

وزارة التعليم والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Alex

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT MECANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

Mise en marche du système de
régulation de température des
fumées :

Proposé par :

A. DINE

Etudié par :

A. DINE

Dirigé par :

A. WERNER

PROMOTION :

1981-1982

DEDICACES

A ma mère

A mon père

A mes frères

A tous ceux que j'aime

je dédie ce modeste travail .

Remerciements

Je tiens à remercier tous les enseignants qui ont contribué à ma formation d'ingénieur en particulier ceux du Génie-mécanique.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à M. A WERNER pour son aide, son suivi et ses conseils combien utiles qu'il m'a prodigués, en souhaitant qu'il trouvera dans ce modeste travail toute mon admiration.

Je remercie les agents, les techniciens surtout Abde'kader pour son sympathie et tout ceux qui ont contribué, de loin ou de près à l'élaboration de ce projet.

TABLE DE MATIERES

I	INTRODUCTION	1
II	DESCRIPTION DU SYSTEME DE REGULATION	
II1	Le transmetteur	3
II2	Le regulateur	6
II3	Le servomoteur	13
II4	La vanne	19
II5	Le thermocouple	22
III	MESURE DE LA TEMPERATURE	
III1	Generalite	26
III2	Principes de mesure	27
III3	Les instruments de mesure de temperature	28
III4	Les caracteristiques principales des instruments de mesure de temperature	28
III5	Thermometres utilisant les proprietes thermoelectrique	29
III51	Thermometre a resistance	29
III51a	Principe de mesure	29
III51b	La sonde	30
III51c	Mesure avec pont Wheatstone equilibre	30
III51d	Pont desequilibre	31
III51e	Compensation de la resistance de la ligne (Sonde a 3 fils)	31
III51f	Appareils a equilibrage automatique	32
III51g	Le logometre	32
III52	Thermistances	32
III53	Les thermocouples	33
III53a	Introduction	33
III53b	Hypothese effet de Volta	33
III53c	Experience de Seebeck	34
III53d	Experience de Peltier	34
III53e	Experience de Thomson	34
III54	Principales qualites requises pour les thermocouples	35
III55	Precision	35
III55f	Vieillessement des thermocouples	36

III552	Soudure froide (correction)	36
III553	Inertie des thermocouples	37
III554	Espace mort entre la gaine et le thermocouple	38
III555	Vitesse de fluide entourant le thermocouple	39
III556	Effet de radiation	39
III557	Conductibilité de la gaine et du thermocouple	39
III56	Erreur dynamique et retard	40
III57	Assemblage des thermocouples	40
III58	Mesure de fem d'un thermocouple	41
III58a	Méthodes directes	41
III58b	Méthode potentiométrique ou de zéro	42
III58c	Compensation manuelle par décalage de l'échelle ou à double curseurs	43
III58d	Compensation par potentiomètre	43
III58e	Compensation automatique	43
III58f	Appareil à équilibrage automatique	43
IV	VANNES DE REGLAGE	
IV1	Reglage du débit	45
IV2	Coefficient de débit C_v	45
IV2a	Historique	45
IV2b	Définition	45
IV3	L'intérêt du C_v	45
IV4	Détermination de C_v	46
IV1	Historique	46
IV5	Vannes en service liquide	47
IV6	Dimensionnement des vannes en services gaz et vapeur	49
IV7	Vannes en série avec résistance, composition de C_v	51
IV8	Notion de C_v équivalent	52
IV9	Choix de vanne de réglage	53
IV10	Caractéristiques d'une vanne de réglage dans une installation	54
IV11	Choix de la caractéristique d'une vanne	55
IV12	Plage de réglage	55
IV13	Sensibilité unitaire d'une vanne	56
IV14	Perte de charge dans la vanne	56

V ETUDE EXPERIMENTALE

V1 Transmetteur	57
V2 Regulateur	58
V3 Positionneur	61
V4 Vanne de reglage	65
V5 Vanne en serie avec resistance	67
V6 Procédé	70
V7 Thermocouple	71

VI ELEMENTS EFFECTUÉS

73

VII CONCLUSION

75

Table des tableaux

Tableau des valeurs des forces electromotrice et courants	58
-----------------------------------------------------------	----

Tableau des mesures	69
---------------------	----

Table des dessins

Vis ecrou	73
-----------	----

Tube	74
------	----

Abreviations

FEM : Force electro motrice

NL : Non lineaire

PI : Proportionnel et integral

Département: ... G. MECHANIQUE

Professeur: A. WERNER

Thème Ingénieur: A. DIBES

معلمة ..
وجه
لمزيد من هندسة

الموضوع

الملخص : يتمثل هذا المشروع في تشغيل نظام تحكم تلقائي (أوتوماتيكي) لدرجة الحرارة في مخرج غرفة ما قبل الاحتراق ، للثيفة للهواء في مدخل غرفة الاحتراق (المحرك ثقات) المراد دراستها .
استنادا على العناصر المحيطة بحلقة التنظيم :
- استنتاجا خصائص كل عنصر
- اقصينا عدم استقرار الحلقة الداخلية .
- اعدنا السلسلة الكوتة للنظام بحيث استبدلنا غرفة ما قبل الاحتراق بأخرى ذات سحب طبيعي مما يسمح بدراسة نظام التحكم هذا بدون تشغيل مآفئة الهواء .

Subject: Mise en marche du système de régulation de température des fumées

Résumé: Ce projet consiste à la mise en marche d'un système de régulation automatique de la température à la sortie de la chambre de précombustion qui conditionne l'air à l'entrée de la chambre de combustion (d'un turbomoteur) à étudier. En se basant sur les éléments de la boucle de régulation on a :
- déterminé les caractéristiques de chaque élément .
- éliminé l'instabilité de la boucle interne .
- préparé une variante du système où la chambre de précombustion est remplacée par une autre à tirage naturel ce qui permet d'étudier le système sans recourir à soufflerie en marche .

Subject:

Abstract: An automatic control system of the outlet temperature of a precombustion chamber has been set in motion. A permits the conditioning of the air entering the combustion chamber (of turbomachine) under test. We based on the elements of the existing control system have characteristics of system elements have been determined and an instability of the internal loop has been eliminated. A variant of the system is prepared where the precombustion chamber is replaced with another one of natural draft it allows to study the automatic control system without the necessity of making use of the air blower.

I INTRODUCTION

La vie ne peut exister que lorsque les molécules sont assemblées de telle sorte qu'elles aient donné naissance à un régulateur tendant à maintenir l'existence de l'organisme qu'elles composent.

Sans un tel régulateur, la vie, même au stade inférieur est impossible. Les formes de la vie supérieures ne sont apparues que lorsqu'un organisme a pu assurer une régulation de température, rendant ainsi métabolisme indépendant des variations de la température ambiante.

Pour mettre ceci en évidence, pensons par exemple à la température du corps humain qui demeure remarquablement constante au voisinage de 37°C quand pendant une fièvre, le régulateur de la température dérègle pour un motif quelconque, et la température de notre corps varie ne serait-ce que de 2°C en plus ou en moins. Chacun sait à quel point notre efficacité diminue rapidement.

La régulation c'est l'action de régler.

Toute action crée une réaction qui s'oppose à l'action jusqu'à l'obtention d'un nouvel état d'équilibre du système considéré. Cette réaction peut être naturelle ou imposée par l'homme, dans ce dernier cas on dit que la réaction est automatique.

Les systèmes qui se règlent naturellement sont appelés stables ou autorégulants, les systèmes sans réaction sont instables.

La réaction (ou régulation) est automatique lorsqu'elle est imposée par l'homme par différents moyens (automatismes).

Deux problèmes essentiels se posent pour une régulation : sont la précision et la stabilité.

Avant de choisir le type de chaîne de régulation souhaitable, il faut déterminer quelle est la précision nécessaire, c'est à dire, en régime stable, quel est l'écart maximal admissible entre la consigne et la mesure.

Il faut aussi déterminer quelle est la stabilité nécessaire, c'est à dire en régime transitoire, quel est l'écart maximal admissible entre la consigne et la mesure.

Vu l'importance de la régulation qui embrasse tous les domaines de l'industrie, l'existence du banc d'essai de combustion de notre laboratoire énergétique (qui a été étudié et conçu pour une simulation de la combustion

dans les conditions de vol d'un avion supersonique volant à une altitude $z = 18000 \text{ m}$ et nombre de mach $M = 2$ } exige un tel système de régulation pour maintenir constante la température à l'entrée de la chambre de combustion le thème de ce projet est la détermination des caractéristiques de chaque élément du système et la mise en marche de ce système.

la température à prévoir à l'entrée de la chambre de combustion est de 495°C , la simulation de la température est obtenue en plaçant avant la chambre de combustion une chambre de préchauffage ou première combustion qui permet d'atteindre la température requise afin de vaporiser le kérosène qui est généralement le carburant avant de brûler dans les conditions d'une chambre de combustion, cette vaporisation exige un apport de chaleur transmise par l'air venant du compresseur.

II DESCRIPTION DU SYSTEME DE REGULATION

la boucle de regulation (du banc d'essai) se compose essentiellement d'un regulateur electronique, d'un positionneur electro-pneumatique, d'un servomoteur, d'une serie des vannes, d'un thermocouple et d'un transmetteur.

Ces deux derniers elements constituent la chaine de reaction, alors que les autres constituent la chaine d'action.

le present chapitre a pour but d'identifier chacun de ces elements.

II1 Transmetteur

C'est un appareil qui assure la conversion des signaux.

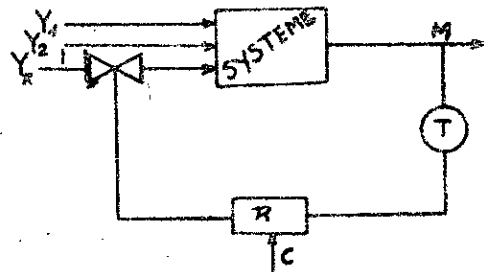
Il existe deux types de transmission :

II1a Transmission pneumatique

une pression analogique, souvent proportionnelle à la grandeur mesurée, informe le regulateur de la valeur de grandeur mesurée (M). la technologie de regulateur (R) est donc pneumatique.

II1b Transmission electrique

une intensité (ou tension) analogique, souvent proportionnelle à la grandeur mesurée, informe le regulateur (R) de la valeur de la grandeur (M). le regulateur est à technologie electronique.



le transmetteur (T) convertit la grandeur mesurée (M) en un signal analogique intensité.

Plusieurs echelles sont couramment utilisees : (0-5) mA, (4-20) mA, (10-50) mA, (0-20) mA.

le regulateur reçoit donc l'information (intensité) du transmetteur et la compare à la valeur de consigne (C). Celle-ci est de même echelle que le signal du transmetteur.

lorsque la mesure (M) varie, le regulateur ayant été informé par le signal intensité du transmetteur, il reagit en modifiant le signal de reglage vers le servomoteur de la vanne.

Remarque : le servomoteur ne peut recevoir qu'une information de pression or. le regulateur delivre un signal intensité. On trouve en serie dans le signal de de reglage ; un convertisseur de signal analogique, qui transforme le signal (intensité) en signal (pression) normalisé.

II12 Role des transmetteurs

Trois fonctions sont imposees dans les transmissions analogiques :

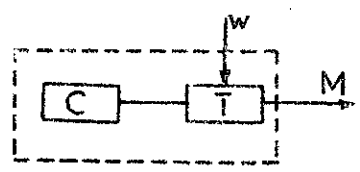
II12a Separation : la separation energetique de la grandeur mesuree et la grandeur transmise.

II12b Normalisation : lorsqu'une information est transmise à echelle normalisée, il devient plus facile de remplacer un recepteur (Indicateur, enregistreur) defectueux qui aura la même echelle que le transmetteur. D'autre part, cette normalisation limite le stock des appareils en reserve pour le depannage.

II12c Amplification de puissance : l'énergie necessaire à la transmission des informations n'est pas empruntee à la grandeur mesuree, mais fournie par une source exterieure, pneumatique ou électrique

II13 Etude des transmetteurs

Schema general :



C : l'etage capteur

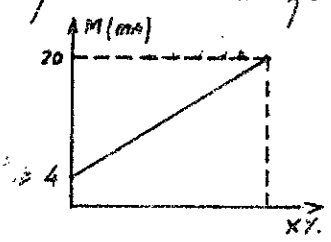
T : l'etage transmetteur

X : une grandeur physique (force ou deplacement) fournie par le capteur.

M : signal analogique de sortie

W : l'énergie exterieure necessaire à l'amplificateur.

l'etage transmetteur est systeme asservi qui assure une fonction lineaire entre m et x .



II 14 Classification des transmetteurs

II 14a Transmission pneumatique

- A équilibre de force (x est une force)
- A équilibre de déplacement (x est un déplacement)

II 14b Transmission électrique

- Electromécanique : x est une force ou déplacement
- Electronique : Aucune technologie mécanique interne. x peut être tension, résistance ou capacité électrique.

Remarque : les échelles d'entrée peuvent être modifiées par l'utilisateur ce qui leur donne une grande souplesse d'emploi.

II 15 Transmission de température

Les transmetteurs reçoivent une information x qui peut être une force, un déplacement, une force électromotrice ou une variation de résistance.

L'élément capteur (c) fournit l'information x à partir des phénomènes physiques qu'il mesure.

Plusieurs types de transmetteurs couramment employés dans l'industrie :

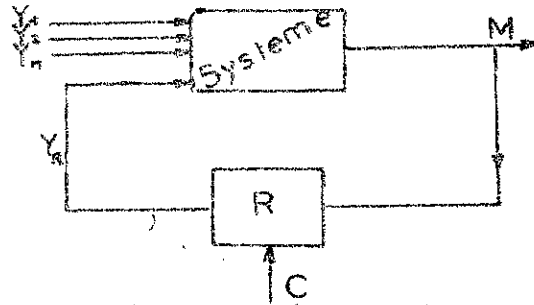
- Transmetteurs à bulbe
- Transmetteur à tension de vapeur
- Transmetteur de force électromotrice : on l'utilise comme transmetteur de température. Le capteur est un thermocouple. Le signal est généralement électrique. Dans ce cas, il faut s'assurer que la compensation automatique de soudure froide est initialement prévue dans le pont de mesure du transmetteur.

Rappelons que la f.e.m. d'un thermocouple ne dépend pas uniquement de la température de soudure chaude (température réelle mesurée) mais aussi de la température de soudure froide (température au bornier du thermocouple ou de l'appareil).

II2 - Regulateur

C'est un appareil qui, comparant les signaux de mesure et de consigne qui lui sont délivrés, est capable d'émettre en fonction de tout écart constaté entre ces signaux, une énergie qui sous forme d'un signal d'action agira sur les organes de réglage chargés de rétablir la stabilité et l'état initial d'un système.

II21 Rôle du régulateur



Le rôle du régulateur est de limiter les variations de la grandeur mesurée (M) lorsque le système est soumis aux perturbations des grandeurs y_1, y_2, \dots, y_n après une perturbation, la grandeur réglée varie ainsi que l'information (M) qui la représente. Si la valeur (M) est différente de la valeur de la consigne (C), le régulateur modifie, suivant une fonction mathématique, le signal Y_r qui positionne l'organe de réglage dans le but de limiter et même d'annuler l'écart entre la mesure (M) et la consigne (C).

II22 Classification des régulateurs électroniques

Le critère de classification est technologique (balancé de forces, à croix, à empilement de membranes etc.) et leur équation générale (ou fonction de transfert) est souvent celle d'un régulateur type série. La structure des fonctions de transfert des régulateurs électroniques servira de critère à leur classification. Celle-ci sera donc indépendante de la technologie ou des schémas électriques employés.

Il ya des régulateurs de fonctions de transfert différentes:

- Régulateur série : $G(p) = G_R \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right) (1 + T_d p)$
- Régulateur parallèle : $G(p) = G_R + \frac{1}{T_i p} + T_d p$
- Régulateur mixte : $G(p) = G_R \left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right)$

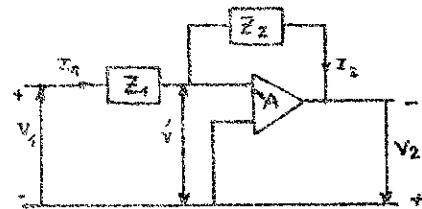
Ces différentes structures sont apparues par l'emploi des amplificateurs opérationnels et de rétroaction.

1123 Etude des amplificateurs operationnels

L'element fondamental des regulateurs electroniques est l'amplificateur operationnel, qui est avant tout constitue par un amplificateur electronique à courant continu à gain eleve.

1123a Utilisation: les amplificateurs operationnels sont d'un emploi plus souple pour la realisation des fonctions de transfert actives que la methode d'inversion.

1123b Equation generale: le montage d'un amplificateur operationnel est donne par le schema suivant:



V_1 et V_2 sont en sens opposes
les equations des mailles:

$$V_1 = Z_1 I_1 + V'$$

$$-V_2 = Z_2 I_2 + V'$$

si l'amplificateur (A) est tres elevee, V' tres faible et peut negligeer.
Autrement dit que le courant qui entre dans l'amplificateur est infinitesimal devant I_1 et I_2 et on peut admettre que $I_1 = I_2$.

$$\begin{aligned} V_1 = Z_1 I_1 &\implies \frac{V_1}{Z_1} = -\frac{V_2}{Z_2} & -V_2 = V_1 \frac{Z_2}{Z_1} \\ -V_2 = Z_2 I_2 & \end{aligned}$$

En se basant sur ce montage on peut determiner facilement les differentes fonctions elementaires.

- Fonction proportionnelle: on pose $Z_1 = R_1$ et $Z_2 = R_2$

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

- Fonction integrale: on pose $Z_1 = R$ et $Z_2 = \frac{1}{Cp}$

$$\implies -V_2 = V_1 \frac{1}{R C p}$$

$$= V_1 \frac{1}{T_i C p} \quad \text{avec } T_i = RC \text{ (temps d'integration)}$$

- Fonction proportionnelle et integrale:

Z_2 est remplacee par (resistance + capacite) en serie

C'est à dire

$$Z_1 = R_1$$

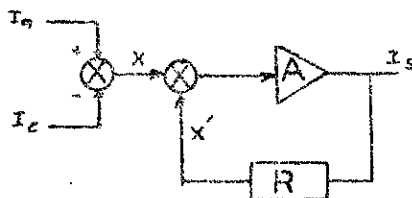
$$Z_2 = R_2 + \frac{1}{Cp} \implies -V_2 = V_1 \frac{R_2 C p + 1}{R_1} = V_1 \frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{1}{R_2 C p} \right)$$

1124 Schema fonctionnel d'un regulateur type serie

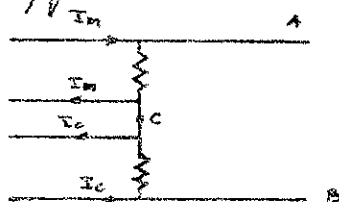
le schma fonctionnel d'asservissement est celui qui implique la regle d'inversion.

Si l'amplification est suffisamment elevee on peut ecrire :

$$I_s \approx \frac{a}{R(p)} X(p)$$

1124a Etage detecteur d'ecart ($I_m - I_c$)

Cet etage doit informer le regulateur de l'ecart (x) existant entre (m) et (c).
le schma de cet etage est donne par la figure suivante :



on calcule le ddp entre A et B

$$V_A - V_C = R I_m \quad (I)$$

$$V_B - V_C = R I_c \quad (II)$$

la difference entre les deux equations (I) et (II) donne :

$$\begin{aligned} V_A - V_B &= R(I_m - I_c) \\ &= X \end{aligned}$$

l'ecart x est proportionnel à l'ecart ($m-c$) et x exprime en millivolts.

1124b Etage comparatif ($x - x'$)

En electronique, si les coefficients (β) des deux transistors sont identiques, la difference de potentiel (E) entre A et B est proportionnelle à ($x - x'$) c'est à dire $E \approx \beta(x - x')$

1125 Regulateur à action proportionnelle type serie

l'action proportionnelle est un mode de regulation dans lequel il ya une relation lineaire continue entre les valeurs de l'ecart et de la grandeur reglee.

l'action de la grandeur reglee est donc reproduite et amplifiee dans l'action de l'element final de regulation.

l'action proportionnelle stabilise une grandeur, mais ne lui fixe pas une valeur constante. Elle permet de limiter de maniere importante de la perturbation.

11 25a Schema fonctionnel

A partir de la règle d'inversion on peut écrire :

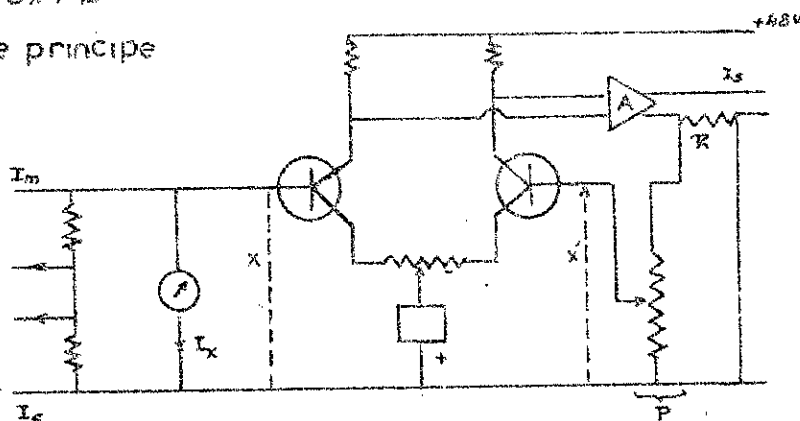
$$I_s = G X \quad (1)$$

Si on examine la réaction (X), on constate que celle dernière doit être proportionnelle au courant de sortie I_s et cette proportionnalité doit être réglable.

la formule complète de (1) peut être écrite sous la forme :

$$I_s = \pm G X + B$$

11 25b Schema de principe



le courant I_x indiqué par le galvanomètre est proportionnel à $(I_m - I_c)$, ce galvanomètre nous renseigne sur l'existence et la valeur de X (sur l'écart m-c exprimé en pourcent de l'étendue de l'échelle).

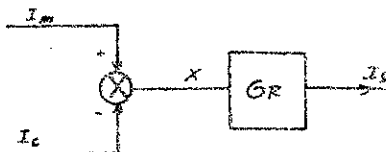
la proportionnalité entre X et I_s est réalisée par une résistance R et un potentiomètre réglable (P) qui sert à modifier la proportionnalité entre I_s et X , soit le gain du régulateur (ou BP).

11 25c Fonction de transfert schema fonctionnel simplifié

la fonction de transfert est celle donnée par la règle d'inversion

$$G(P) = G_R$$

le schema fonctionnel simplifié est donné par la figure

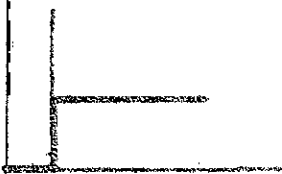


1126 Regulateur à actions proportionnelle et intégrale

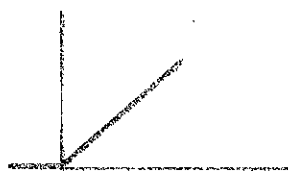
l'action proportionnelle peut parfois être fort gênante.

Dans la plupart des cas, il est indispensable de revenir à la valeur de consigne et s'y maintenir. Pour obtenir ce résultat, il sera nécessaire d'annuler la variation de la grandeur réglée avant de la stabiliser.

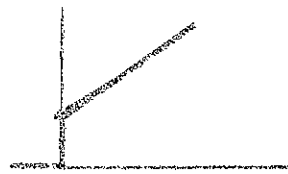
L'action intégrale (mode de régulation dans lequel la valeur de la grandeur réglée varie à une vitesse proportionnelle à l'écart. Si donc l'écart double de valeur, l'élément final de régulation est mu avec une vitesse double. Quand la grandeur réglée est à la valeur prescrite (écart nul), l'élément final de régulation est au repos), agissant conjointement à une action proportionnelle, permet de stabiliser la grandeur réglée à la valeur de consigne choisie.



Action proportionnelle

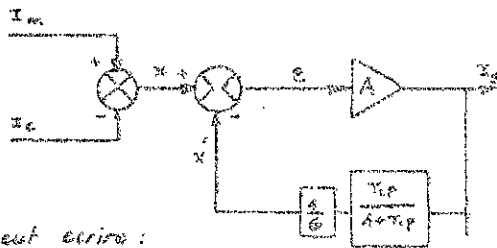


Action intégrale



Action proportionnelle et intégrale

1126a Schéma fonctionnel



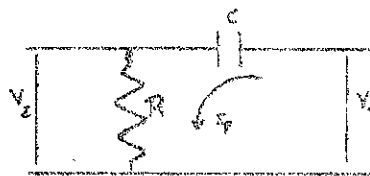
On utilisant la règle d'inversion on peut écrire :

$$I_c = G \left(\frac{T_D + s}{T_I} \right) X(p)$$

La fonction de transfert $\frac{T_I p}{K + T_I p}$ d'élément intégral est facilement réalisée en utilisant un circuit RC.

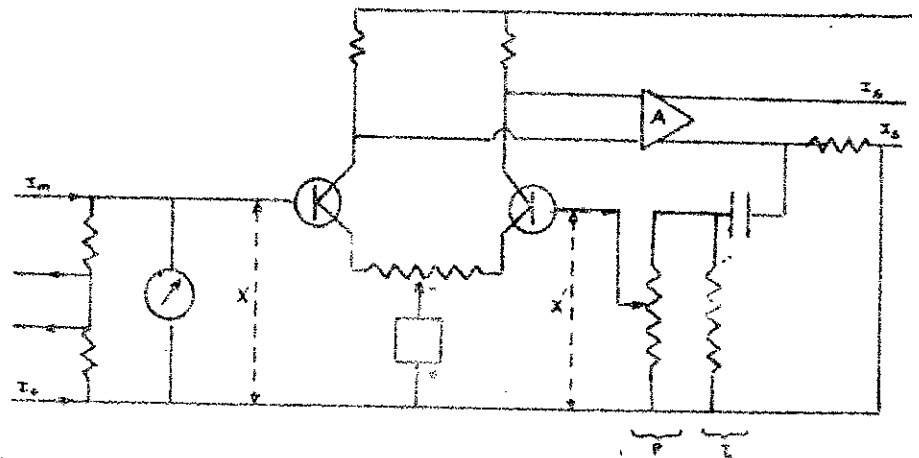
$$I_p = \frac{V_c}{R + \frac{1}{Cp}}$$

$$= \frac{V_c Cp}{RCp + 1}$$



$$V_c = R I_p = V_c \frac{RCp}{RCp + 1} \Rightarrow \frac{V_c}{V_c} = \frac{RCp}{RCp + 1}$$

1126b Schema de principe



l'action intégrale (I) se trouve en amont de l'action proportionnelle (P). la permutation des étages est possible.

1126c Equation generale du regulateur

l'équation générale du régulateur est obtenue en calculant la transformée inverse.

$$I(p) = G X(p) + \frac{G X(p)}{T_i p}$$

Soit $I(t) = L^{-1} I(p)$

$$= G X(t) + \frac{G}{T_i} \int_0^t X(t) dt + I_c$$

1127 Avantages des régulateurs électriques et électroniques

Les avantages de ce type de régulation par rapport à la régulation pneumatique se situent d'abord sur le plan de la mesure. Des procédés de fabrication compliqués exigent des mesures nombreuses et des circuits de calculs complexes.

L'électricité permet d'établir de façon simple et élégante de tels circuits, et un faisceau de fils électriques est moins encombrant, moins cher aussi à installer qu'un réseau équivalent de tubes en cuivre ou en acier.

En outre, de nombreuses grandeurs sont fournies électriquement par les capteurs : thermocouple, analyse de gaz

Par contre, le servomoteur électrique, s'il fournit des forces et des courses de positionnements de toutes grandeurs, il est plus coûteux que le servomoteur pneumatique et doit être parfois livré en modèle anti-déflagrant, donc cher.

Enfin les vitesses de positionnement sont limitées et souvent plus faibles que celles des servomoteurs pneumatiques.

11 28 Les signaux des régulateurs électriques et électroniques

Les signaux d'entrée acceptables par les régulateurs électriques ou électroniques se groupent en deux séries :

- l'une part de zéro
- l'autre part d'une valeur non nulle.

La première série répond à une certaine habitude Cartésienne de faire correspondre les échelles de valeurs des signaux avec celles de la grandeur mesurée entre une valeur nulle et une valeur extrême.

La seconde série a pour souci de prouver qu'un zéro éventuel de l'appareil correspond à un zéro mesuré et non à une absence accidentelle du support de signal. En général, les signaux admissibles par un régulateur le sont dans la gamme prévue pour les capteurs et transmetteurs et le régulateur peut s'ajuster au signal désiré.

11 29 Poste de commande (Auto-Manu)

Les constructeurs se sont attachés à séparer des organes de réglage, le bloc de commande permettant :

- DE passer de la position de la commande automatique à une position de commande manuelle afin, en cas de besoin (entretien, dépannage) de ne pas interrompre le fonctionnement de l'appareillage en cause.
- DE fixer la consigne à partir d'un poste d'exploitation.

11.3 Elements terminaux de regulation

11.31 Generalité

L'element final de regulation est le mecanisme qui change la grandeur reglee en reponse au signal de sortie venant du regulateur.

Le signal émis par le regulateur agit sur le systeme reglé par l'intermédiaire de l'organe de contrôle dont le rôle est de modifier l'influence de l'agent réglant.

L'element final de regulation se compose souvent de deux parties :

- Un actionneur sert à convertir le signal de sortie d'un regulateur en une action mecanique generalement limitée (course) et reversible, ce qui il se distingue de moteur.

- Un dispositif sert à ajuster la valeur de la grandeur réglée (generalement le debit d'un fluide)

L'actionneur qui a pour fonction de faire assurer au clapet la position requise par les besoins de la regulation, il doit assurer une position précise proportionnelle au signal d'entree (qui exige rapidité de reponse, puissance, stabilité de fonctionnement, incidence de la porte du signal de commande ou du fluide moteur, fiabilité etc.) malgré l'existence des forces agissantes sur l'element de sortie. Les plus importantes de ces forces sont :

- Forces d'inertie dues à la masse des pieces en mouvement.
- Forces statiques de frottement entre les surfaces en contact.
- Forces de poussée dues au poids et la pression non compensée d'un fluide.

Pour cela, il est souvent nécessaire d'utiliser un mecanisme amplificateur de puissance.

11.32 Propriétés

L'exécution des ordres donnés par le regulateur à en general pour but de modifier un debit, une pression ou un courant électrique.

L'action sur un debit ou sur une pression se traduit par la plus ou moins grande ouverture d'un clapet de vanne sur son siege, et la variation d'un courant peut être provoquée par le déplacement d'un rheostat.

Les déplacements des actionneurs (servomoteurs) seront generalement lineaires pour la commande des variations de debit ou de pression, lineaires ou circulaires pour le déplacement d'un rheostat.

1132a Linearité

La déformation de la membrane en fonction de la pression (de la course) n'est pas rigoureusement linéaire, car la réaction effective varie quant au ressort, il représente un comportement à peu près linéaire quand les spires ne sont pas jointives et s'il travaille loin de la limite élastique du métal. L'usinage des portées joue un rôle très important. La proportion du "boudin", rapport longueur/diamètre moyen représente un optimum. trop court, l'effet extrémité se fait sentir. trop long il flambe.

1132b Caractéristique statique

C'est la relation entre le signal d'entrée et la grandeur de sortie en l'occurrence, la course. Cette relation est généralement proportionnelle, mais peut revêtir toute autre forme. Les réactions du système réglé sont susceptibles d'altérer la linéarité ou la conformité d'une caractéristique. Le positionneur permet d'éliminer en grande partie l'influence de ces facteurs perturbateurs et de retrouver une linéarité correcte.

1132c Caractéristique dynamique

- même si la caractéristique statique d'un organe de contrôle est linéaire (avec ou sans l'emploi d'un positionneur), le comportement dynamique linéaire n'est pas nécessairement prouvé.

- les caractéristiques données par les constructeurs pour définir un organe de contrôle ne sont pas généralement valables que pour un point de fonctionnement.

- les valeurs fournies pour un appareil nu: Bode, Nyquist vitesse de translation, durée de course etc ont peu de signification. L'appareil doit être couplé à l'organe qu'il est chargé de contrôler et à des conditions d'exploitations normales.

1132d Précision de positionnement

Cette précision n'a pas de signification utile dans une boucle fermée, puisque l'erreur est prise en charge par la boucle. Mais dans une boucle ouverte, la précision de positionnement qui devient "la précision de réglage" devient un des critères de choix.

1133 Choix d'un organe de positionnement

le choix d'un actionneur est basé sur deux paramètres

- la course
- la force (ou le couple de commande)

on peut ajouter les paramètres :

- 1) nature du signal de commande .
- 2) Nature de l'effort d'énergie auxiliaire
- 3) utilisation (d'un positionneur ou d'un amplificateur)
- 4) Caractéristiques statiques
 - sens de fonctionnement en fonction du signal
 - Gain
- 5) Caractéristiques dynamiques
 - vitesse de transfert
 - cadence
 - Fonction de transfert
- 6) Position de Sécurité

1133a La course : la Course peut être angulaire ou rectiligne la course angulaire peut être transformée en course rectiligne et vice versa .

1133b La force

le deuxième critère de choix d'un organe de contrôle est l'effort maximal agissant sur l'agent réglant . Cet effort doit être supérieur à la réaction maximale .

En résumé un servomoteur est presque entièrement statiquement défini par la connaissance des deux grandeurs :

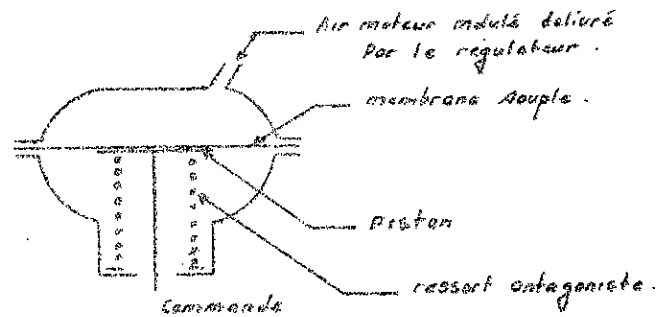
- Course totale
- Force ou Couple maximum.

Comme les régulateurs automatiques , l'organe de réglage peut être à commande pneumatique , hydraulique ou électrique ou une combinaison de ces trois dispositifs . nous limiterons notre étude à la description des actionneurs pneumatiques et électropneumatiques .

1134 Actionneur pneumatique

les actionneurs pneumatiques se composent d'une membrane souple , qui en se déformant sous l'action de la pression d'air envoyé par le régulateur ,

agit sur un piston, écrasant un ressort antagoniste, la pression exercée sur la membrane par l'air étant équilibrée par l'effort développé par l'écrasement du ressort.



Remarque

Une légère hystérésis amène parfois le Aeromoteur pneumatique à ne pas suivre la même courbe dans les deux sens d'action.

Si la surface efficace de la membrane et le coefficient d'élasticité du ressort restent constants pendant la course, l'hystérésis due aux contraintes dans le ressort et la membrane est généralement inférieure à un ou deux pour cent de la course totale.

11.35 Positionneur

Pour compenser le manque de linéarité, la susceptibilité aux réactions perturbatrices du système contrôlé et pour apporter l'énergie à la commande de l'agent réglant, le positionneur constitue un outil incomparable.

11.35a Principe

La course d'un actionneur en fonction de la pression matrice (P) est comparée au signal de commande dans un détecteur d'erreur. L'erreur agit sur la pression (P) et fait évoluer la course dans le sens de sa réduction (contre réaction).

11.35b Propriétés générales des positionneurs

— Avantages

- 1) Amélioration de la précision de positionnement en la rendant peu sensible à de nombreux facteurs perturbateurs inhérents aux réactions parasites de l'organe de contrôle.
- 2) Amélioration de la linéarité de positionnement (réduction de l'hystérésis)
- 3) Amélioration de la vitesse de réponse, donc de l'aptitude à contrôler les phénomènes à transitoire rapide.
- 5) Eventuelle conversion d'un signal de commande (faible) ou une énergie de puissance de nature différente.

- 5) utilisation de plusieurs actionneurs sur un même signal de commande
 6) l'actionneur peut vaincre des forces de frottement statiques élevées, à cause des pilotes amplificateurs.

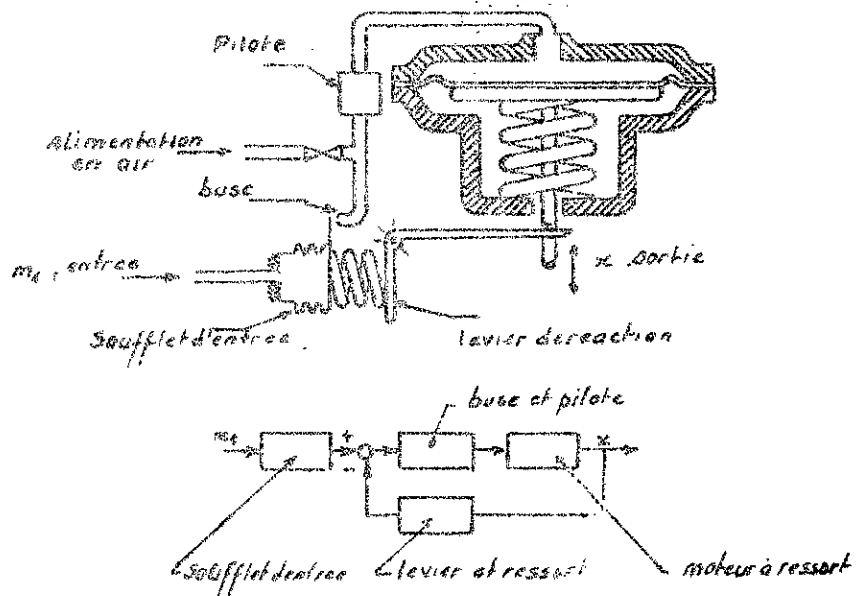
- Inconvénients

- 1) la linéarité de positionnement n'est pas garantie de la linéarité dynamique. la plupart des positionneurs n'ont pas un comportement dynamique réellement linéaire.
 2) l'introduction d'une boucle fermée locale amène le risque d'oscillations propres. l'augmentation de la précision de positionnement et la vitesse de réponse, proportionnelle au gain, sont limitées par la valeur de gain qui amorce les oscillations.
 3) le positionneur n'améliore pas l'aptitude de l'actionneur à manipuler des forces d'inertie ou de poussée plus grandes sans réglages spéciaux de la bande de fonctionnement du moteur.
 4) nécessité d'entretien, coût, instabilité etc...

II 36 Actionneur à ressort avec positionneur

l'actionneur à ressort nécessite souvent un positionneur. quand les forces de frottements statiques sont grandes ou quand la réponse du moteur est trop lente.

le positionneur comporte un soufflet d'entrée, une buse, un pilote amplificateur, des leviers et un ressort de réaction.



Quand la pression d'air augmente, le soufflet d'entrée se déplace vers la droite, amenant le volet à obturer la buse. La variation de la pression en arrière de la buse est amplifiée par le pilote et transmise à la membrane. Cette dernière se déplace vers le bas et le levier de réaction comprime le ressort pour ramener le volet à une position d'équilibre. Ainsi la tige de l'actionneur prend une position donnée par la pression d'air d'entrée. L'actionneur à ressort devient un dispositif de puissance, et les caractéristiques du ressort et de la membrane sont relativement moins importantes.

1137 Relais d'asservissement pneumatique

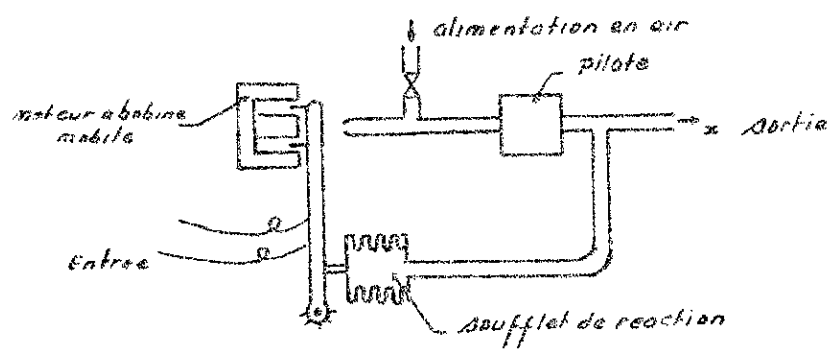
Il permet au servomoteur de développer son effort maximum pour une variation faible de la pression d'air moteur. Le relais est utilisé dans le cas où une grande précision de réglage est requise et chaque fois que la liaison régulateur-servomoteur est longue pour combattre l'effet de temps de réponse qui requiert d'être important. Le relais peut être à simple ou à double effet.

1138 Actionneur électro-pneumatique

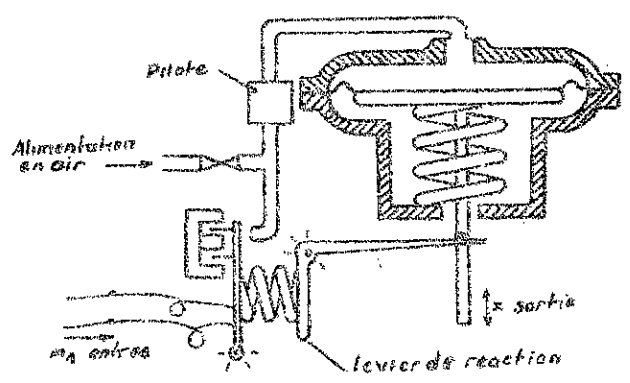
Quand on emploie des systèmes de régulation électrique, il est avantageux d'utiliser un actionneur pneumatique. Il peut délivrer une grande puissance qui peut être directement actionnée par un système électrique de régulation. Ceci nécessite la conversion du signal électrique de sortie du régulateur en une grandeur d'entrée convenable par l'actionneur.

1139a Pilote électropneumatique

Le pilote électropneumatique est prévu pour convertir un signal électrique d'entrée en une pression proportionnelle de sortie. Le signal électrique d'entrée (généralement un courant continu) entre dans le moteur à bobine mobile. La bobine mobile est maintenue dans le champ d'un aimant permanent, de sorte qu'elle donne une force proportionnelle à la valeur du courant continu à l'entrée. Cette force produit une déviation du fleau, obture la buse, d'où une augmentation de la pression de la sortie. Cette pression agit sur le soufflet de réaction pour créer sur le fleau un couple égal, mais en sens contraire, à celui créé par la bobine mobile.



l'actionneur electro-pneumatique combine la bobine mobile et le pilote en un positionneur d'organe pneumatique de commande. le déplacement de sortie de cet organe est lié au fléau par l'intermédiaire du levier de réaction. la position de sortie de l'actionneur est donc proportionnelle au courant continu d'entrée.



114 Vannes de réglage

1141 Introduction

les vannes de réglage constituent l'un des éléments principaux de réglage. le choix correct d'une vanne, dépend souvent de la qualité du résultat obtenu en régulation.

le rôle d'une vanne de réglage est de créer sur la circulation d'un fluide une perte de charge telle que le débit ou la pression du fluide de la sortie de la vanne atteigne la valeur désirée par le point de consigne.

1142 Types de vannes

Selon les conditions du processus, la vanne peut être choisie parmi un certain nombre de modèles.

on distingue deux grandes familles.

- les vannes à clapets, à soupape, à opercules etc
- les vannes à papillon.

11421 Vannes à clapets

Il existe trois groupes

- Vannes à simple siége
- Vannes à double siége
- Vannes à trois voies

Chaque groupe se compose de deux sous groupes.

- Vannes à action directe : les Vannes qui se ferment sous l'action croissante du signal de commande.

- Vannes à action inverse : celles qui s'ouvrent sous l'action croissante du signal de commande.

11421a Vannes à simple siége

Le déplacement longitudinal de la tige tend à obturer ou permettre le passage du fluide.



- Avantages :
 - La construction relativement simple
 - bonne étanchéité.

- Inconvénient : la pression sur le clapet, ce qui crée une force ajoutant à la poussée du servomoteur.

11421b Vannes à double siége



- Avantages : les pressions existantes sur les clapets créent des forces opposées qui tendent à s'annuler, le servomoteur de commande de la tige sera donc moins puissant.

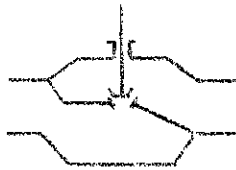
La vanne à double siége admet une SP plus importante que celle à simple siége.

- Inconvénient : Elle est moins étanche à la fermeture ; lors de fermeture les clapets doivent se poser sur leurs sièges sans laisser le passage au fluide. la distance entre les clapets doit être très précise. une très faible erreur peut donner une fuite.

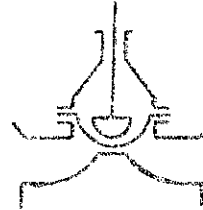
114.3 Technologie des vannes de réglage à clapet

11431 Pour régulation TOUT OU RIEN

On utilise pour ce mode de régulation des vannes à soupape ou à membrane. Ce type possède une caractéristique débit-ouverture du type exponentiel à faible étendue de réglage qui ne permet que de tout ou rien.



Vanne à soupape



Vanne à membrane

11432 Pour régulation continue

11432a Sur liquide et vapeur

on utilise des vannes à plongeur à simple ou à double siège avec ou sans guide.

11432b Sur gaz

on utilise des vannes à plongeur soit sur des petits débits, soit lorsque la pression statique du gaz est importante.

1144 Efforts mécaniques exercés sur les vannes à clapet

1144a Vannes à simple siège

Ces clapets subissent des efforts dus à la différence de pression entre l'amont et l'aval. D'autre part la tige de clapet subit un effort résultant des forces en action.

Ce type de vanne doit installer de façon que le sens de circulation du fluide soit opposé à la fermeture du clapet. De cette façon la force à vaincre par le servomoteur augmente quand le clapet s'approche du siège ce stabilise le fonctionnement.

1144b Vanne à double siège

les efforts étant équilibrés, les risques de détérioration sont moindres. Par contre se méfier des effets de "flashing" et de cavitation.

115 Couples thermoelectriques

1151 Principe

Deux conducteurs metalliques de nature differente, relies entre eux par chacune de leur extremités respectives, sont le siege d'une f.e.m. Si les points de jonction A_1 et A_2 sont portés à des temperatures differentes T_1 et T_2 .



1152 Definition

La soudure chaude d'un thermocouple est celle qui est soumise à la temperature à mesurer. L'autre soudure est dite soudure froide.

1153 Precision du thermocouple

La precision de la mesure par thermocouple depend de:

- 1) La qualite des conducteurs, et surtout de leur interchangeabilite sur un meme appareil de mesure.
- 2) L'execution des soldures.
- 3) Mauvais contacts entre fils de thermocouple, cables de compensation et appareil.
- 4) L'existence d'une f.e.m. parasite sur les contacts.
- 5) Fuites ou courts circuits eventuels (mauvaise isolation).

La soudure ne doit pas être tres longue, le mieux étant de souder les fils bout en bout sans torsade. Il faut s'assurer également du bon contact entre la soudure et la paroi dont on mesure la temperature.

Le cas des couples placés sous gaine, on doit reduire au maximum les intervalles nuisibles.

L'experience montre qu'il est preferable de choisir des fils de petit diametre à l'endroit de la soudure. Le fil de diametre plus faible donne une mesure plus precise en raison des efforts d'echange par convection avec la paroi.

1154 Soudure froide

La f.e.m. produite est fonction de la difference de la temperature entre la jonction et les extremités du thermocouple. De ce fait le thermocouple

ne mesure pas la température réelle, mais bien l'écart de température entre la soudure chaude plongée dans la température à mesurer et la soudure froide prise pour référence.

Pour obtenir la température réelle, il faut connaître exactement la température de la soudure froide et la maintenir aussi constante que possible.

La température donnée par les instruments serait exacte si la soudure froide était maintenue à 0°C , qui peut être obtenue:

- En plongeant les extrémités du thermocouple, soudées aux fils de liaison en cuivre, dans une bouteille thermos remplie de glace fondante.

- En plongeant les extrémités du thermocouple, soudées aux fils de liaison en cuivre dans un puits de 3 à 4 m de profondeur qui maintiendra la température constante à 1 ou 2 degrés près. Ces deux méthodes ne sont plus pratiques, donc moins utilisables industriellement. D'autre part le prix des thermocouples de grande longueur est élevé.

Pour remédier à ces inconvénients et utiliser des thermocouples dont la longueur est suffisante, on utilise des fils de compensation si la soudure froide est près de l'enceinte, elle est chauffée par conduction et radiation, ce qui provoque des variations importantes de température de la soudure froide. On a alors pensé à prolonger les fils du thermocouple par des fils isolés constitués de mêmes métaux ou des métaux équivalents au point de vue thermoelectrique.

1155 Fils de compensation

Les fils de thermocouple peuvent être interrompus et plongés jusqu'à la soudure froide par des fils de nature différente. Afin de réduire le prix des installations industrielles.

on utilise cette propriété pour relier la sonde à l'afficheur. Les câbles reliant les sondes aux appareils indicateurs ou enregistreurs sont appelés câbles de compensation. La condition imposant le choix de ces câbles est qu'ils doivent développer la même fem

- la fidélité, surtout son insensibilité aux agents extérieurs capables de la faire évoluer par pollution ou corrosion.

- son interchangeabilité. C'est à dire la facilité avec laquelle il peut être reproduit avec les mêmes caractéristiques $f.e.m./\text{température}$.

- l'allure de la courbe $f.e.m./\text{température}$.

Il est préférable quelle se rapproche le plus possible d'une droite dans le domaine d'emploi.

En général on utilise les thermocouples suivants :

1) Chromel et Alumel :

utilisables de 0 à 1350°C, la sensibilité est de 40 $\mu\text{V}/\text{deg}$, la courbe $f.e.m.$ en fonction de la température est pratiquement linéaire, ce qui est préférable dans le cas d'utilisation de convertisseurs "Analogique-digital". La précision est meilleure que $\pm 3 \text{ deg}$ jusqu'à 400°C et $\pm 1\%$ de la valeur mesurée au-delà de 400°C.

Ce type se caractérise par sa grande stabilité. Il peut être utilisé dans, pratiquement, tous les cas usuels de mesure de température jusqu'à 1100°C.

Précisons toutefois que les atmosphères réductrices sont légèrement plus préjudiciables à la stabilité du thermocouple que les atmosphères oxydantes.

2) le cuivre et le constantan : utilisables de -198 à 850°C

3) le nickel-chrome et le nickel : utilisables jusqu'à 1350°C

4) Platine rhodié 10% - Platine pur et le platine rhodié 13% - platine pur : utilisables jusqu'à 1700°C

D'autres types de thermocouples sont utilisés pour résoudre des cas spéciaux ou pour la mesure des très hautes températures.

III MESURE DE LA TEMPERATURE

III Generalite

IIIa Introduction

La technique de la mesure des temperatures embrasse tous les domaines de la physique, elle se rattache aussi bien à l'optique qu'à l'électricité et à la thermodynamique, elle met en oeuvre des instruments et des méthodes de mesure extrêmement variées.

Nous ajouterons qu'elle prend chaque jour une place plus importante non seulement au laboratoire, mais dans la pratique industrielle courante où les qualités toujours plus grandes demandées aux produits fabriqués nécessitent un contrôle de plus en plus minutieux des températures.

IIIb Notion de la temperature

Primitivement, on classait les corps en corps chauds, tièdes ou froids selon la sensation que l'on ressentait à leur contact. On dit qu'un corps est chaud ou plus chaud qu'un autre; froid ou plus froid qu'un autre. Les indications fournies par nos sens sont insuffisantes pour apprécier la température d'une façon précise, même approximative parce qu'ils ne pourraient la supporter physiologiquement.

Plusieurs corps, à des températures différentes placés dans une enceinte isolée calorimétriquement, mis en contact égalisent leurs températures au bout d'un certain temps (il n'y a pas de changement d'état), lorsque l'égalité est atteinte, il y a équilibre de température.

Soit un corps A possède une quantité de chaleur a , un corps B possède une quantité de chaleur b , après le contact au bout d'un certain temps ils égalisent leurs températures.

La quantité de chaleur qu'ils possèdent à eux deux est $(a+b)$, la température finale de deux corps en contact est comprise entre celle de A et de B. donc on peut prendre le corps A pour connaître la température du corps B.

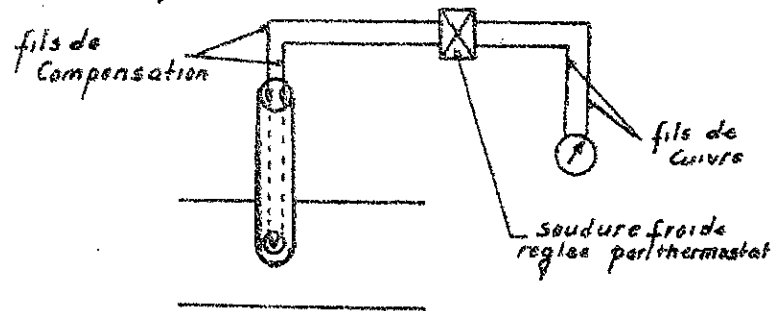
Pour cela il faut que A soit tel que mis au contact de B il ne fasse pratiquement pas varier la température de B et que le temps soit le plus court possible. Il faut donc que T_f soit pratiquement égale à T_B . on prend pour cela A de faible masse et de faible chaleur spécifique.

dans la zone des températures allant de l'ambiance à la température de leur jonction avec les fils du thermocouple.

Les câbles de compensation doivent être protégés et isolés entre eux aussi bien que de la masse afin d'éviter la présence de courants parasites. Le revêtement doit être suffisamment étanche pour ne pas être sensible à l'humidité et résister aux actions destructrices d'origine chimique, thermique ou mécanique.

On peut également maintenir la soudure froide à une température rigoureusement constante, en faisant aboutir les fils de compensation dans une boîte thermostatique. Dans cette boîte, un chauffage électrique réglé automatiquement par thermostat, maintient la température de la soudure froide à une valeur constante.

La température réglée sera supérieure à celle du local où se trouve cette boîte. (si la température maximale du local peut atteindre 35°C le thermostat sera réglé sur 40°C).



II 56 Choix des métaux

Le nombre des thermocouples possibles est illimité puisqu'il suffit d'associer deux conducteurs différents pour constituer un thermocouple. Le mot différent couvre aussi des éléments dissemblables (cuivre, platine, fer) que des alliages de mêmes constituants avec des compositions variées (alliages de platine 6, 10, 20, 30% de Rhodium). ou même que deux conducteurs d'un même élément, ne différent que par l'orientation réticulaire de cet élément dans chacun des conducteurs, par sa forme allotropique ou par son état écroui ou recuit.

Ce choix est dicté par les considérations :

- le domaine de températures à mesurer.
- la sensibilité du couple thermoélectrique c'est-à-dire la valeur de la puissance

Si le volume V_0 du corps A est connu à une température prise comme référence lorsqu'on le met au contact du corps B, dont on veut la température de B son volume devient V_T .

Le loi de variation de volume donne $\Delta V = V_T - V_0$, en fonction de la température on pourra en déduire T.

IIIc Echelle de la température

Pour obtenir une échelle de température on prend deux points de repère connus et fixes, correspondant à deux états physiques d'un corps donné. En divisant l'intervalle entre ces deux points en intervalles égaux, chaque intervalle représente un degré.

La fusion de la glace est prise comme point de départ et correspond à zéro degré. L'ébullition de l'eau correspond à 100 degrés.

et cet intervalle est divisé en 100 parties égales. Chacune vaut un degré. Cette échelle s'appelle centésimale ou Celsius (C)

Il y a aussi l'échelle FAHRENHEIT désignée par (F) et donnée par la formule :

$$T^F = \frac{9}{5} T^C + 32$$

Dans les calculs ou dans les formules physiques, les températures sont données souvent par rapport au zéro de température absolue.

L'échelle absolue correspondant à l'échelle Celsius est l'échelle KELVIN (K), le passage d'une échelle à une autre est donné par :

$$T^K = T^C + 273$$

L'échelle absolue qui correspond à l'échelle FAHRENHEIT est l'échelle RANKINE (R)

$$T^R = T^F + 459$$

III2 Principes de mesures

on convient d'appeler thermomètre tous les appareils qui mesurent une température, pour les températures élevées on utilise le nom de Pyromètre.

Divers principes sont utilisés pour mesurer les températures :

III2a Les propriétés thermiques des solides et des fluides

- Dilatation des liquides
- Dilatation des solides
- Tension de vapeur des liquides.

III25 Les propriétés thermoelectriques

- Variation de la resistance d'un conducteur avec la temperature
- Variation de propriétés des Semi-conducteurs.
- F.e.m au point de Connection (thermocouple)

III3 Les instruments de mesure des temperatures

Ces instruments peuvent être divisés en deux grandes classes. La première classe comprend les instruments dans lesquels l'élément sensible est en contact aussi intime que possible avec le corps à contrôler. C'est le cas des:

- 1) montres fusibles - (corps à changement d'état physique)
- 2) Thermometres à dilatation de liquide.
- 3) Thermometres à dilatation de gaz.
- 4) Thermometres à tension de vapeur saturante.
- 5) Thermometres à dilatation de solide.
- 6) Thermometres à resistance électrique.
- 7) Thermometres à couple thermoelectrique.

La seconde classe comprend les instruments dans lesquels l'élément sensible n'est plus en contact avec le corps à contrôler. Celui-ci étant à une temperature telle que la stabilité physico-chimique du corps thermoelectrique ou de son support ne serait plus assurée. Dans cette classe nous citerons:

- 1) les pyrometres à radiation totale.
- 2) les pyrometres à radiation partielle (optique monochromatique)
- 3) les pyrometres à cellule photo-electrique
- 4) les pyrometres à couleur

III4 Caracteristiques principales des instruments de mesure des temperatures

1) la fidelité : un instrument de mesure est d'autant plus fidèle qu'il fournit pour une valeur déterminée de la temperature à mesurer des indications concordant entre elles avec une meilleure approximation. La fidelité est la qualité essentielle à rechercher pour un thermometre. Elle s'exprime en pourcent de l'étendue de l'échelle de mesure.

2) la sensibilité : un instrument de mesure est d'autant plus sensible que, pour une faible variation Δy de la grandeur à mesurer, il accuse

une plus grande variation Δx de l'organe mobile le long de la graduation x c'est à dire $\Delta x/\Delta y$ est plus grande.

la sensibilité peut être constante ou variable. si $y=f(x)$, la sensibilité pour chaque région de l'échelle est donnée par la valeur correspondante de la dérivée dx/dy . elle est constante si $f(x)$ est linéaire et variable si $f(x)$ non linéaire.

3) La précision : un instrument de mesure est d'autant plus précis que l'erreur relative maximale qu'il peut commettre est plus faible. Elle s'exprime en pourcent de la valeur mesurée ou en pourcent de la valeur maximale de l'étendue de mesure. les installations de mesure de température sont des ensembles de plusieurs appareils ayant chacun leur erreur propre, on distingue :

a) l'erreur maximale de l'ensemble qui est la somme des valeurs absolues des erreurs absolues de chaque appareil.

b) l'erreur moyenne la plus probable qui est la racine carrée de la somme des carrés des erreurs absolues de chaque instrument.

4) Temps de réponse.

III.5 Thermomètres utilisant les propriétés thermoelectriques

III.5.1 Thermomètre à résistance

on utilise un conducteur métallique ayant une certaine résistance électrique (R). si la température de R varie, sa résistance varie et devient

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t)$$

la résistance des métaux augmente avec la température (sa variation est proportionnelle à la variation de température)

III.5.1a Principe de mesure

l'appareil est composé d'une résistance appelée sonde (R_s). Cette sonde est reliée par deux fils à un récepteur (galvanomètre). un générateur de courant constitué par une pile P alimente le circuit.

on a

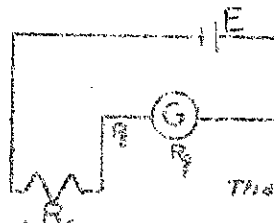
$$I = \frac{E}{r + R + R_g + R_s}$$

les indications données par (G) sont en I directement. I [mA]

on suppose que, les variations de I ne proviennent que des variations de R_s .

D'autres causes peuvent faire varier i :

- R_g et R_t
 - la décharge de la pile dans le temps fait diminuer la f.e.m ce qui varie i .
- C'est à dire t° ne peut jamais être déterminée exactement



Thermomètre à résistance.

on peut y remédier par les modifications suivantes :

- Alimentation stabilisée (toujours constante)
- Lignes et cadres constitués par des métaux de résistance constante

III 51 b La sonde

Elle est constituée par un fil métallique bobiné sur un support isolant réfractaire.

les fils de sortie et la bobine sont placés dans une gaine protectrice, le tout enrobé dans un isolant réfractaire.

le fil, la bobine, l'enrobage et la gaine ont en général la même dilatation pour éviter des contraintes mécaniques qui risquent de fausser la valeur de la résistance de la sonde.

Pour réduire l'inertie thermique, on prend des diamètres et longueurs plus faibles que possible.

III 51 c Mesure avec pont de Wheatstone équilibré

$$I_1 R_1 = I_2 R_2$$

$$I_1 R_3 = I_2 R_4$$

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \implies \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$



le pont est équilibré lorsqu'on a : $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$
lorsque le galvanomètre est à zéro le pont est équilibré.

si la température de la sonde s'élève, sa résistance augmente, le pont se déséquilibre, le galvanomètre dévie.

Pour rattraper l'équilibre on déplace le curseur jusqu'à ce que le galvanomètre indique zéro.

— Avantage de cet appareil :

- 1) Ce montage est indépendant des variations de f.e.m. de la pile.
- 2) La mesure est indépendante de la température ambiante lors de mesures de surfaces.

— Inconvénient

1) Il faut opérer manuellement pour équilibrer et avoir la valeur de température.

2) Cet appareil ne peut être utilisé pour faire de la régulation car il ne donne pas l'indication en continu.

3) Si la résistance de la ligne varie, ce qui se produit lorsque la température ambiante varie, la mesure sera faussée.

III 51^o Pont déséquilibré

La résistance ajustable R_3 est remplacée par une résistance fixe. Si la résistance de la sonde varie, le galvanomètre dévie et indique directement la valeur de la température.

— Avantage :

1) Indique la température sans intervention manuelle.

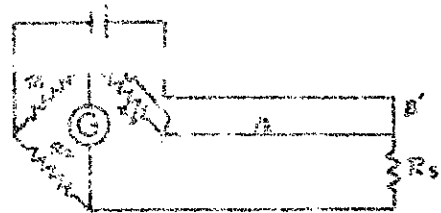
— Inconvénient

1) Si la résistance de la ligne varie, la mesure sera faussée.

2) Cet appareil ne peut pas être utilisé pour faire de la régulation car le couple moteur du galvanomètre est faible.

III 51^e Compensation de la résistance de la ligne

Sonde à trois fils



On ajoute à R_3 une longueur de ligne de résistance l_2 et à la sonde R_1 une longueur de ligne de résistance l_1 ($l_1 = l_2$).

Ces résistances varient en même temps, de la même valeur, et étant placés dans des branches opposées du pont, l'équilibre n'est pas faussé, donc les variations des résistances de ligne peuvent être compensées en plaçant un troisième fil jusqu'à la sonde.

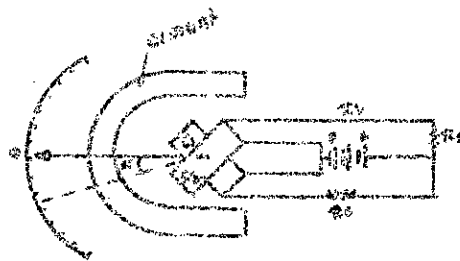
III 51f Appareil à équilibrage automatique

- on utilise un pont équilibré avec résistances d'équilibrage.
- le galvanomètre est remplacé par un système de détection
- le pont est alimenté par une pile
- la détection commande un amplificateur électronique
- le curseur de résistance R_3 est commandé mécaniquement par un moteur électrique
- le moteur électrique d'équilibrage est un moteur triphasé
- Avec un enroulement secteur, et un enroulement alimenté par la sortie de l'amplificateur.

si la température de R_3 varie, R_3 varie déséquilibrant le pont. l'étage de détection enregistre un déséquilibre.

l'ampli étant commandé, délivre une tension, le moteur tourne entraînant le curseur jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint.

III 51g Le logometre



les deux cadres sont identiques $R_{C1} = R_{C2}$

à OC : $R_1 = R_2$

Dans le circuit de C_1 on a : $R_1 + R_2 + R_{C1} + r_p = R_{C1} \Rightarrow L_1 = \frac{e}{R_{C1}}$

Dans le circuit C_2 : $L_2 = \frac{e}{R_{C2}}$

on peut tirer $R_{C1} = R_{C2} \Rightarrow L_1 = L_2$

le champ dans chaque cadre est le même $H_{C1} = H_{C2} \Rightarrow$ la résultante

R_H s'aligne sur la direction du champ d'aimant et l'aiguille indique zéro.

si la température augmente, R_2 augmente donc L_2 diminue et H_{C2} diminue. H_{C1} n'est pas varié.

H_{C1} et H_{C2} donnent R_H dévié d'un angle α . Pour s'aligner sur le champ de l'aimant elle tourne d'un angle α en entraînant les cadres.

III 52 Thermistance

on utilise les semi-conducteurs. lorsque la température augmente la résistance diminue (effet inverse des conducteurs).

les thermistances présentent une sensibilité très élevée au variation de température et à un encombrement réduit. Les thermistances peuvent s'employer entre -70 à 200°C. Elles sont appelées aussi (CTN) corps à coefficient de température négatif.

III 53 Les thermocouples

III 53a Introduction : chaleur et électricité sont deux formes d'énergie susceptibles de donner lieu à diverses manifestations dans des conducteurs. On attribue celles-ci en général des phénomènes ou effets que l'on distingue par la pensée, pour la commodité et l'étude bien que, dans la réalité ces effets n'aient jamais d'existences séparées. Parmi ces effets :

- la conversion directe de la chaleur en électricité par effet thermoélectrique (effet Seebeck)
 - Conversion directe d'électricité en chaleur et de chaleur en électricité par effet Peltier à la jonction de deux conducteurs.
 - Conversion directe d'électricité en chaleur et de chaleur en électricité par effet Thomson dans un conducteur homogène à température non uniforme.
- Au sens de la thermodynamique classique ces effets sont des processus réversibles.

III 53b Hypothèse et loi de Volta

Pour interpréter les faits observés par Galvani, Alessandro Volta émit en 1800 une hypothèse que l'on peut énoncer ainsi : le contact entre deux métaux différents engendre de l'électricité.

Aucune expérience ne permet de donner une preuve directe de cette affirmation. Ce résultat négatif n'est obtenu toutefois si au tout le système est à la même température. Il s'agit donc sous la forme que l'on appelle loi de Volta.

Quelle que soit le nombre de conducteurs différents à température uniforme, n'est le résultat d'aucun courant électrique. Comme toute absence de manifestation, celle du phénomène hypothétique de Volta ne peut s'interpréter que deux façons : c'est ou bien que le phénomène n'existe pas ou bien qu'il donne lieu à des effets opposés dont le résultat global est nul.

si l'on représente par $E(A/B)$ la potentialité du contact entre les métaux A et B (dans l'ordre A, B), la seconde interprétation, on peut écrire d'après la figure

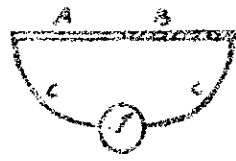


$$E(A/B)_{\text{jonction A}} + E(B/A)_{\text{jonction B}} = 0$$

c'est à dire :

$$E(A/B) = - E(B/A)$$

Par l'intervention d'un troisième conducteur on peut écrire.



$$E(A/a) + E(B/c) + E(C/A) = 0$$

III 53c Experience de Seebeck :

montre que dans un circuit fermé, formé de deux fils de métaux différents, si l'on porte les deux points de jonction à des températures différentes, il se crée un courant électrique dont la grandeur est déterminée par la nature des métaux employés, et l'écart de température entre les deux points de jonction.

III 53d Experience de Peltier :

montre que si l'on fait passer un courant électrique dans un thermocouple, une des soudures absorbe de la chaleur tandis que l'autre en émet. Cette constatation conduit à la localisation, à l'endroit des jonctions, de forces électromotrices (fem Peltier)

III 53d Experience de Thomson

Thomson montre à Santour que si l'on porte des deux extrémités d'un fil conducteur homogène à des températures différentes, une force électromotrice apparaît entre ces deux extrémités (fem Thomson)

La force électromotrice créée par un thermocouple est la résultante de ces phénomènes, desquels découlent trois lois :

1) loi du circuit homogène :

si l'on reproduit l'expérience de Seebeck en utilisant deux fils de composition identique dont les jonctions sont soumises à des températures différentes, le circuit ainsi fermé n'est le siège d'aucun courant; (les fem Peltier et la somme algébrique des fem Thomson sont nulles)

2) loi de la répartition des températures :

Quand les deux jonctions d'un circuit formé de deux fils de nature différente sont portées à des températures différentes la fem créée est indépendante de la température répartie le long des fils.

3) loi des métaux intermédiaires :

Quand dans un circuit formé de deux fils de nature différente, dont les jonctions sont portées à des températures différentes, si on coupe un des fils en deux tronçons pour y intercaler un troisième fil d'une autre nature,

La f.e.m. créée n'est pas modifiée lorsque les deux points de jonction de ce troisième fil se trouvent à la même température.

III 54 Principales qualités requises pour les thermocouples

Pour répondre aux exigences d'un service industriel, les thermocouples doivent :

1) Développer une f.e.m. aussi grande que possible, fonction continue de la température.

2) Être suffisamment durables, et il faut envisager par-là non seulement leur résistance à la corrosion et aux chocs, mais encore la propriété de conserver à une température donnée, une f.e.m. invariable.

3) Être interchangeable, c'est à dire que les appareils de lecture ne doivent nécessiter aucun recalonnage ni aucune correction, lorsqu'on substitue un thermocouple de même nature.

Le choix d'un thermocouple dépend surtout de la grandeur des températures à mesurer.

On choisira en effet, les thermocouples qui tout en résistant aux températures, envisagées, présentent les f.e.m. les plus élevées.

Lorsqu'un est utilisé à des températures où il est réputé durable, il faut toujours considérer qu'une condition importante est sous-entendue :

sa protection contre la corrosion du milieu où il est plongé. C'est ainsi que les thermocouples chromel-alumel et platine rhodié-platine qui résistent parfaitement dans les atmosphères oxydantes, se détruisent rapidement dans les milieux réducteurs.

Par contre les thermocouples fer-constantan qui résistent bien dans les atmosphères réductrices, se détruisent dans les milieux oxydants.

III 55 Precision

Quels sont les effets des erreurs sur un thermocouple et quels sont les moyens pour les éliminer ?

Parmi les sources des erreurs on peut citer :

- 1) le vieillissement des thermocouples
- 2) la température de la soudure froide.
- 3) l'inertie (retard de réponse)

- 4) l'espace mort entre la gaine et le thermocouple
 - 5) la vitesse du fluide entourant le thermocouple
 - 6) la radiation
 - 7) la conductibilité de la gaine et du thermocouple
- 1) Le vieillissement des thermocouples

Il n'est malheureusement pas toujours possible que les thermocouples soient suffisamment durables pour conserver à une température donnée une fem invariable. Il est difficile de préciser après combien de temps un thermocouple doit être remplacé, car le vieillissement dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels nous citerons : la température à contrôler, l'atmosphère de l'enceinte, la gaine de protection, le diamètre des fils etc.

Généralement on procède à des contrôles pour déterminer la durée maximale de service sans erreur appréciable.

Diverses méthodes sont utilisées pour effectuer les contrôles.

— Méthode de comparaison avec un thermocouple étalon (neuf)

— Méthode de fusion d'un fil d'or : on coupe les fils du thermocouple à la jonction (soudure chaude) et on soude entre les bouts, un fil d'or pur de 0,2 mm de diamètre et de 40 à 15 mm de longueur. On peut aussi torsader le fil d'or autour des fils de thermocouple, mais il faut dans ce cas veiller à ce que le contact soit parfait. En rechauffant le four on remarque sur l'enregistreur un palier à 1063°C (point de fusion de l'or) puis une légère remontée précédant immédiatement la rupture du fil d'or. Si le thermocouple n'est pas vieilli le palier se produira exactement à 1063°C.

— Méthode de fusion d'un fil de Palladium :

Le point de fusion de Palladium est 1552°C. L'instrument de lecture utilisé étant un potentiomètre de réponse rapide nous avons obtenu des paliers entre (1552 - 1556°C).

2) Correction de soudure froide

Correction sur les millivoltmètres gradués en degrés : la graduation de l'instrument est faite en partant de la température de référence et le zéro de l'échelle correspondant à cette température. Il n'en sera pas de même pour les millivoltmètres dont le zéro de l'échelle correspond à 0°C. le plus souvent on ajoute à la lecture la température de la soudure froide, là on commet une erreur de correction :

Soit un millivoltmètre gradué de 0 à 1200 μ pour un thermocouple Platine-rhodium - Platine. la soudure froide est considérée à 0 $^{\circ}$ C, si la température réelle de soudure froide est 28 $^{\circ}$ C et qu'on lise sur l'appareil une température de 1000 μ on ne peut pas dire que la température réelle est de 1028 $^{\circ}$ C, mais 1013 $^{\circ}$ C car la f.e.m. correspondant à 1000 μ (9,719 mV) il faut ajouter la f.e.m. correspondant à 28 $^{\circ}$ C (0,149 mV).

la somme des f.e.m. (9,868) correspondant à 1013 $^{\circ}$ C, est la température exacte.

Cette correction varie avec la température et la nature du thermocouple.

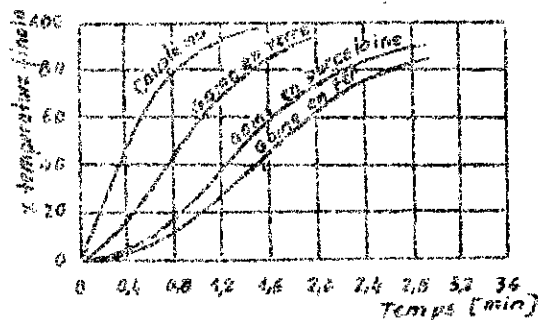
3) L'inertie des thermocouples :

Le temps de réponse sera d'autant plus long que :

- la capacité thermique du thermocouple est plus forte
- la surface/masse de thermocouple est plus petit
- la vitesse du fluide entourant le thermocouple est plus faible.
- la capacité thermique et la conductibilité du fluide sont plus petites.

Il s'ensuit qu'un thermocouple placé dans une enceinte contenant un gaz sec, aura un temps de réponse plus long que le même thermocouple placé dans un liquide ou dans un gaz saturé d'eau.

la gaine de protection, indispensable dans la majorité des cas, influence également le temps de réponse.



4) Effet de l'espace mort entre la gaine et le thermocouple

L'air contenu dans la gaine de protection forme, entre Cellaci et le thermocouple, un écran très mauvais conducteur. Son influence fait perdre tout le bénéfice attaché à la qualité de la gaine, en ce qui concerne la transmission de la chaleur. Non seulement, l'air contenu dans la gaine et entourant le thermocouple diminue la vitesse de réponse mais il peut suivant la façon dont est fixée la gaine dans l'enceinte, conduire à une erreur de mesure.

En effet l'air se trouvant dans la gaine va se chauffer et provoquer une circulation qui refroidira la soudure chaude et chauffera la soudure froide. Le thermocouple indiquera alors une température inférieure à la réalité.

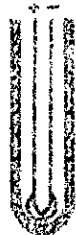
Lorsque des grandes vitesses de réponse sont recherchées, il faut réduire l'espace mort au minimum possible en utilisant des gaines de très petit diamètre, et soit :

- souder la jonction des fils de thermocouple, dans une feuille demi-circulaire. Cette demi-sphère, grâce à sa forme, crée un bon contact avec la surface interne de la gaine de protection, facilitant le transfert de la chaleur entre le tube et la soudure chaude du thermocouple. Pour des températures inférieures à 900°C on peut utiliser une demi-sphère en argent ou en cuivre.

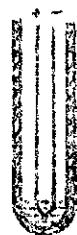
- mettre un peu d'huile ou de mercure dans le fond de la gaine (cas des températures peu élevées)

- souder la soudure chaude du thermocouple à la gaine.

- utiliser par exemple dans le cas d'un thermocouple Fer-Constantan, la gaine si Cellaci est en fer comme conducteur positif et souder le fil de Constantan (conducteur négatif) dans le fond de la gaine.



Soudure chaude
soudée dans une
demi-sphère



Soudure chaude
plongée dans
un liquide



Soudure chaude
soudée au fond
de la gaine



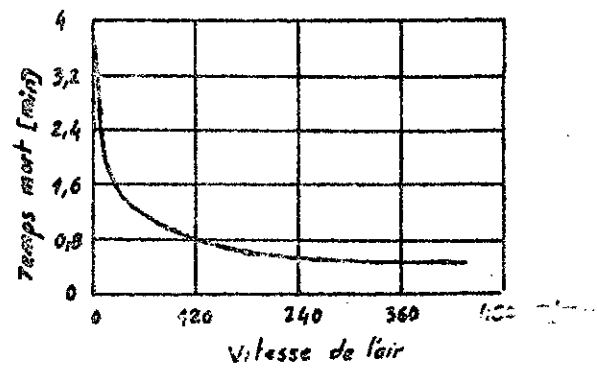
Soudure chaude
formée par un fil
et la gaine de
protection

5) Effet de la vitesse du fluide entourant le thermocouple

la transmission de la chaleur, entre le fluide et la gaine du thermocouple s'accroît considérablement avec la vitesse du fluide.

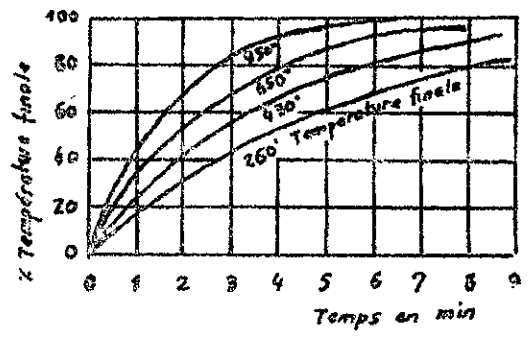
- Dans un liquide pour maintenir le temps mort à une valeur raisonnable, il faut que la vitesse du fluide soit au moins égale à 18 m/min

- Dans les gaz, l'influence de la vitesse est encore plus considérable, il faut atteindre 120 m/min pour réduire le temps mort à une valeur raisonnable.



6) Effet de radiation

L'énergie calorifique transmise par radiation suit une loi proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue. Il s'ensuit que le temps mort sera d'autant plus court que l'enceinte sera à haute température.



7) Effet de la conductibilité de la gaine et du thermocouple

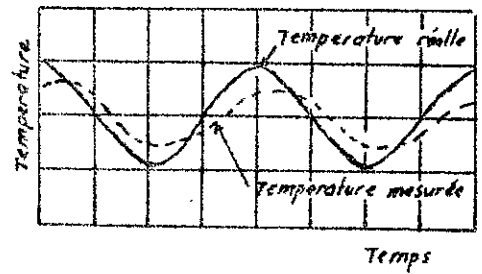
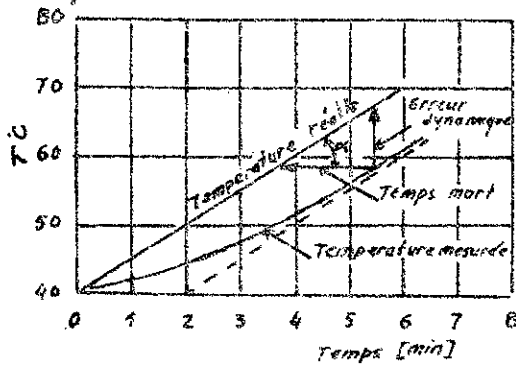
la température qui prend la gaine (et thermocouple) plongée dans une enceinte chaude, résulte de l'apport de chaleur qu'elle reçoit cette enceinte et la perte de chaleur qu'elle évacue par conduction vers les parois de l'enceinte.

Cette perte est d'autant plus grande que les gaines sont faites en matière plus conductrice, qu'elles sont de plus grande section et plongées moins profondément dans l'enceinte chaude.

Une réponse rapide et fidèle avec des gaines conductrices ou avec des fils de thermocouple

III 56 Erreur dynamique et retard

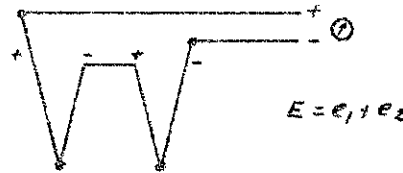
Si la température de l'enceinte augmente ou diminue à une vitesse constante le thermocouple accusera un retard constant sur la température réelle, il résulte qu'à un moment donné, la mesure présente une erreur appelée erreur dynamique, qui est liée au retard. Elle est égale au produit du retard par la tangente de l'angle α .



III 57 Assemblage de thermocouples

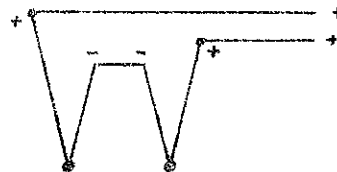
III 57a Assemblage en serie

les thermocouples de même nature peuvent être assemblés en série, soit pour obtenir une grande f.e.m., soit pour mesurer des très faibles variations de températures. la f.e.m. mesurée est égale à la somme des f.e.m. de tous les thermocouples



III 57b Assemblage en opposition

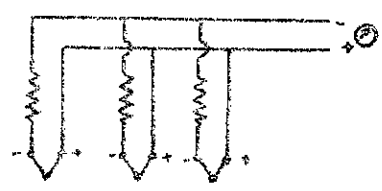
Deux thermocouples ou deux piles thermoélectriques de même nature peuvent être assemblés en opposition et donnent la différence de température de thermocouples placés à des endroits différents.



III 57c Assemblage en parallèle

Ce montage permet d'obtenir la température moyenne d'une enceinte, au moyen de plusieurs thermocouples placés à des endroits différents.

chaque thermocouple représente une source de courant, pour éviter qu'un thermocouple débite dans le circuit d'un autre quand la différence entre les températures de leur soudure chaude devenait trop élevée, chaque thermocouple doit être équilibré par une résistance assez élevée pour réduire l'effet de variation de résistance du thermocouple avec la température



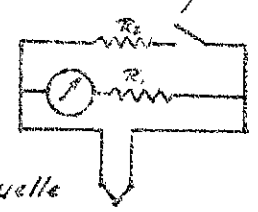
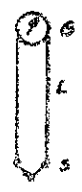
III 58 Mesure de la fem d'un thermocouple

Généralement on utilise deux méthodes :

III 58 a Méthodes directes :

Ces méthodes consistent à envoyer la fem du thermocouple dans un circuit galvanométrique, la déviation du galvanomètre étant directement proportionnelle à la fem émise.

la fem du couple débite sur le galvanomètre (G) mais la résistance de la ligne et celle du circuit de mesure influencent la mesure. l'appareil G est étalonné pour une longueur donnée de ligne (L). l'erreur due à la résistance du circuit peut être corrigée en partie par un artifice de la lecture, en adaptant le montage suivant:



on fait deux lectures :

- une lecture directe T_1 , dans laquelle la température est fonction directe de la fem E , prise par G et qui est égale à celle donnée par le thermocouple E diminuée des chutes dues à la résistance du circuit (ligne galvanomètre + R_1)
- une lecture T_2 après l'introduction de $R_2 = R_1$ dans le circuit; qui fait diminuer de moitié la résistance du circuit et en ajoutant à T_1 l'écart T_2 , on annule l'erreur due à la résistance du circuit. la lecture n'est plus entachée que de l'erreur de la résistance de la ligne.

Avantages: l'appareil étant bien étalonné et les conditions de mesure respectées (résistance de la ligne), on limite au maximum les erreurs de lecture puisque, seules la précision du couple et du galvanomètre sont en jeu.

Inconvénient:

- Fragilité de l'appareil (galvanomètre)
- Influence de résistance de la ligne
- l'appareil n'est utilisable que dans de très étroites conditions; (longueur et nature du câble de compensation, température ambiante...)

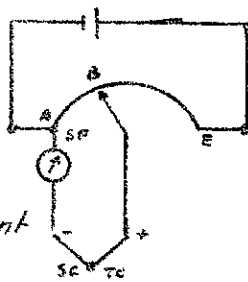
III 58 b Méthode potentiométrique ou méthode de zéro

Cette méthode consiste à opposer à la fem du couple une fem contraire, que l'on règle en agissant sur un potentiomètre jusqu'à égalité, cette dernière étant constatée par l'absence de courant passant dans le galvanomètre.

- Méthode de zéro pour thermocouple:

En se basant sur le principe, on réalise le montage suivant:

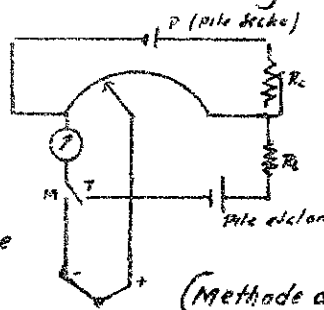
on oppose à la fem du couple, la fem prise entre A et B. lorsque la fem du thermocouple et celle prise entre A et B sont égales le galvanomètre indique zéro.



le curseur mobile sur la résistance déplace en même temps, un index sur un cadran gradué en mV ou en degrés d'une échelle donnée.

l'inconvénient de cet appareil qu'on a supposé que la fem de la pile \mathcal{E} est constante on peut remédier à cet inconvénient en réalisant le montage suivant:

on chute une partie de la tension à travers un rhéostat de tarage R_c , la pile étalon capable de délivrer une tension



invariable de 1,0183V permet de tarer la pile (P). Cette dernière ne doit pas tabiter, pour cela on place en série avec elle une résistance R_c . Pour effectuer le tarage, on met l'inverseur à la position T et on varie le rhéostat jusqu'à

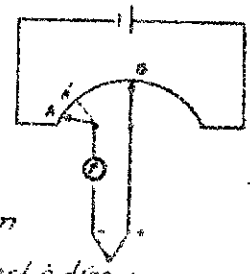
(Méthode de zéro (tarage)).

ce que le galvanometre indique zero, à ce moment la tension de la pile chutee à travers R_c est egale à la tension etalon. Pour fonctionner l'appareil on met l'inverseur en marche (position m).

En general la soudure froide n'est pas 0°C, il est necessaire de prevoir une compensation :

1) Compensation manuelle par decalage de l'echelle ou à double curseurs:

lorsque la soudure froide est à zero, le curseur de compensation est au point A et la fem de la soudure froide est 0 mv.



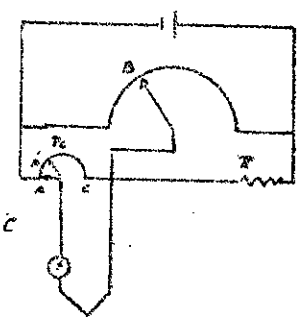
la fem mesuree est egale à la difference entre la fem de la soudure chaude et celle de la soudure froide. C'est à dire :

$$fem (mesuree) = fem - 0mv = V_{AB}$$

si la soudure froide est differente à zero ($fem_{SF} = V_{AK}$) on decale le curseur de A à A' et la fem mesuree est : $fem_{SC} - fem_{SF}$ ($V_{AB} = fem_{SC} - V_{AK}$)

2) Compensation par potentiometre :

si la soudure froide est à zero, le curseur de potentiometre est en A - et la fem de soudure froide egale 0 mv. le curseur indicateur est en B.

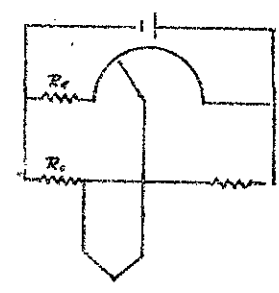


si la temperature de soudure froide est differente à zero c on decale le curseur de potentiometre de A en A'

3) Compensation automatique

la resistance R_c varie avec la temperature, de telle sorte que la variation de fem qui s'ensuit soit egale à la variation de fem de la soudure froide.

R_c est une resistance d'etalonnage invariable avec la temperature.



4) Appareils à equilibrage automatique

On remplace le galvanometre par un etage de detection qui attaque un amplificateur.

lorsque la fem de thermocouple n'est pas equilibree. la difference entre cette fem et celle prise entre A et B sur le fil calibre est detecte par l'etage de detection,

V VANNES DE REGLAGE

IV1 Regulation du debit

On considere une vanne permettant de regler le debit d'un fluide. le debit de ce fluide depend essentiellement de la position de la vanne et des pressions amont et aval de la vanne.

IV2 Coefficient de debit

IV2a Historique : ce coefficient a été introduit par la société Masonellan (USA) en 1944. Vu sa grande utilité pratique, il a été adapté sous sa forme originale ou avec certaines adaptations, par le restant des constructeurs, aux USA d'abord puis en Europe. son utilisation permet de lier par une relation simple le debit passant à travers la vanne à sa perte de charge et ainsi d'effectuer le dimensionnement des vannes.

IV2b Definition

le C_v exprime le nombre de gallons us d'eau par minute s'écoulent à travers une restriction donnée, en créant une perte de charge de 1 psi.

$$Q = C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{d}}$$

Q : (gallons us/mn)
 d : densité / eau
 ΔP : P.S.I

D'autre manière c'est le debit en 3,785 litres d'eau par minute qui crée une perte de 70 millibars.

ou bien c'est le debit d'eau en litres par minute qui crée une perte de charge de 18,5 bars.

les fabricants des vannes (en Allemagne) utilisent le coefficient K_v qui exprime le debit en m^3 par heure d'eau pour une perte de 1 bar.

la notion de C_v , ayant été établie pour les vannes, peut être étendue à tous les éléments présentant une résistance hydraulique (vannes, clapet de retenue, portion de tuyauterie ...)

IV3 L'intérêt du C_v

— Par une mesure expérimentale simple sur une restriction donnée on obtient un indice de capacité permettant une comparaison entre les éléments hydrauliques

— Il est possible à l'aide des formules simples de calculer le debit de la vanne (ou restriction) en fonction de n'importe quelle condition de perte de charge, nature de fluide, densité, pression, température.

Remarque

le C_v n'étant valable que pour une valeur de résistance.

Pour une vanne chaque degré d'ouverture à un coefficient de débit. Ces pourquoi, aux caractéristiques, le C_v est donné pour une ouverture complète.

les valeurs de C_v données par les Constructeurs sont basées sur la moyenne de collections de vannes identiques.

le C_v peut évoluer dans le temps de services pour des raisons d'usure, érosion de corrosion etc.

IV4 Détermination de C_v

IV4.1 Historique

une standardisation des formules de calcul avait été faite aux états-unis (il y a vingtaines d'années) avec la norme FC158-1 relative à la détermination de la capacité des vannes de réglage suivie de la norme FC162-1 donnant une série des formules de dimensionnement des vannes pour liquide gaz et vapeur d'eau. Les constructeurs ont mis en évidence des phénomènes tels que la vaporisation, la cavitation et surtout la récupération de la pression et leur influence sur le dimensionnement des vannes.

Des nouvelles recherches ont introduit autres coefficients dans la formule de base de C_v et qui sont propres au type de vanne et dont la valeur est établie par les constructeurs.

En 1977 a été publiée aux US la norme ANSI/ISA-575.01 "Standard Control Valve Sizing" qui donne les formules nécessaires pour les dimensionnements des vannes. Ce standard remplace les anciennes normes 539-1 et 539-3 et constitue une extension importante de la norme bien connue FC162-1 du Fluid Controls Institute déjà citée qui a été pendant longtemps un document de référence pour le dimensionnement des vannes.

Bien que la norme ANSI/ISA 75-01 ait été élaborée avec collaboration des représentants des principales sociétés constructrices des états-unis et que dans un souci louable d'universalité, elle donne des coefficients numériques relatifs aux unités métriques ou même titre que les unités anglo-saxonnes.

Toute restriction est placée sur le parcours d'un fluide provoque une chute de pression (perte de charge).

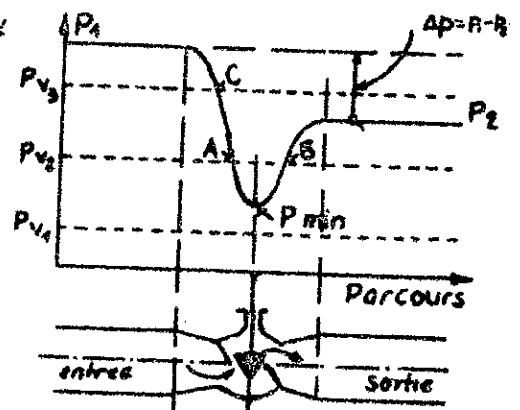
si la tension de vapeur du liquide est inférieure à la pression du liquide ($P_v = P_{v1}$) l'écoulement est normal, le Cv est donné par l'une des deux formules :

1) Débit en volume

$$C_v = 1,16 Q \sqrt{\frac{\rho_f}{\Delta P}} \cdot \frac{1}{F_p}$$

2) Débit en poids

$$C_v = \frac{4,16 W}{\sqrt{\rho_f \Delta P}} \cdot \frac{1}{F_p}$$



F_p : Facteur de correction dû au convergent divergent de part et d'autre part de la vanne, qui est donné par le constructeur ou bien calculé.

Q : m^3/h W : t/h

ρ_f : densité à la température de service

ΔP : chute de pression à travers la vanne ($P_1 - P_2$) en bar

P_1 : pression amont (bar absolu)

P_2 : pression aval (bar absolu)

Toutefois une partie de la perte de charge est récupérée. Pour un liquide P_{min} peut être inférieure à la tension de vapeur, on peut alors considérer deux cas :

— la tension de vapeur est supérieure à la pression du liquide et inférieure à P_2 le liquide se vaporise en A, les bulles de vapeur implosent en B et l'on a le phénomène de cavitation ($P_v = P_{v1}$). l'énergie dissipée produit des contraintes superficielles qui provoquent l'usure de vanne; ce phénomène peut être évité :

1 On ramène la chute de pression inférieure à P_{v1}

2 Implanter la vanne dans la partie la plus basse du système considéré

($P_{statique}$ augmente $\Rightarrow P_{partie}$ augmente \Rightarrow perte de charge diminue)

3 Choisir une vanne dont C_p plus élevé.

4 la meilleure solution est placer deux ou trois vannes en série, la vanne aval règle la pression de sortie de la vanne amont à une valeur suffisante d'empêcher la cavitation.

— la tension de vapeur inférieure à P_1 et supérieure à P_{min} et P_2 , le liquide se vaporise en c (Pas de cavitation) le phénomène s'appelle "Flashing".
 C_f (taux de recuperation de pression) exprime le rapport entre C_v obtenu dans les conditions critiques et le C_v dans les conditions de recuperation de pression normale.

— Vaporisation :

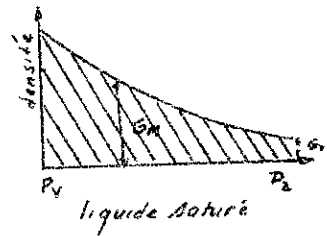
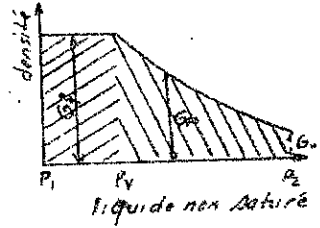
1) Methode de Coaflow

a) Dans le cas general

$$C_v = \frac{0,986 \cdot G_f}{C_f [\sqrt{G_m(P_v - P_2)} + \sqrt{G_f(P_1 - P_v)}]}$$

b) si le liquide est saturé à son entrée de la vanne.

$$C_v = \frac{0,986 \cdot G_f}{C_f \sqrt{G_m(P_v - P_2)}}$$



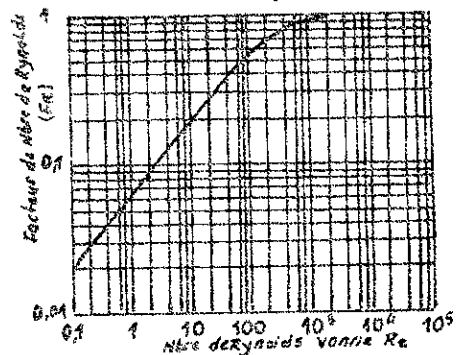
2) Methode d'addition de C_v

Ces la somme des C_v relatifs à la portion liquide et la fraction vaporisée.

— Ecoulement liquide visqueux.

lorsque la viscosité augmente ou la vitesse de passage diminue, l'écoulement n'est plus turbulent et peut devenir laminaire, ce qui fait diminuer le débit. Cette diminution peut être mise en évidence au moyen du facteur F_R (le rapport entre les débits aux conditions turbulent et non turbulent), ce facteur peut être déterminé graphiquement.

$$Re_v = \frac{76000 F_R Q}{\sqrt{FL} \cdot C_v^{1/2}} \left[\left(\frac{30140 FL F_R C_v}{D^2} \right)^{3/4} + 1 \right]$$



Q (débit) : [m³/h]

ν : viscosité cinématique en centistokes.

FLP : Coefficient de récupération de pression

D : diamètre intérieur de la tuyauterie [mm]

$F_d = 1$ vannes à simple siège et 0,7 pour les autres types.

— Ecoulement biphasique :

Cet écoulement peut représenter sous deux formes

1) A l'entrée de la vanne on peut avoir un mélange de liquide et de gaz incondensables.

2) on peut avoir du liquide et sa vapeur.

Dans le premier cas, il n'y a pas de vaporisation et si la vitesse est suffisante d'assurer un écoulement turbulent et homogène.

$$C_v = \frac{51,8 W}{\sqrt{\Delta p (w_1 + w_2)}}$$

W : t/h

w_1 : masse volumique du mélange amont

w_2 : poids spécifique du mélange aval

kg/m³

Dans le deuxième cas pour les mêmes conditions

$$C_v = \frac{38,6 W}{\sqrt{\Delta p w_1}}$$

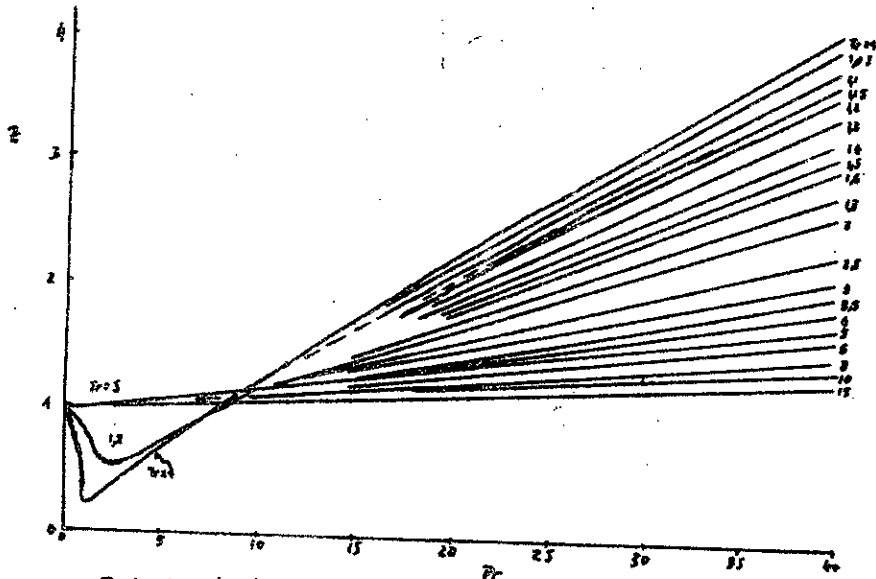
IV6 Dimensionnement des vannes en service gaz et vapeur

Dans une tuyère parcourue par un gaz la vitesse du son peut être atteinte au col et dans ce cas la pression est voisine à la moitié de la pression amont absolue.

On se trouve être alors en conditions de détente critique, pour lesquelles l'écoulement est déterminé seulement par les conditions de pression amont.

Le coefficient de compressibilité (z) permet de corriger la loi des gaz parfaits pour compte du comportement des gaz réels soumis à des variations de pression et de température. On a $PV = zRT$. Pour des pressions inférieures à 7 bars, z peut être négligé. La valeur de z ne varie pas sensiblement pour les différents gaz lorsque l'on exprime les pressions et les températures en coordonnées réduites (P_r, T_r).

Le coefficient z peut être déterminé graphiquement.



Avec $P_r = \frac{P_{\text{absolue d'entrée}}}{P_{\text{absolue critique}}}$

$T_r = \frac{T_{\text{absolue d'entrée}}}{T_{\text{absolue critique}}}$

Pour les gaz :

- Débit en volume :

$$C_v = \frac{G \sqrt{G T_2}}{257 C_f P_1 (Y - 0,148 Y^2)}$$

- Débit en poids :

$$C_v = \frac{54,9 W}{C_f P_1 \sqrt{G} (Y - 0,148 Y^2)}$$

Le Coefficient Y est donné par la formule suivante: $Y = \frac{1,63}{C_f} \sqrt{\frac{\Delta P}{P_1}}$

Pour la vapeur d'eau, Seul le débit en poids est utilisé :

- Vapeur saturée :

$$C_v = \frac{83,8 W}{C_f P_1 (Y - 0,848 Y^2)}$$

- Vapeur surchauffée :

$$C_v = \frac{83,7 (1 + 0,00126 T_{s6}) W}{C_f P_1 (Y - 0,148 Y^2)}$$

C_f : Coefficient de débit critique

G : densité de gaz à 15°C et 1013 mbar absolue calculée, par rapport à celle de l'air prise égale à 1

G_f : densité du fluide à T de coulement et 1013 mbar absolue par rapport à celle de l'air prise égale à 1.

P_1 : pression absolue amont bar

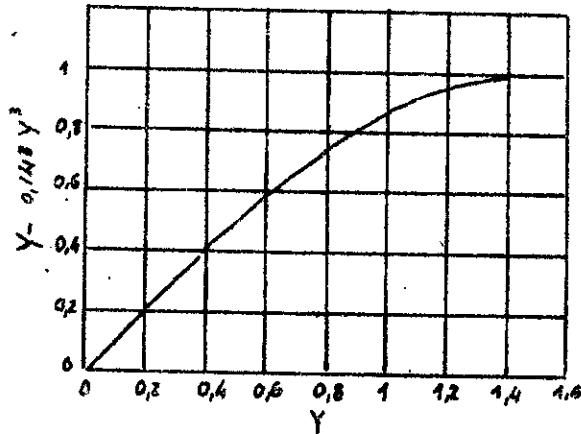
P_2 : Pression absolue aval bar.

W : m^3/h

l'expression $(Y - 0,142 Y^2)$ peut être déterminée graphiquement

$\Delta p (P_1 - P_2) < C_f^2 P$, écoulement normal

$\Delta p \geq C_f^2 P$, écoulement critique.



IV 7. Vannes en série avec résistance, composition de c_v :

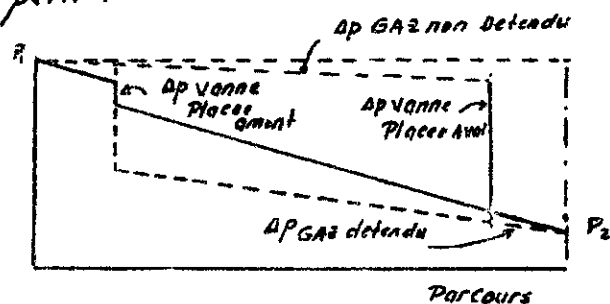
Si les portions de tuyauteries en amont et en aval de la vanne de réglage présentent le même diamètre, le gaz détendu en aval est plus rapide ce qui entraîne une perte de charge linéaire plus grande comparativement à l'amont. Le phénomène déjà sensible quand la vanne est fortement ouverte, croît à mesure qu'elle se ferme.

La tuyauterie aval apporte une résistance complémentaire qui assiste l'action de la vanne.

Si la tuyauterie est longue et la perte de charge est importante, la position de la vanne sur la tuyauterie n'est plus indifférente:

- la vanne est placée très en amont: le débit maximal qu'elle permet sera réduit par la résistance de la tuyauterie et on aurait besoin d'un C_v plus grand

- la vanne est placée très en aval: le gaz est transporté sous pression, la tuyauterie est capable d'un débit plus grand, et la vanne absorbe un Δp plus grand et son C_v est petit.



IV 7a Cas de gaz de forte détente

Si la pression P_1 est élevée et P_2 (dans l'enceinte) très basse, la vanne crée avec la tuyauterie une perte de charge, qui détermine la pression de sortie P_2' dans l'enceinte pour un débit Q .

Si P_2 est très bas, la vitesse maximale (sonique) est atteinte et les fluctuations de P_2 ne peuvent être ressenties en amont, car la contrepression ne peut pas remonter la vitesse du son.

La fermeture de la vanne augmente la résistance et P_2 descend pour atteindre P_2' . Dans ce cas la tuyauterie aval ne présente aucune résistance et $\Delta p = P_1 - P_2$ se trouve au borne de la vanne, qui devient le sujet d'un écoulement critique (sonique) qui se produit soit à la sortie de tuyauterie (débit fort) soit au niveau de la vanne (débit faible).

La situation de la vanne joue un rôle important :

— Près de la sortie : Il y a les meilleures chances que l'écoulement critique se produise de façon continue

— Près de l'entrée : la portion aval peut absorber une grande partie de la perte de charge et protéger la vanne.

IV B Notion de C_v équivalent

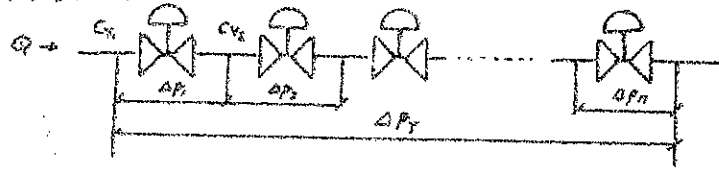
La notion de C_v équivalent permet de traiter les différents cas d'applications de vannes de réglage multiples, en les réduisant à une vanne unique. Ceci est réalisé en combinant les caractéristiques individuelles des vannes constitutrices du réseau de manière à permettre et faciliter les calculs sans avoir besoin de considérer individuellement chacune d'elles.

Les vannes de réglage peuvent être assemblées en série ou en parallèle. L'utilisation de vannes en série pour fractionner une perte de charge élevée, afin de réduire le niveau de bruit ou le bouchage éventuel (orifices trop petits) qui accompagneraient l'emploi d'une vanne unique.

L'utilisation de vannes en parallèle permet d'obtenir le débit désiré. De même l'emploi de vannes en parallèle dans des cas où la rangeabilité requise dépasse les possibilités d'une vanne unique.

La notion de C_v équivalent peut être appliquée aux autres organes de tuyauterie employés pour régler ou limiter les débits des fluides véhiculés tels que vannes à soupape ou à pointeau, orifices de restriction.

1) Vannes en Serie



$$\Delta P_T = \sum \Delta P_i$$

$$C_{v_i} = Q \sqrt{\frac{G}{\Delta P_i}}$$

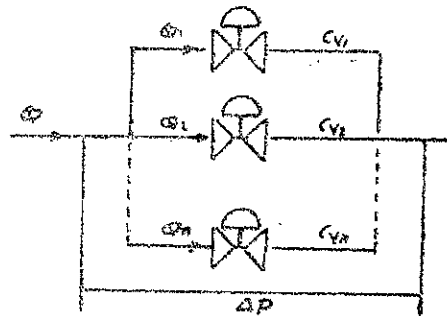
$$\Delta P_T = Q^2 G \sum \left(\frac{L}{C_v}\right)^2 \quad Q = \frac{\sqrt{\Delta P_T}}{\sqrt{\sum \left(\frac{L}{C_v}\right)^2}}$$

$$C_{v_{eq}} = \frac{1}{\sqrt{\sum \left(\frac{L}{C_v}\right)^2}}$$

$$\frac{1}{C_{v_{eq}}^2} = \frac{1}{C_{v_1}^2} + \dots + \frac{1}{C_{v_n}^2}$$

2) Vannes en parallele:

le debit Q est la somme des debits individuels Q1, ..., Qn
 c'est à dire $Q = \sum Q_i$



$$Q = \sum C_{v_i} \sqrt{\Delta P / G}$$

$$\Rightarrow C_{v_{eq}} = \sum C_{v_i}$$

NB: Ces equations sont applicables directement pour les liquides. Dans le cas de gaz et de vapeurs, on doit tenir compte les facteurs de compressibilités.

IV9 Choix de vanne de reglage

lorsque la perte de charge à travers la vanne est petite par rapport à celle du reseau malgré une plage de fonctionnement étendue, il y'a lieu de prendre une vanne lineaire.

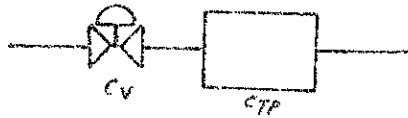
Si la perte de charge du reseau prend des valeurs importantes quand le debit augmente malgré la plage est restreinte, une vanne egal pourcentage est preferable.

On peut dire que pour les petites variations de la charge, les performances des Vannes lineaire et egal pourcentage sont presque identiques. Toutefois une vanne lineaire surdimensionné presente une source d'ennuis à cause de faible qualite de regulation par rapport à celle d'une vanne à egal pourcentage dans les memes conditions.

IV10 Caractéristiques d'une vanne de réglage dans une installation

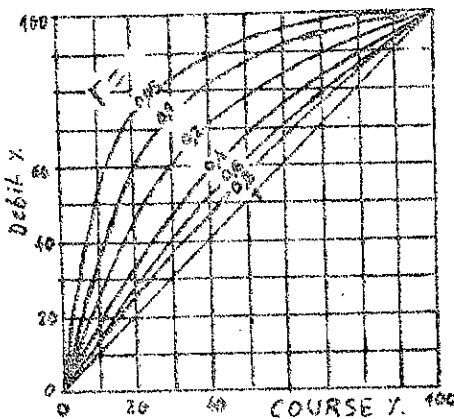
Elles permettent la comparaison entre les vannes, et fournissent les bases nécessaires donnant la relation ouverture-débit réel de l'ensemble (vanne + tuyauterie porteuse).

Par analogie de C_v de la vanne, on définit le coefficient de débit de tuyauterie porteuse par C_{TP} et du système par C_{syst} afin de schématiser l'ensemble

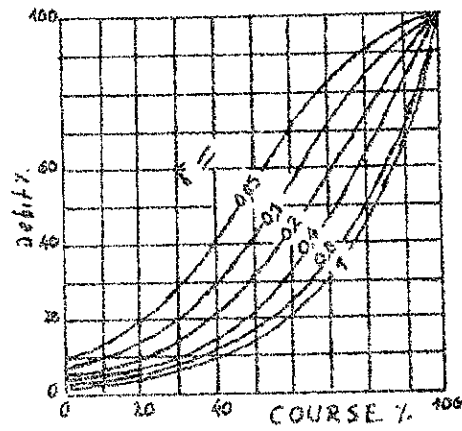


$$C_{syst}^2 = C_v^2 \frac{C_{TP}^2}{C_v^2 + C_{TP}^2}$$

La caractéristique débit en fonction de la course dépend de r ($r = \frac{AP_v}{AP_T + AP_{TP}}$)



Vanne linéaire



Vanne égal pourcentage

— Vanne linéaire : une augmentation de la perte de charge de tuyauterie porteuse (diminution de r) donne une caractéristique d'une vanne à ouverture rapide.

— Vanne égal pourcentage : la caractéristique se rapproche d'une loi linéaire en augmentant la perte de tuyauterie porteuse.

ce qui présente un avantage de ce type des vannes auxquelles on attribue une faible part de la perte de charge totale du système.

IV11: Choix de la caractéristique d'une vanne

La vanne idéale est celle qui possède une caractéristique de débit effective susceptible d'assurer à la boucle une stabilité sur la plage de fonctionnement indépendante des variations de la charge, ce qui est vérifié si le gain total de la boucle reste constant.

$$k_v \cdot k_p = \text{cte} \quad \text{avec } k_v = \text{gain de la vanne}$$

$$k_p = \text{gain de procédé}$$

le gain de la vanne tout au long de la course de manière à compenser des variations de gain des autres éléments de la boucle.

les caractéristiques des vannes linéaire ou égal pourcentage représentent les principales caractéristiques pour une régulation continue.

IV12: Plage de réglage (Rangeabilité)

Ce terme est souvent employé, malgré qu'il n'est pas toujours clairement défini.

Par définition c'est le rapport des débits maximal et minimal contrôlables mais cette définition n'est plus pratique car on ne peut pas déterminer exactement ces débits (maximal et minimal) contrôlables.

la rangeabilité peut être infinie ce qui n'a pas de signification pratique (vanne d'un clapet à garniture d'étanchéité).

C'est pourquoi la rangeabilité est mieux définie par le rapport entre les débits maximal et minimal entre lesquels la caractéristique de la vanne est maintenue dans certaines limites de précision.

les caractéristiques ne sont pas bien définies au voisinage de la fermeture.

C'est à dire à partir d'un point sur la courbe, la vanne ne respecte plus la loi donnée de régulation. Ce point définit C_v minimal et on peut déterminer C_v maximal et on a :

$$R = \frac{C_v \text{ max}}{C_v \text{ min}}$$

Plusieurs facteurs à prendre en considération :

— Débit maximum et débit de fuite

l'étanchéité des vannes à la fermeture est variable et liée à leur construction (problème d'alignement, jeux permettant le fonctionnement à des températures élevées sans grippages). le débit de fuite est généralement considéré comme étant le débit minimal contrôlable.

IV 13 Sensibilité unitaire d'une vanne

La sensibilité (S_v) c'est la variation relative du débit en % correspondant à une variation de la course de 1%, basée sur le débit existant avant la variation.

Pour une vanne à caractéristique linéaire : $S_v = K \frac{1}{C_v}$

Pour une vanne à égal pourcentage $(1 + S_v)^{100} = R$, c'est à dire S_v pour ce type est constante ce qui présente un avantage.

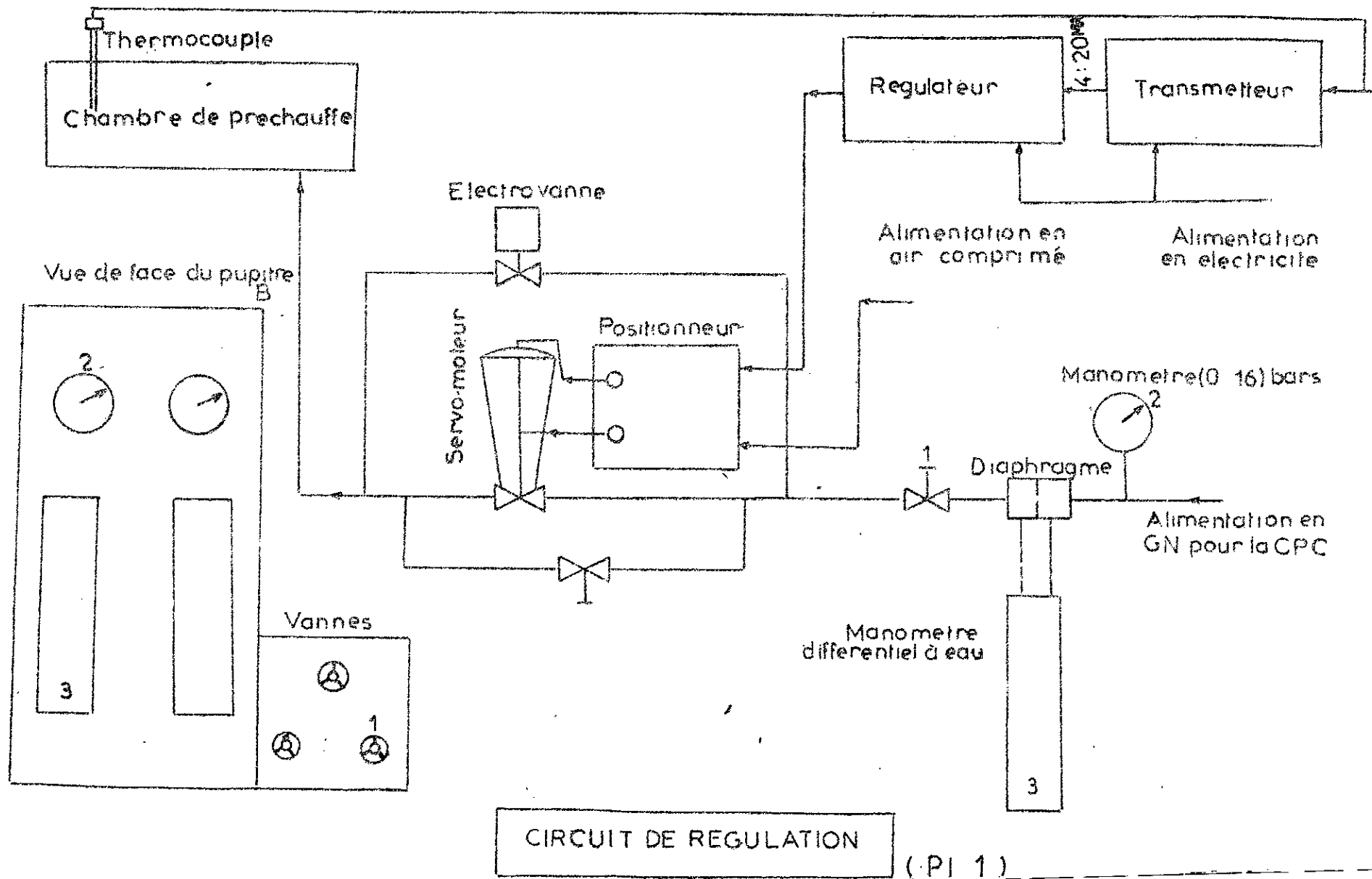
IV 14 Perte de charge dans la vanne

La perte de charge résiduelle d'une vanne détermine le débit maximal du système.

Si le rapport $\frac{\Delta P_{\text{vanne}}}{\Delta P_{\text{vanne}} + \Delta P_{\text{tuyauterie}}}$ est petit, la modification de la résistance

de la vanne n'a pas d'influence sur la perte de charge globale et sur le débit.

Pour rendre la vanne influente, on doit la choisir de telle sorte que pour l'ouverture complète, elle représente une perte de charge de même ordre que celle de la tuyauterie nue.



V ETUDE EXPERIMENTALE

Notre but porte essentiellement sur la détermination et l'étude des caractéristiques des éléments de la boucle.

En effet ceci nous conduit à utiliser chaque élément sur un montage particulier.

V1 Transmetteur

Ce convertisseur type BN transforme les tensions d'entrée d'amplitude faible (à partir 5mv) en courants normalisés.

la tension est fournie (dans notre cas) par un thermocouple ; A cet effet, l'amplificateur est équipé d'un système de compensation de la soudure froide et d'un linéariseur à deux segments de droite permettant de sortir un courant pratiquement proportionnel à la température à mesurer.

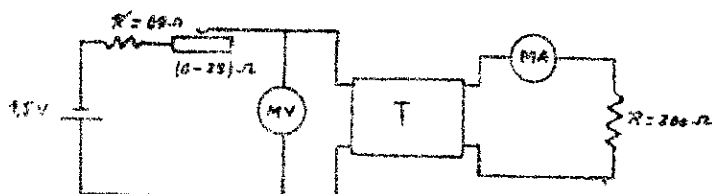
l'entrée est une fem de plage [0 50] mv et la sortie est un courant de plage [4 ÷ 20] mA.

V11 Performances (d'après la documentation)

- linéarité de l'amplificateur : Meilleure que 0,2%
- Temps de réponse à 1% : Environ 1 seconde.
- linéarisation : Par deux segments de droite avec point de cassure à 50% de l'échelle, prévue pour un thermocouple.
- Écart de non linéarité résiduel < 1% environ.
- Charge : 10 à 100% de charge max.
- Influence de variation de fréquence: Neant.
- Influence de variation de la température :
 - . derive du zero ramenée à l'entrée < 2 μ V/c
 - . derive du gain < $\pm 1\%$ entre 0 et 50 c
- Influence de variation de charge : < 0,1% entre 10 et 100% de charge max.
- Influence de variation de la tension d'alimentation :
 - $\pm 0,2\%$ pour 15%
 - $\pm 10\%$

V12 Manipulation

Dans le but de vérifier le fonctionnement du transmetteur ainsi que la détermination de ses caractéristiques, on se propose de le monter dans le circuit suivant :



la variation de la grandeur d'entrée par le rheostat donne une variation de la grandeur de sortie. En notant les indications des appareils de mesure pour chaque variation on obtient :

V [mV]	0,28	0,88	2,3	3,66	5,16	6,82	8,33	9,98	11,66	13,10	14,82	16,33	18,20	19,64	21,30	22,99
I [mA]	4,6	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

V13 Graphe de $I=f(v)$: (voir Pl2)

V14 Interpretation :

la caractéristique $I=f(v)$ est une droite, donc la variation est linéaire.

V2 Régulateur

Il permet de régler la température à la sortie de la chambre de précombustion par l'intermédiaire du débit du gaz naturel.

Ce régulateur peut fonctionner de deux façons soit automatiquement, soit manuellement en agissant sur le positionneur par un bouton, dont le but, en comparant un signal variable de mesure avec une valeur de consigne, commander un organe de réglage à entrée électrique par une action proportionnelle et intégrale (P.I) et comporte :

- Un cadran (0-100) pour les valeurs prescrites réglables à l'aide d'un bouton
- Un cadran pour les valeurs mesurées (m), (0-100)
- Un cadran pour les valeurs de la différence (erreur) $e = c - m$.
- Un cadran pour mesurer directement le signal de sortie.

V21 Principe de fonctionnement

- Amplificateur à modulateur d'entrée
- Elaboration des actions dans le circuit de contre-réaction.

V22 Caractéristiques

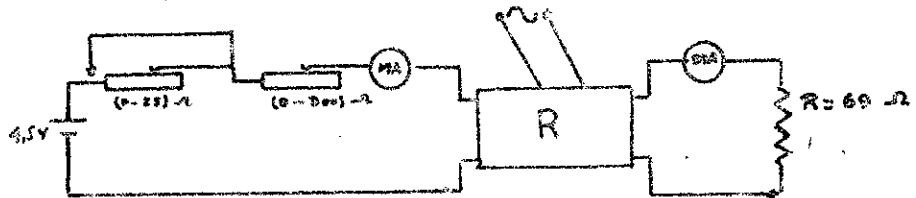
Entrée : (4 - 20) mA , la résistance d'entrée 250 Ω , alimentation incorporée 48V
 Sortie : (4 - 20) mA dans une résistance de charge (0 - 1200) Ω .

V23 Performances

Action proportionnelle : 2 - 500% en 12 positions
 Action intégrale : 0,25 - 30 mn en 2 gammes de 12 positions
 linéarité : 0,5 %
 Hysteresis : 0,2 %
 Sensibilité : 0,1 %
 Bande proportionnelle cohérente : 0,3 %
 ondulation résiduelle : 3 %
 Température de fonctionnement : (0 - 50) °C

V24 Manipulation

le montage correspondant à la vérification de fonctionnement et à la détermination des caractéristiques du régulateur peut être figuré sous la forme ci-dessous



Deux rhéostats montés en série dont l'un a pour rôle de viser la grandeur de l'échelon et l'autre pour régler la plage de fonctionnement de régulateur.

La vérification de fonctionnement de régulateur à action proportionnelle seule ne peut être réalisée car le temps d'intégration reste petit.

C'est à dire on ne peut déterminer que les caractéristiques du régulateur à action proportionnelle et intégrale (P+I).

En appliquant à l'entrée un échelon par un court circuit du rheostat (25-2), on note les valeurs indiquées par le milliamperemètre placé à la sortie du régulateur, en fonction du temps.

la même manipulation est répétée pour des différents temps d'intégration et différentes bandes proportionnelles.

V25 Graphes

les graphes de la grandeur de sortie en fonction du temps pour des différents temps d'intégration et différentes bandes proportionnelles sont représentés sur les planches ci-après.

BP 5% — $T_i = 0,5 \text{ mn}$ (PL 3)

— $T_i = 1 \text{ mn}$ (PL 4)

— $T_i = 2 \text{ mn}$ (PL 5)

BP 10% — $T_i = 0,5 \text{ mn}$ (PL 6)

— $T_i = 1 \text{ mn}$ (PL 7)

— $T_i = 2 \text{ mn}$ (PL 8)

BP 20% — $T_i = 0,5 \text{ mn}$ (PL 9)

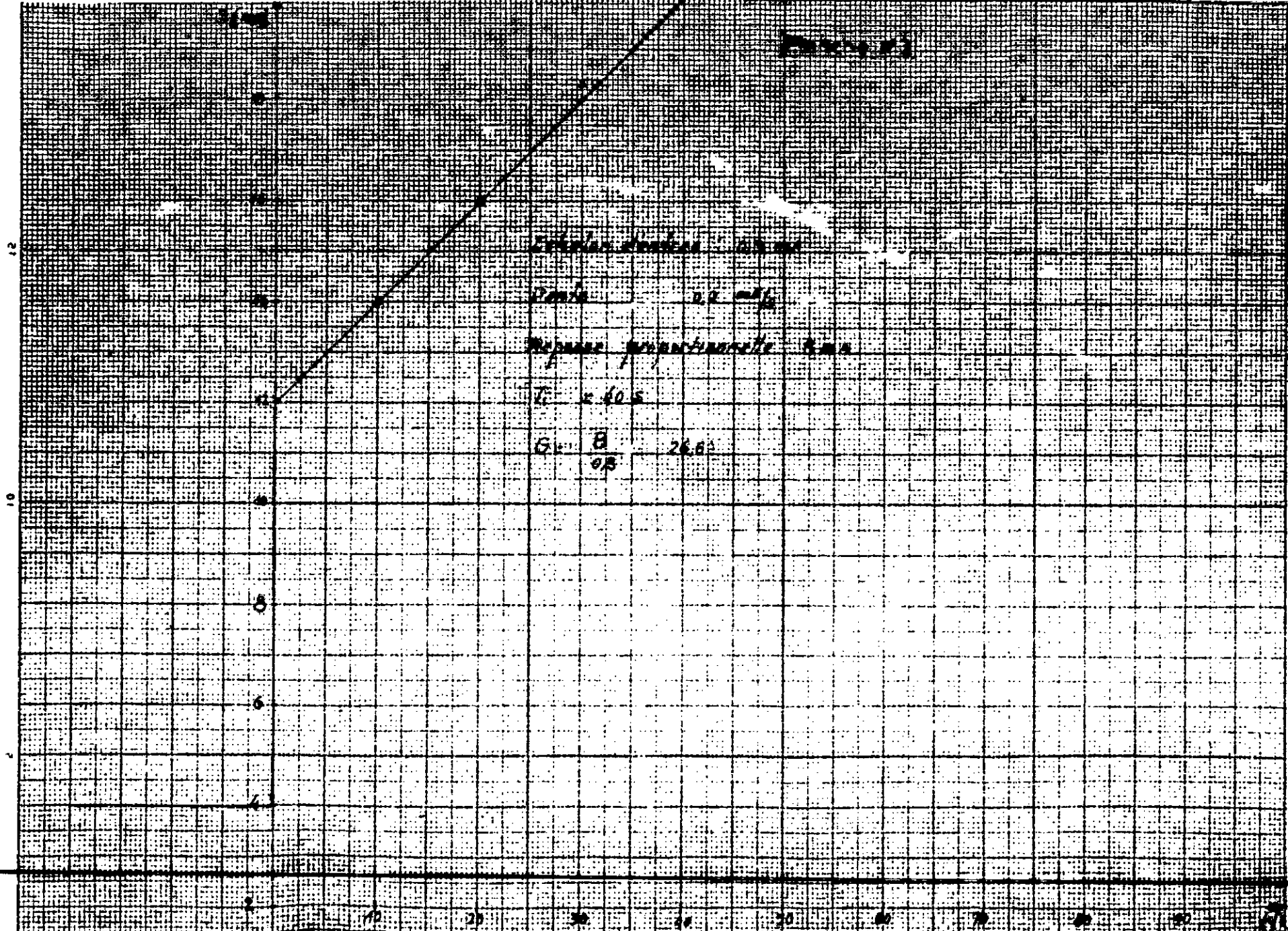
— $T_i = 1 \text{ mn}$ (PL 10)

— $T_i = 2 \text{ mn}$ (PL 11)

V26 Interpretation

les graphes trouvés expérimentalement sont pratiquement les mêmes que ceux de la théorie, ce qui prouve que l'action du régulateur est (P+I).

les temps d'intégration déterminés graphiquement sont très proches de ceux affichés ce qui montre la bonne graduation de l'affichage.



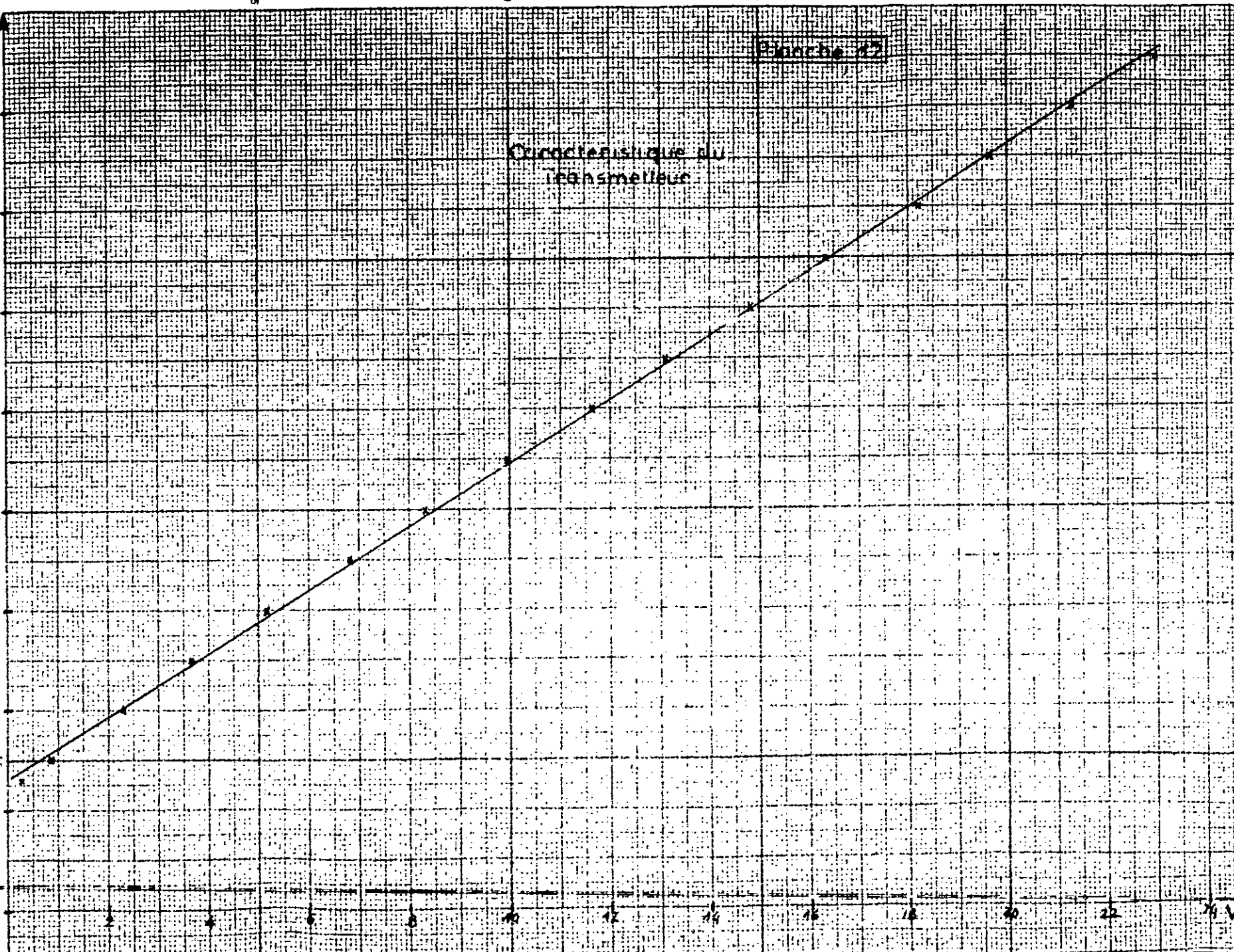
$I [mA]$

Planche 42

Caractéristique du
transmetteur

18
16
14
12
10
8
6
4
2

24 V



Explosion $T_{exp} = 0.5 \text{ ms}$

Dens. 0.12 mg/L

Reponse proportionnelle 7.8 ms

$\gamma = 72.5$

$$G = \frac{7.8}{0.5} = 28$$

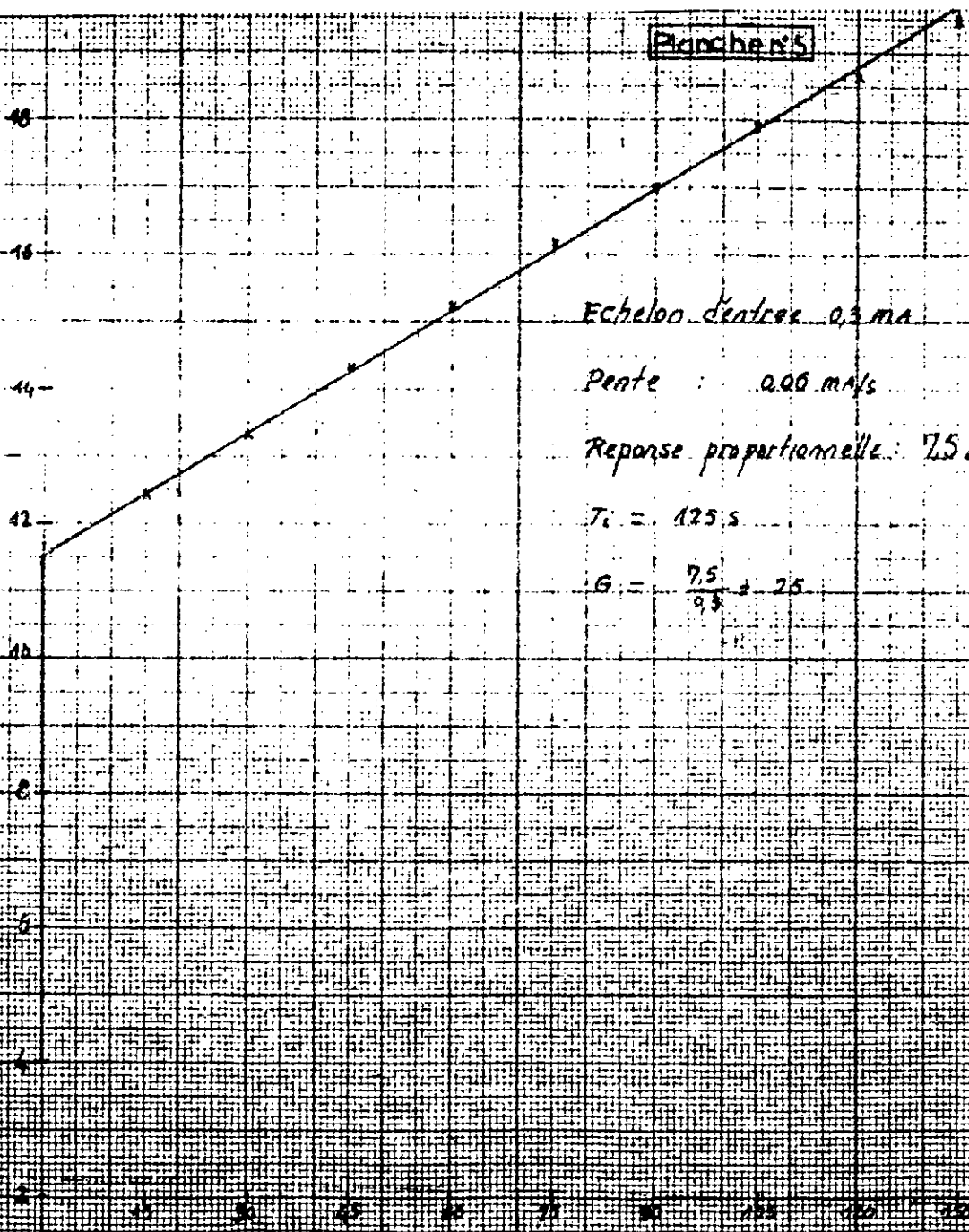
1.2

1.0

0.8

10 20 30 40 50 60 70 80 90

Planche n°5



Echelon d'entree 0,3 mA

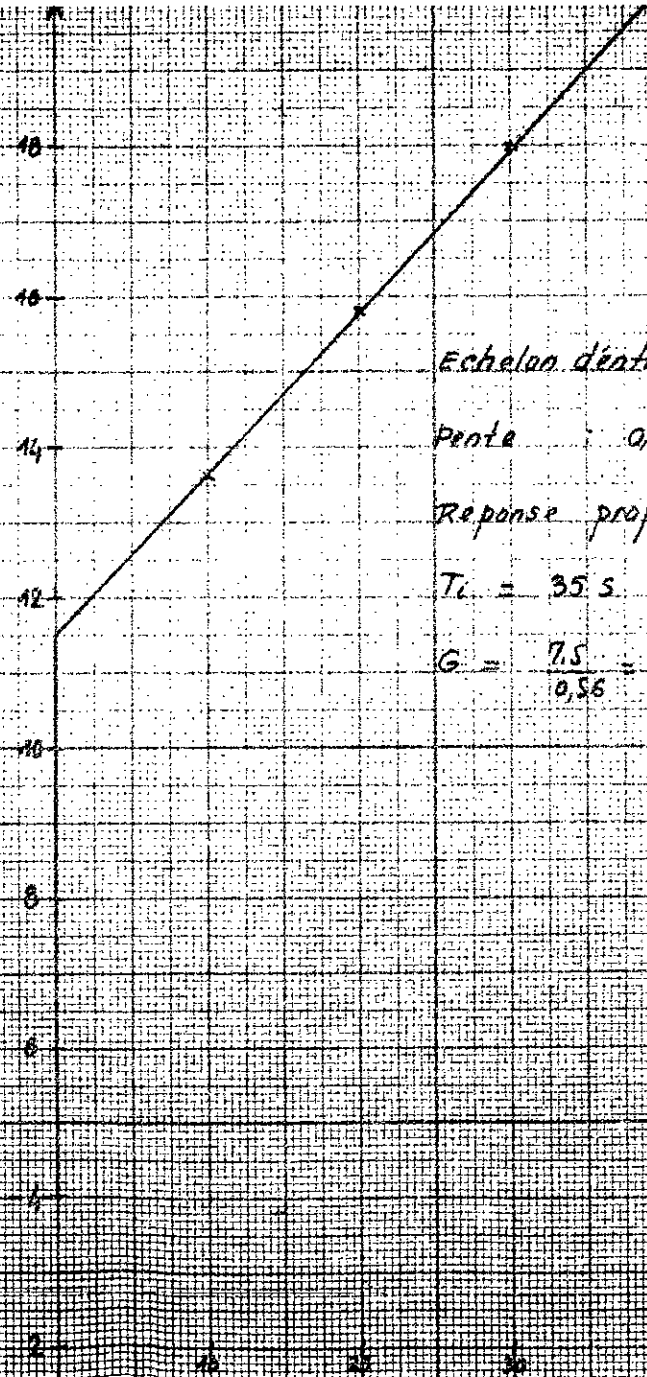
Pente : 0,08 mA/s

Reponse proportionnelle : 7,5 mA

$T_i = 125 \text{ s}$

$$G = \frac{7,5}{0,3} = 25$$

Planche n°6



Echelon d'entree : 0,56 mA

Pente : 0,22 mA/s

Reponse proportionnelle : 7,5 mA

$T_i = 35 \text{ s}$

$$G = \frac{7,5}{0,56} = 13,3$$

$S[ma]$

Plancher 7

18

16

14

12

10

8

6

4

2

Echelon d'entrée : 0,56 mA

Pente : 0,1 mA/s

Reponse proportionnelle : 7 mA

$T_i = 70,5$

$G = \frac{7}{0,56} = 12,5$

S [mA]

Planche 18

18

16

14

12

10

8

6

4

2

Echelon d'entrée : 0,56 mA

Pente : 0,255 mA/s

Reponse proportionnelle : 7 ms

$T_c = 124 \mu s$

$\alpha = \frac{7}{0,076} = 92,1$

10

0,1

2

2

5

10

20

50

100

200

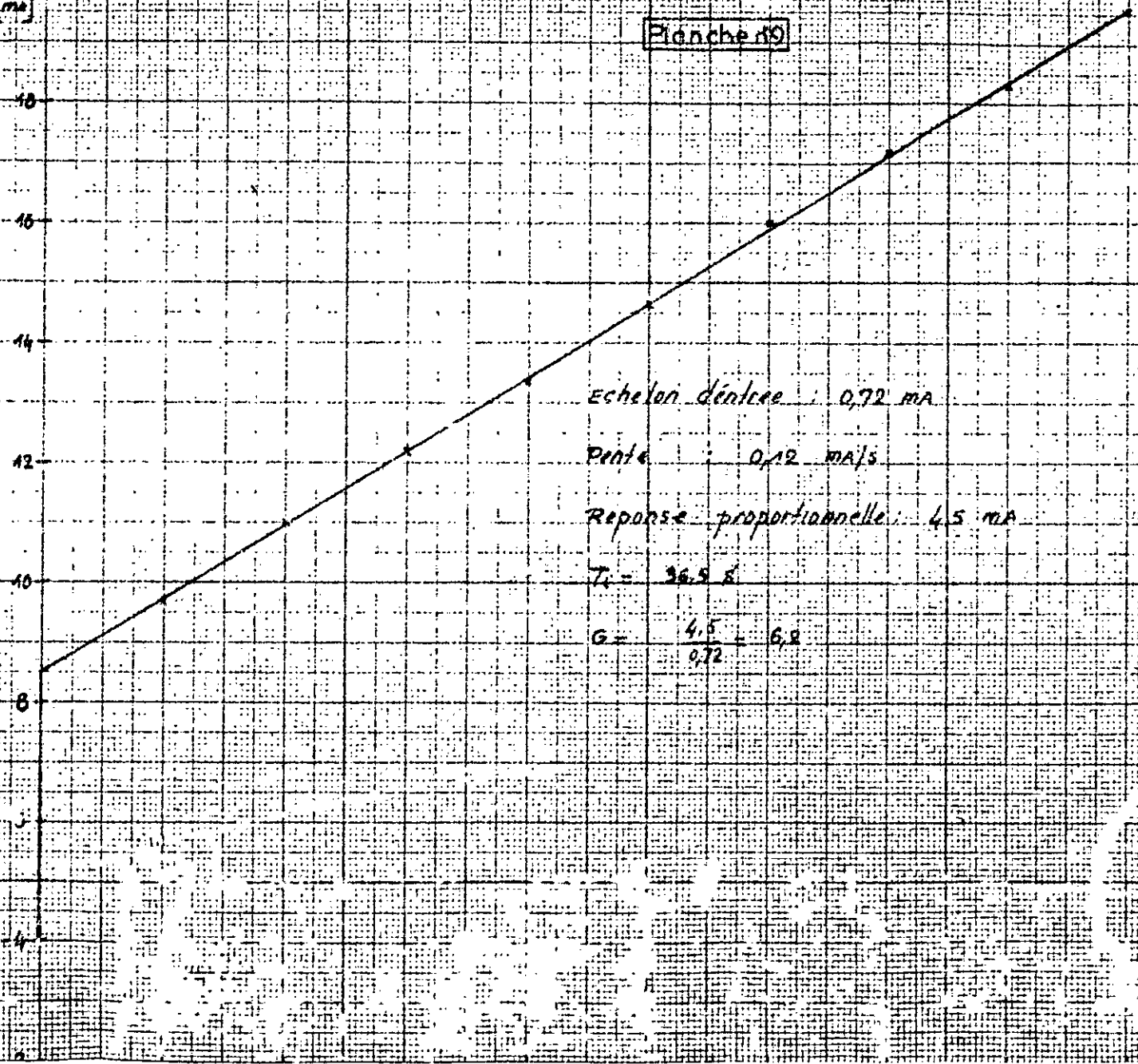
500

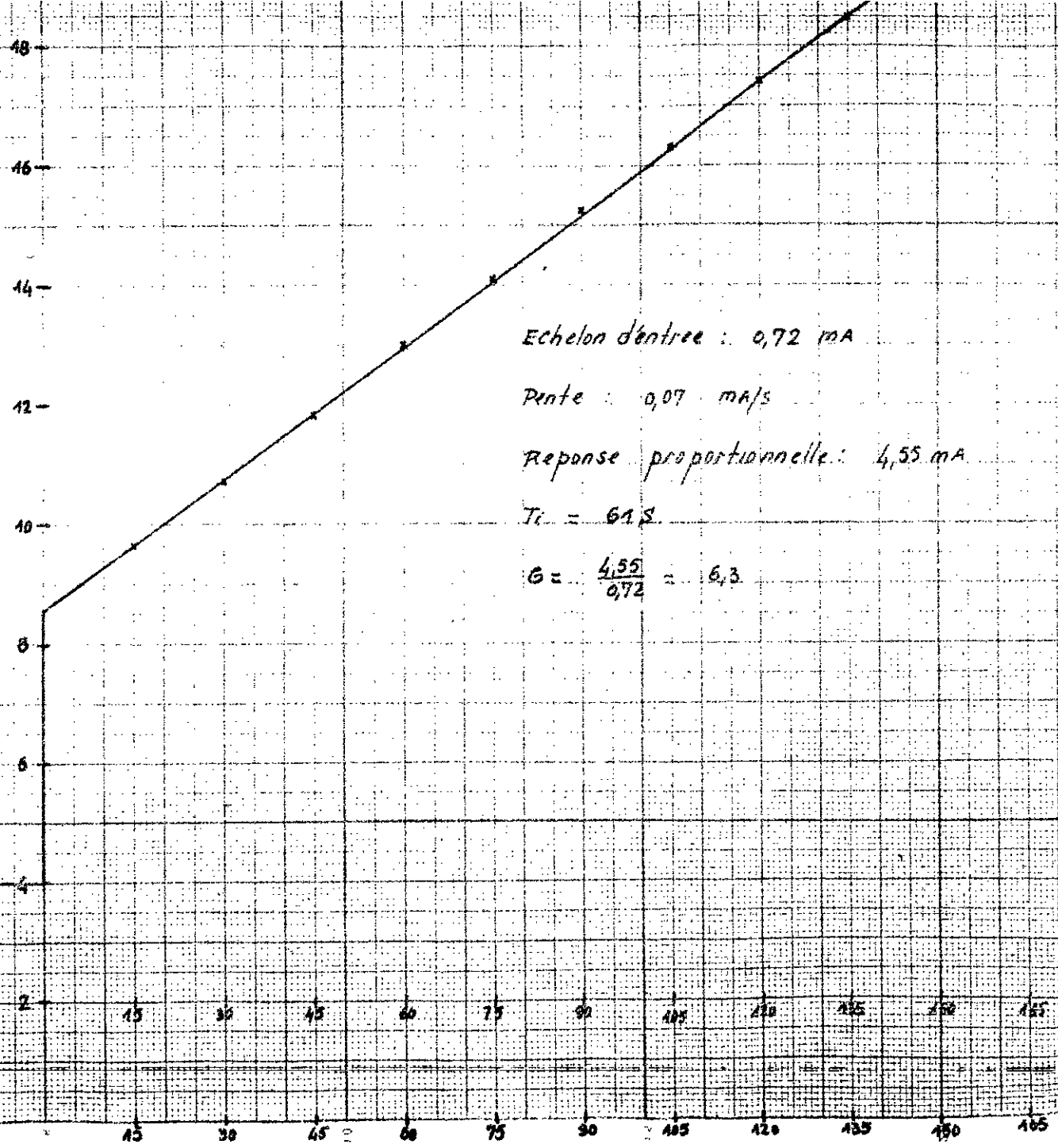
S[ms]

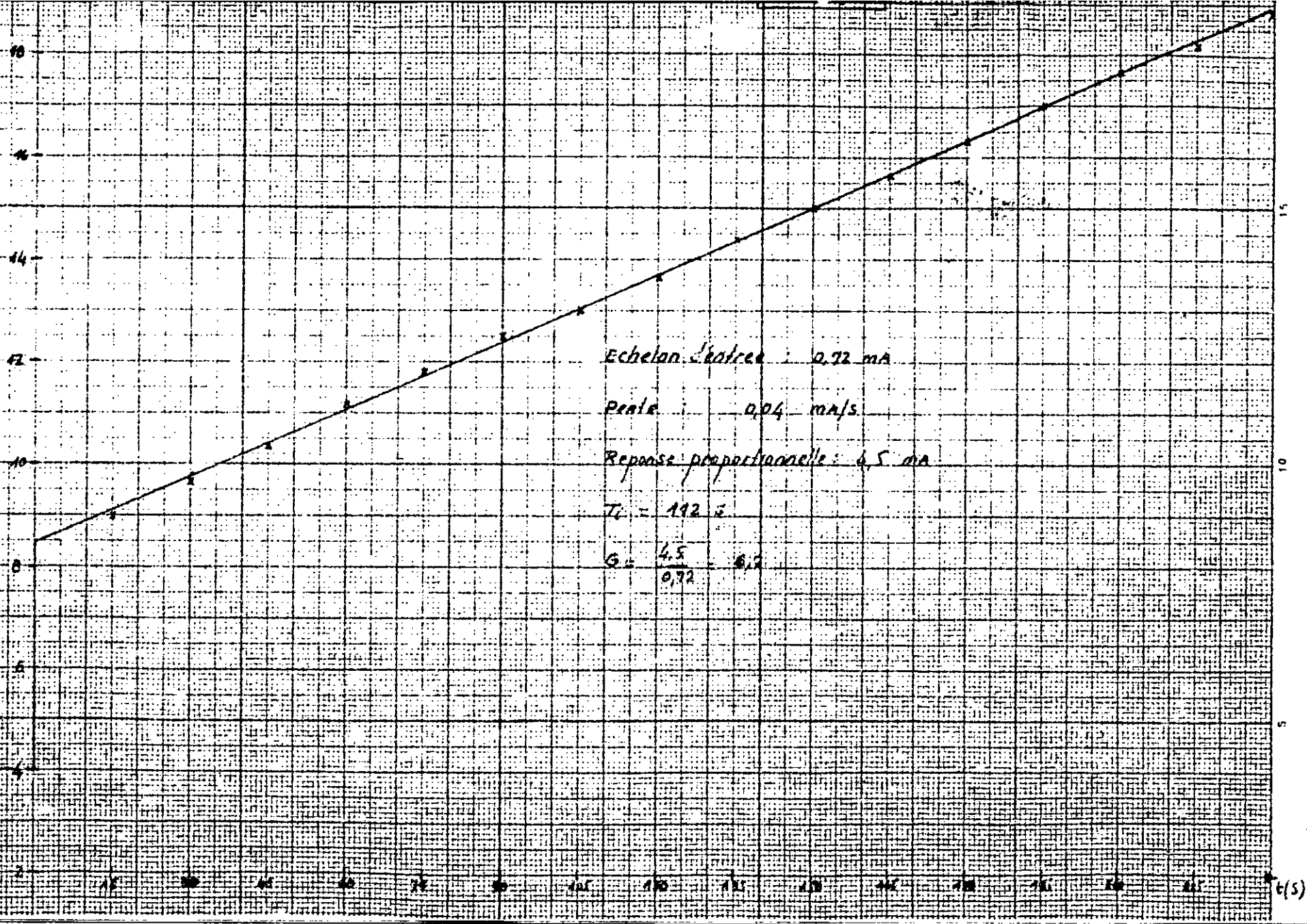
Planché 19

18
16
14
12
10
8
6
4

Echelon dentée : 0,72 mA
Pente : 0,12 mA/s
Reponse proportionnelle : 4,5 mA
 $T_i = 36,5 \text{ s}$
 $G = \frac{4,5}{0,72} = 6,2$







V3 Positionneur

Quand on emploie des systèmes de régulation électriques avec un servomoteur pneumatique il est nécessaire d'utiliser un positionneur. si l'on dispose d'une alimentation d'air compressible un positionneur peut délivrer une très grande puissance de sortie et peut être directement commandé par un signal électrique de sortie du régulateur. le positionneur électropneumatique a pour but d'assurer au étage d'une vanne de réglage à servomoteur pneumatique à membrane, une position requise correspondant à un signal électrique de faible intensité continue issu d'un régulateur électronique ou d'un poste de commande à distance.

son relais-pilote sans fuite, à gain élevé et débit ajustable, permet une utilisation optimum de la vanne de réglage.

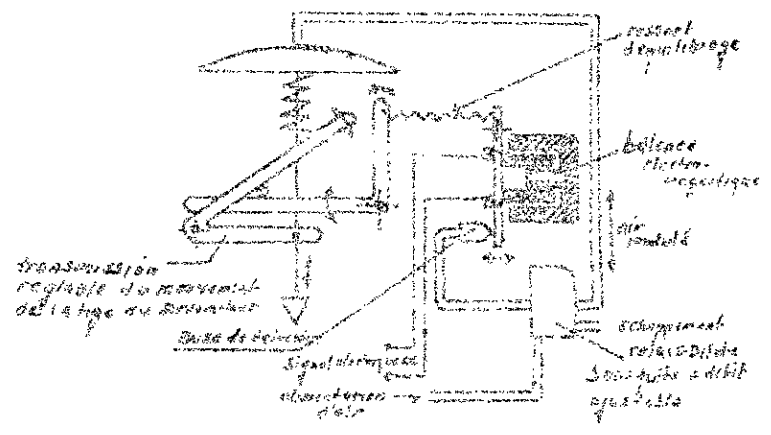
V31 Principe de fonctionnement

le système busa-palette détecte l'équilibre entre deux couples:

— Celui produit par une balance électromagnétique soumise à un signal électrique en courant continu donné.

— Celui produit par la tension d'un ressort proportionnelle à la course du étage de la vanne.

Tout déséquilibre détecté est amplifié par le relais-pilote qui provoque la réaction du servomoteur dans le sens voulu pour annuler ce déséquilibre.



V32 Caracteristiques

- Echelle électrique : (4-20) mA
- Echelle de course : le réglage mécanique des leviers permet d'ajuster le positionneur aux Vannes de réglage ayant des courses de clapet de (12 à 100) mm.

V33 Performances

- Fidélité : 0,3%
- Sensibilité : 0,2%
- Hystérésis : 0,7%
- Linearité

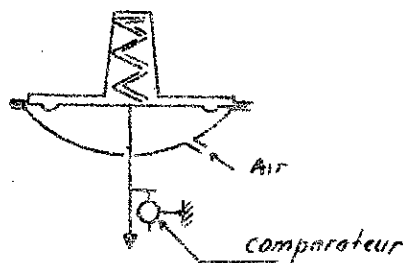
V34 Manipulation

le but de cet essai :

- Tracer la caractéristique course en fonction du signal électrique
- Tracer la caractéristique course en fonction de la pression de sortie de positionneur.

le positionneur est alimenté en air comprimé par le compresseur ; la pression d'alimentation doit être maintenue à 4,4 kg/cm² par un manodétendeur. la pression à la sortie de positionneur est donnée par un manomètre placé à la sortie de ce dernier.

le déplacement du clapet est mesuré à l'aide d'un comparateur.

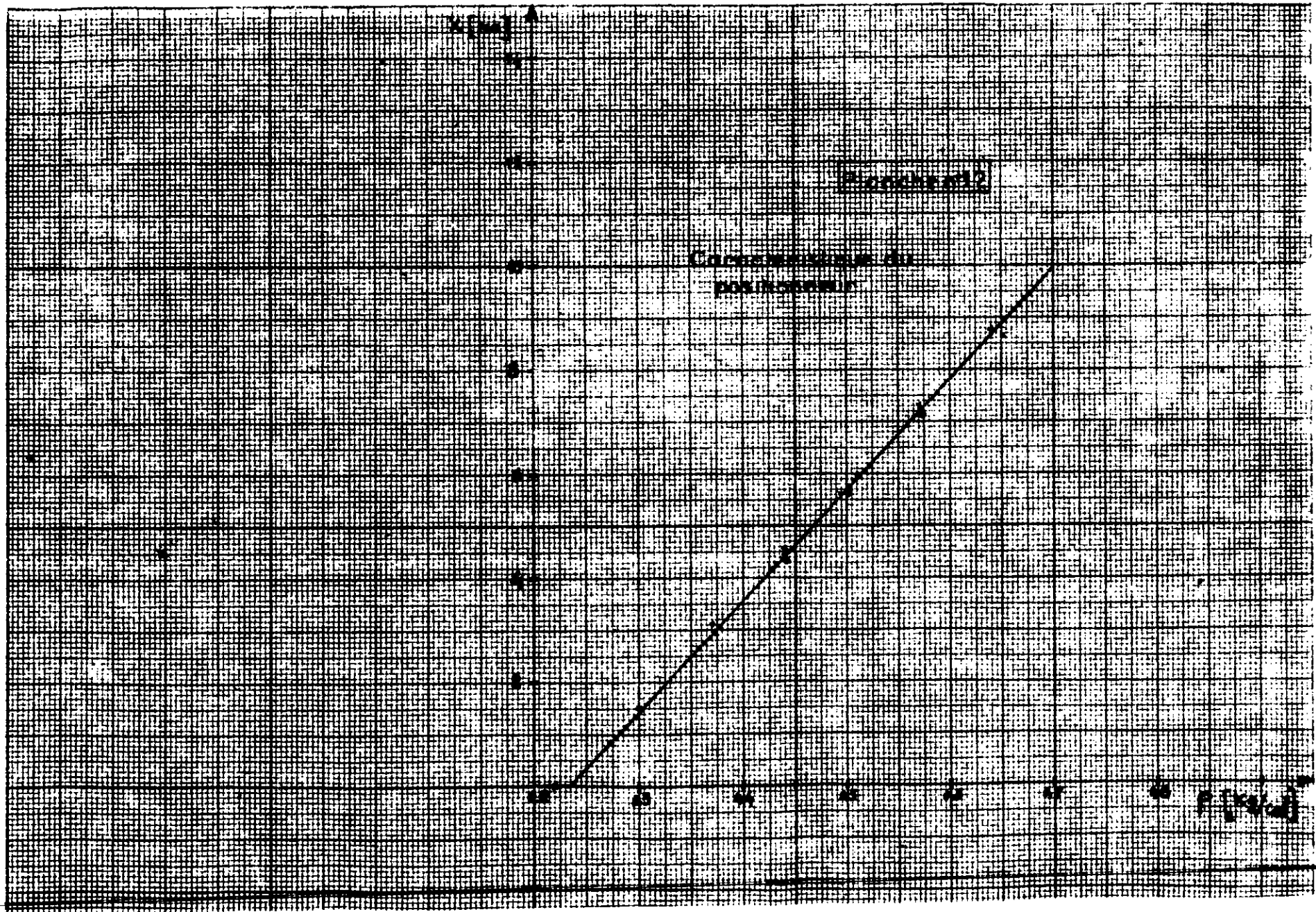


lors de la mesure, on a effectué un aller-retour dans la variation de l'affichage c'est à dire de 0% ---- 100% ---- 0% pour distinguer l'effet de l'hystérésis.

V35 Graphes

$$x = f(\text{signal électrique}) \quad (\text{PL 13})$$

$$x = f(p) \quad (\text{PL 14})$$



$x(\text{mm})$

44

12

10

8

5

4

2

0

Caractéristique du
positionneur

Plancher 13

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

V36 Interpretation

Chacune des deux caractéristiques est une droite donc la variation est linéaire.

L'effet d'hystérésis est pratiquement négligeable vu que les valeurs (Aller) et (Retour) de la course pour un même signal électrique sont très proches.

V37 Elimination de l'instabilité de la boucle intérieure

Pendant l'essai et pour une position donnée de la course, on a constaté que la tige se met à vibrer ce qui montre l'instabilité du système.

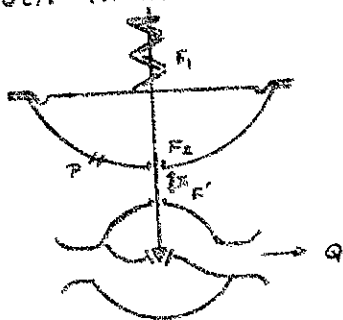
Vu que la grandeur de sortie du régulateur reste constante (pour une position donnée) ce qui implique que l'instabilité du système provient de la boucle intérieure.

Cette instabilité peut être due à plusieurs facteurs:

V37a Frottement

Le frottement mécanique peut créer un retard (hysteresis) qui peut être la cause de l'instabilité du système.

la boucle intérieure sera donc :



$$F_1 = kx$$

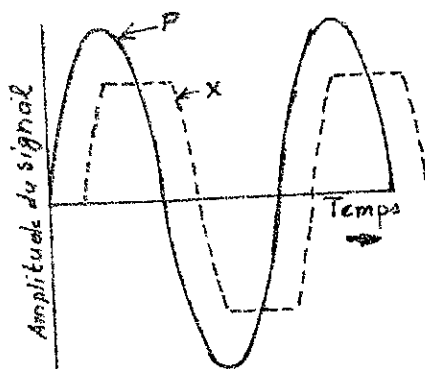
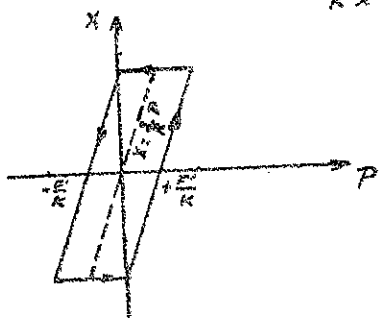
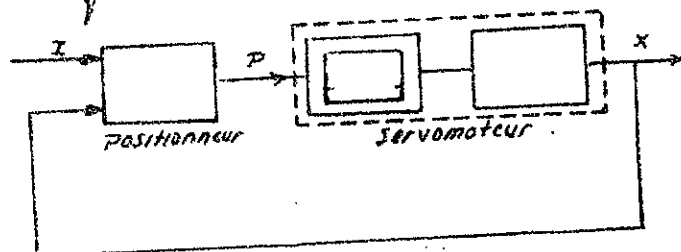
$$F_2 = Ps$$

F' : Frottement

A l'équilibre on a :

$$F_1 \pm F' = F_2$$

$$kx \mp F' = Ps \Rightarrow x = \frac{s}{k} P \pm \frac{F'}{k}$$



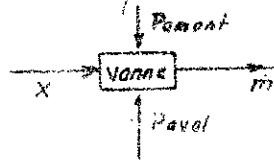
$$\theta = \text{Arc sin } \frac{P-X}{P}$$

V4 La vanne de réglage

la vanne sert à régler le débit.

Le débit est fonction de la position du clapet de la vanne mais aussi des pressions amont et aval de la vanne.

Ces pressions sont aussi fonctions de débit et de résistances hydrauliques de conduites.



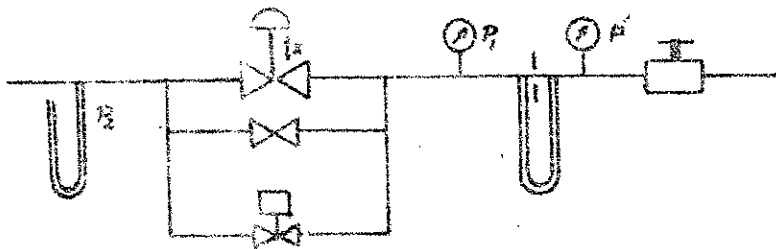
V41 Manipulation

le but de cet essai :

- Détermination du gain statique

Pour faire la caractéristique pure de la vanne, on a fait la première expérience à l'air libre (vanne est débouchée à l'atmosphère à travers une courte conduite), en maintenant la pression amont constante pour éliminer son influence sur le débit.

la pression aval de la vanne est différente de la pression atmosphérique à cause du prolongement de la tuyauterie. Ses valeurs sont données par un tube en U.



Pendant l'essai les vannes en dérivation sont fermées.

Pour chaque point on ajuste l'affichage de détendeur de façon à avoir la pression P_1 constante égale à 1,2 bar.

la mesure de débit est assurée par un appareil existant dans l'installation d'alimentation en gaz (diaphragme). la différence des pressions amont et aval de cet orifice est donnée par un tube en U.

Pour déterminer le débit du gaz, on doit connaître la valeur de la masse volumique (ρ) qui peut être déterminée à partir de la température et la pression du gaz données par un thermomètre.

et un manometre (P) installés juste en amont de l'orifice.

Le debit se calcule à partir de la formule :

$$m = 0,175 \sqrt{\Delta h \rho_{GN}} \quad \text{g/s} \quad \begin{array}{l} \Delta h: (\text{mm}) \\ \rho_{GN}: \text{kg/m}^3 \end{array}$$

la masse volumique du gaz (ρ_{GN}) est donnée par la relation :

$$\frac{P}{\rho_{GN}} = rT$$

P: Pascal

r: $\frac{\text{m}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

T: K

ρ_{GN} : kg/m^3

V42 Graphes et leurs interprétations

la premiere Caracteristique :

$$m = f(x) \quad \text{Debit en fonction du deplacement} \quad (\text{Pl 14})$$

- La partie Centrale est lineaire

- Le debut de l'ouverture se caracterise par l'irregularité de la vanne.

- Lorsqu'on se rapproche de l'ouverture complete de la vanne, on observe la diminution de la pente. C'est à dire la diminution du gain statique qui peut etre due à la resistance de la portion de tuyauterie.

la deuxieme Caracteristique : (Pl 15)

$P_2 = f(m)$; elle represente la perte de charge de la conduite en fonction de debit, dont l'allure est parabolique. La chute de pression est bien inferieure à celle au niveau de la vanne.

la troisieme Caracteristique : (Pl 16)

$C_v = f(x)$; le coefficient de debit en fonction de deplacement, il caracterise la vanne même.

Les memes observations que celles du debit en fonction de deplacement, ce qui veut dire que la perte creee par la conduite en aval est faible.

le C_v est donné par la formule :

$$C_v = \frac{Q_v}{290} \sqrt{\frac{d T}{\Delta P (P_1 + P_2)}}$$

Q_v : Nm^3/h

d : densite du gaz rapporté à l'air

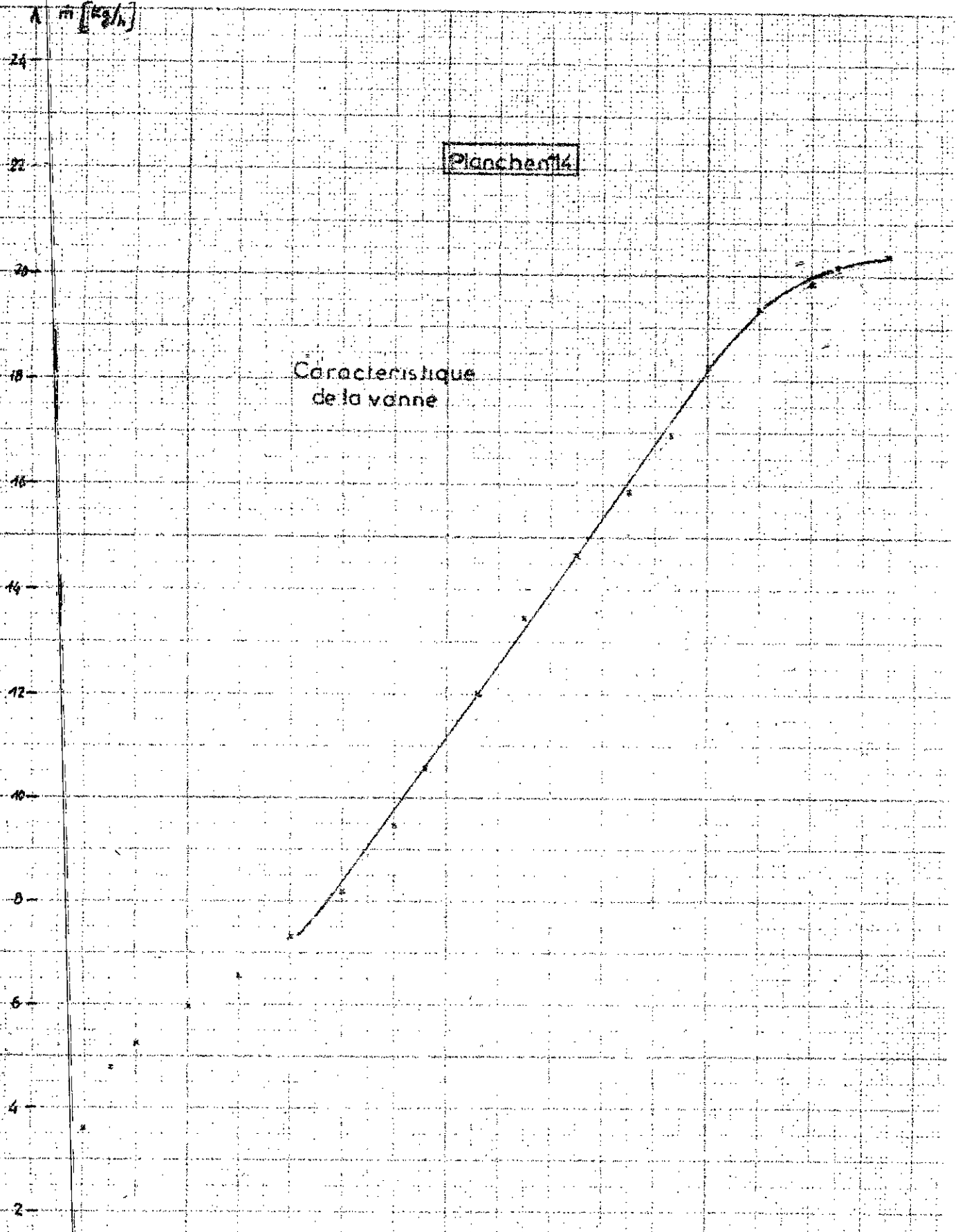
T : (K)

ΔP : Perte de charge que l'on se fixe au debit

P_1, P_2 : Pression avant et aval absolue (bar)

Plancher 14

Caractéristique
de la vanne



P_2 [bar]

Plaque n°15

Caractéristique
de la vanne

0

2

4

6

8

10

12

14

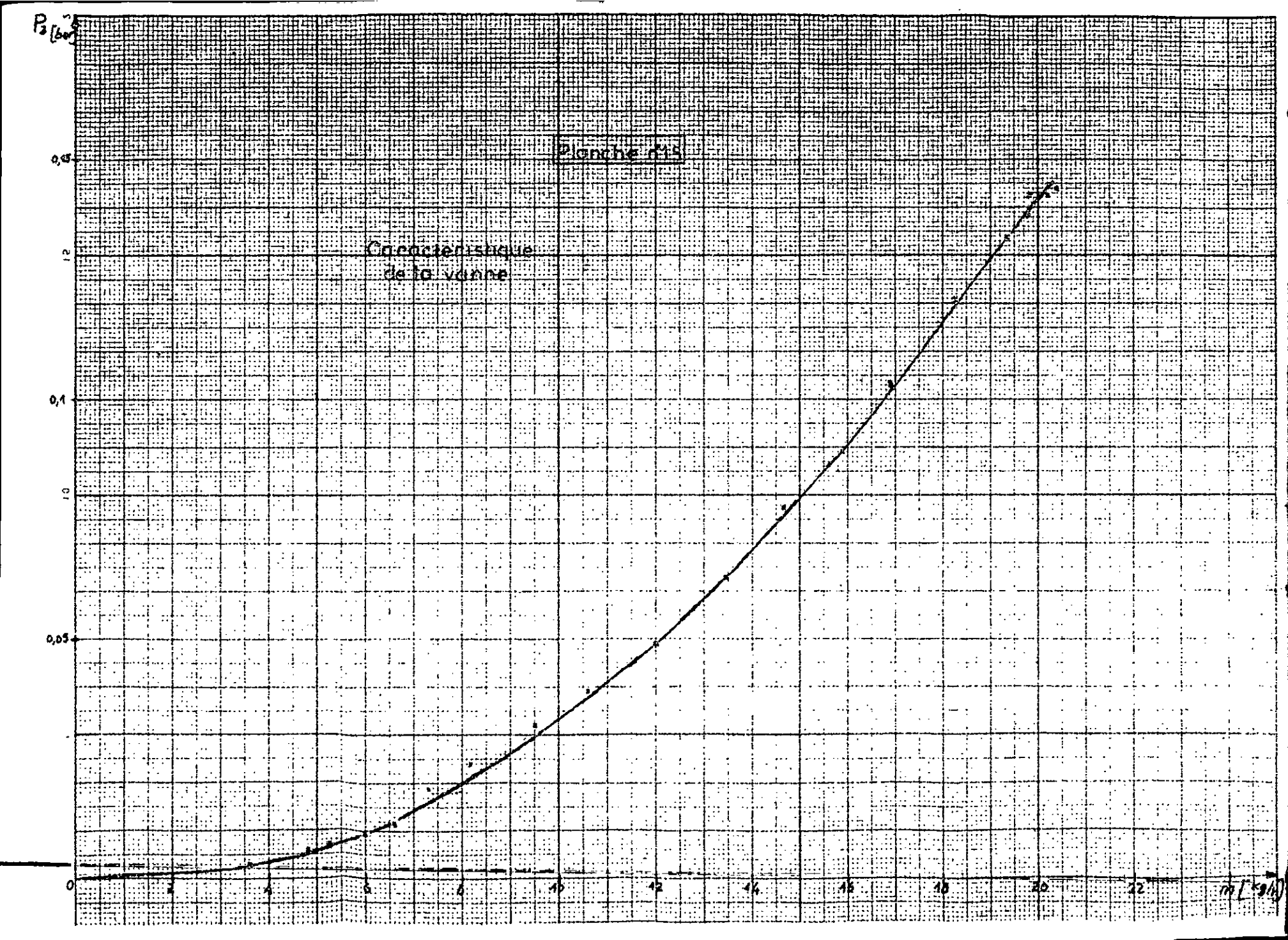
16

18

20

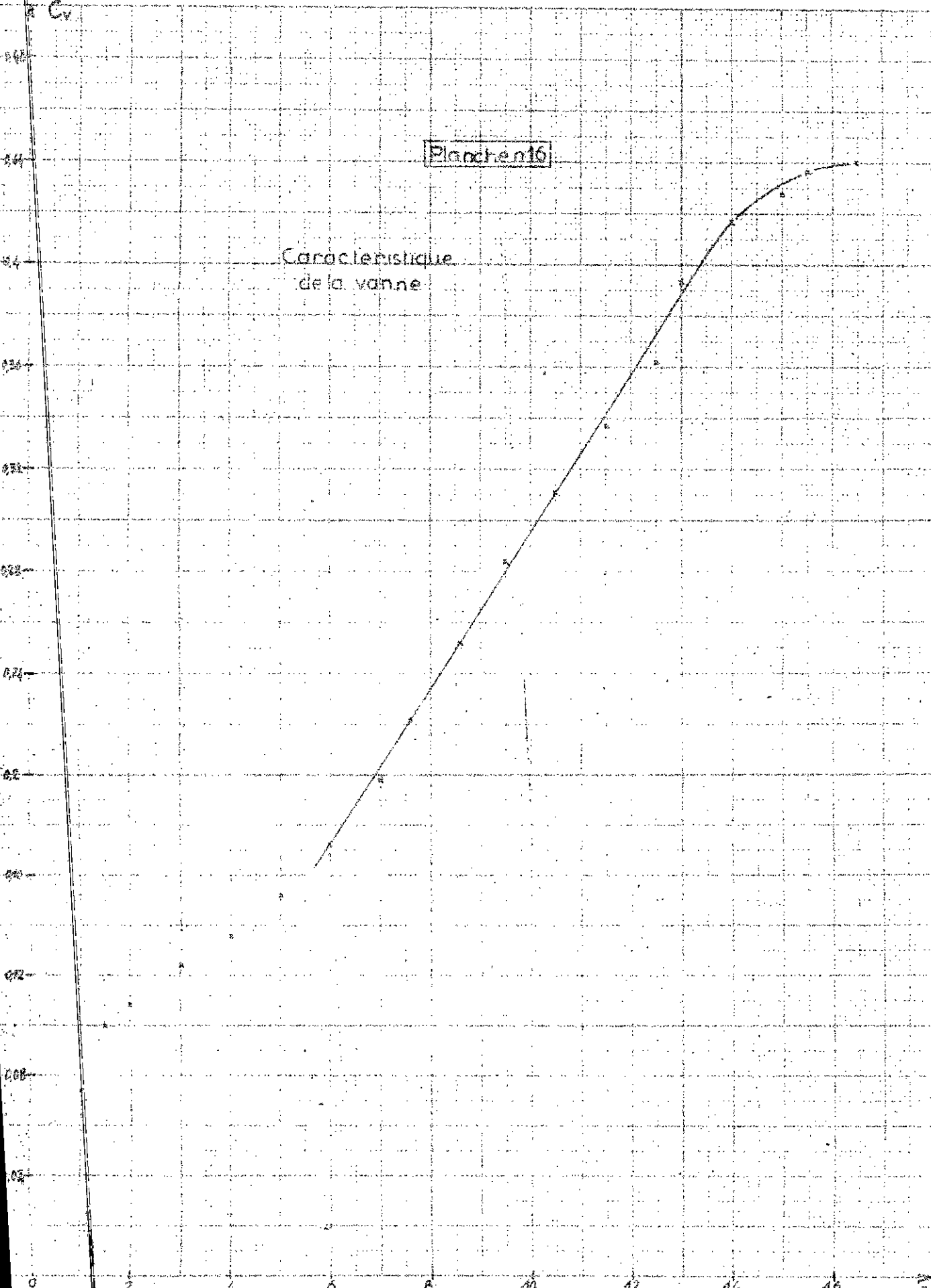
22

m [g/h]



Planché n°16

Caractéristique
de la vanne



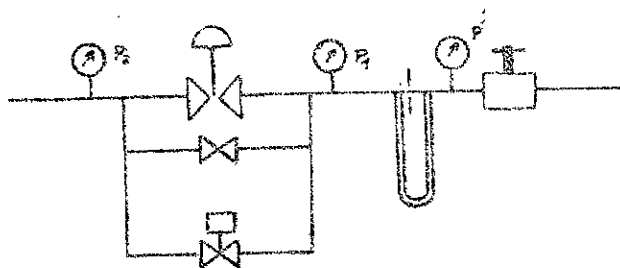
V5 Vanne en serie avec resistance

Le but de cette experience est d'obtenir une caracteristique de reglage reel lorsque la vanne est placee dans l'installation.

V51 Manipulation

L'affichage de detendeur se maintient constant; La variation de la pression (P_1) en amont de la vanne pour des ouvertures differentes de celle-ci, est due aux pertes des charges.

la manipulation se fait sur le même montage que precedemment à l'exception de tube en U qui est remplacé par un manometre.



Dans cette manipulation on determine une seule caracteristique, celle de debit en fonction de deplacement de clapet necessaire pour determiner le gain statique de l'organe de reglage qui entre dans la boucle fermée de systeme asservis (voir PL 17)

V52 Interpretation

Comparons les caracteristiques de la presente manipulation avec celles des precedentes; on observe une influence preponderante dans l'allure de la courbe due au branchement en serie d'une grande resistance hydraulique.

la pente de la caracteristique importante pour les petites ouvertures devient de plus en plus faible au fur et à mesure de leurs augmentations.

Ceci prouve que cet element de la boucle du systeme est devenu non lineaire; son gain statique diminue pour les grandes charges. Pour la verification: on a calculé pour des conditions nouvelles de la caracteristique C_v de la vanne. (PL 18)

La figure (19) présente les pertes de charge dues au tuyauterie et au brûleur se trouvant en aval de la vanne.

La courbe pratiquement a la même forme que celle de la figure (15) mais les valeurs des pertes sont beaucoup plus grande.

V53 Tableau des mesures

Condition d'essai

$$P = 752,8 \text{ mm Hg}$$

$$T = 19^\circ\text{C}$$

\Rightarrow

$$P = 100365,07 \text{ pascal}$$

$$T = 292 \text{ K}$$

$$\rho_{\text{GN}} = \frac{P}{rT} = \frac{100365,07}{440 \cdot 292} = 0,78117 \text{ kg/m}^3$$

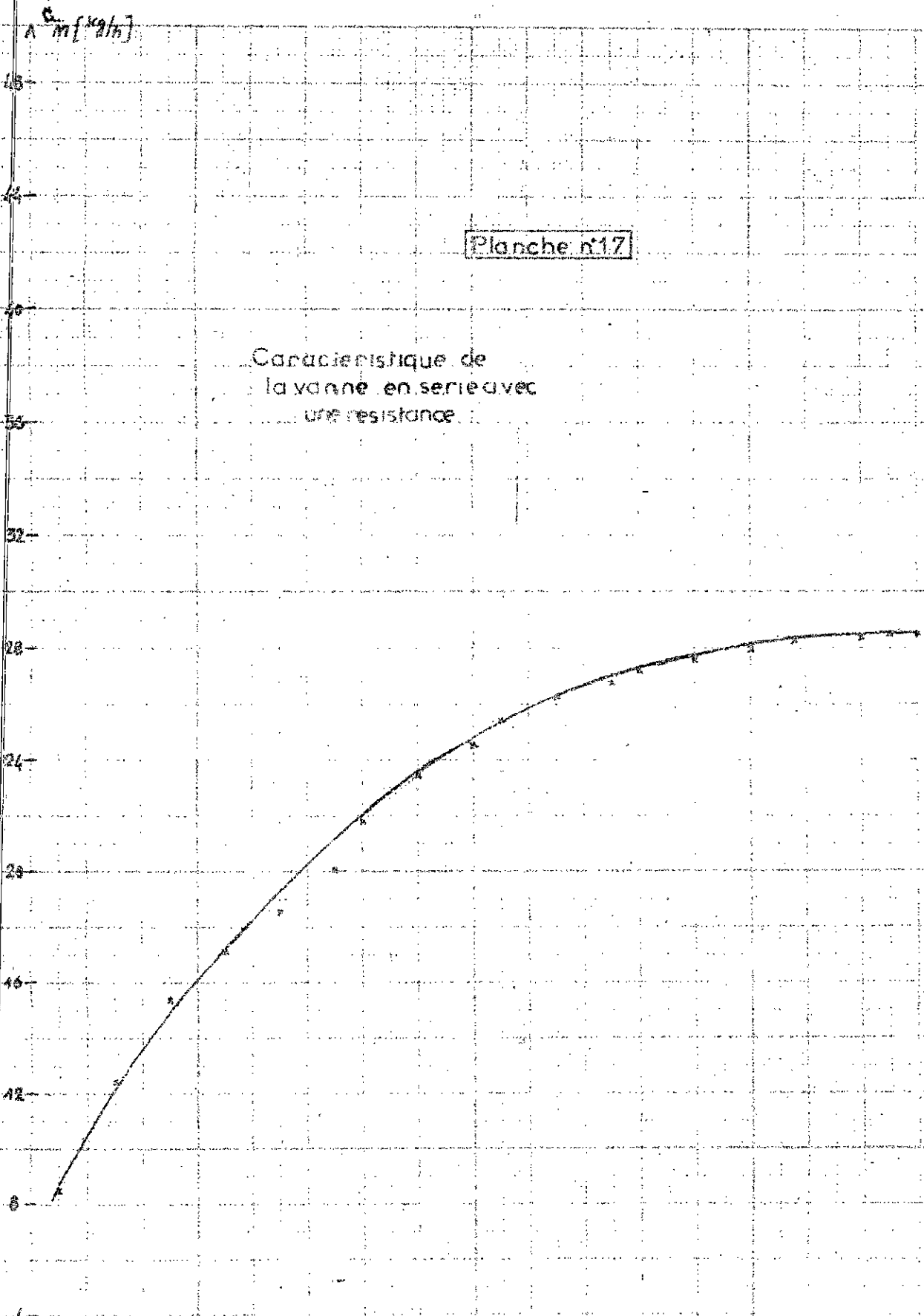
$$\rho_{\text{air}} = 1,19761 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{la densité } d = 0,65227$$

X (mm)	Δh (mm)	P' (bar)	P_1 (bar)	P_2 (bar)	Q ($N\ m^3/h$)	S_{GW} (Kg/m^3)	m (Kg/h)	C_v
0,5	55	5,65	5,72	0,45	4,2499	5,14479	8,5008	0,030
1,5	120	5,50	5,55	1,18	6,2332	5,07762	12,4142	0,048
2,5	185	5,48	5,47	1,63	7,7394	5,07762	15,4139	0,062
3,5	230	5,45	5,37	1,96	8,6295	5,06499	17,1602	0,072
4,5	270	5,40	5,32	2,22	9,3499	5,03856	18,5495	0,084
5,5	320	5,35	5,22	2,48	10,1288	5,09950	20,1157	0,093
6	380	5,30	5,18	2,78	11,0924	4,96044	21,8348	0,107
7	444	5,20	5,09	3,08	11,9899	4,92138	23,5089	0,126
8	492	5,18	5,00	3,28	12,6214	4,84327	24,5499	0,142
8,5	530	5,15	4,94	3,48	13,0994	4,82764	25,4392	0,157
9,5	567	5,12	4,89	3,56	13,5493	4,80424	26,2483	0,172
10,5	595	5,10	4,84	3,67	13,8798	4,78077	26,8229	0,188
11	617	5,10	4,83	3,75	14,1340	4,76575	27,2696	0,198
12	632	5,10	4,80	3,82	14,3048	4,76515	27,5999	0,209
13	654	5,09	4,78	3,89	14,5517	4,76515	28,0754	0,224
13,8	666	5,08	4,75	3,93	14,6846	4,75734	28,3085	0,236
15	672	5,08	4,75	3,96	14,7506	4,74952	28,4124	0,244
15,5	678	5,05	4,73	3,97	14,8163	4,74952	28,5389	0,247
16	680	5,05	4,73	3,98	14,8384	4,72609	28,5904	0,249

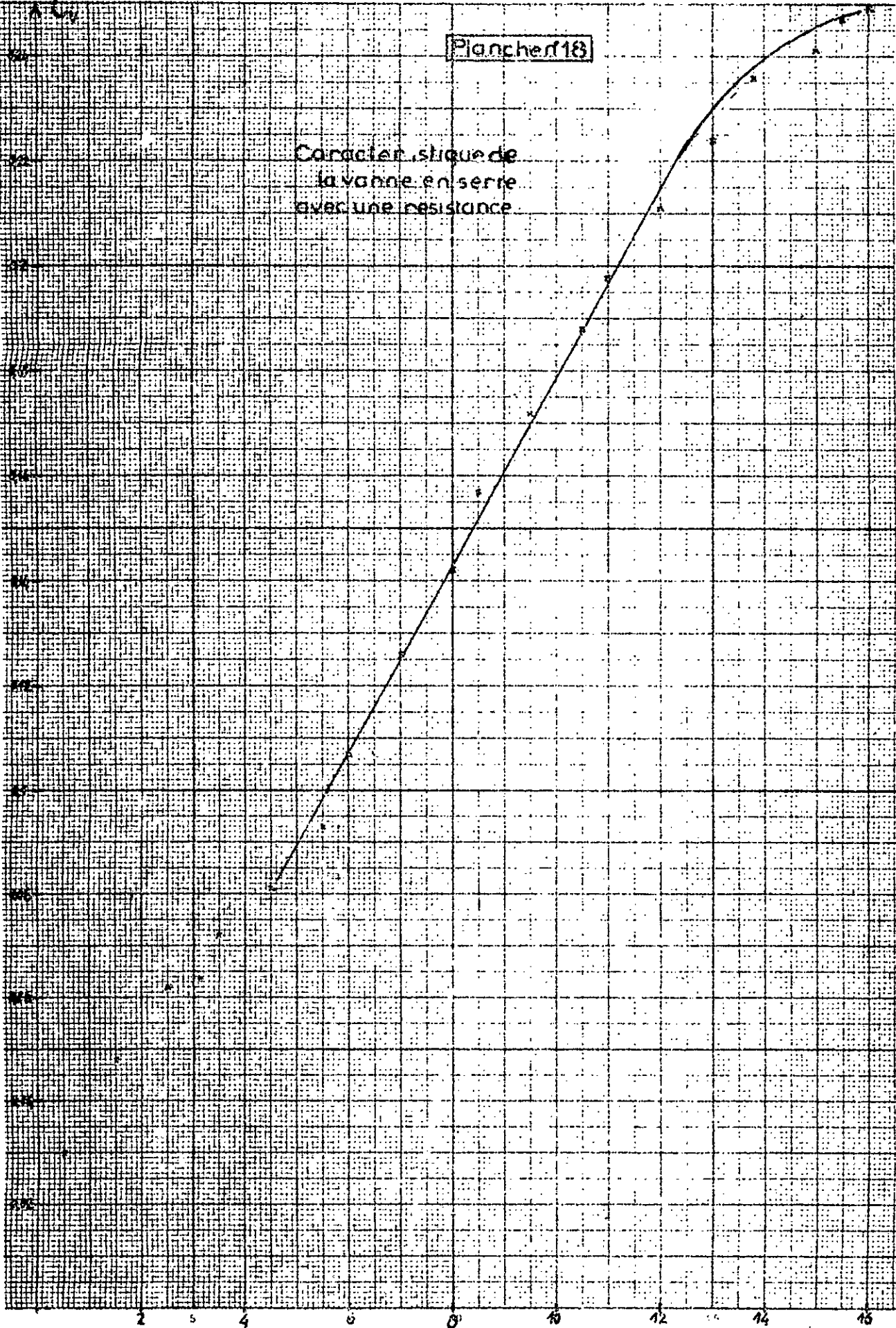
Planche n°17

Caractéristique de
la vanne en série avec
une résistance

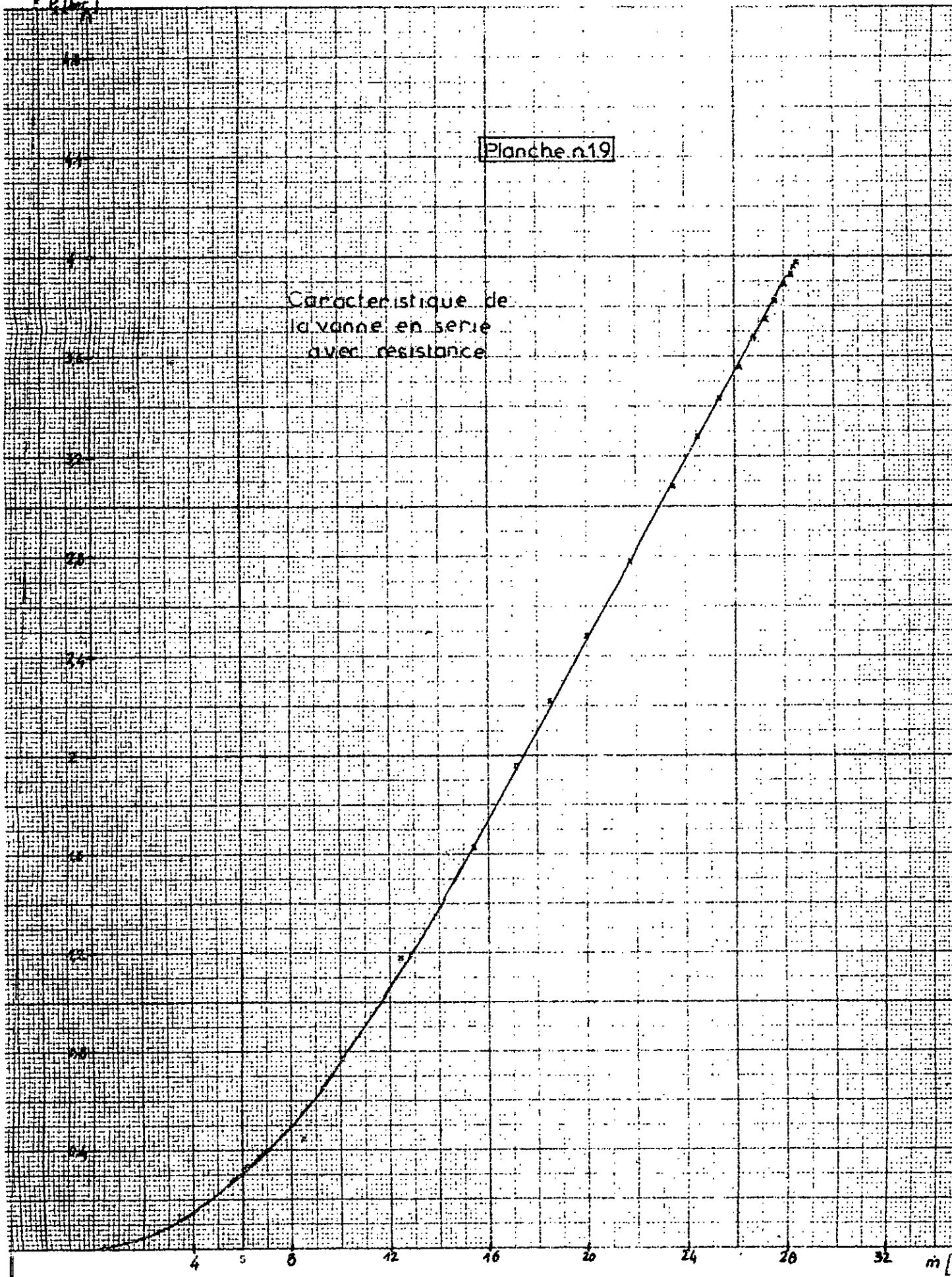


Plancher 18

Caractéristique de
la vanne en serre
avec une résistance



Caractéristique de
la vanne en série
avec résistance



V54 Conclusion

la perte de charge au niveau de la vanne est faible devant celle de la résistance (tuyauterie porteuse + brûleur). Dans ce cas la modification de la résistance de la vanne a une faible influence sur la perte de charge globale et sur le débit.

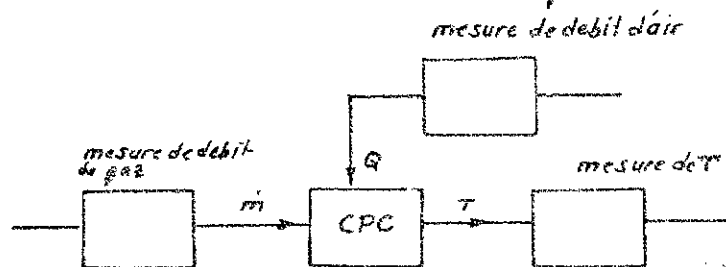
Pour cela, la vanne doit être placée en aval pour absorber un Δp grand ce qui est impossible dans notre cas, puisque la grande perte de charge est au niveau du brûleur.

Il est préférable de placer une vanne à égal pourcentage car sa caractéristique se rapproche d'une loi linéaire. Ou bien on change les tuyauteries par celles des diamètres plus grands.

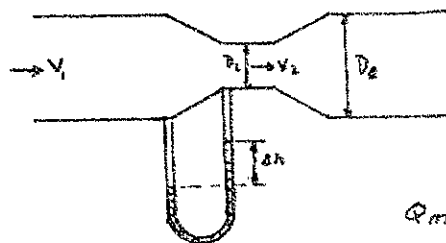
V6 Procède

le but de cet essai :

- Tracer la caractéristique température en fonction du débit de gaz pour plusieurs valeurs de débit d'air (charge).



le calcul du débit d'air se fait par un dispositif de étranglement intercalé dans la conduite d'aspiration « VENTURI » qui est constitué d'un convergent conique prolongé par un cylindre et suivi d'un divergent conique.



$$Q_m = 919 \sqrt{S_0 \Delta h} \quad (\text{g/s})$$

$\Delta h : (\text{mm H}_2\text{O})$

le réglage de débit d'air se fait à l'aide d'un papillon placé au début de la conduite d'aspiration.

le débit de gaz nécessaire est obtenu en agissant sur la commande manuelle du régulateur.

la mesure de la température se fait par un thermocouple, dont les bornes sont reliées d'un millivoltmètre approprié gradué directement en °C.

les courbes de la plaque n° 20 représentent les caractéristiques correspondantes à trois charges différentes.

En comparant les trois courbes on constate que la pente (gain statique) diminue avec l'augmentation de la charge.

limite supérieure de la température:

Pour les grands débits d'air, le débit maximum de gaz n'assure pas une température importante

par exemple pour un débit d'air la température correspondante n'atteint que 280°C

limite inférieure de la température:

Elle résulte du rapport min gaz-air qui assure l'existence de la flamme

V7 Thermocouple

V71 Manipulation

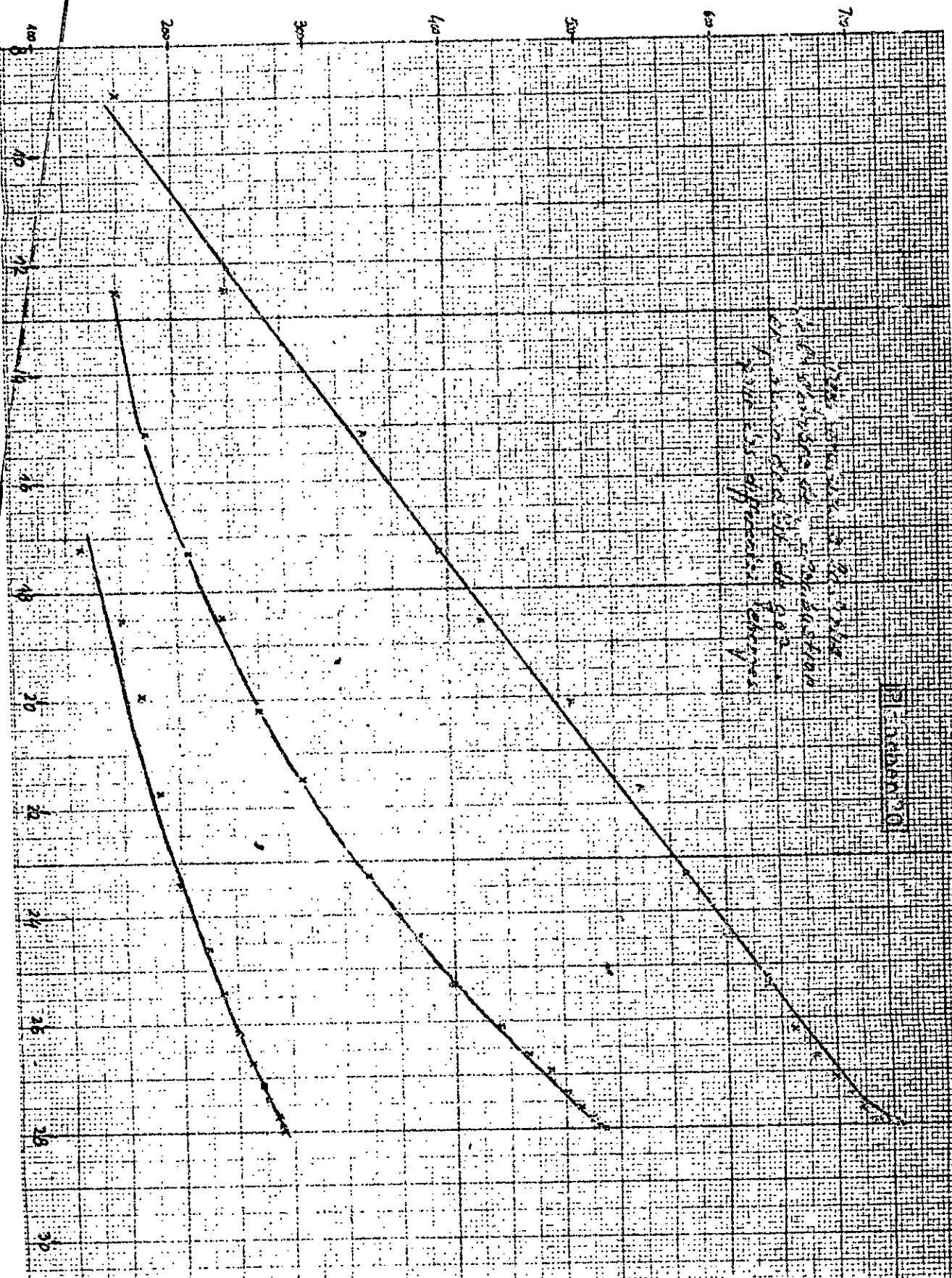
on branche directement, sans intermédiaire d'un dispositif de soudure froide, le câble provenant du thermocouple aux bornes d'un millivoltmètre.

On met d'abord le thermocouple dans un récipient d'eau froide dont la température est mesurée par un thermomètre à mercure, puis dans un récipient d'eau bouillante.

Dans les deux cas on mesure la tension générée. Deux points ainsi relevés permettant de trouver la pente de la caractéristique

V72 Graphe, Interprétation

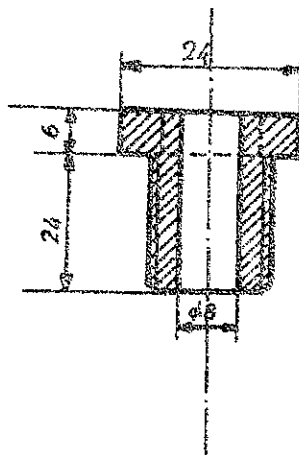
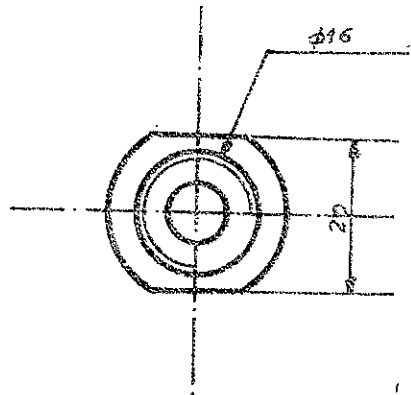
la comparaison de cette caractéristique avec celles des thermocouples



1. The curves are plotted on millimeter paper.
 2. The curves are labeled A, B, and C.
 3. The curves show an upward trend.

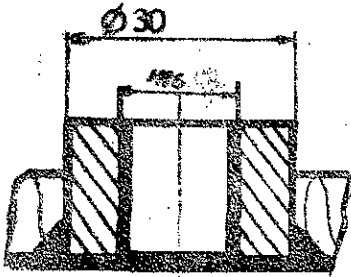
1. The curves are plotted on millimeter paper.
 2. The curves are labeled A, B, and C.
 3. The curves show an upward trend.

Connus (PL 21) rend possible de prévoir que le thermocouple utilisé est de type chromel Alumel. le décalage correspond à la température au niveau du millivoltmètre utilisé. Donc on peut utiliser les caractéristiques standardisées de ce type pour la plage de la température nécessaire.

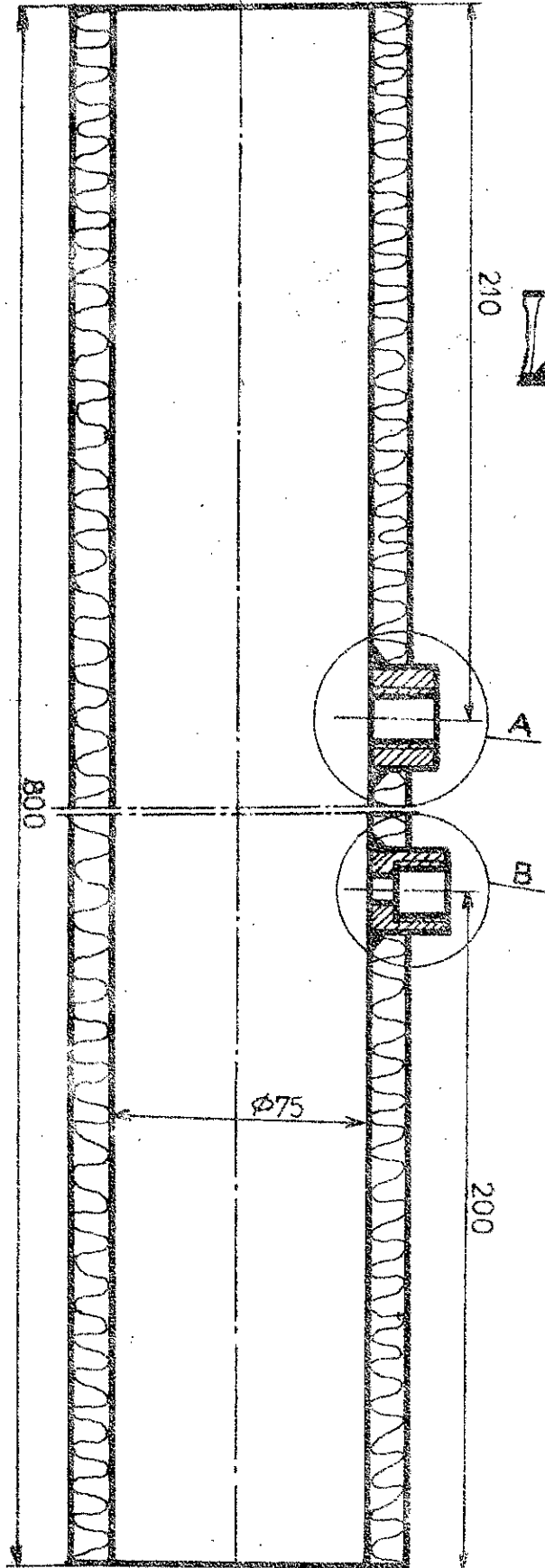
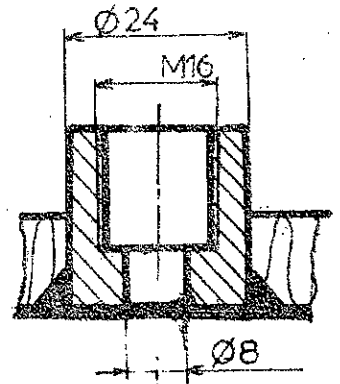


ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE				
Echelle	MASSÉ		VIS ECROU	ENP Dep Mécanique
1				
Etudiant	DIBES			
Promoteur	WERNER			
			Nombre 1	

A ECHELLE:1



B ECHELLE:1



Ecole Nationale Polytechnique		ENP	ENP Dep. Mécanique
Échelle	Masse		
0,5			
Étudiant: DIBBS			
Encadreur: WERTHER			
TUBE			

VII CONCLUSION

Le banc d'essai à été mis en marche et prêt à fonctionner enrichissant ainsi notre laboratoire énergétique.

Cette étude m'a été très utile, elle m'a permis d'analyser expérimentalement les éléments du système par des simples moyens et d'étudier leurs caractéristiques.

La modification apportée au banc est le remplacement de la chambre de précombustion par une autre à tirage naturel; elle permet d'étudier le système sans mettre la soufflante en marche.

J'ai acquis une abondante expérience au contact d'un matériel nouveau pendant les travaux effectués.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) *Instrumentation industrielle 2*
MICHEL CERR *TECHNIQUE of DOCUMENTATION*
- 2) *Technique de la regulation industrielle*
DANIEL DINDELEUX *EYROLLES 1981*
- 3) *Les principes des mesures*
M. CAPOT
- 4) *Pratique de la mesure et du Controle dans l'industrie -2*
J. BURTON
- 5) *Mesure des temperatures*
G. RIBAUD
- 6) *Regulation automatique industrielle*
ECKMAN
- 7) *Technique de l'ingenieur : Mesures et Contrôles*
- 8) *Guide de la mesure et de la regulation industrielle*
PAR ROBERT FARDIN
preface de M CHALVET
- 9) *Documentations techniques*

