IV - 4

CONVERTISSEUR TENSION-FREQUENCE

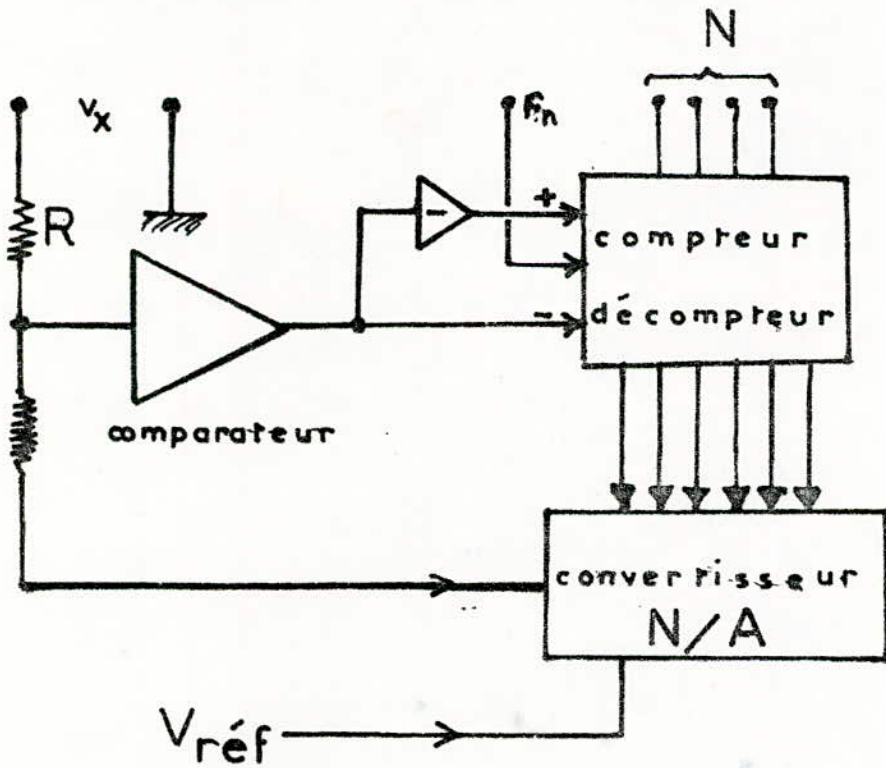


Fig. IV - 5 - CONVERTISSEUR PAR PESEES SUCCESSIVES

Soit $N = \frac{F}{f_n}$ (Fréquence d'horloge de référence)

$$I_1 = V_x / R \quad \text{et} \quad I_2 = k \cdot F \Rightarrow I_1 = I_2 \Leftrightarrow \frac{V_x}{R} = k \cdot F$$

d'où: $F = \frac{V_x}{k \cdot R}$

$$N = \frac{F}{f_n} = \frac{V_x}{k R f_n} = \frac{V_x K}{f_n}; \quad \text{où} \quad K = \frac{1}{k \cdot R}$$

L'intérêt de ce type de convertisseur est de ne faire intervenir dans la précision que des éléments qui, sur le plan technologique sont facilement maîtrisables (Résistances).

IV-3-4 - CONVERSION PAR PESEES SUCCESSIVES (Fig. IV-5)

Ce type de convertisseur est encore appelé à approximations successives, car l'on compare la tension inconnue à des tensions successives de référence. Le procédé s'apparente un peu, comme si l'on pèse une marchandise quelconque sur une balance; en jetant des poids dans l'un des plateaux. Celui-ci est rapide, mais ce qui le freine, c'est qu'il ne dispose que d'un seul comparateur. Il est très économique, sa précision dépend surtout de la stabilité de la tension de référence, de la qualité de son CNA, des caractéristiques de commutation, de la précision du comparateur. Le CNA permet d'annuler la tension V_x lorsque $I_1 = I_2$, celui-ci est commandé à partir d'un compteur décompteur de façon telle que la tension appliquée au comparateur soit quantifiée.

* AUTRES TYPES DE CONVERTISSEURS INTERVENANT DANS LES APPLICATIONS INDUSTRIELLES

a°)- CONVERTISSEUR RESISTANCE - FREQUENCE (Fig. IV-6)

Celui-ci est destiné à être utilisé avec des Capteurs à résistance tels que des potentiomètres ou des thermomètres à fil résistant, dans lesquels la résistance varie entre 0 et 300Ω au maximum. La fréquence de l'oscillateur n'est pas linéaire en fonction de la température:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}} = \frac{1}{K \sqrt{R_1(t^\circ)}} \quad ; \quad k = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}}$$

Alors, on ne peut donc pas placer le fréquencemètre directement à la sortie de l'amplification opérationnel. Néanmoins, dans le cas où la fréquence F (en Hz) est liée à la résistance R (en Ω) du capteur par une relation de la forme:

$$F = K \cdot R \quad (\text{modèle "A 1558"})$$

ou
$$F = KR + C \quad (\text{modèle "A 1558 D"})$$

avec: K - Coefficient réglable par potentiomètre, où:

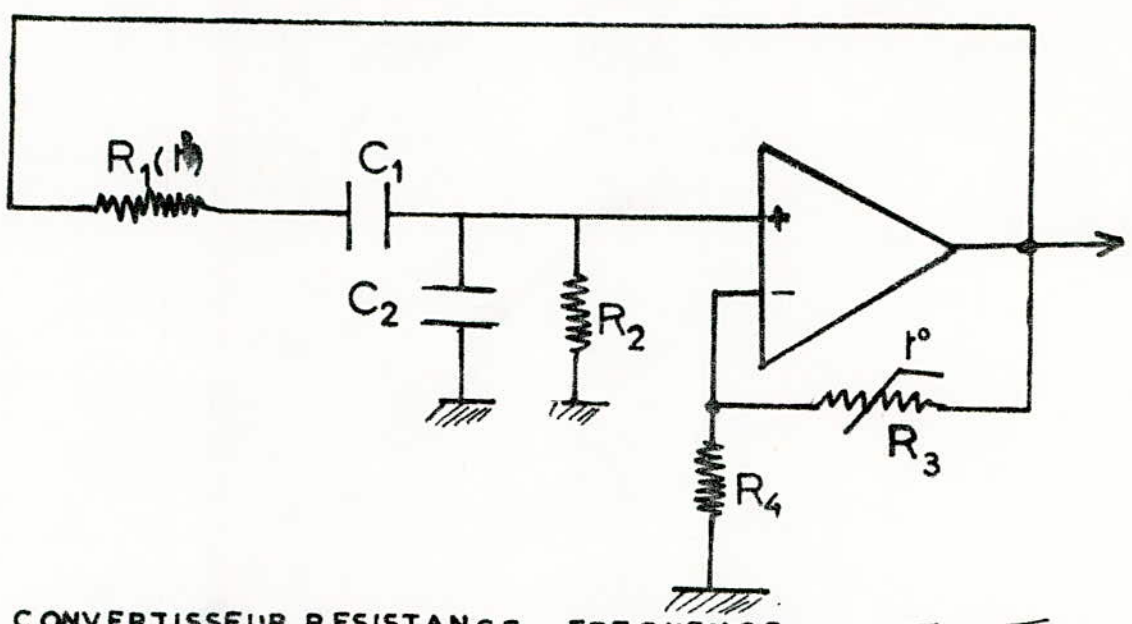
$$20 \leq K \leq 35$$

$$C - \text{Constante,} \quad 0 \leq C \leq 50\%$$

Dans ce cas, il est possible de brancher le fréquencemètre sans trop d'ambiguïté, ce convertisseur peut-être utilisé entre -55°C et $+40^\circ\text{C}$.

Un autre type de convertisseur résistance - fréquence se présentant sous forme de convertisseur intégré a été proposé par Analog Devices : L'AD 537

- L'AD 537 J ou K de gamme industrielle allant



CONVERTISSEUR RESISTANCE - FREQUENCE

Fig. IV-6-

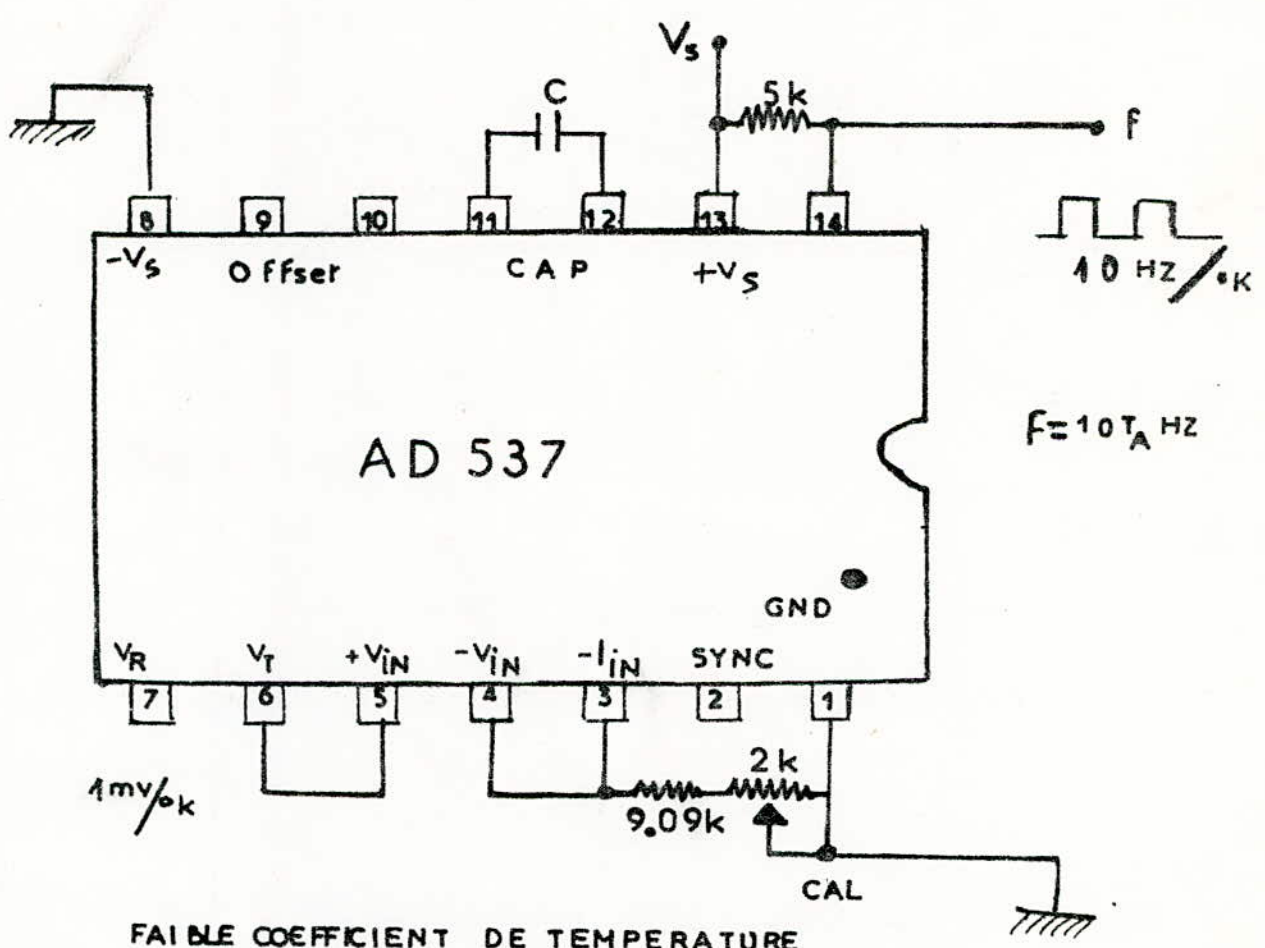


Fig. IV-7-

CONVERTISSEUR DEGRE KELVIN - FREQUENCE

de 0°C à 70°C ;

- L'AD 537 S de gamme militaire (-55°C à $+125^{\circ}\text{C}$)

b°)- CONVERTISSEUR DEGRE KELVIN - FREQUENCE (Fig. IV-7)

Ce schéma simple réalise une conversion de température en fréquence. La sortie $1\text{mV}/^{\circ}\text{K}$ fournit l'entrée de l'ampli tampon et le courant de commande de l'oscillateur est calibré pour être à $298\ \mu\text{A}$ à 298°K , soit 25°C . L'utilisation d'une capacité de $10^3\ \text{pF}$ permet d'obtenir la fréquence correspondant à $2,98\ \text{KHz}$. L'ajustage sur un seul point de calibration est suffisant pour garantir une erreur inférieure à 2°C de -55°C à $+125^{\circ}\text{C}$.

c°)- CONVERTISSEUR DEGRE CELSIUS - FREQUENCE (Fig. IV-8)

La sortie de référence 1V peut être adaptée avec la sortie $1\text{mV}/^{\circ}\text{K}$ pour réaliser de nombreuses échelles de température. Pour l'échelle Celsius, le point bas de la résistance de temporisation doit être décalé de $273\ \text{mV}$. Ceci est aisément réalisé et permet d'avoir une sortie variable 0 à $1\ \text{KHz}$ pour des variations de température de 0°C à 100°C .

d°)- INTERFACE AVEC DES CAPTEURS RESISTIFS (Fig. IV-9)

Tous les types de capteurs à éléments résistifs, comme les potentiomètres d'asservissement, les indicateurs de niveau, les thermistances, les capteurs photosensibles, les jauges de contraintes, etc. peuvent être directement connectés à L'AD 537. A titre d'exemple,

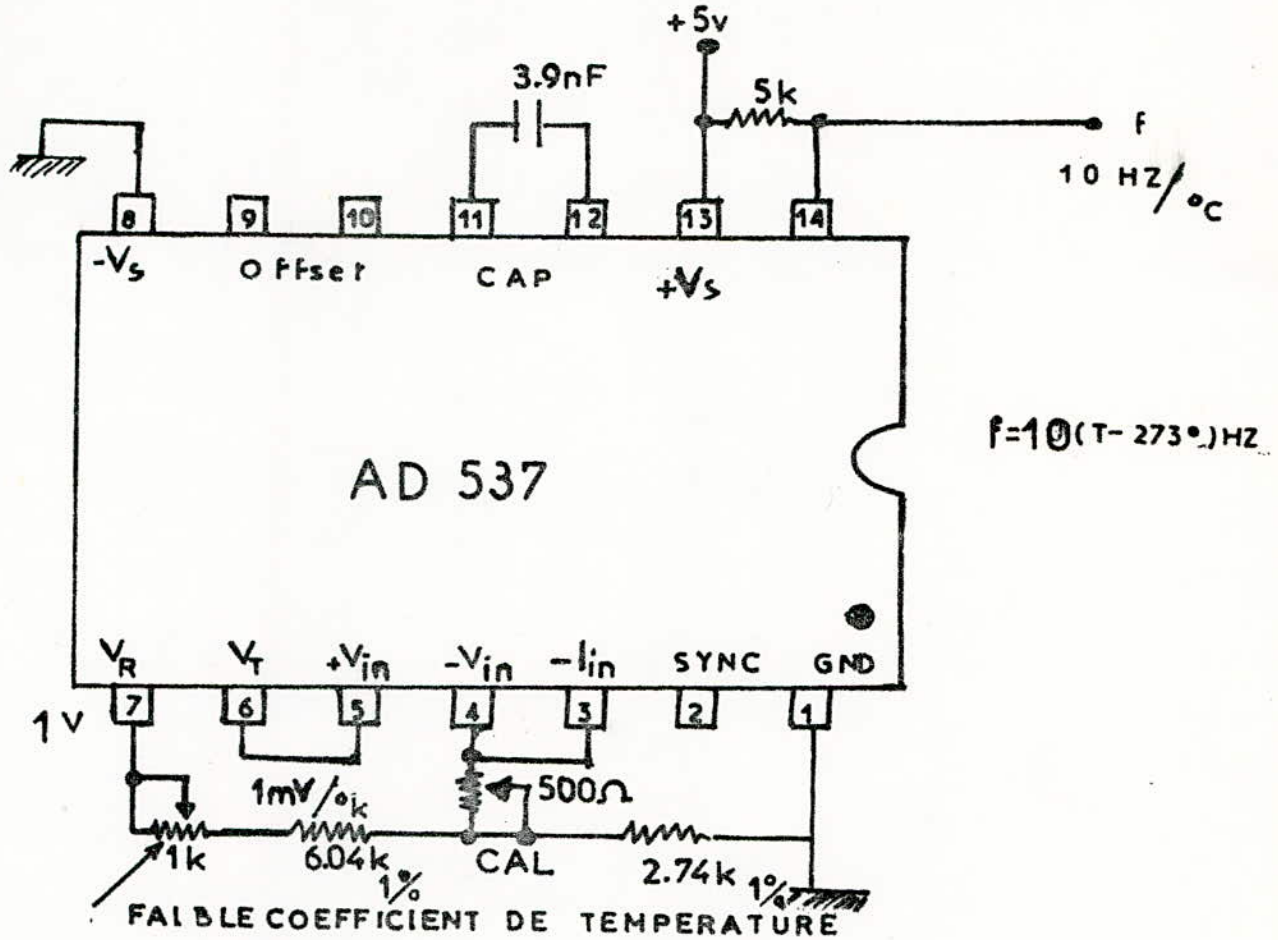


Fig. IV-8 - CONVERTISSEUR DEGRE CELSIUS - FREQUENCE

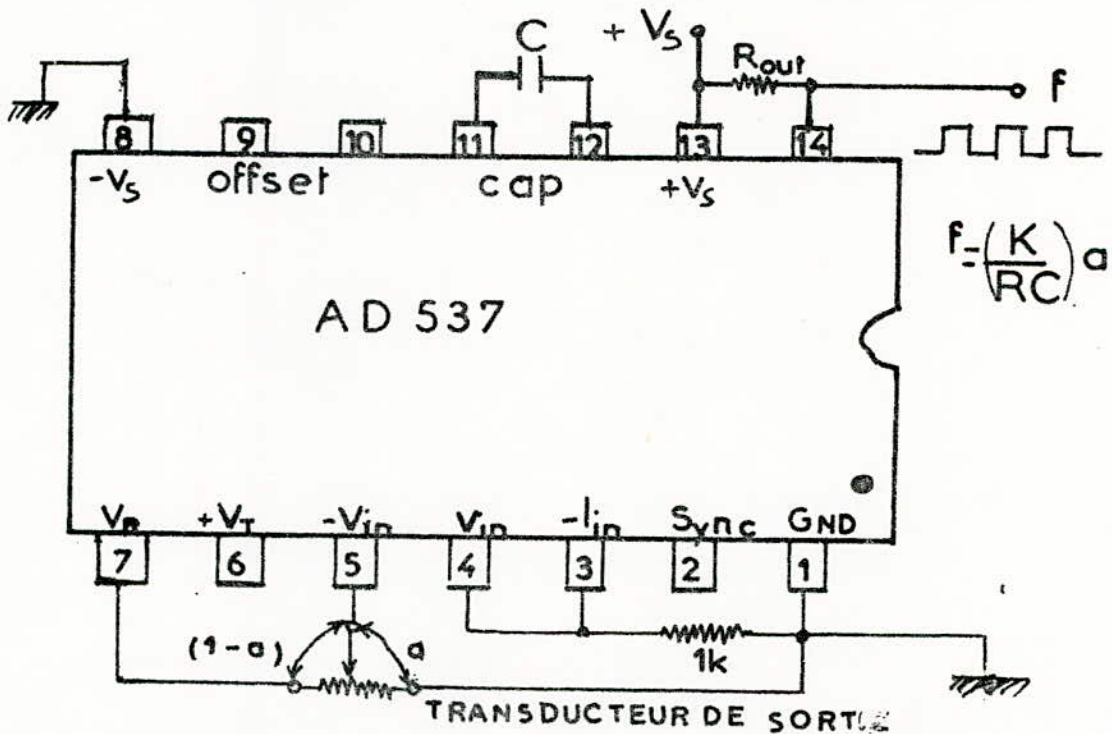


Fig. IV-9 - APPLICATION A UNE INTERFACE AVEC CAPTEURS RESISTIFS

les résistances variant de $3\text{ k}\Omega$ à $100\text{ k}\Omega$ sont aisément utilisées.

Nous citons également comme convertisseur analogique digital un circuit intégré précis et bon marché tel que le CA 3162, celui-ci peut être utilisé dans une très large gamme d'applications, par exemple : les thermomètres médicaux. Le CA 3162 utilisant une thermistance adéquate permet l'affichage direct de la température en degré et dixième de degré.

IV-3-5. LINEARISATION

Nous avons, tout au long des chapitres précédents, débattu le critère de linéarisation. En effet, celui-ci peut-être envisagé au niveau des CAN. C'est ainsi que nous proposons les schémas suivants :

_ VOLTMETRE NUMERIQUE (Fig. IV-10)

Ce type possède un dispositif tel que ce dernier détecte l'ordre des basculements qui définit la polarité du signal. Ce principe de conversion analogique numérique est très simple et se prête bien aux linéarisations.

_ THERMOMETRE A THERMOCOUPLE (Fig. IV-11)

Ce schéma de principe ainsi proposé se compose d'un dispositif de compensation de SF, d'un amplificateur et d'un voltmètre numérique linéarisé. Ce type de thermomètre entre dans la gamme des appareils très

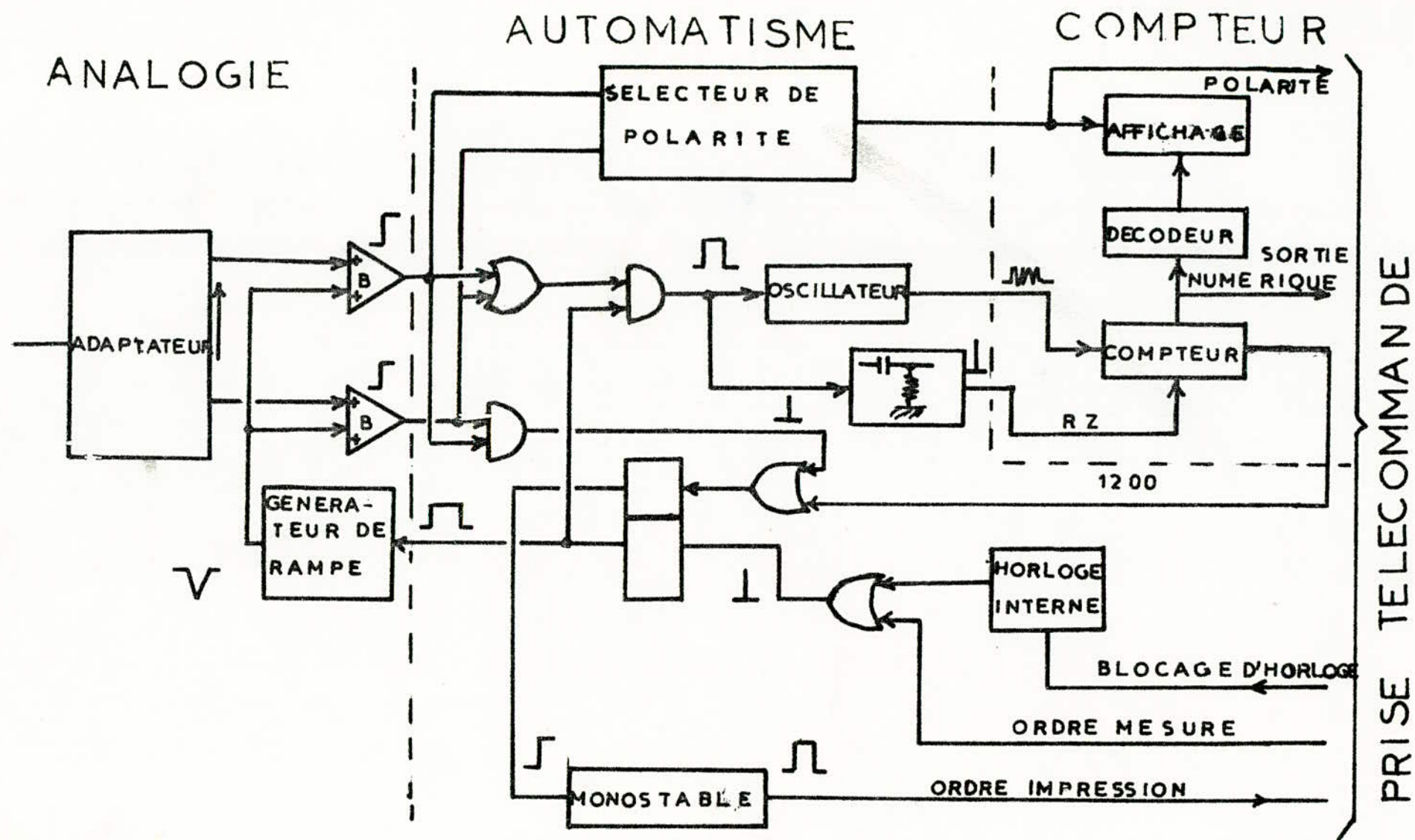


Fig. IV-10- SYNOPTIQUE D'UN VOLTMETRE NUMERIQUE

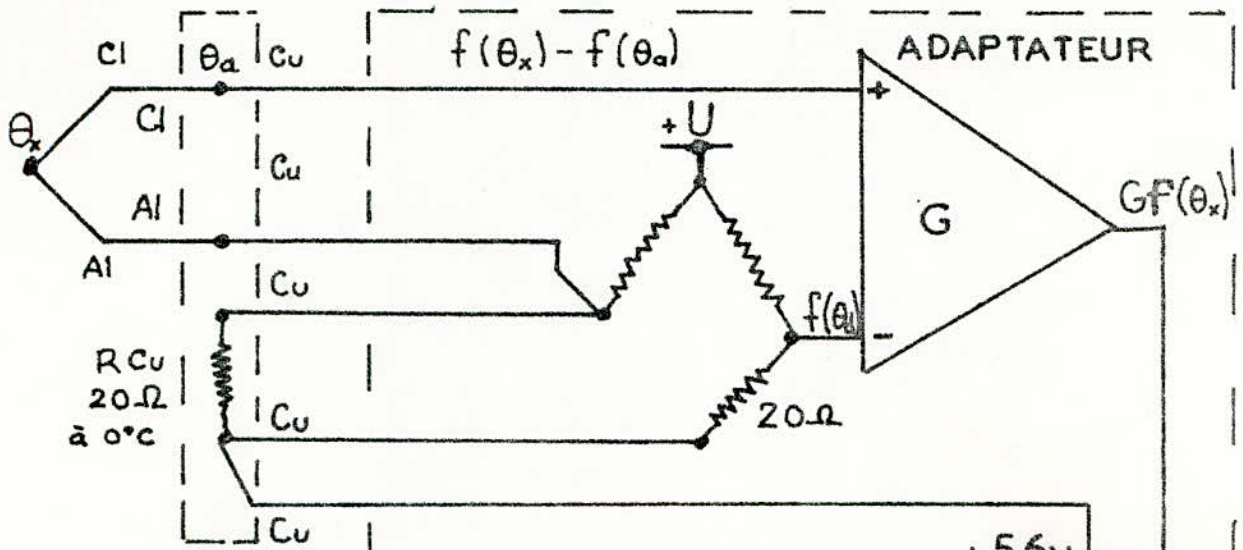
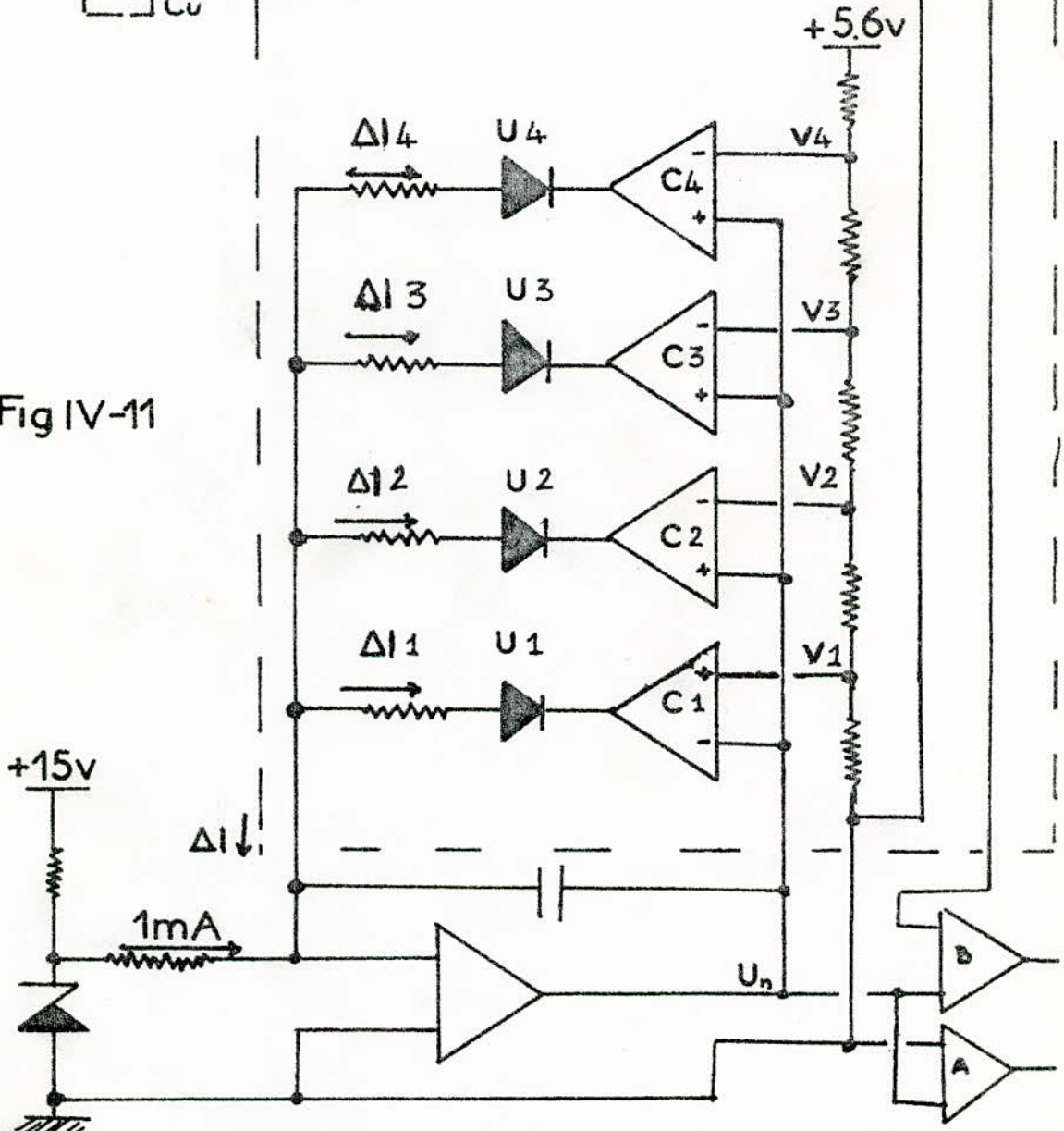


Fig IV-11



SCHEMA DE PRINCIPE D'UN THERMOMETRE A THERMOCOUPLE

performants. La linéarisation est faite à mieux que 1°C près pour les types de thermocouples.

Le choix d'un convertisseur peut se faire suivant les critères énumérés dans le tableau ci-dessous

Nom du Convertisseur	Précision	Vitesse	Réjection des bruits
Convertisseur à simple rampe	Moyenne ($5 \cdot 10^{-4}$)	Moyenne lente	Non
Convertisseur à double rampe	Très grande ($10^{-4} \div 10^{-5}$)	lente	Oui
Convertisseur tension fréquence	Très élevée (10^{-6})	Très lente	Oui
Convertisseur à approximations successives	élevée $5 \cdot 10^{-5}$	élevée	Non

CHAPITRE V

REALISATION

V-1. PRELIMINAIRES

Cette réalisation a pour dessein essentiel d'établir en effet, le lien entre ce critère abordé, notamment celui de la linéarité. Les capteurs que nous avons envisagés possèdent pour la plupart une caractéristique importante: la linéarité qui est liée à la technique de conversion. Nous n'avons pu réaliser un appareil susceptible d'afficher la grandeur physique compte tenu du laps de temps qui nous a été imparti.

V-2. MONTAGE UTILISE : CAPTEUR RESISTIF

A %- (CAS DU PLATINE)

V-2-1. SCHEMA DE PRINCIPE (Fig. V-1)

Les valeurs mesurées sur ce montage sont les suivantes: $V_z = 4,92\text{ V}$ et $V_{\text{réf}} = 0,62\text{ V}$

$$V_s = \frac{V_{\text{réf}}}{2} \cdot K \frac{\Delta R}{R}$$

Prenons: $K = 10$; $R = 100\ \Omega$ et $\frac{\Delta R}{R} = 100\% = 1$

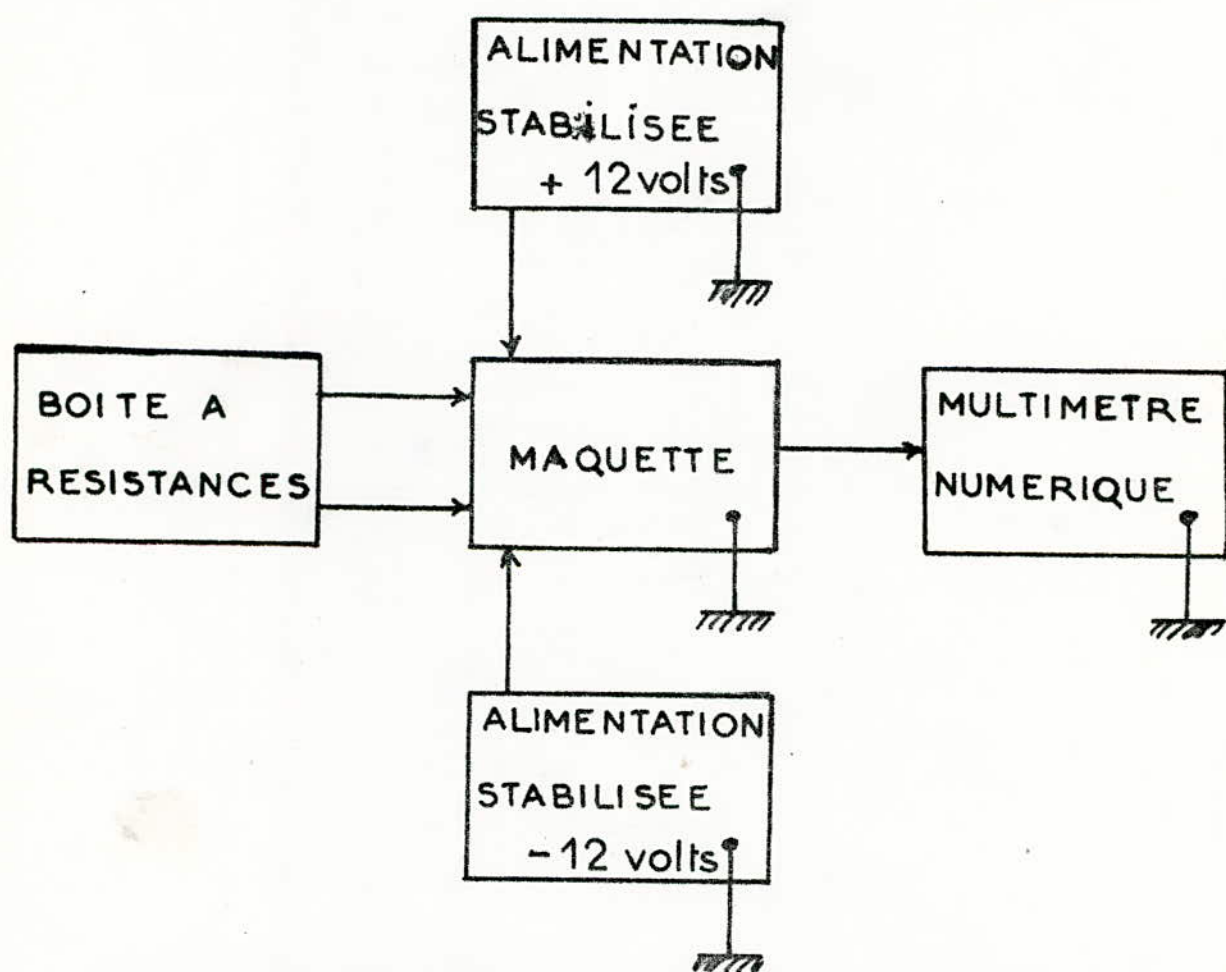
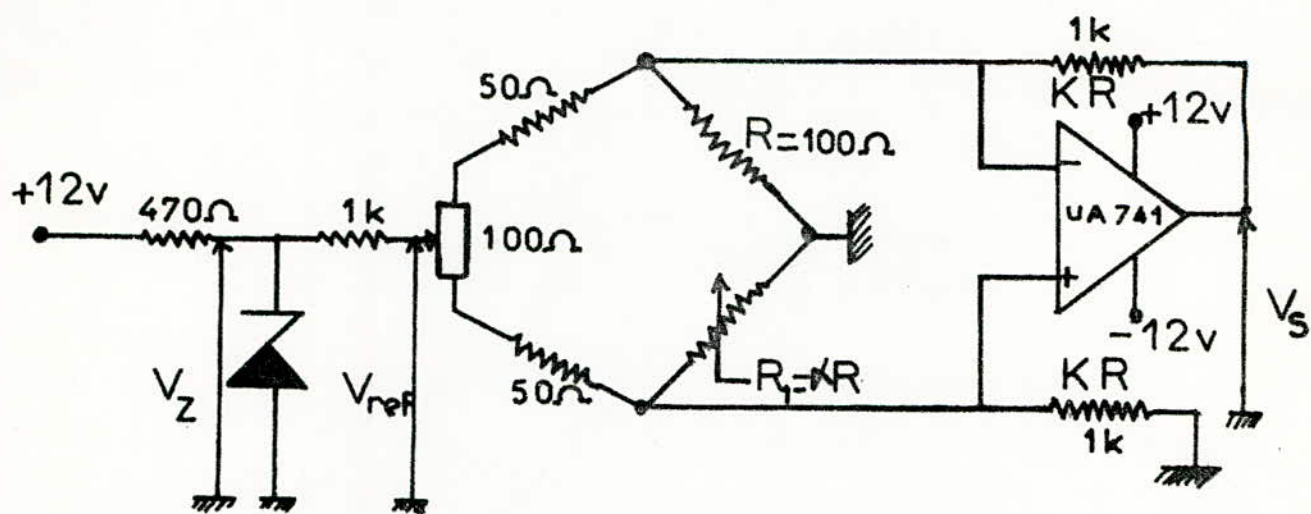
$$\alpha = 1 \div 2 ; R_1 = 1\text{ K}\Omega$$

Nous avons ainsi constitué un pont asymétrique.

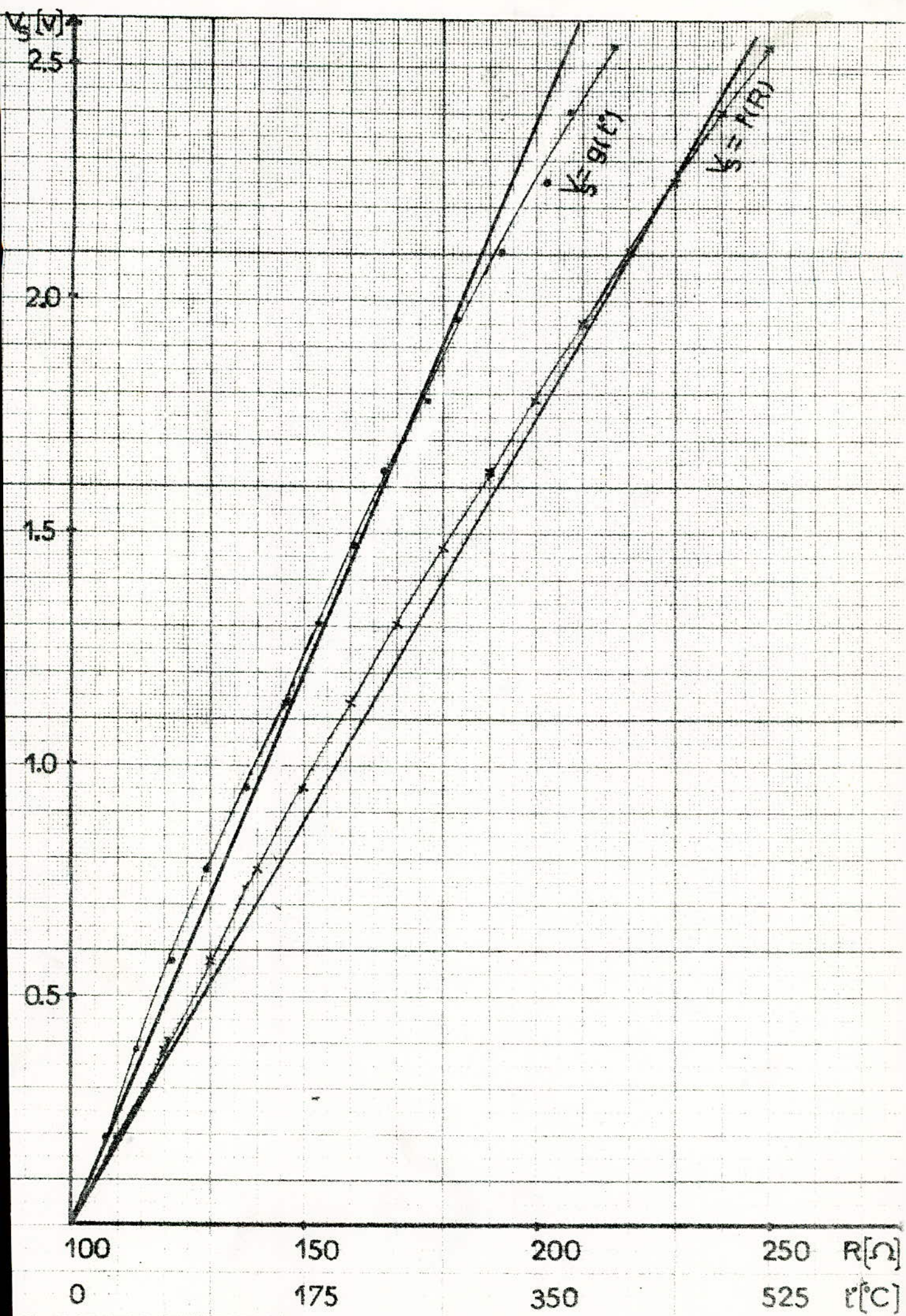
$$V_s = \frac{0,62}{2} \times 10 \times 1 = 3,1\text{ V}$$

La diode Zener est utilisée de façon que le signal de sortie qui va être injecté au CAN ne soit supérieur à +5V. Dans notre cas, $V_{s\text{ max}} = 3,1\text{ V}$, Cette tension peut toujours être augmentée :

Fig. V-1. SCHEMA DE PRINCIPE POUR CAPTEUR RESISTIF



SYNOPTIQUE DE L'APPAREILLAGE UTILISE POUR
L'OBTENTION DES MESURES



- Soit en utilisant un autre type de diode Zener ;
- Soit en utilisant une autre résistance moins élevée, et celle-ci devant être placée à l'entrée du pont.

V-2-2. APPAREILS UTILISES

L'Appareillage utilisé est représenté dans le schéma Synoptique :

- Deux alimentations stabilisées de type MC 4020 C ;
- Un multimètre numérique de type PM 2522 ;
- Une boîte à résistances variables de type RM 28

V-2-4. GRAPHES ET CONCLUSIONS

a) - GRAPHES : $V_s = f(R)$; $V_s = g(t^\circ)$

b) - CONCLUSIONS

Les résultats obtenus sont satisfaisants, le montage réalisé obéit bien au critère de la stabilité et peut être utilisé dans la pratique. La courbe $V_s = g(t^\circ)$ est quasiment linéaire dans le domaine de 0° à 400° . L'Exploitation de ces résultats peut donc aboutir à une réalisation pratique sans faire recours à la linéarisation.

B°/ V-2- MONTAGE UTILISE : CAPTEUR THERMO-ELECTRIQUE (CAS DU CHROMEL-ALUMEL)

V-2-1 - SCHEMA DE PRINCIPE (Fig V-2-)

Dans ce montage, le thermocouple est remplacé par un diviseur de tension constitué par une résistance variable R_v et une résistance fixe $R = 100 \text{ k}\Omega$. La tension

V-2-3- TABLEAU DE MESURES POUR LE CAPTEUR RESISTIF
(PLATINE)

$R_{\text{exacte}} (\Omega)$	100	110.12	120.16	130.13	140.02	149.82	160.30	169.94	179.88	190.09
$R_{\text{utilisée}} (\Omega)$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
$t^{\circ} (^{\circ}\text{C})$	0	26	52	78	104	130	158	184	211	239
$V_{\text{Sortie}} (V)$	0	0.199	0.394	0.584	0.769	0.950	1.127	1.30	1.467	1.632

$R_{\text{exacte}} (\Omega)$	199.85	209.88	219.82	230.02	240.13	250.13
$R_{\text{utilisée}} (\Omega)$	200	210	220	230	240	250
$t^{\circ} (^{\circ}\text{C})$	266	294	323	351	380	409
$V_{\text{Sortie}} (V)$	1.793	1.952	2.11	2.25	2.40	2.54

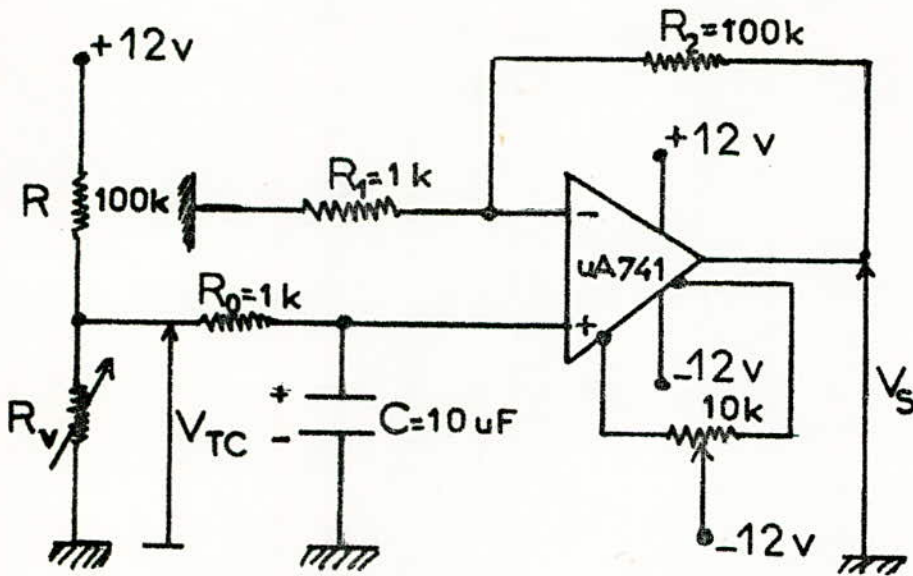
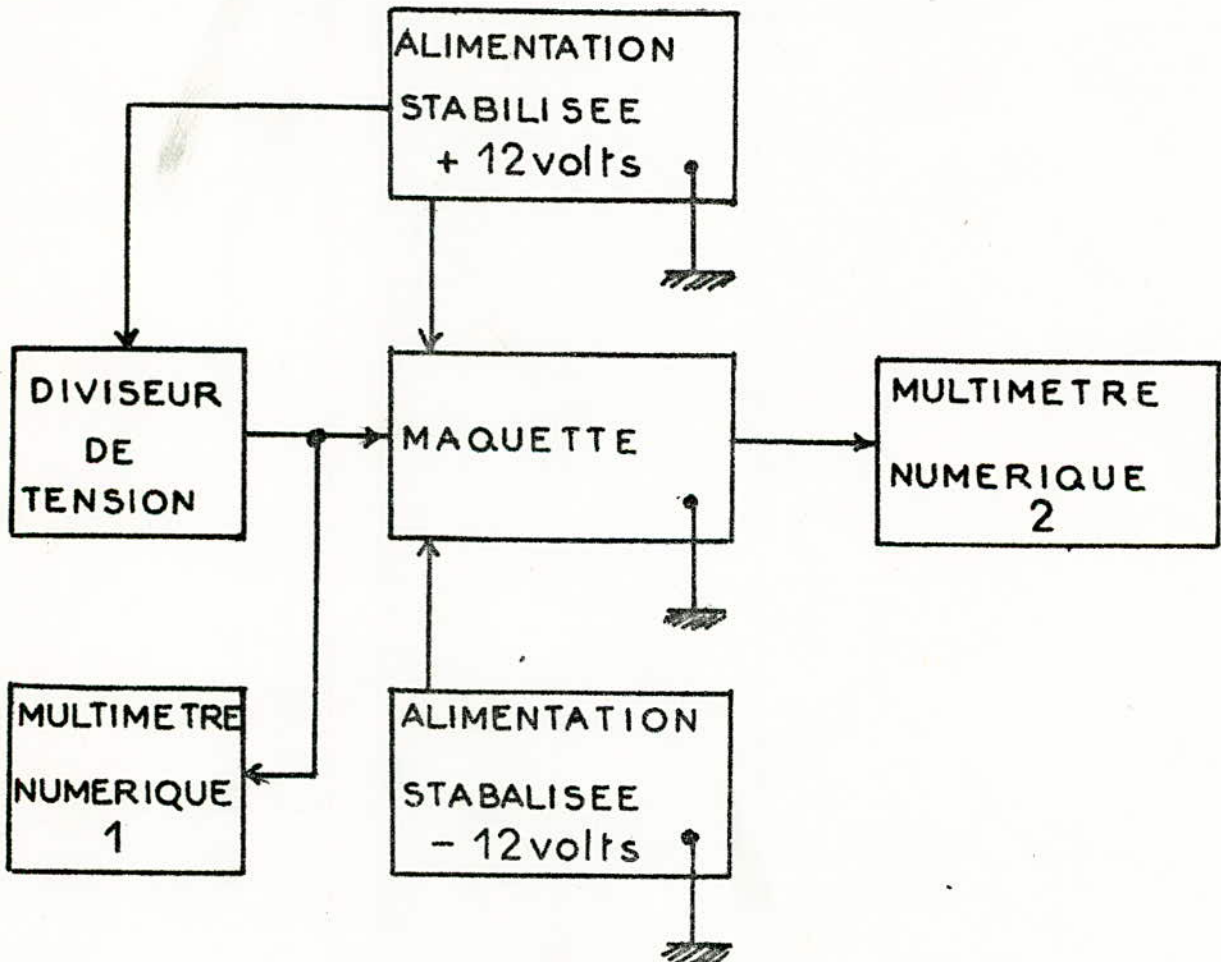


Fig. V-2-

SCHEMA DE PRINCIPE POUR CAPTEUR THERMOELECTRIQUE



SYNOPTIQUE DE L'APPAREILLAGE UTILISE POUR L'OBTENTION DES MESURES

du thermocouple notée V_{TC} est égale à :

$$V_{TC} = \frac{R_V}{R_V + R} \times V_{CC}$$

Connaissant la sensibilité du couple Chromel-Alumel ($40 \mu V / ^\circ C$), nous pouvons calculer :

$$V_{TC} = 0 \div 20 \text{ mV pour } t = 0^\circ C \div 500^\circ C$$

* CALCUL DE QUELQUES ELEMENTS

Nous disposons d'un filtre passe bas, de ce fait la valeur de la Capacité est calculée de façon à éliminer les parasites.

$$f = \frac{1}{2\pi R_0 C} \leq 25 \text{ Hz} \Rightarrow C \geq \frac{1}{2\pi \times 10^3 \times 25}$$

$C \geq 6,4 \mu F$ (dans le schéma de principe, nous avons inséré une capacité céramique de $10 \mu F$)

$$R_1 = 1K\Omega ; R_2 = 100K\Omega ; R_0 = R_1 \parallel R_2 = 1K\Omega$$

Le potentiomètre de $10K\Omega$ réalise l'offset, l'ampli étant non inverseur dont le gain vaut $G = 1 + R_2/R_1$

$$G \approx 100$$

$$V_{Smax} = V_{TC \text{ max}} \times G = 20 \times 10^{-3} \times 10^2 = 2 \text{ V}$$

La Valeur de R_V est la suivante :

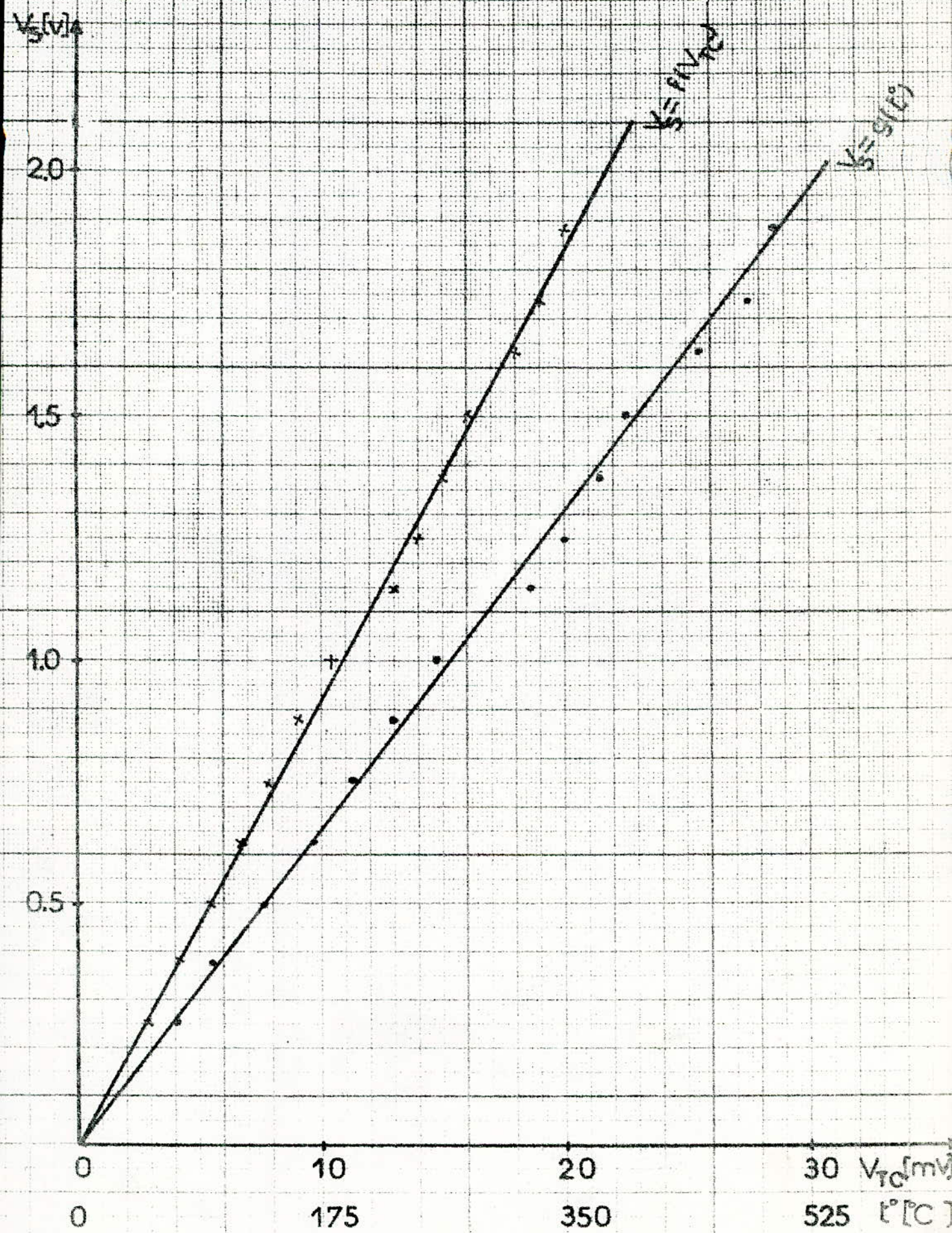
$$V_{TC} = \frac{R_V}{R_V + R} \cdot V_{CC} \quad ; \quad V_{CC} = 12 \text{ V} \quad ; \quad R = 100K\Omega$$

$$V_{TC} = 20 \text{ mV}$$

tous calculs faits : $R_V \approx 167 \Omega$ (Resistance maxi)

$$R_V = 0 \div 167 \Omega \quad ; \quad V_{TC} = 0 \div 20 \text{ mV}$$

La Valeur $V_{Smax} = 2 \text{ V}$ est loin de saturer l'ampli opérationnel.



V-2-2. APPAREILS UTILISES

- Deux alimentations stabilisées de type MC4020C;
- Deux multimètres numériques de type PM 2522 (un seul peut être utilisé en se servant d'un commutateur)
- Un diviseur de tension.

V-2-3. GRAPHES ET CONCLUSIONS

a). GRAPHES : $V_s = f(V_{Tc})$; $V_s = g(t^\circ)$

b). CONCLUSIONS

Les courbes obtenues sont également linéaires, ce qui est fort intéressant, car le Chromel-Alumel est le thermocouple le plus linéaire. Ces résultats peuvent être utilisés dans la pratique.

V-2- MONTAGE UTILISE: CAPTEUR RESISTIF (CAS DU PLATINE)

V-2-1. SCHEMA DE PRINCIPE (Fig. V-3)

Ici le capteur résistif est remplacé par une boîte à résistances variables avec $R_0 = 100 \Omega$ en série avec 900Ω , de façon à réaliser un pont symétrique qui possède sur chaque branche une résistance de $1K\Omega$. Ce même pont peut être réalisé avec des résistances de 100Ω , mais dans ce cas l'Ampli opérationnel va être chargé très fortement. Cela revient à placer un étage de puissance à la sortie de l'ampli. Il est à souligner que le montage utilisé présente par ailleurs une meilleure sensibilité. Ce qui justifie

V-2-4

TABLEAU DE MESURES POUR LE CAPTEUR THERMOELECTRIQUE

(cas du chromel - alumel, sensibilité égale à $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$)

t° ($^\circ\text{C}$)	≈ 0	72.5	102.5	135	165	197.5	227.5	260	325	350
V_{TC} (mV)	0.3 *	2.9	4.1	5.4	6.6	7.9	9.1	10.4	13	14
V_s (V)	0.004**	0.25	0.38	0.50	0.63	0.75	0.88	1	1.12	1.25

t° ($^\circ\text{C}$)	375	400	450	475	500
V_{TC} (mV)	15	16	18	19	20
V_s (V)	1.37	1.5	1.62	1.74	1.87

* tension du bruit de fond à l'entrée.

** tension à la sortie après l'offset quand la résistance variable $R_v = 0$

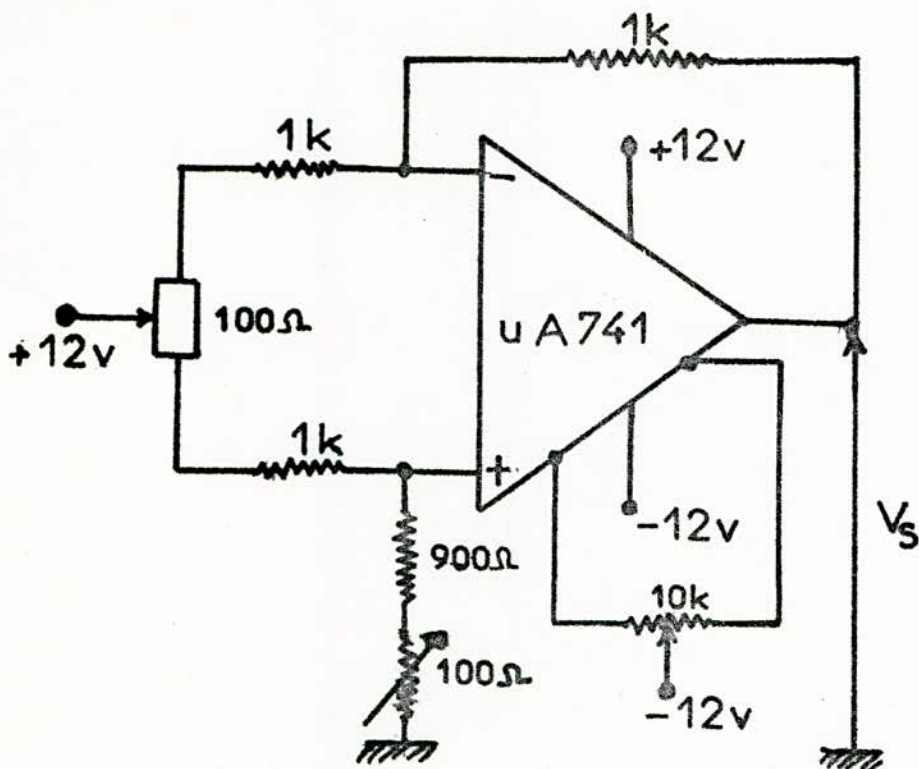
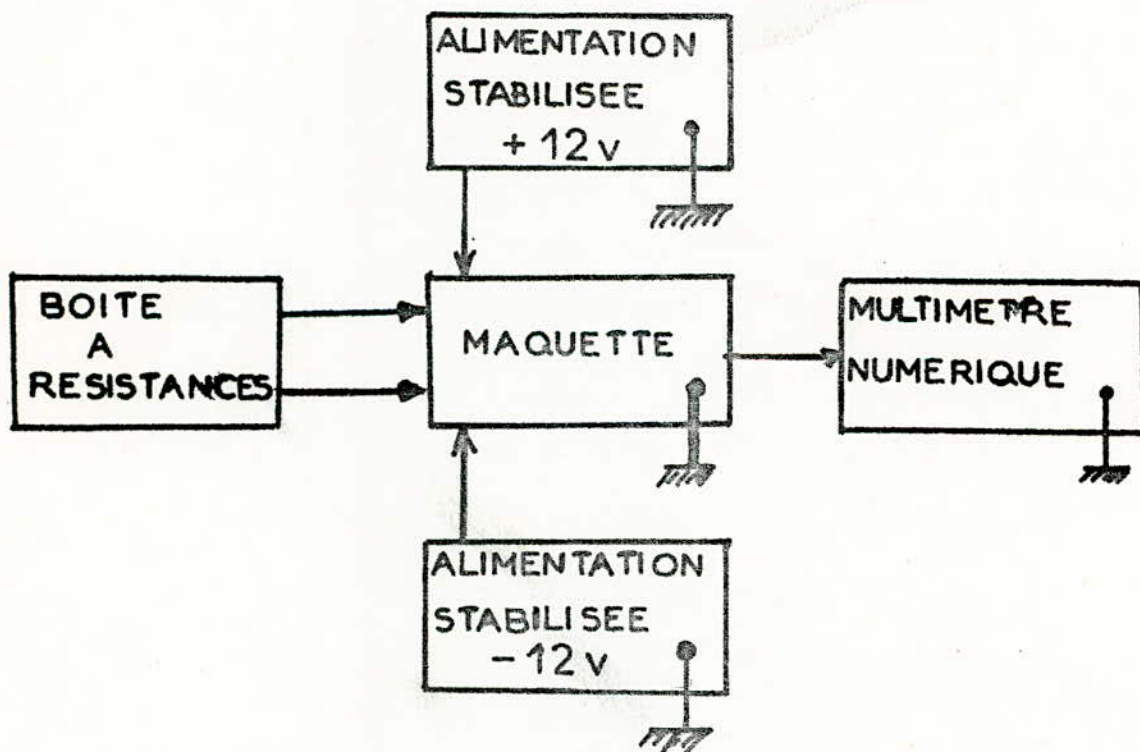


Fig. V-3

SCHEMA DE PRINCIPE POUR CAPTEUR RESISTIF

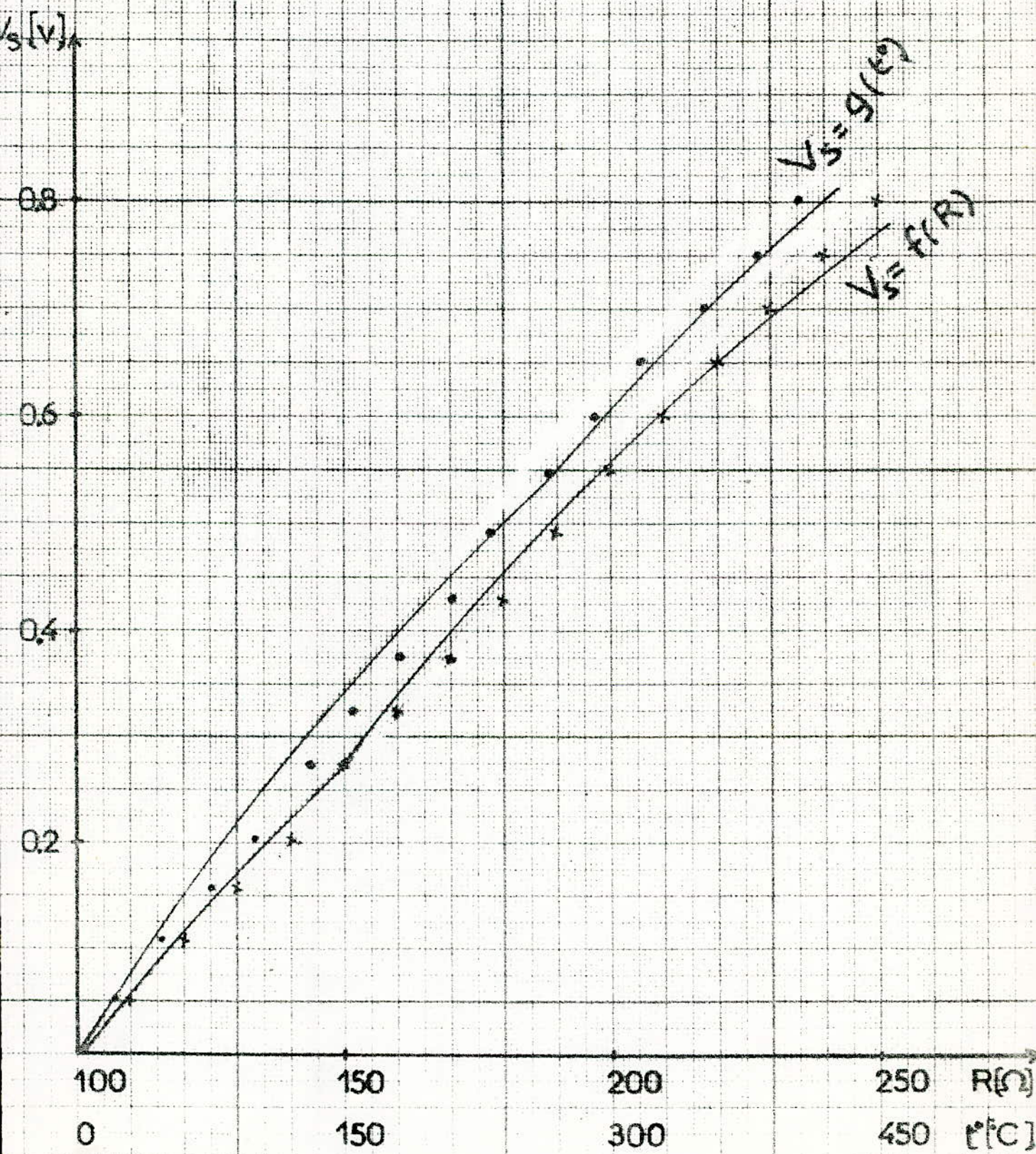


SYNOPTIQUE DE L'APPAREILLAGE UTILISE POUR L'OBTENTION DES MESURES

V-2-4 TABLEAU DE MESURES POUR LE CAPTEUR RESISTIF
(PLATINE)

$R_{\text{exacte}} (\Omega)$	100	110.12	120.16	130.13	140.02	149.82	160.30	169.94	179.88	190.09
$R_{\text{utilisée}} (\Omega)$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
$t = (^\circ\text{C})$	0	26	52	78	104	130	158	184	211	239
$V_{\text{sortie}} (V)$	0	0.05	0.11	0.16	0.20	0.27	0.32	0.37	0.43	0.49

$R_{\text{exacte}} (\Omega)$	199.85	209.88	219.82	230.02	240.13	250.13
$R_{\text{utilisée}} (\Omega)$	200	210	220	230	240	250
$t = (^\circ\text{C})$	266	294	323	351	380	409
$V_{\text{sortie}} (V)$	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80



notre choix ;

- le potentiomètre de 100Ω sert à régler l'équilibre du pont ;
- Celui de $10 K \Omega$ nous permet d'avoir $0V$ pour $R_0 = 100 \Omega$

$$V_s \approx \frac{V_{ref}}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad \text{si } \Delta R \ll R$$

$$V_s = V_{ref} \left| \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} \right| \quad \alpha = 1 + 2$$

V-2-2- APPAREILS UTILISES

- Deux alimentations stabilisées de type MC4020C ;
- Un multimètre numérique de type PM 2522 ;
- Une boîte à résistances variables de type RM 28

V-2-3 - GRAPHES ET CONCLUSIONS

a) - GRAPHES : $V_s = f(R)$; $V_s = g(t^\circ)$

b) - CONCLUSIONS :

Ce montage utilisé assure normalement la linéarité $V_s = f(R)$, mais compte tenu des composants utilisés (Potentiomètres d'Offset et celui qui assure l'équilibrage) comme on le voit sur le graphe, certains points sont décalés. La courbe $V_s = g(t^\circ)$ est non linéaire, ce qui se justifie par la non linéarité du thermomètre en platine. Dans le domaine d'utilisation, c'est-à-dire entre $0^\circ C$ et $409^\circ C$, l'erreur de non linéarité n'est pas très grande. Ce montage peut être également utilisé avec succès dans la pratique.

CONCLUSION

Ce travail qui touche à sa fin avait pour but primordial l'étude de différents capteurs de température et ainsi que des techniques d'affichage numérique.

En rétrospective :

- Dans le bref sommaire que nous avons dressé, l'intérêt était de définir l'échelle légale de température constituée de deux unités : $^{\circ}\text{C}$ et $^{\circ}\text{K}$.
- Le noeud du problème posé a été consacré aux données techniques ainsi qu'à la gamme d'utilisation de divers capteurs de température rencontrés.
- Ensuite, viennent donc les dispositifs destinés à la mesure de la grandeur physique envisagée ; puis divers montages alloués aux capteurs.
- Notre grandeur analogique (température) nécessite une conversion pour être enfin affichée ; à cet effet, les problèmes de technique d'affichage numérique sont donc prévus.
- Enfin, le dernier volet revêt d'une importance capitale car celui-ci nous a permis de concilier les deux parties intégrantes du domaine technique qui est le nôtre. Eu égard aux résultats obtenus qui ont été satisfaisants pour les trois montages réalisés, nous pensons que

Ceux-ci peuvent être d'un apport assez considérable en pratique dans un domaine comme celui-ci qui possède un large champ d'application : dans l'industrie où l'on suit par exemple la cuisson de la porcelaine, dans les laboratoires de Biochimie, en électronique médicale, etc.

En définitive, comme perspectives d'avenir, nous souhaiterions que ce même travail soit entrepris sous les mêmes auspices. Mais, cette fois-ci, en réalisant une chaîne de mesure avec le véritable capteur de température inséré dans l'un des montages exécutés, suivi d'un véritable Convertisseur analogique numérique et enfin d'un bloc d'affichage.

(Il est à souligner que dans notre travail, nous nous sommes limités à une simulation de Capteurs de température,)

BIBLIOGRAPHIE

- 1_ A. NIETO et F. PAUL
Mesure des températures
Editions Radio , Paris 1975
- 2_ J. BURTON
Pratique de la mesure et du Contrôle dans l'industrie 2
Edition Dunod , Paris 1966
- 3_ V. RAMIREZ
Les Résistances non linéaires à Semi-conducteurs.
Modules Teccart
Edition Dunod , Paris 1981
- 4_ U. ZELBSTEIN
Mesures électroniques au Laboratoire et dans l'industrie
Edition Dunod , Paris 1969
- 5_ M. CAPOT
Les Principes des mesures : Pressions, débits, niveaux,
températures .
Société des éditions Technip , Paris 1971
- 6_ S. BELAKHOWSKY
Chauffage et Ventilation des locaux
Deuxième édition technique et vulgarisation, Paris 1963

- 7_ R. FONTENAY
Numérique - Analogique
Convertisseurs
Analogique - Numérique
Editions Radio , Paris 1979
- 8_ B. LORIFERNE
La Conversion Analogique - Numérique et Numérique -
Analogique .
Editions Eyrolles , Paris 1976
- 9_ Maurice ORFEUIL
Electrothermie Industrielle
Edition Dunod , Paris 1981
- 10_ A. HAAS
Applications Industrielles des procédés électroniques
Editions Radio , Paris 1966
- 11_ H. SOUBIES - CAMY
L'Informatique Industrielle
Acquisition et traitement des données
Editions Radio , Paris 1970
- 12_ W.O. GILMOUR
Appareillage électronique industriel
Equipements de commande et de réglage
Editions Eyrolles , Paris 1969

- 13_ Data Acquisition Handbook National Semi-Conductor
U.S.A. 1978
- 14_ Full Line Catalogue
PMI 1981
- 15_ A. CAMPA
Technologie Professionnelle générale pour les Méca-
niciens - Tome II -
"Mesure des températures élevées" Pages 143-149
Editions Foucher, Paris 1971

REVUES

- 1_ A. MOREAU
La mesure numérique des températures
Extrait de la Revue électronique et microelectronique
industrielles.
AOIP n° 176, 15 Juin Paris 1973
- 2_ Mesure de Températures
AOIP, Paris 1973
- 3_ D. HEYDEN
Radio Plans
Journal d'Electronique appliquée
"Les Capteurs Biomédicaux" Page 57
N° 352 Mars 1977, Paris.

- 4_ R. RATEAU
Radio Plans
Journal d'Electronique Appliquée
"Sonde thermométrique de précision" page 76
N° 373 Décembre 1978, Paris.
- 5_ CYRILLIA
Radio Plans
Electronique Loisirs
"La Mesure des Températures" Pages 61 ÷ 65
N° 439 Juin 1984, Paris.
- 6_ Un Thermomètre Numérique : Le TC F₂
"Journal Haut Parleur" Pages : 99 ÷ 104
N° 1668 Mai 1981, Paris
- 7_ Radio Plans Electronique Loisirs
"Mesurez les températures avec précision ! un
Thermomètre à affichage numérique" Page 45
N° 412 Mars 1982, Paris.