

nea

DEPARTEMENT D'ELECTRICITE

FILIERE INGENIEUR EN ELECTROTECHNIQUE



PROJET DE FIN D'ETUDES

REGULATION AUTOMATIQUE
AVEC MINIMISATION DE
LA CONSOMMATION
D'ENERGIE DANS
UNE INSTALLATION
DE CLIMATISATION



PROMOTION 1980



Proposé par :

Z. BARSKI - Dr. ès-science

Etudié par :

Ms. BENYAHIA

Ms. BOUCHERIT

DEPARTEMENT D'ELECTRICITE

FILIERE INGENIEUR EN ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

159.400

REGULATION AUTOMATIQUE
AVEC MINIMISATION DE
LA CONSOMMATION
D'ENERGIE DANS
UNE INSTALLATION
DE CLIMATISATION



PROMOTION 1980



Proposé par :

Z. BARSKI - Dr. ès-science

Etudié par :

Ms. BENYAHIA
Ms. BOUCHERIT

- R E M E R C I E M E N T S -

Nous tenons à remercier Monsieur Z. BARSKI, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique pour l'aide qu'il a bien voulu nous apporter tout au long de cette étude.

Nous exprimons notre reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce projet.

oOo

TABLE DES MATIERES

	Page	
1	Introduction	1
2	Installation de climatisation	3
	2.1. Spécification des éléments	3
3	Analyse des propriétés dynamiques du processus automatisé	12
	3.1. Etude théorique	12
	3.2. Etude expérimentale	22
4	Réalisation technologique des boucles de réglage	
	4.1. Régulation de la température	27
	4.2. Régulation de l'humidité	30
	4.3. Conclusion	31
5	Choix et calcul de mise au point des régulateurs	
	5.1. Caractéristiques des régulateurs	32
	5.2. Mise au point des régulateurs	37
	5.3. Stabilité	40
	5.4. Optimisation	
6	Choix et calculs des organes de réglage	
	6.1. Généralités	50
	6.2. Caractéristiques des vannes de réglage	50
	6.3. Choix des vannes de réglage	52
	6.4. Dimensionnement des vannes de réglage	53
7	Description du système de régulation et de mesure	
	7.1. Schéma de base	56
	7.2. Schéma de bloc	57
8	Spécification des éléments de mesures et de régulation	
	8.1. Les capteurs	60
	8.2. Régulateurs	64
	8.3. Servo-moteurs	66
	8.4. Vanne de réglage	67
9	Minimisation de la consommation d'énergie	
	9.1. Optimisation : système auto adaptatif	69
	9.2. Minimisation de la consommation d'énergie	70
10	Conclusion	72
	. Bibliographie	73
	. Annexe.	74

1. INTRODUCTION

1.1. Présentation du sujet

Notre sujet a pour objectif l'étude de la régulation automatique d'une installation de climatisation avec minimisation de la consommation d'énergie dans un hopital.

1.1.1. Définition et rôle de la climatisation :

L'installation de climatisation est un procédé de traitement de l'air assurant la maîtrise simultanée de sa température, son humidité, sa pureté et sa répartition de façon à satisfaire les besoins de confort des occupants du local conditionné. Donc l'installation doit comprendre entre autre :

- Un rechauffeur
- Un réfrigérateur
- Un humidificateur ou deshumidificateur
- Un filtre

1.1.2. Régulation automatique

Elle a pour but le maintien automatique a une valeur désirée une grandeur physique (température ou humidité) soumise a des variations ou utilise à cet effet une boucle fermée d'action et de retroaction dans intervention humaine. Elle présente beaucoup d'avantages : elle a libéré l'être humain des tâches difficiles. L'avantage technologique est que la machine peut accomplir ces tâches d'une façon plus rapide et plus uniforme que l'homme.

1.1.3. Optimisation

Dans le passé, l'automatisme s'attachait à réaliser des dispositifs de régulation et de commande qui satisfaisaient à des spécifications techniques classiques telles que bande passante, valeurs maximales des dépassement, amortissement, etc...

Pour y parvenir l'automatisme utilisait des techniques mathématiques de synthèse limitées aux équations différentielles linéaires et a des critères de stabilité qui étaient appliqués à des systèmes monovariables.

Depuis quelques vingtaines d'années apparait la nécessité des systèmes industriels plus vastes d'une part et soumis à des contraintes à la fois technique, économiques et sociales d'autre part.

L'époque actuelle demande en effet aux automaticiens d'analyser un système pour prévoir son comportement de manière à minimiser le coût de production, à maximiser le confort des personnes usagers.

Etant donné, le choix d'un régulateur optimale ne résoud pas le problème d'économie d'énergie, des nouvelles techniques mises au point par de nombreux chercheurs sont maintenant susceptibles de résoudre ce problème.

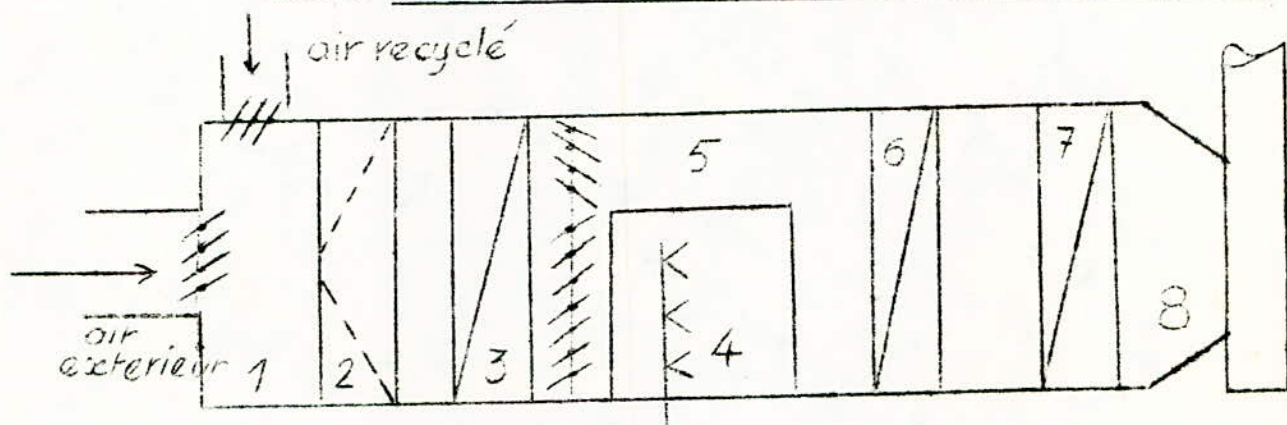
Afin de ces méthodes soient très efficaces, vu que beaucoup de systèmes industriels ont leur qualité dynamiques et statiques défavorables et variables en fonction des perturbations extérieures et intérieures, des essais sont nécessaires pour déterminer leur caractéristiques réelles.

Dans notre étude les caractéristiques des objets ont été prises dans des atlas des propriétés dynamiques car nous n'avions pas pu effectuer les essais prévus pour des raisons techniques.

2. Données techniques de l'installation :

2.1. Spécification des éléments des centrales de climatisation :

2.1.1. Schéma du dispositif de la préparation de l'air



2.1.1.1. Chambre de mélange :

C'est une chambre à double entrées commandées par des clapets qui servent à réaliser un mélange d'air dans les proportions désirées (air extérieur + air recyclé)

2.1.1.2. Filtre à poussière :

Après la chambre de mélange, on dispose toujours d'un filtre à poussière pour épurer l'air et en même temps pour éviter les dépôts de poussière dans le local à climatiser.

Les filtres varient suivant le matériel de construction (filtres à papiers, tôles de choc huilée à matière filtrante) et suivant la gamme de fabrication.

	<u>Gamme de Fabrication</u>	<u>Pour des Grains de dim.</u>
A	Filtres grossiers	$> 8\mu$
B	Fin	$> 0,7\mu$
C	Ultra fin	$< 0,7\mu$

Gamme de fabrication		pour des grains de dimension
A	Filtres grossiers	$> 0,8 \mu$
B	Fin	$> 0,7 \mu$
C	Ultra fin	$< 0,7 \mu$

2.1.1.3. Préchauffeur :

Il est utilisé pour rapprocher l'air plus facilement de son point de rosée lors de son humidification et son refroidissement. Il est constitué à l'aide de tubes à ailettes chauffés à vapeur ou à eau.

2.1.1.4. Humidificateur (laveur) :

Il sert à humidifier l'air pour lequel on doit maintenir la teneur en eau constante et aussi à purifier par lavage.

Cette humidification se fait par pulvérisation d'eau ou par injection de vapeur.

Les pulvérisateurs peuvent être disposés de façon à ce que le jet d'eau soit refoulée par rapport à l'air, soit à contre courant. Dans le laveur l'air absorbe une partie de l'eau pulvérisée avec laquelle il rentre en contact et sort dans un état plus ou moins proche de la saturation suivant l'efficacité du laveur. Cette efficacité est définie d'après "le rendement de saturation". La surface d'échange et la durée de contact avec l'eau pulvérisée sont les 2 principaux facteurs qui influent sur l'efficacité d'un laveur.

Cette surface est déterminée par le diamètre des gouttelettes d'eau, dépend également du débit d'eau pulvérisée, du nombre de nappes.

Nbre de nappes	Direction du jet	Rendement %
1	Dans le sens de l'air	55-65
	en sens contraire	65-80
2	Même sens	80-90
	Sens contraire	85-95
	Sens opposé	90-98
	2 en sens contraire	
3	+ 1 dans le même sens	> 98

2.1.1.5. Réfrigérateur :

Utilisé pour l'assèchement de l'air pendant le processus de climatisation. On utilise le fait que le refroidissement s'effectue avec condensation de l'eau donc pour assécher l'air il suffit de refroidir l'air jusqu'à la température correspondant à la teneur en eau désirée pour l'air saturé.

2.1.1.6. Réchauffeur :

L'effet du préchauffeur n'étant pas toujours suffisant, il faut un réchauffeur pour amener l'air à température désirée quand elle est inférieure à celle-ci. Ce chauffage se fait à l'aide d'échangeurs de chaleur qui sont à vapeur ou à eau chaude.

2.1.1.7. Ventilateur :

Il sert à véhiculer l'air traité dans l'installation de climatisation dans le local à climatiser.

2.1.2. Mode d'utilisation de l'installation de climatisation :

2.1.2.1. Système ferme :

Dans ce système la totalité de l'air utilisé est recyclé. C'est un système très économique mais il n'est pas hygiénique, malgré son avantage économique ce système n'est utilisé.

2.1.2.2. Systeme ouvert :

C'est un système à prise totale d'air extérieure, il est très hygiénique mais pas du tout économique. Ce système est utilisé dans le cas où aucune reprise d'air intérieur n'est tolérée, c'est le cas de certains laboratoires et blocs chirurgicaux etc..

2.1.2.3. Systeme mixte :

C'est un système à reprise partielle de l'air intérieur mélangé à l'air extérieur. Ce système est plus avantageux car il respecte le compromis hygiène économie. Il est utilisé pour les installations de confort.

2.1.3. Propriétés de l'air sec :

2.1.3.1. Constante de l'air sec "r_a"

Le poids moléculaire de l'air sec étant de 29 alors

on a :
$$r_a = \frac{848}{29} = 29,24 \text{ kgm/kg}^\circ\text{K}$$

2.1.3.2. Volume spécifique de l'air sec "V_a"

L'air sec se comportant comme un gaz parfait, nous pouvons lui appliquer l'équation caractéristique des gaz parfaits

$$V_a = \frac{r_a \cdot T}{P_a}$$

T : température Absolue

PA : pression Absolue de l'air (kg/m³)

2.1.3.3. Chaleur spécifique de l'air sec "C_{pa}" :

Dans la page considérée en conditionnement de l'air la chaleur spécifique "C_{pa}" de l'air varie (sec) très peu. On adoptera pour le calcul une valeur moyenne de

$$0,24 \text{ (K cal / kg }^\circ\text{C)}$$

2.1.3.4. Enthalpie de l'air sec "ha"

L'enthalpie n'est définie qu'à une constante arbitraire près alors l'on pourrait choisir comme origine l'enthalpie à une température et une pression quelconque par exemple on choisit :

$$T_0 = 0^\circ \quad \text{et } P = 760 \text{ mm Hg}$$

On aura donc :

$$h_a = C_{pa} \cdot \Delta t = 0,24 (t - 0)$$

$$h_a = 0,24 t$$

2.1.4. Propriétés de la vapeur d'eau :

2.1.4.1. Constante de la vapeur d'eau " κ_v "

Le poids molécule de l'eau est 18 donc on a :

$$\kappa_v = \frac{848}{18} = 47,11 \text{ Kgm/Kg}^\circ\text{K}$$

2.1.4.2. Chaleur spécifique de la vapeur d'eau " C_{pv} "

La variation de la chaleur spécifique de la vapeur saturée ou surchauffée étant très faible, dans la plage des températures considérées pour le conditionnement, on adoptera une valeur constante de 0,45 (Kcal/Kg $^\circ$ C) qu'il s'agisse de vapeur saturée ou surchauffée.

2.1.4.3. Volume spécifique de la vapeur d'eau et Enthalpie de vapeur d'eau :

Les valeurs sont données directement par des tables. L'erreur commise en utilisant la table étant négligeable pour le calcul de conditionnement d'eau on adoptera cette méthode pour les calculs.

2.1.5. Propriétés des mélanges Air Vapeur d'eau :2.1.5.1. Loi de DALTON :

a) la pression totale d'un mélange est la somme des pressions partielles de chaque gaz s'il occupait seul le volume total.

$$p = p_a + p_v \quad [\text{mm Hg ou kg/cm}^2]$$

b) le volume spécifique occupé par un mélange de gaz est le même que le volume occupé par chacun d'eux. Sous une pression égale à sa pression partielle dans le mélange.

2.1.5.2. Point de rosée :

Lorsque l'on refroidit à pression constante un mélange d'air et de vapeur d'eau, la vapeur passe de l'état surchauffée à l'état saturée et puis la condensation apparaît. La température correspondant au début de la condensation est dite "température de rosée" ou "point de rosée".

2.1.5.3. Humidité spécifique "x" :

Elle est définie comme le poids de vapeur dans un kilogramme d'air sec.

2.1.5.4. Degré hygrométrique ou humidité relative :

Il représente la quantité d'eau réelle contenue dans l'air rapportée à la quantité qu'il est capable d'absorber à la température considérée.

REMARQUE : Au point de rosée, la vapeur d'eau contenue dans l'air est saturée on dit alors que le degré hygrométrique de l'air est de 100 %.

a) température sèche :

C'est la température ordinaire que nous appellerons T° de bulbe sec ou simplement T° sèche

b) température de bulbe humide (T° humide) :

C'est la température qu'aura l'air non saturée après sa saturation par lavage.

2.1.6. Construction du diagramme psychrométrique :

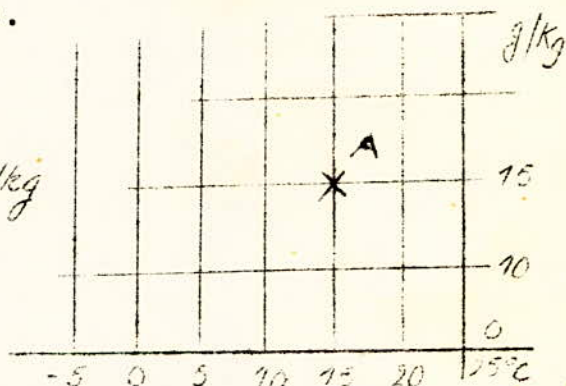
* Dans le diagramme psychrométrique les températures sont en abscisse et les humidités spécifiques sont en ordonnées.

exemple.

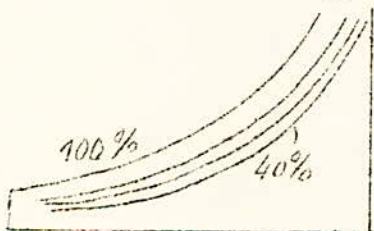
point A

T° sèche 15°C

H spécifique = 15 g/kg



* La courbe qui passe par tous les points de rosée s'appelle la courbe de saturation c'est la courbe de degré hygrométrique 100 %

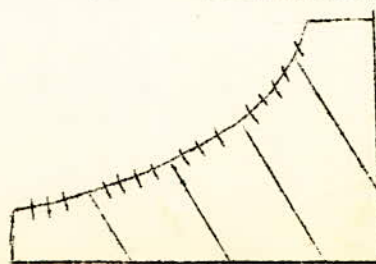


les autres courbes de degré hygrométriques constant ont aussi la même allure

RQ : le point de rosée de l'air dépend de son humidité spécifique, il correspond à l'intersection. La courbe de saturation et de l'horizontale passant par le point représentatif de l'état de l'air.

* Les courbes de température humide constante sont des droites qui sont obtenues en joignant le point représentatif de l'état de l'air non saturé et son point représentatif après saturation (humidification)

La température humide se lit sur la courbe de saturation



Remarque : Soit la température sèche, l'humidité spécifique, le point de rosée, le degré hygrométrique et la température humide, il nous suffit de connaître deux de ces valeurs pour connaître les autres.

- * Pour déterminer la valeur de l'Enthalpie sur le diagramme on prolonge les courbes de température humide constante jusqu'à l'échelle des Enthalpies.

2.1.7. Application du diagramme au traitement de l'air :

Tous les changements de l'air lors de son traitement peuvent être représentés dans le diagramme psychrométrique. Cette étude psychrométrique est faite pour 2 périodes de l'année :

- . traitement d'air en hiver
- . traitement d'air en été

2.1.7.1. Fonctionnement en hiver (Fig 1) :

a) dans la chambre de mélange :

On mélange l'air extérieure et l'air recyclé qui en 2 points représentatifs différents respect A et I pour le diagramme alors on obtient le point représentatif de l'air résultant M qui est sur la droite AI.

b) dans le préchauffage :

L'air s'échauffe en gardant une teneur constante et passe de l'état M à l'état V.

c) dans le laveur :

L'air est refroidi et humidifié en même temps. Le changement d'état se fait parallèlement au droite à l'Enthalpie constante à travers le compartiment, l'air passe de l'état V à l'état B.

e) Réchauffeur :

L'air est réchauffé à teneur constante il passe de l'état B à l'état Z.

2.1.7.2. Fonctionnement en Eté (Fig 2) :

a) dans la chambre de mélange :

même traitement

b) dans le réfrigérant :

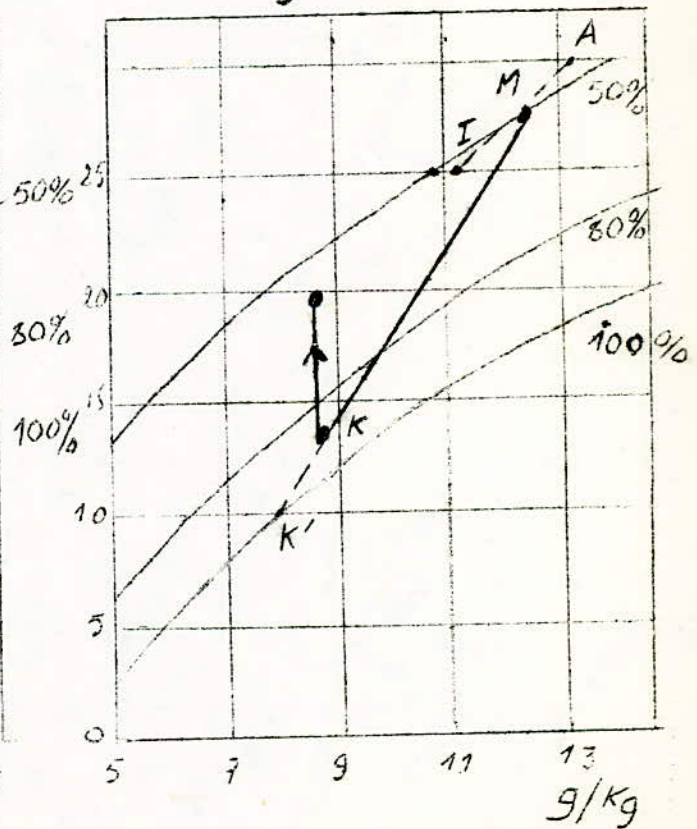
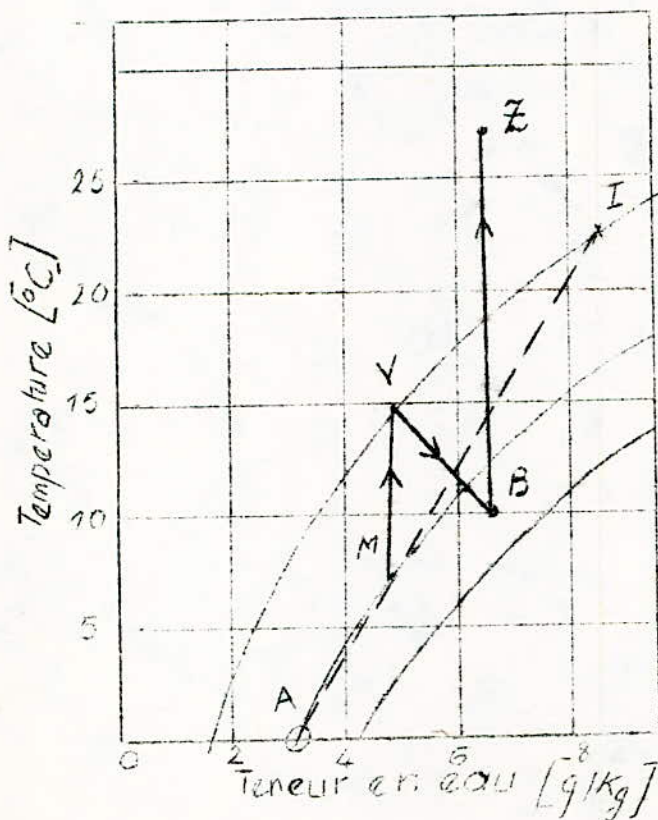
Il y a refroidissement de l'air qui entraîne condensation de la vapeur c'est-à-dire un assèchement. L'air passe de l'état M à l'état R.

c) dans le réchauffeur :

L'air est réchauffé à teneur constante jusqu'à la température désirée.

Fig 1

Fig 2



3. Analyse des propriétés dynamiques du processus automatisé

3.1. Généralités

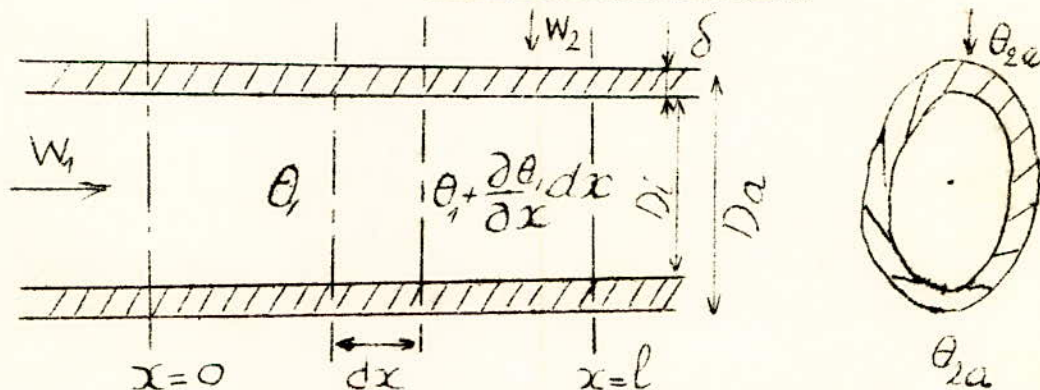
Le fonctionnement d'une chaîne de régulation ne doit pas être considéré du point de vue statique uniquement mais on doit tenir compte des modifications des différentes grandeurs dans le temps, c'est-à-dire l'aspect dynamique des phénomènes.

Lorsque la chaîne est parfaitement connue, il est possible de déterminer théoriquement la caractéristique dynamique de la chaîne par la résolution des équations différentielles régissant le système.

3.2. Etude théorique

3.2.1. Chaîne de régulation de la température

3.2.1.1. Echangeur de chaleur :



Pour déterminer sa caractéristique dynamique qui n'est en fait pas sa caractéristique réelle, nous considérons un simple tube cylindrique à 2 dimensions et nous établissons les équations différentielles régissant à partir du bilan calorifique.

Soit :

W_1 = Vitesse de l'écoulement de la valeur dans le cylindre

W_2 = Vitesse de l'air

D_i = Diamètre intérieur du cylindre

D_a = Diamètre extérieur

θ_1 = Température d'entrée

θ_r = T° à l'intérieur de la paroi

α_i, α_a sont les coefficients d'échange thermique

Les équations différentielles décrivant le système sont obtenues à partir du bilan calorifique.

1°) L'équation calorifique du débit primaire s'exprime par :

$$\rho_1 w_1 c_1 \pi \frac{D_i^2}{4} \theta_1 dt = \rho_1 w_1 c_1 \pi \frac{D_i^2}{4} \left(\theta_1 + \frac{\partial \theta}{\partial x} dx \right) dt + \pi D_i \alpha_i (\theta_1 - \theta_R) dx dt + \rho_1 c_1 \pi \frac{D_i^2}{4} \frac{\partial \theta_1}{\partial t} dx dt$$

en effectuant, et en regroupant les termes, on obtient :

$$\rho_1 w_1 c_1 \pi \frac{D_i^2}{4} \theta_1 dt - \rho_1 w_1 c_1 \pi \frac{D_i^2}{4} \theta dt = \rho_1 w_1 c_1 \pi \frac{D_i^2}{4} \frac{\partial \theta}{\partial x} dx dt + \pi D_i \alpha_i (\theta_1 - \theta_R) dx dt + \rho_1 c_1 \pi \frac{D_i^2}{4} \frac{\partial \theta_1}{\partial t} dx dt.$$

$$\rho_1 c_1 \pi \frac{D_i^2}{4} \left(w_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial x} dx dt + \frac{\pi D_i \alpha_i (\theta_1 - \theta_R)}{\pi \frac{D_i^2}{4} \rho_1 c_1} dx dt + \frac{\partial \theta_1}{\partial t} dx dt \right) = 0$$

D'où l'équation différentielle suivante :

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} + w_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial x} + \frac{4 \alpha_i}{\rho_1 c_1 D_i} (\theta_1 - \theta_R) = 0$$

2°) Le bilan calorifique du tube :

$$\pi D_i \alpha_i (\theta_1 - \theta_R) dx dt = \pi D_o \alpha_o (\theta_R - \theta_{2m}) dx dt + \rho_R c_R \pi D_m \delta \frac{\partial \theta_R}{\partial t} dx dt$$

en posant $\theta_{2m} = (\theta_{2e} + \theta_{2s}) / 2$ température moyenne

D_m diamètre du tube, on obtient :

$$\rho_R c_R \pi D_m \delta \frac{\partial \theta_R}{\partial t} dx dt + \pi D_o \alpha_o (\theta_R - \theta_{2m}) dx dt - \pi D_i \alpha_i (\theta_1 - \theta_R) dx dt = 0$$

$$\frac{\partial \theta_R}{\partial t} + \frac{\alpha_o D_o}{\rho_R c_R D_m \delta} (\theta_R - \theta_{2m}) - \frac{\alpha_i D_i}{\rho_R c_R D_m \delta} (\theta_1 - \theta_R) = 0$$

3°) Le bilan calorifique pour la côte secondaire :

$$\dot{Q}_{2a} = \theta_{2e} + \frac{\pi a D_o \alpha_o}{\rho_2 w_2 c_{p2} R_o} (\theta_R - \theta_{2m})$$

R_a est l'écartement des tubes.

On obtient selon GARTNER et HARRISON les équations

$$\Delta \theta_1' + \frac{\partial \Delta \theta_1}{\partial \xi} + \beta_1 (\Delta \theta_1 - \Delta \theta_R) = 0$$

$$\Delta \theta_R' + \beta_2 (\Delta \theta_R - \Delta \theta_{2m}) - \beta_3 (\Delta \theta_1 - \Delta \theta_R) = 0$$

$$(\Delta \theta_{2o} - 2 \theta_{2e}) - \beta_4 (\Delta \theta_R - \Delta \theta_{2m}) = 0$$

en posant: $\Delta \theta_1' = \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau}$, $\tau = \frac{w_1 t}{l}$, $\xi = \frac{x}{l}$, $\beta_1 = \frac{4 l \alpha_i}{\rho_1 c_1 D_i w_1}$

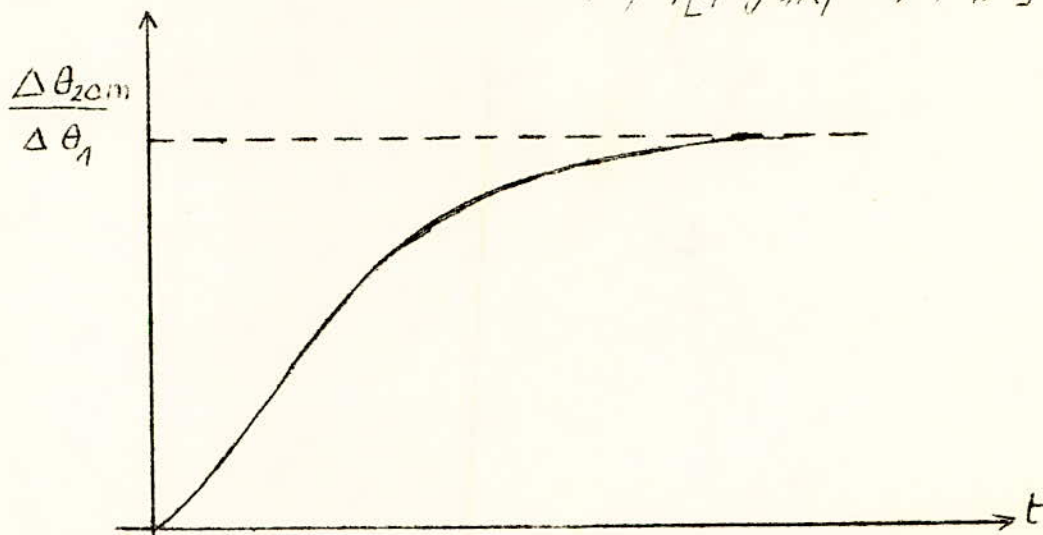
$$\beta_2 = \frac{D_o l \alpha_o}{\rho_R c_R D_m \delta w_1}, \quad \beta_3 = \frac{D_i l \alpha_i}{\rho_R c_R D_m \delta w_1}, \quad \beta_4 = \frac{\pi D_o \alpha_o}{\rho_2 c_{p2} R_o w_2}$$

En utilisant la transformation de la place :

$$\begin{aligned} & \left[(\rho + \beta_2 + \beta_3)(\beta_4 + 2) - \beta_2 \beta_4 \right] \Delta \theta_{2a}(\rho, \xi) + \left[(\rho + \beta_2 + \beta_3)(\beta_4 - 2) - \beta_2 \beta_4 \right] \times \\ & \Delta \theta_{2e}(\rho, \xi) - 2\beta_3 \beta_4 \Delta \theta_1(\rho, \xi) = 0 \\ & \frac{\partial \Delta \theta_1(\rho, \xi)}{\partial \xi} + (\rho + \beta_1) \Delta \theta_1(\rho, \xi) - \frac{\beta_1}{2\beta_4} \left[(\beta_4 + 2) \Delta \theta_{2a}(\rho, \xi) + (\beta_4 - 2) \Delta \theta_{2e}(\rho, \xi) \right] = 0 \end{aligned}$$

La réponse unitaire devient pour $\Delta \theta_{1e}$ température à l'entrée et $\Delta \theta_{2am}$ température de sortie avec

$$a = \beta_3 + 2\beta_2 / (2 + \beta_4) \Rightarrow \frac{\Delta \theta_{2am}(\rho)}{\Delta \theta_1(\rho)} = \frac{2\beta_3 \beta_4 (1 - e^{-\rho} e^{-\beta_1} e^{\frac{\beta_1 \beta_3}{\rho + a}})}{(2 + \beta_4) \left[(\rho + \beta_1)(\rho + a) - \beta_1 \beta_2 \right]}$$



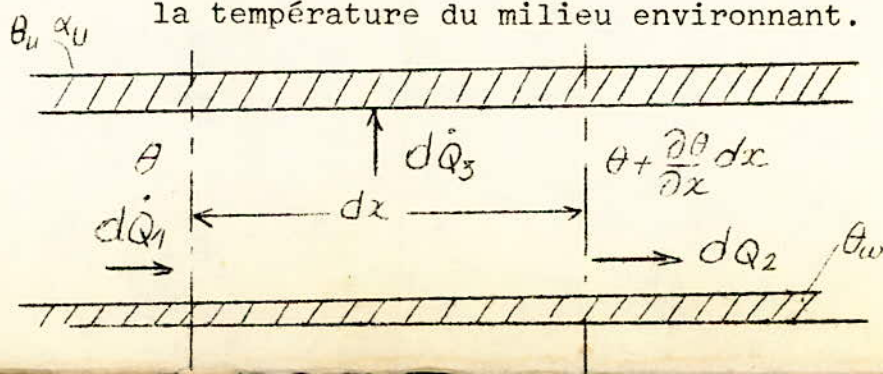
Cette caractéristique est obtenue en se basant sur les hypothèses suivantes :

- Matière homogène, coefficient de transmission de chaleur constant suivant l'axe, aucun mélange axial et l'écoulement sans frottement.

3.2.1.2. Gaine

Pour établir les équations différentielles nous partons du bilan thermique.

La surface laisse échapper de la chaleur dans le milieu ambiant (environnant), le flux thermique qui s'échappe étant par unité de surface proportionnel à l'écart entre la température superficielle et la température du milieu environnant.



- S : Section interne
- U : Surface périmétrique interne
- C : Chaleur massique
- l : masse volumique

$dQ_1 = \int_L \rho_L c_p \omega s \theta dt$ chaleur amenée dans le courant d'air

$dQ_2 = \int_L \rho_L c_p \omega s (\theta + \frac{\partial \theta}{\partial x} dx) dt$ chaleur sortante du courant d'air
chaleur transmise.

$dQ_3 = \alpha_w (\theta - \theta_w) U dx dt$ chaleur cédée à la paroi

$dQ_4 = \rho_L c_p s \frac{\partial \theta}{\partial t} dx dt$ chaleur emmagasinée

$dQ_1 = dQ_2 + dQ_3 + dQ_4$
 $\int_L \rho_L c_p \omega s \theta dt = \int_L \rho_L c_p \omega s (\theta + \frac{\partial \theta}{\partial x} dx) dt + \alpha_i (\theta - \theta_w) U dx dt + \rho_L c_p s \frac{\partial \theta}{\partial t} dx dt.$
 $\int_L \rho_L c_p \omega s \theta dt - \int_L \rho_L c_p \omega s \theta dt = \int_L \rho_L c_p \omega s \frac{\partial \theta}{\partial x} dx dt + \alpha_i (\theta - \theta_w) U dx dt + \rho_L c_p s \frac{\partial \theta}{\partial t} dx dt$

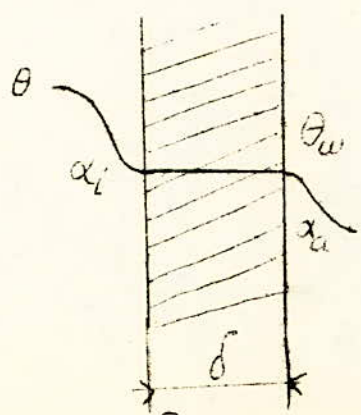
D'où :

$\int_L \rho_L c_p \omega s \frac{\partial \theta}{\partial x} dx dt + \alpha_i (\theta - \theta_w) U dx dt + \rho_L c_p s \frac{\partial \theta}{\partial t} dx dt = 0$

$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\alpha_i U (\theta - \theta_w)}{\rho_L c_p s} + \omega \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$

$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \omega \frac{\partial \theta}{\partial x} + \alpha_i U \frac{\theta - \theta_w}{\rho_L c_p s} = 0$

Néanmoins, θ_w de la paroi est fonction du temps elle aussi. On considère pour son calcul les deux cas idéaux suivants :



Dans ce cas la variation de température est constante et fonction du temps.

$\frac{\rho_w c_w \delta}{\alpha_i + \alpha_a} \Delta \theta'_w + \Delta \theta_w = \frac{\alpha_i}{(\alpha_i + \alpha_a)} \Delta \theta$

en utilisant la transformée de la place :

$\frac{\rho_w c_w \delta}{\alpha_i + \alpha_a} p \Delta \theta_w + \Delta \theta_w = \frac{\alpha_i}{\alpha_i + \alpha_a} \Delta \theta$

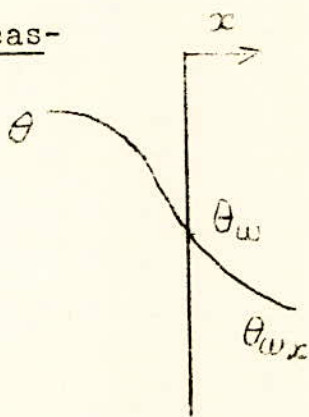
$$\Delta \theta_w \left[1 + p \frac{f_w c_w \delta}{\alpha_i + \alpha_a} \right] = \frac{\alpha_i}{\alpha_i + \alpha_a} \Delta \theta$$

$$\frac{\Delta \theta_w}{\Delta \theta} = \frac{\frac{\alpha_i}{\alpha_i + \alpha_a}}{1 + \frac{f_w c_w \delta}{\alpha_i + \alpha_a} p} = F(p)_w$$

En posant $K_p = \frac{\alpha_i}{\alpha_i + \alpha_a}$, $T = \frac{f_w c_w \delta}{\alpha_i + \alpha_a}$ On obtient :

$$\frac{\Delta \theta_w}{\Delta \theta} = \frac{K_p}{1 + T \cdot p}$$

2^{èm} cas-



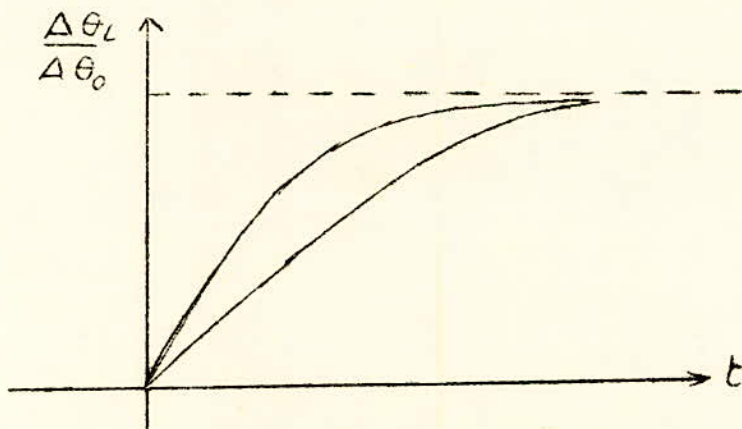
Dans ce cas, on utilise l'équation de FOURRIER, on obtient alors

$$\frac{\Delta \theta_w}{\Delta \theta} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{c_w \rho_w \lambda_w}{\alpha_i^2}} p} = F(p)_w$$

Ainsi, nous pouvons résoudre l'équation différentielle régissant la gaine. On obtient pour fonction de transfert pour la gaine ayant $\theta = \theta_0$ température d'entrée et $\theta = \theta_L$ pour la température de sortie :

$$\frac{\Delta \theta_L}{\Delta \theta_0} = e^{-pT} \cdot e^{-\frac{\alpha_i U L}{R_c \rho_c S_w}} (1 - F(p)_w)$$

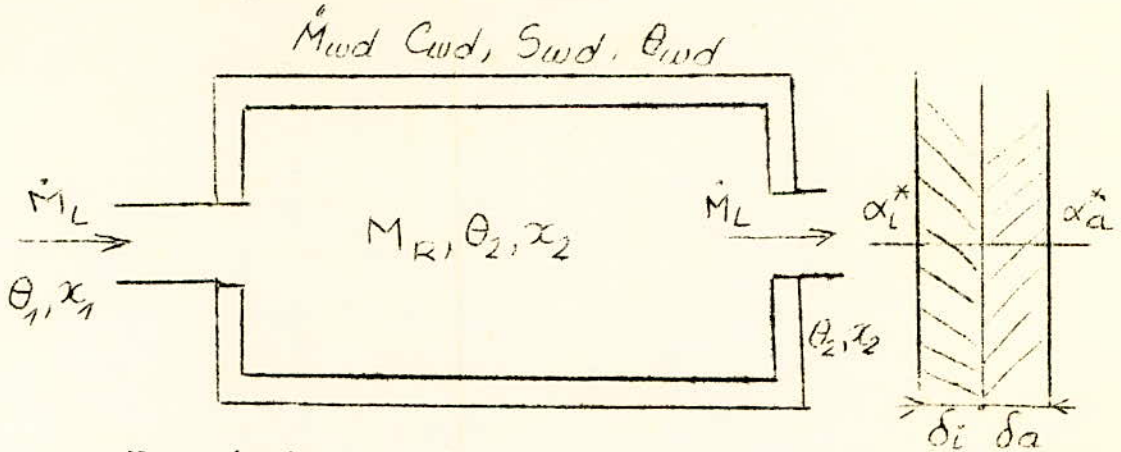
D'où le graphe de la fonction



Nous remarquons que la fonction de transfert dépend du calorifugeage.

3.2.1.3. Local :

Pour étudier la dynamique du local, nous adoptons la simplification de LENZ



Nous écrivons l'équation différentielle à partir du bilan :

$$M_R C_{P2} \Delta \dot{\theta}'_2 = \dot{M}_L C_{P2} (\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2) - \sum (\alpha_i^* S_{wd}) (\Delta \theta_2 - \Delta \theta_{wd})$$

$$M_{wd} C_{wd} \Delta \dot{\theta}'_{wd} = \sum (\alpha_i^* S_{wd}) (\Delta \theta_2 - \Delta \theta_{wd}) - \sum (\alpha_a^* S_{wd}) \Delta \theta_{wd}$$

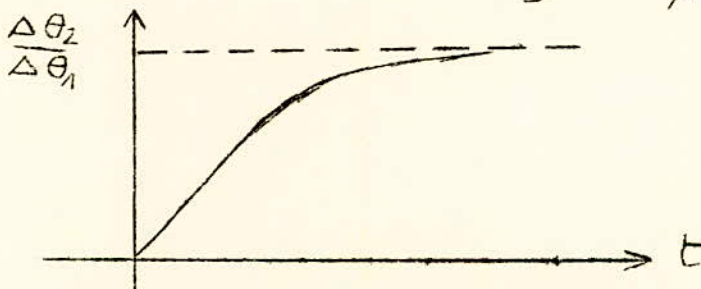
En appliquant la transformée de Laplace sur les 2 équations et en posant

$$T_1 = M_{wd} C_{wd} \left[\sum (S_{wd} (\alpha_i^* + \alpha_a^*)) \right], \quad T_2 = M_R C_{P2} / b; \quad K_p = \frac{a M_R C_{P2}}{b}$$

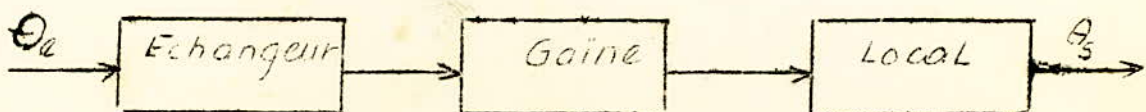
$$b = a M_R C_{P2} + \frac{\sum (\alpha_i^* S_{wd}) \sum (\alpha_a^* S_{wd})}{\sum [(\alpha_i^* + \alpha_a^*) S_{wd}]} \quad \text{et} \quad a = \frac{\dot{M}_L}{M_R}$$

Nous obtenons :

$$\frac{\Delta \theta_2}{\Delta \theta_1} = \frac{1 + T_1 p}{T_1 T_2 p^2 + (T_2 + a T_1 T_2 + \sum \frac{\alpha_i^* F_{wd}}{b} T_1) p + 1}$$



La chaîne de régulation de température :



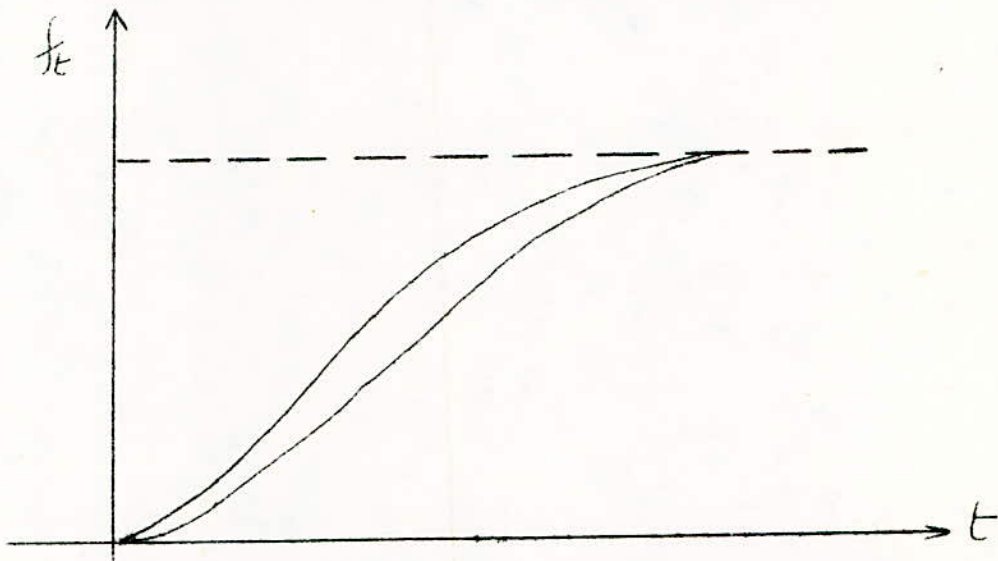
La fonction de transfert du système est le produit des fonctions de transfert de tous les éléments

$$F_t(p) = \frac{2\beta_3\beta_4 (1 - e^{-p} e^{-\beta_1} e^{\frac{\beta_1\beta_2}{p+a}})}{(2+\beta_4) [(p+\beta_1)(p+a) - \beta_1\beta_2]} \times$$

$$e^{-pT_L} \cdot e^{-\frac{x_1 U}{f_L C_{pL} S_w}} (1 - F(p)\omega) \cdot K_p \cdot \frac{1 + T_p}{T_1 T_2 p^2 + (T_2 + a T_1 T_2 + \frac{\sum x_i^* F_{wd} T_i}{b}) p + 1}$$

$$F_t(p) = \frac{K_0 e^{-T_0 p}}{(1 + T_1 p)^n}$$

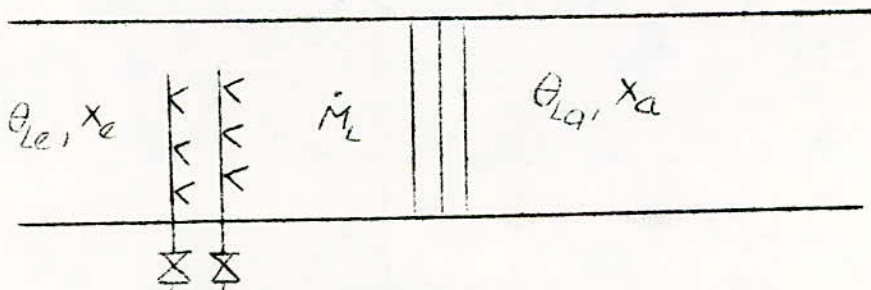
D'où le graphe de la fonction de transfert totale



C'est un faisceau de courbes périodiques dépendant des caractéristiques de l'échangeur et la calorifugeage

3.2.2. Chaine de régulation d'humidité :

3.2.2.1. Humidificateur avec eau en circulation



La relation entre la variation de température du courant d'air et la puissance calorifique transportée est donnée par l'équation :

$$\alpha S (\Delta \theta_{Lm} - \Delta \theta_{wm}) = \dot{M}_L C_{pL} (\Delta \theta_{Le} - \Delta \theta_{La})$$

$$\Delta \theta_{Lm} = (\Delta \theta_{Le} + \Delta \theta_{La}) / 2 \quad \text{et} \quad \Delta \theta_{wm} = (\Delta \theta_{we} + \Delta \theta_{wo}) / 2$$

De plus l'équation :

$$\dot{M}_w C_w (\Delta \theta_{wa} - \Delta \theta_{we}) + r S S (\Delta x_{sm} - \Delta x_a) / 2 = \alpha (\Delta \theta_{Lm} - \Delta \theta_{we}) S$$

exprime que la chaleur apportée par le courant d'air M2 doit couvrir la chaleur nécessaire pour la variation de température de l'eau et la vaporisation de l'eau.

$\bar{\sigma}$: Coefficient de transfert de matière

r : Chaleur de vaporisation

S : Surface extérieure de l'eau pulvérisée

$$\Delta x_{sm} = (\Delta x_{se} + \Delta x_{sa}) / 2$$

la relation entre la matière transformée et l'humidité de l'air est donnée :

$$\bar{\sigma} S (\Delta x_{sm} - \Delta x_a) / 2 = \dot{M}_L \Delta x_a$$

le processus d'emmagasinement dans le récipient collectant l'eau :

$$\dot{M}_w C_w (\Delta \theta_{wa} - \Delta \theta_{we}) = \dot{M} C_w \Delta \theta'_{we}$$

$$\frac{\Delta x_a}{\Delta \theta_{Le}} = K_p \frac{1 + T_1 P}{1 + T_2 P}$$

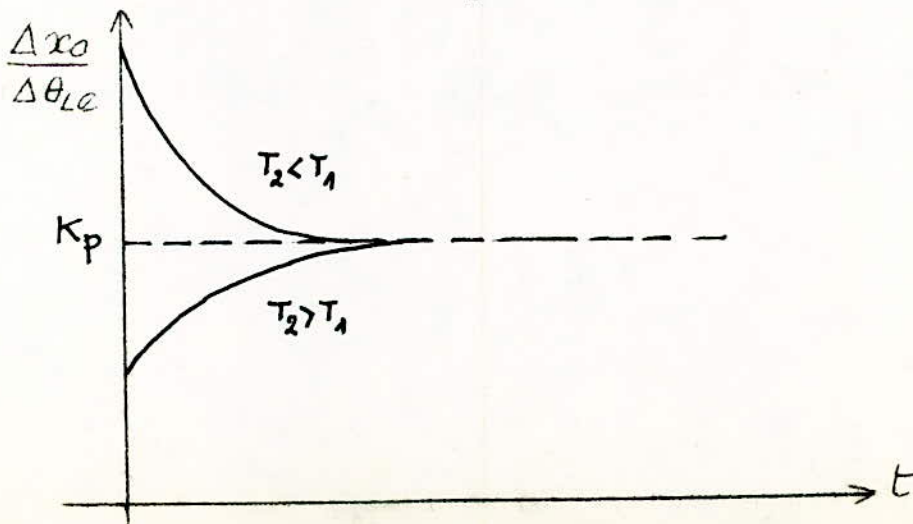
avec

$$K_p = \frac{A}{C}, \quad T_1 = \frac{B}{A}, \quad T_2 = \frac{D}{C} \quad \text{et}$$

$$A = \frac{2 \alpha S \dot{M}_L C_{pL}}{2 \dot{M}_L C_{pL} + \alpha F}, \quad B = \frac{M_s}{2 M_w} A, \quad d = \frac{\Delta x_s}{\Delta \theta_w}$$

$$C = \alpha - \dot{M}_w C_w \frac{2 \dot{M}_L C_{pL} + \alpha S}{d \alpha S}; \quad D = \frac{M_s}{2 \dot{M}_w}$$

$$\alpha = \left(\dot{m}_w C_w + \frac{\alpha F}{2} + \frac{d r \alpha F}{2 C_{pL}} \right) \frac{2 \dot{M}_w C_{pL} + \alpha F}{d \alpha F} - \frac{\alpha F}{2 d} - \frac{r \alpha F}{2 C_{pL}}$$



3.2.2.2. Gaine :

La gaine se comporte comme un temps mort en tant élément de transfert pour l'humidification, en raison de la vitesse limitée de l'air

soit L : la longueur de la gaine

W : la vitesse de l'air

donc le retard introduit par la gaine est $T = \frac{L}{W}$

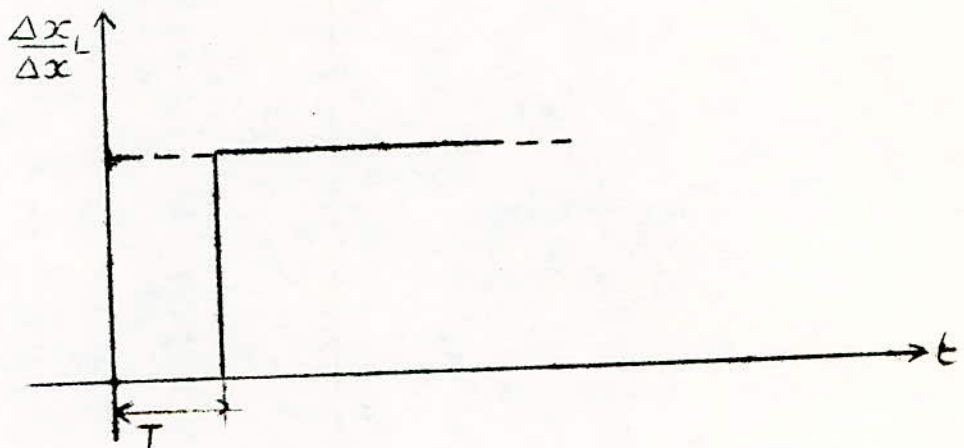
on obtient la réponse harmonique :

$$\frac{\Delta x_L}{\Delta x} = K_p \cdot e^{-T\omega}$$

avec Δx_L l'humidité à l'extrémité de la gaine comme par ailleurs, il ne se produit aucune condensation $K_p = 1$

$$\text{d'où } \frac{\Delta x_L}{\Delta x} = e^{-T\omega}$$

la réponse indicielle :

3.2.2.3. Local :

On parvient à une relation simple, si, la capacité d'emmagasinage des parois est négligeable. Il faut de même que le mélange est idéal, on obtient une équation simple.

$$\begin{aligned} \dot{M}_R \Delta x_2' + \dot{M}_L \Delta x_2 &= \dot{M}_L \Delta x_1 \\ \dot{M}_R \Delta x_2 \rho + \dot{M}_L \Delta x_2 &= \dot{M}_L \Delta x_1 \\ \Delta x_2 (\dot{M}_R \rho + \dot{M}_L) &= \dot{M}_L \Delta x_1 \end{aligned}$$

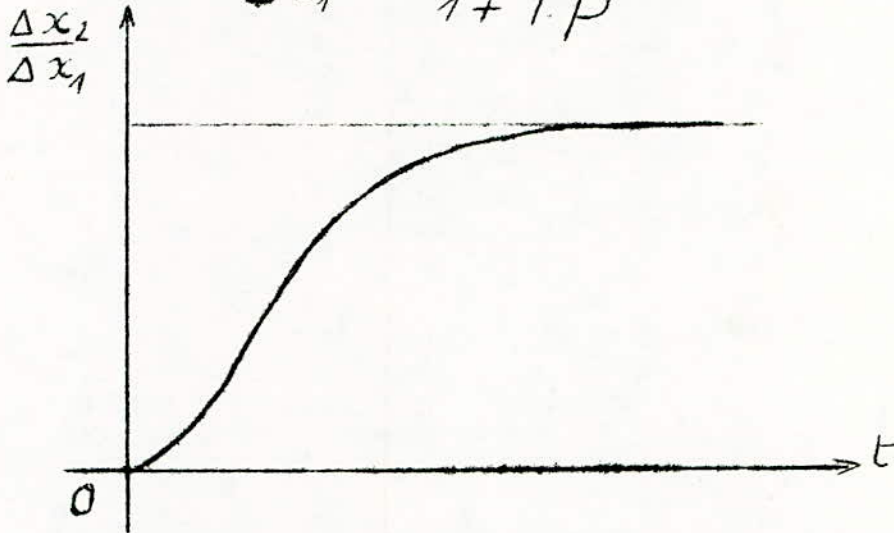
$$\frac{\Delta x_2}{\Delta x_1} = \frac{\dot{M}_L}{\dot{M}_R \rho + \dot{M}_L} = \frac{1}{1 + \frac{\dot{M}_R \rho}{\dot{M}_L}} = \frac{K_p}{1 + T\omega}$$

Dans le cas où il n'y a aucun transfert par les parois ni aucune condensation, $K_p = 1$.

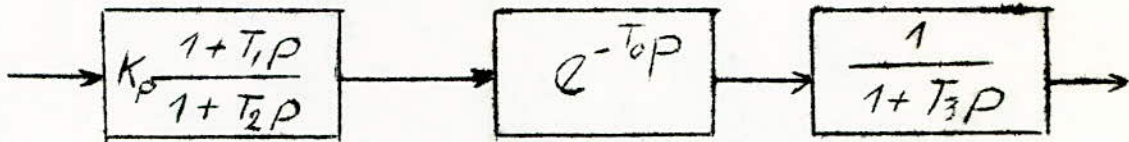
La constante de temps $T = \frac{M_R}{M_L}$ est inversement proportionnelle au renouvellement d'air

finalement

$$\frac{\Delta x_2}{\Delta x_1} = \frac{1}{1 + T \cdot p}$$



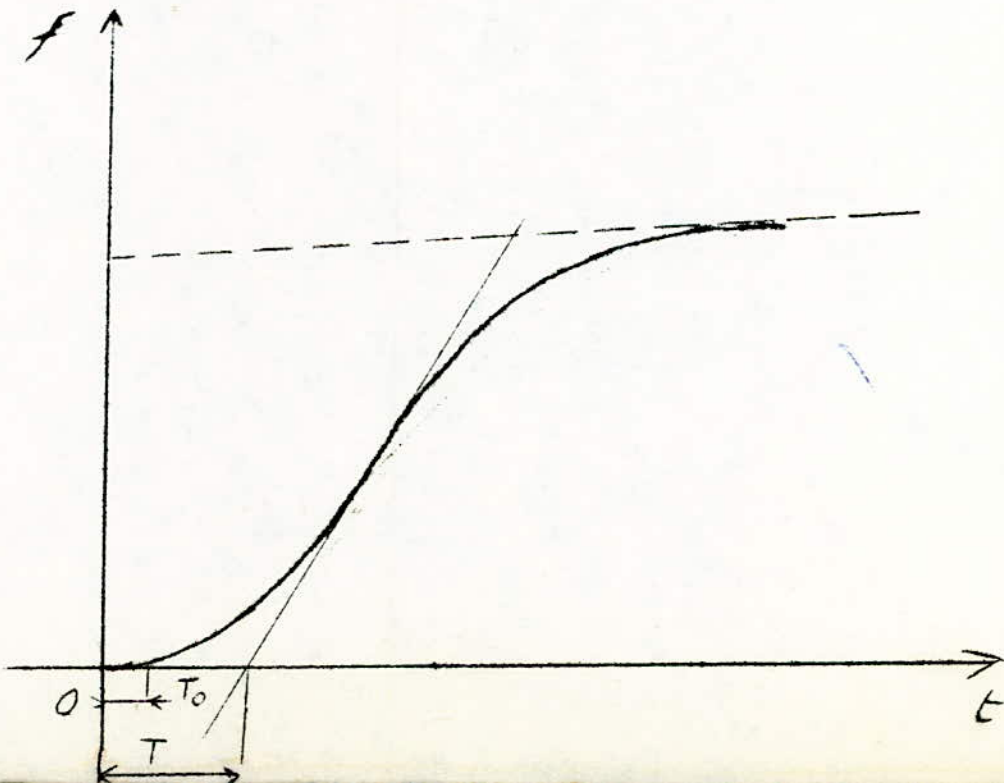
La chaîne de régulation d'humidité devient



la fonction de transfert :

$$F(p) = \frac{K_p (1 + T_1 p) e^{-T_0 p}}{(1 + T_2 p)(1 + T_3 p)}$$

D'où la réponse indicielle :

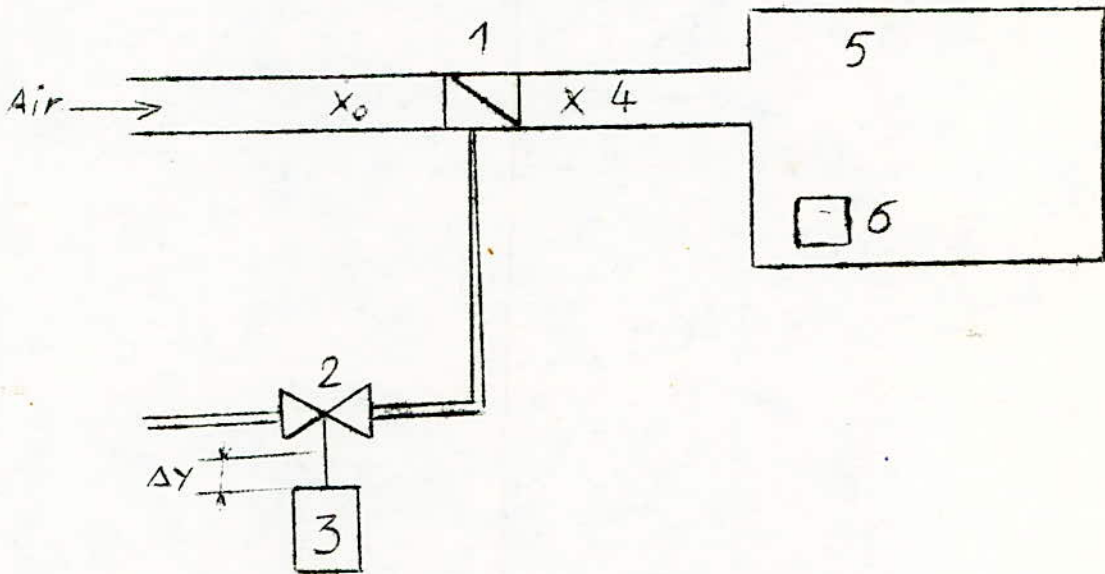


3.3. Etude expérimentale :

L'évaluation des performances de la chaîne asservie nécessite des essais en vue de pouvoir effectuer une commande en connaissance de cause.

Cette méthode consiste à prendre l'objet de régulation avec tous les éléments présentant un retard appréciable en boucle ouverte et de visualiser le comportement dans le temps de la grandeur de sortie lorsqu'on soumet son entrée à un signal échelon, ceci concerne le mode de passage d'un état à un autre.

Soit l'objet de régulation suivant :



1. Echangeur
2. Vanne
3. Servo-moteur
4. Gaine
5. Local
6. Thermomètre

3.3.2. Mode opératoire :

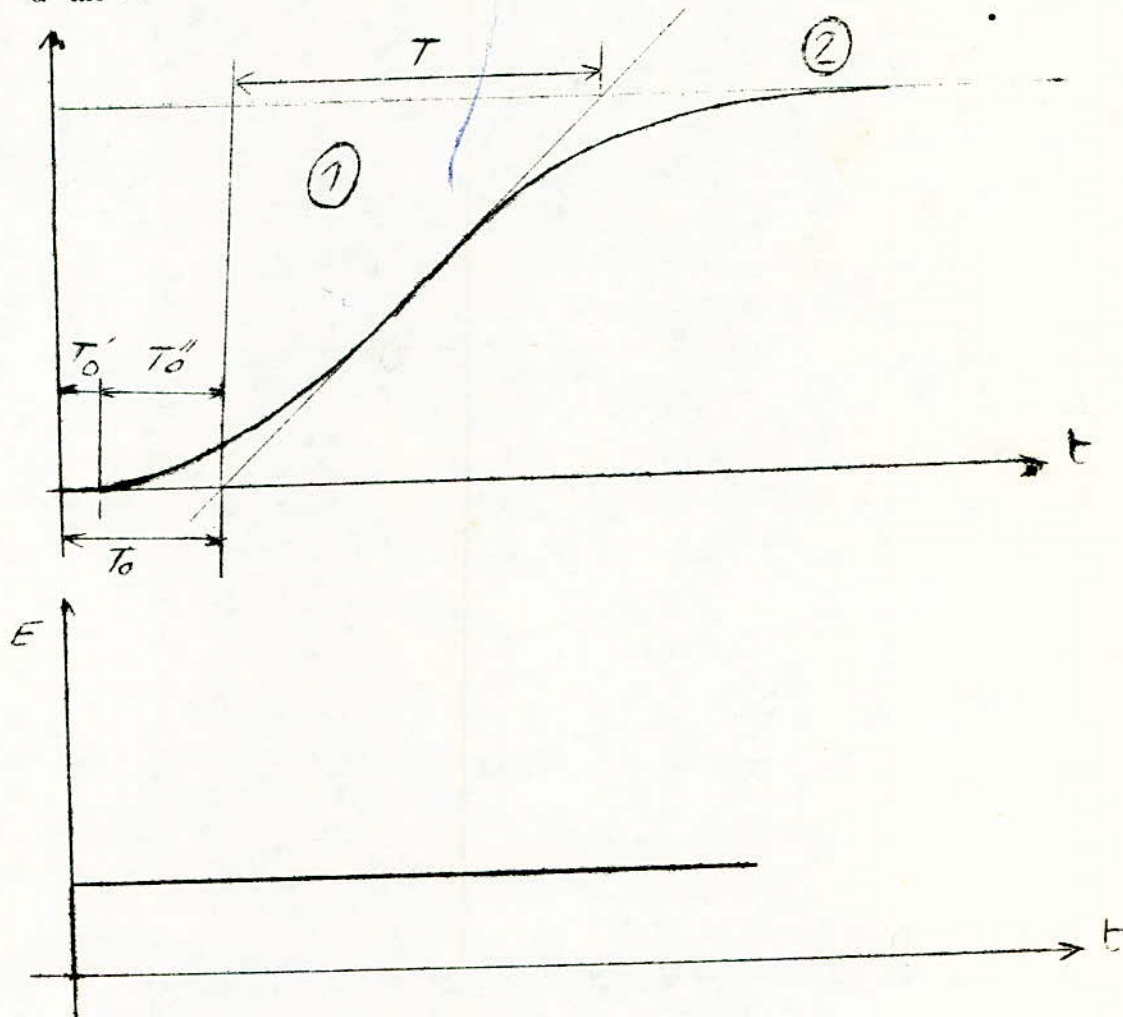
Tout d'abord on installe des capteurs et des appareils de mesure du paramètre X (T° ou H) et Dy variation de position de l'axe de la vanne.

Le changement de la position de la vanne entraîne un changement du débit du fluide refroidissant ou chauffant de l'échangeur ce qui fait varier les paramètres de l'air.

Puis relever le changement de position de la vanne et mesurer les valeurs de la température ou d'humidité toutes les 15 secondes,

puis toutes les 30 secondes et enfin toutes les 60 secondes en les regroupant dans un tableau de mesure. Et enfin on trace la réponse indicielle qui nous renseigne sur les caractéristiques statiques et dynamiques.

La courbe est presque toujours une courbe de la forme de d'un S



1° Zone des propriétés dynamiques

2° Zone des propriétés statiques

T_0' (s) temps mort naturel

T_0'' (s) temps mort artificiel

T_0 (s) temps mort total

La caractéristique étant tracée, il va falloir lui associer un modèle mathématique. Pour cela on utilise des méthodes approximatives :

- . Méthode de STREJC
- . Méthode Simplifiée

Le modèle ainsi défini est déduit d'essais temporels, on lui attribue une fonction de transfert qui n'est certes pas la fonction de transfert du système réel mais peut jouer le rôle de la F.T équivalente en vue d'éventuelles études sans réserve d'une certaine approximation.

3.3.3. Méthode de STREJC :

C'est une méthode pratique permettant de passer du domaine fréquentielle dans le cas d'une chaîne asservie dont réponse indicielle ne comporte pas de sur-oscillation, c'est-à-dire un régime apériodique. Elle est utilisée dans la plupart des systèmes thermiques.

La chaîne étant une chaîne présentant un temps de retard par T_0 et dont la transmittance exprimée en fonction de la variable complexe comporte une constante au numérateur et un polynôme à racines réelles négatives au dénominateur.

$$(1+pT_1)(1+pT_2)\dots\dots\dots(1+pT_n)$$

STREJC propose le remplacement de

$$(1+pT_1)(1+pT_2)\dots\dots\dots(1+pT_n) = (1+pT)^n$$

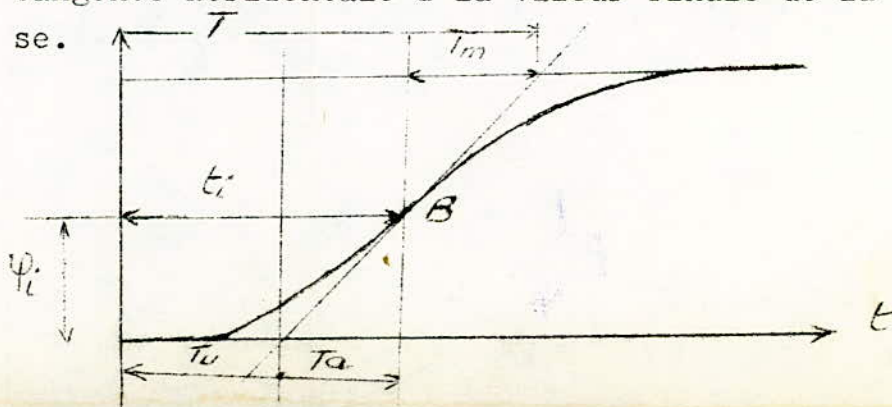
ou T est une constante de T prise entre la plus forte et la plus faible des constantes de temps de la chaîne.

Donc la fonction de transfert est alors

$$H(p) = \frac{K_{ob} e^{-pT_0}}{(1+pT)^n}, \quad K_{ob} = \text{gain statique}$$

La réponse indicielle étant enregistrée fig. 1.

Premièrement, on trace la tangente au point d'inflexion de la courbe, en second lieu, on *mène* la tangente horizontale à la valeur finale de la réponse.



L'exposant est déterminé une fois T_u et T_a relevé et en utilisant le tableau suivant :

n	T_a/T	T_u/T	T_u/T_a	T_i/T	$I = \varphi_i$
1	1	0	0	0	0
2	2,718	0,28	0,104	1	0,264
3	3,695	0,80	0,218	2	0,323
4	4,463	1,42	0,319	3	0,353
5	5,119	2,10	0,410	4	0,371
6	5,699	2,81	0,493	5	0,384
7	6,226	3,54	0,570	6	0,394
8	6,711	4,307	0,642	7	0,401
9	7,164	5,081	0,709	8	0,407
10	7,590	5,869	0,773	9	0,413

T_i = Représente le temps entre le point d'analyse et B (point d'inflexion)

φ_i = valeur relative de la fonction de 0 à B

$T_u = T'_0 + T''_0$ Temps mort total provenant de la réponse indicielle

T'_0 = temps mort naturel

T''_0 = temps mort artificiel

$T_p = T_u + T_a$

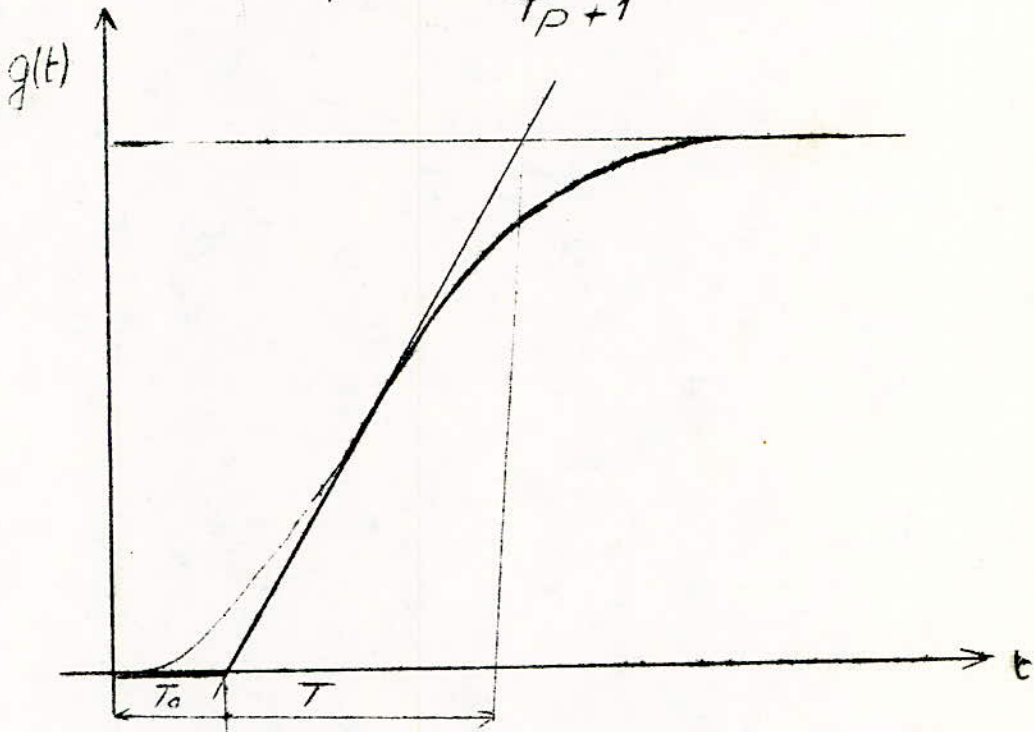
Il existe des variantes visant une amélioration de la méthode.

La difficulté que présente cette méthode est la localisation du point d'inflexion.

3.3.4. Méthode simplifiée :

Elle consiste à assimiler la F.T du système à la F.T d'un système du premier ordre avec retard pur c'est-à-dire ayant pour

$$KG(p) = K_{ob} \frac{e^{-T_0 p}}{T_p + 1}$$



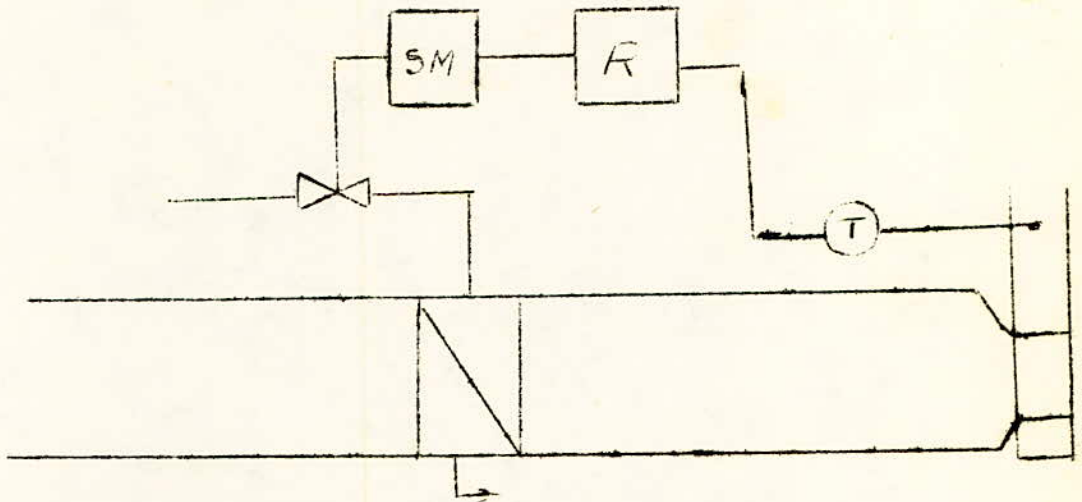
Dans cette méthode, on prend un temps de retard supérieur au temps de retard réel du système, ainsi nous considérons le système dans des conditions les plus défavorables. Si la stabilité du système est réalisée dans de telles conditions à foriori, elle sera encore meilleure dans les conditions réelles de travail.

4. Réalisation Technologique des boucles de réglage :

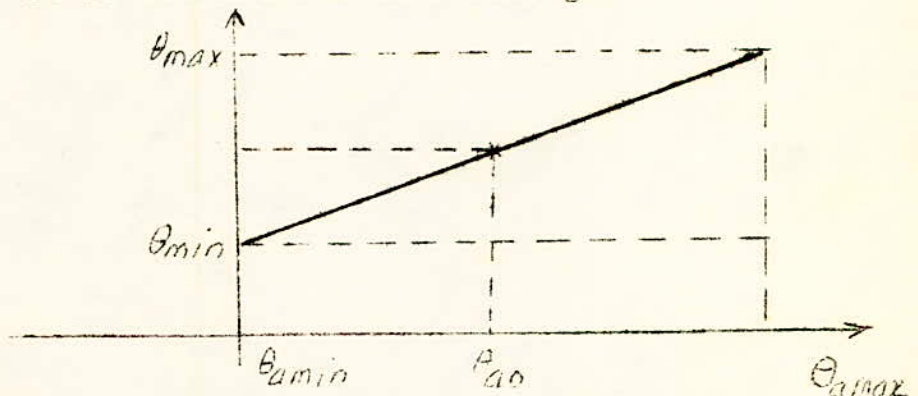
4.1. Régulation de la température :

Il existe beaucoup de possibilités de couplage des éléments pour agir sur la température.

4.1.1. Régulation de la température de l'air d'apport :



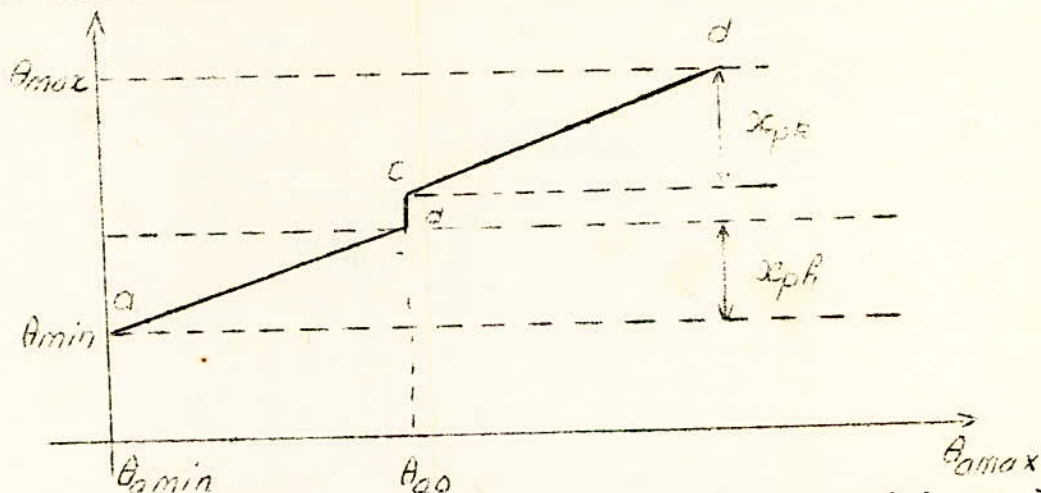
La température est maintenue constante dans une plage P pendant le fonctionnement en chauffage.



Un tel montage est utilisé lorsque la température d'un local est maintenue constante par un chauffage de base du local et que l'installation de ventilation ne doit apporter que l'air nécessaire au renouvellement. Dans ce cas là véritable grandeur perturbatrice serait la température extérieure.

Les conditions sont les mêmes pour la période été mais en introduisant un réfrigérateur en série avec le réchauffeur.

Selon le type de régulation, on peut donner une valeur de consigne (θ_{20}) qui doit correspondre à la charge la plus fréquente, de façon à obtenir l'écart minimal. Le fonctionnement est représenté sur la figure.

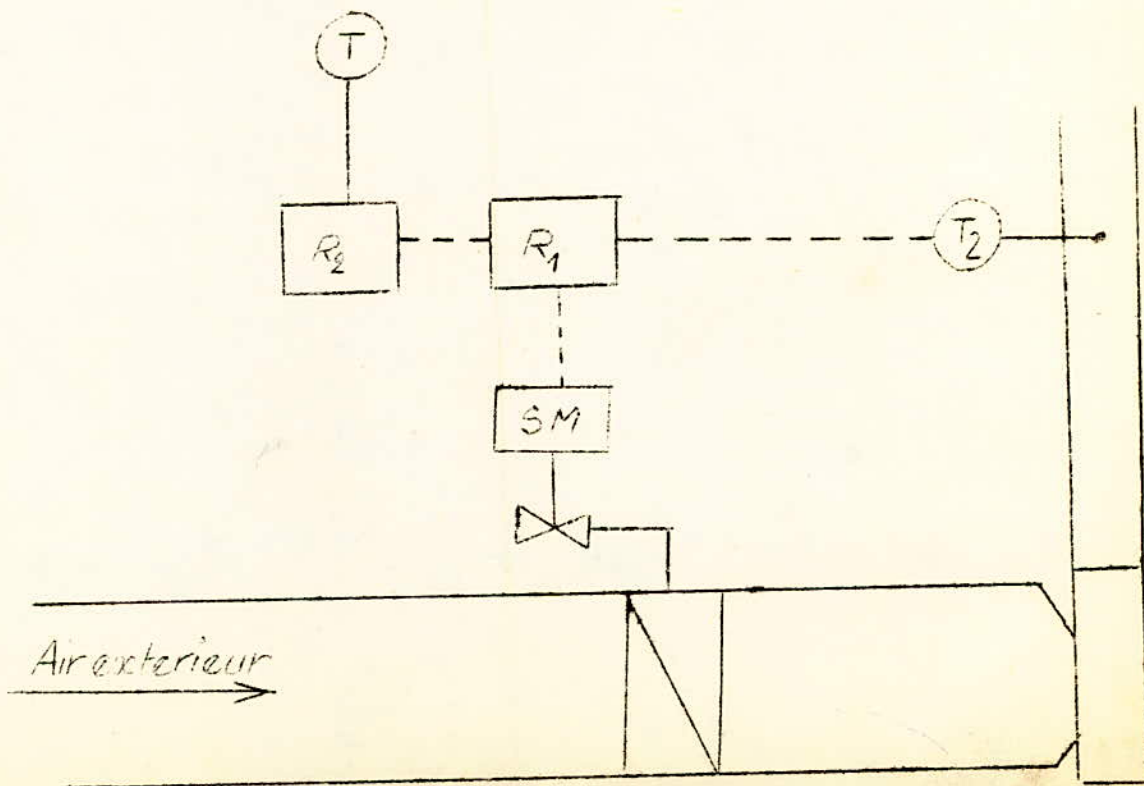


Ainsi si la température d'air d'apport est supérieure à (valeur de consigne) le régulateur agira sur la vanne du réfrigérateur et ramène la valeur θ_a à la valeur θ_{20} . Si par contre la température θ_a est inférieure à θ_{20} , le régulateur ouvre la vanne du réchauffeur et augmente la température jusqu'à la valeur θ_{20} .

Pour des raisons économiques les régulateurs sont couplés afin d'éviter le travail en opposition.

4.1.2. Régulateur de la température d'ambiance :

4.1.2.1. Réglage direct :



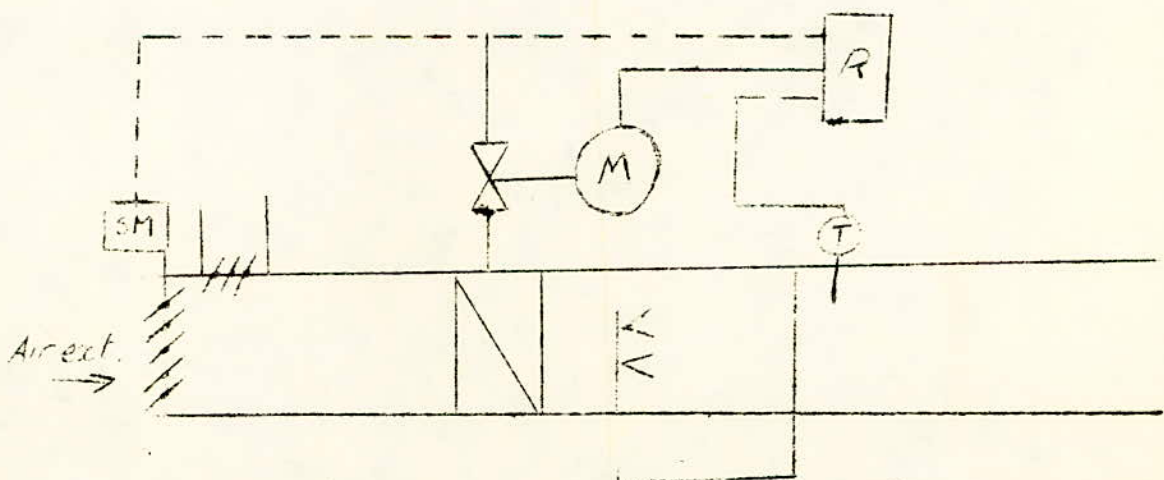
En choisissant comme grandeur de réglage la température de l'air dans le local, les caractéristiques statiques et dynamiques changent.

S'il y a un chauffage de base dans le local, il peut se produire le cas où les boucles de régulation s'influencent l'une sur l'autre et éventuellement en rafraîchissement, se produit un travail en opposition.

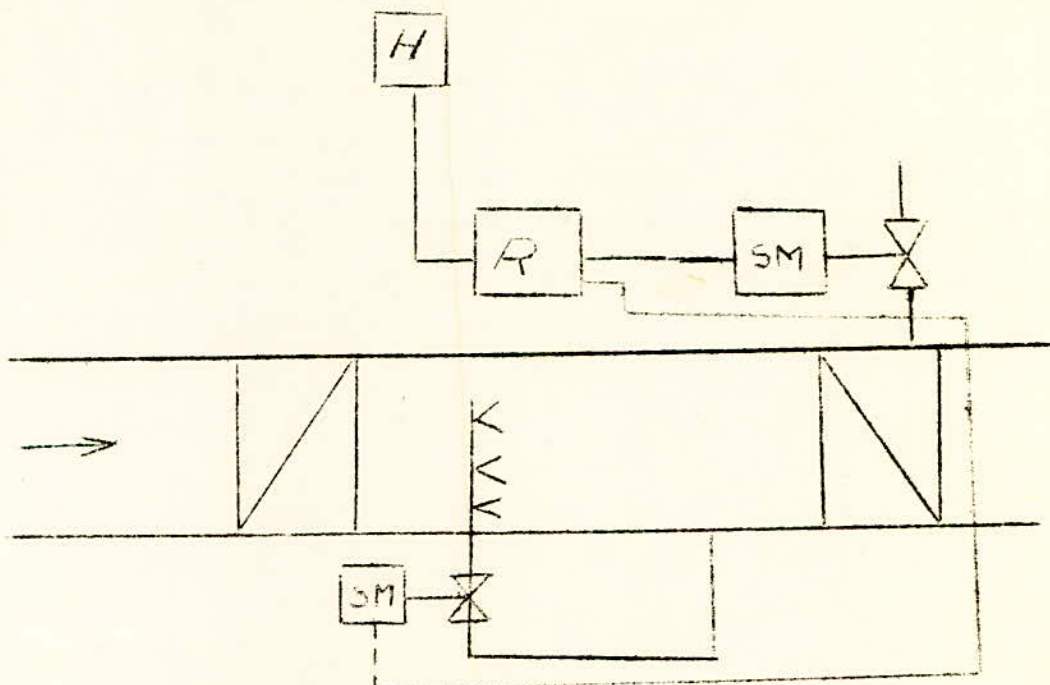
On prévoit une mise en service en cascade qui pour but l'amélioration de l'évolution de la grandeur de réglage. Ainsi la température de l'air peut améliorer par le régulateur R_1 actionné par le capteur T_2 de sorte qu'elle ne provoque aucune variation de température dans le local.

4.1.2.2. Réglage par point de rosée :

Dans cette méthode, on maintient constante la température derrière l'humidificateur. Dans ses conditions, d'après le diagramme (*H, θ*) l'humidité relative de l'air est définie par sa température. Au moyen d'un seul régulateur de température on maintient l'humidité constante dans les locaux. Par exemple pour une humidité relative 50 % et si l'on désire maintenir une température constante à 20 ° d'après le diagramme (*H, θ*) nous déduisons $T = 9,5^\circ\text{C}$. Ainsi, nous réglons la température du point de rosée à $9,5^\circ\text{C}$.



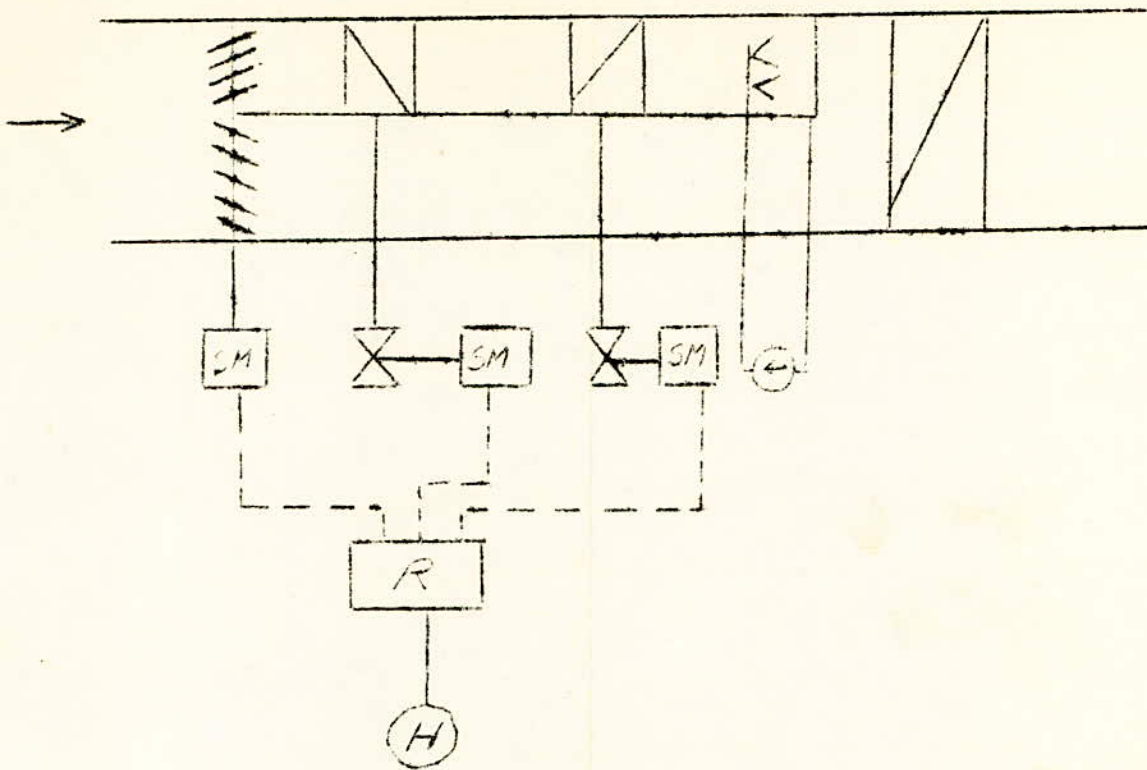
Si la température T est supérieure à $9,5^\circ\text{C}$, la sonde de température actionne le régulateur qui agira le servomoteur de la vanne du réfrigérant et la température baisse. On constate que la température du local n'est pas constante et dépend de la température extérieure, de même pour l'humidité.

4.2. Réglage de l'humidité :4.2.1. Réglage direct :

Un hygrostat est placé dans le local où l'on désire maintenir une certaine valeur d'humidité. Lorsque l'humidité préréglée est dépassée, la vanne du réchauffeur s'ouvre et l'humidité baisse. Dans le cas où cette action n'est pas suffisante, la vanne du laveur se ferme à son tour. Dans le cas contraire, c'est-à-dire, l'humidité est inférieure à la valeur désirée, le servomoteur ferme la vanne du réchauffeur et si encore l'action n'est pas suffisante la vanne du laveur s'ouvre.

4.2.2. Réglage avec by-pass :

Même principe que précédemment sauf que cette fois on peut agir sur l'humidité en agissant sur les registres du by-pass.



Hygromètre actionne le régulateur quand l'humidité pré-réglée est dépassée ou n'est pas atteinte et le régulateur selon le cas agit sur le préchauffeur, soit le réfrigérateur, soit les registres du by-pass. Souvent cette régulation est combinée au réglage du point de rosée.

4.3. Conclusion :

Après examen de ces quelques possibilités de couplage, nous constatons que la régulation n'agit qu'en un point sur la grandeur de réglage. Donc le choix de ce point est très important surtout dans le local à climatisé car il faut tenir compte de toutes les particularités de ce local.

Si par exemple, le capteur d'humidité ou de la température se trouve près des diffuseurs d'air, la régulation travaille comme une régulation d'air d'apport et l'état d'air dans le local est fonction des perturbations. Si par contre le capteur est encastré dans un mur, la régulation peut être médiocre par suite des déperditions calorifiques.

5. Choix et mise au point des régulateurs5. 1. Caractéristiques des régulateurs5.1.1. Définition d'un régulateur :

Un régulateur a pour fonction essentielle de comparer le signal de mesure à une valeur assignée à la grandeur mesurée en vue d'élaborer un signal d'action. Ce signal est utilisé pour agir par un servomoteur sur les organes de réglage réalisant l'asservissement d'une grandeur réglante dont l'ajustement à une valeur donnée doit permettre de ramener la grandeur mesurée à sa valeur de consigne.

5.1.2. Différents types de régulateurs5.1.2.1. Régulateur proportionnel :

L'action proportionnelle est un mode de régulation dont la grandeur de sortie est proportionnelle à tout moment à la grandeur d'entrée

a) Fonction de transfert :

$$x_s(t) = k_p x_e(t)$$

sous forme opérationnelle, en utilisant la transformée de la place, on aura

$$X_s(p) = k_p X_e(p) \Rightarrow \frac{X_s(p)}{X_e(p)} = k_p$$

b) Réponse indicielle :

En appliquant à l'entrée une variation brusque c'est-à-dire

$$x_e = \begin{cases} 0 & \text{pour } t < 0 \\ 1 & \text{" } t > 0 \end{cases}$$

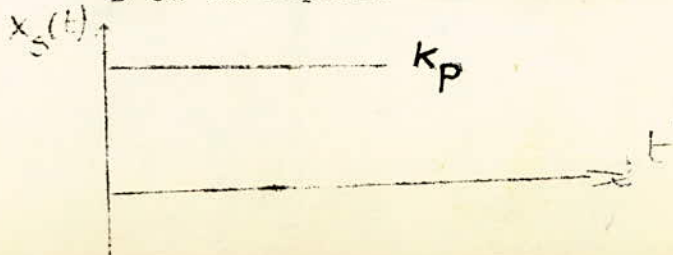
Sachant que

$$\mathcal{L}\{x(t)\} = \frac{1}{p}$$

Alors

$$X_s(p) = k_p \cdot \frac{1}{p}$$

D'où la réponse indicielle d'un régulateur P Fig.



5.1.2.2. Régulateur à action intégrale :

L'action intégrale est un mode de régulation dans lequel le signal de sortie est proportionnel à l'intégrale du signal d'entrée.

$$x_s(t) = K \int_0^t x_e(t) dt$$

a) Fonction de transfert :

$$x_s(t) = K \int_0^t x_e(t) dt$$

Sous forme opérationnelle

$$x_s(p) = \frac{K}{p} x_e(p) \Rightarrow \frac{x_s(p)}{x_e(p)} = \frac{K}{p}$$

On définit le temps d'intégration T_i comme étant l'inverse de K : $T_i = \frac{1}{K}$

D'où
$$F(p) = \frac{1}{T_i \cdot p}$$

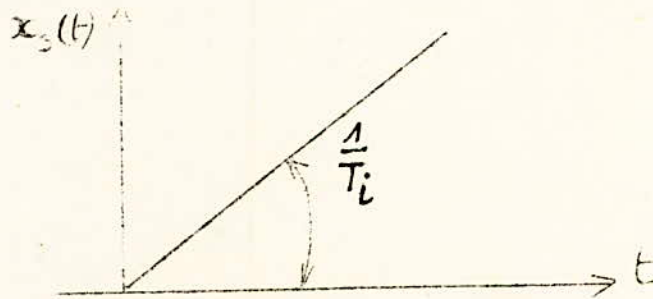
b) Réponse indicielle =

On soumet le système à l'échelon unité : $x_e(p) = \frac{1}{p}$

$x_s(p) = \frac{1}{T_i \cdot p^2}$, d'où la transformée inverse :

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{x_s(p)\right\} = \frac{1}{T_i} t \text{ puisque } \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{p^2}\right\} = t$$

la sortie varie linéairement en fonction du temps selon le graphe Fig.



5.1.2.3. Régulation à action intégrale et proportionnelle PI

C'est la combinaison additive d'une action proportionnelle et une action intégrale

$$x_s(t) = K_p x_e(t) + K \int_0^t x_e(t) dt$$

a) Fonction de transfert :

$$x_s(t) = K_p x_e(t) + K \int_0^t x_e(t) dt$$

sous forme opérationnelle

$$X_s(p) = K_p X_e(p) + K_c$$

$$X_s(p) = K_p \left(X_e(p) + K_I X_e(p) \cdot \frac{1}{p} \right), \text{ En posant } K = K_I \cdot K_p \Rightarrow X_s(p) = K_p X_e(p) \left[1 + \frac{K_I}{p} \right]$$

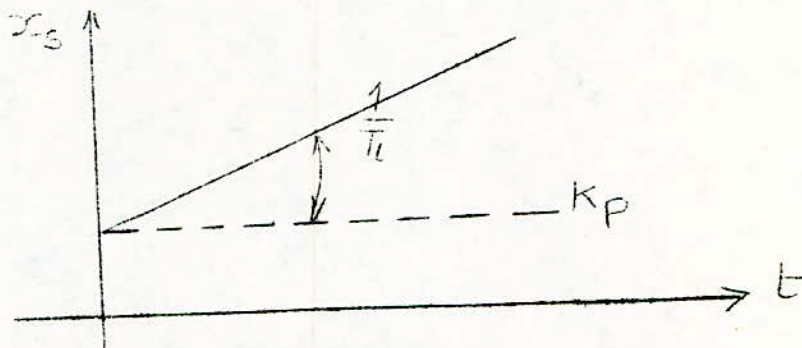
$$\frac{X_s(p)}{X_e(p)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot p} \right) \text{ avec } T_i = \frac{1}{K_I}$$

b) Réponse indicielle :

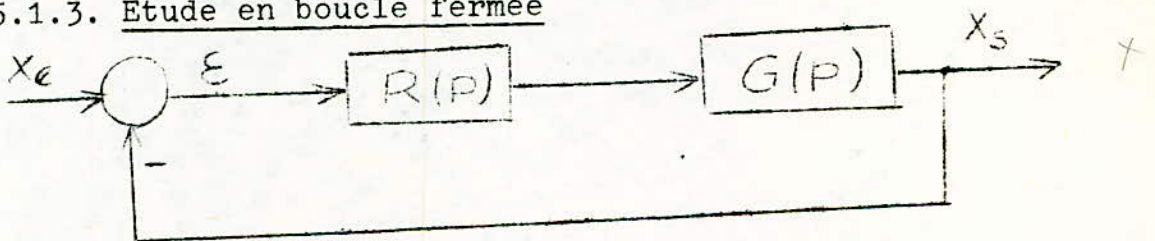
$$X_s(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right) X_e(p) = \frac{K_p}{p} + \frac{K_p}{T_i p^2}$$

$$\mathcal{L}^{-1} \{ X_s(p) \} = K_p \left(1 + \frac{t}{T_i} \right)$$

d'où la réponse indicielle du régulateur PI



5.1.3. Etude en boucle fermée



Soit le schéma bloc ci-dessus à retour unitaire et

$R(p)$: Représente la fonction de transfert du régulateur

$G(p)$: Fonction de transfert du processus

5.1.3.1. Régulateur proportionnel :a) Fonction de transfert :

$$X_s(p) = E(p) \cdot R(p) \cdot G(p) = R(p) \cdot G(p) [X_e(p) - X_s(p)]$$

$$F(p) = \frac{X_s(p)}{X_e(p)} = \frac{R(p) \cdot G(p)}{1 + R(p) \cdot G(p)}$$

Dans ce cas : $R(p) = K_p$

$$G(p) = \frac{K_{ob} e^{-T_0 p}}{1 + T_p p} \quad \text{déterminé au chapitre 3}$$

$$F(p) = \frac{K_p K_{ob} e^{-T_0 p}}{K_p K_{ob} e^{-T_0 p} + (1 + T_p p)} = \frac{K_p K_{ob} e^{-T_0 p}}{K_p K_{ob} e^{-T_0 p} + (1 + T_p p)}$$

b) Ecart permanent :

L'erreur statique est l'écart entre l'entrée et la sortie quand le régime définitif est atteint, c'est-à-dire quand $t \rightarrow \infty$

$$E(p) = X_e(p) - X_s(p) = X_e(p) \left[1 - \frac{X_s(p)}{X_e(p)} \right]$$

$$E(p) = X_e(p) \left[1 - \frac{R(p) \cdot G(p)}{1 + R(p) \cdot G(p)} \right] = \frac{1}{1 + R(p) \cdot G(p)} \cdot X_e(p)$$

de la même manière, on remplace les transmittances par leurs expressions en sachant qu'on applique à l'entrée l'échelon unité :

$$X_e(p) = \frac{1}{p} \quad \text{alors :}$$

$$E(p) = \frac{1}{1 + K_p \cdot \frac{K_{ob} \cdot e^{-T_0 p}}{1 + T_p p}} \cdot \frac{1}{p} = \frac{1 + T_p p}{p(1 + T_p p + K_p K_{ob} \cdot e^{-T_0 p})}$$

L'écart permanent est donc

$$E_0(p) = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot E(p)$$

$$E_0(p) = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1 + T_p p}{(1 + T_p p + K_p K_{ob} \cdot e^{-T_0 p})} = \frac{1}{1 + K_p K_{ob}}$$

En prenant $K_0 = K_p \cdot K_{ob}$, l'écart permanent devient

$$E_0 = \frac{1}{1 + K_0}$$

D'où l'écart permanent est inversement proportionnel à K_0 .

5.1.3.2. Régulateur à action intégrale :a) Fonction de transfert en boucle fermée :

$$F(p) = \frac{R(p) \cdot G(p)}{1 + R(p) \cdot G(p)}, \quad R(p) = \frac{1}{T_i p}, \quad G(p) = \frac{K_{ob} e^{-T_0 p}}{1 + T_p p}$$

En remplaçant des transmittances par leurs valeurs :

$$F(p) = \frac{\frac{1}{T_i p} \cdot \frac{K_{ob} \cdot e^{-T_0 p}}{1 + T_p p}}{1 + \frac{K_{ob} \cdot e^{-T_0 p}}{1 + T_p p} \cdot \frac{1}{T_i p}} = \frac{K_{ob} \cdot e^{-T_0 p}}{(1 + T_p p) T_i + K_{ob} \cdot e^{-T_0 p}}$$

b) Ecart permanent :

$$E(p) = X_d(p) - X_c(p) = \frac{1}{1 + \frac{1}{T_i p} \cdot \frac{K_{ob} e^{-T_0 p}}{1 + T_p p}}$$

$$E(p) = \frac{T_i \cdot p (1 + T_p p)}{K_{ob} e^{-T_0 p} + T_i \cdot p (1 + T_p p)} X_d(p)$$

L'écart permanent est alors :

$$\lim_{p \rightarrow 0} p \cdot E(p) = \lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t)$$

En appliquant un échelon unité à l'entrée,

$$X_d(p) = \frac{1}{p} \quad \text{l'écart devient :}$$

$$E(p) = \frac{T_i \cdot p (1 + T_p p)}{K_{ob} \cdot e^{-T_0 p} + T_i \cdot p (1 + T_p p)} \cdot \frac{1}{p}$$

$$E_0(p) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot E(p) = 0$$

Le régulateur à action intégrale permet d'éliminer l'erreur permanente.

5.1.3.3.3 Régulateur PI :a) Fonction de transfert :

$$F(p) = \frac{R(p) \cdot G(p)}{1 + R(p) \cdot G(p)}$$

La transmittance du régulateur PI est :

$$R(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot p} \right)$$

La fonction de transfert devient :

$$G(p) = \frac{K_P \left(1 + \frac{1}{T_I p}\right) \frac{K_{ob} \mathcal{Q}^{-T_0 p}}{1 + T_D p}}{1 + K_P \left(1 + \frac{1}{T_I p}\right) \frac{K_{ob} \mathcal{Q}^{-T_0 p}}{1 + T_D p}} = \frac{K_P T_I K_{ob} p \mathcal{Q}^{-T_0 p}}{K_P T_I K_{ob} p \mathcal{Q}^{-T_0 p} + T_I p (1 + T_D p)}$$

V. 213.2 Ecart permanent :

$$E(p) = \frac{1}{1 + R(p) \cdot G(p)} \cdot X_e(p) = \frac{(1 + T_D) \cdot T_L \cdot p}{T_I p (1 + T_D) + K_P T_I p \mathcal{Q}^{-T_0 p} K_{ob}} X_e(p)$$

$$E(p) = \frac{T_I p (1 + T_D)}{T_I p (1 + T_D) + K_P T_I K_{ob} p \mathcal{Q}^{-T_0 p}} \cdot X_e(p)$$

Toujours en appliquant à l'entrée un échelon

$$E_0 = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot E(p) = \frac{T_I p (1 + T_D) p}{T_I p (1 + T_D) + K_P T_I K_{ob} \mathcal{Q}^{-T_0 p} p} = 0$$

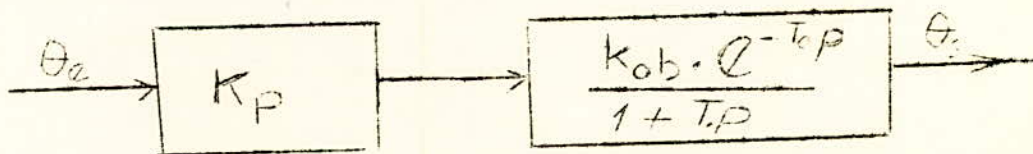
Comme précédemment le régulateur intégrale annule l'écart permanent.

En conclusion, au point de vue écart permanent, le régulateur intégrale est meilleur du fait il ne subsiste aucun écart permanent après le régime transitoire.

5.2. Calcul et mise au point des régulateurs :

5.2.1. Régulateur proportionnel de température :

On place le mécanisme du régulateur sur le comportement P seulement.



Ainsi, on peut calculer facilement d'une manière approchée l'amplification critique de la boucle pour un régulateur P. Elle dépend du rapport de la constante de temps T au temps mort T_0 .

Pour cela nous disposons du diagramme de stabilité Fig. 5.1

Etant donné que nous n'avons pas pu effectuer les essais prévus sur l'objet de régulation afin de déterminer les constantes exactes de l'objet, nous avons pris les valeurs les plus probables dans des atlas des propriétés dynamiques.

a) Dans le local climatisé :

$$\begin{aligned} T &= 1200 \text{ S} \\ T_0 &= 120 \text{ S} \end{aligned} \quad K_{ob} = 0,2^\circ\text{C}$$

Nous avons dans ce cas : $\frac{T_0}{T} = 0,1$

En utilisant le graphe , nous obtenons la plage de stabilité suivante

$$3 \leq K_0 \leq 15$$

or $K_0 = K_p \cdot K_{ob} \Rightarrow K_p = \frac{K_0}{K_{ob}}$ d'où la bande proportionnelle du régulateur $15 \leq K_p \leq 75$

Le coefficient d'amplification du régulateur doit être compris entre 15 et 75 pour que le système soit stable.

Néanmoins, avec un tel régulateur, il subsistera toujours un écart permanent compris entre

$$\frac{1}{1+4} = 0,2 \text{ et } \frac{1}{1+15} = 0,05$$

$$0,05 < E_0 < 0,2$$

b) Central de climatisation :

$$\begin{aligned} T_0 &= 25 \text{ S} \\ T &= 150 \text{ S} \\ K_{ob} &= 0,5^\circ\text{C}/\% \end{aligned}$$

Nous constatons que le temps de retard est inférieur à celui enregistré dans le local, ceci est dû à la gaine et le capteur.

De même pour le local, nous déterminons le régulateur en fonction de $\frac{T_0}{T} = 0,16$

D'après le Fig. 5.1 nous obtenons $2 < K_0 < 10$

D'où $4 < K_p < 20$

Erreur permanente

$$0,1 < E_0 < 0,6$$

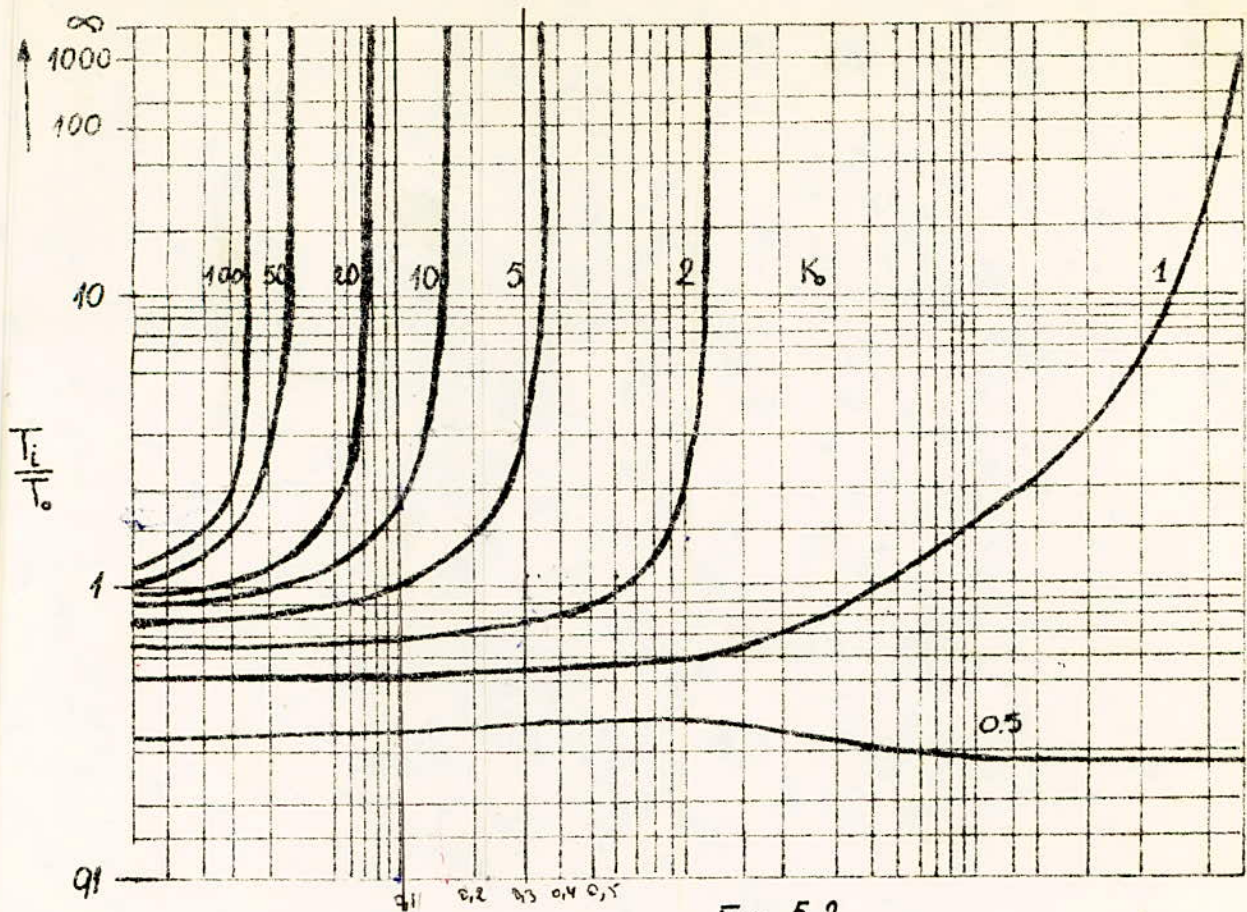


Fig. 5.2

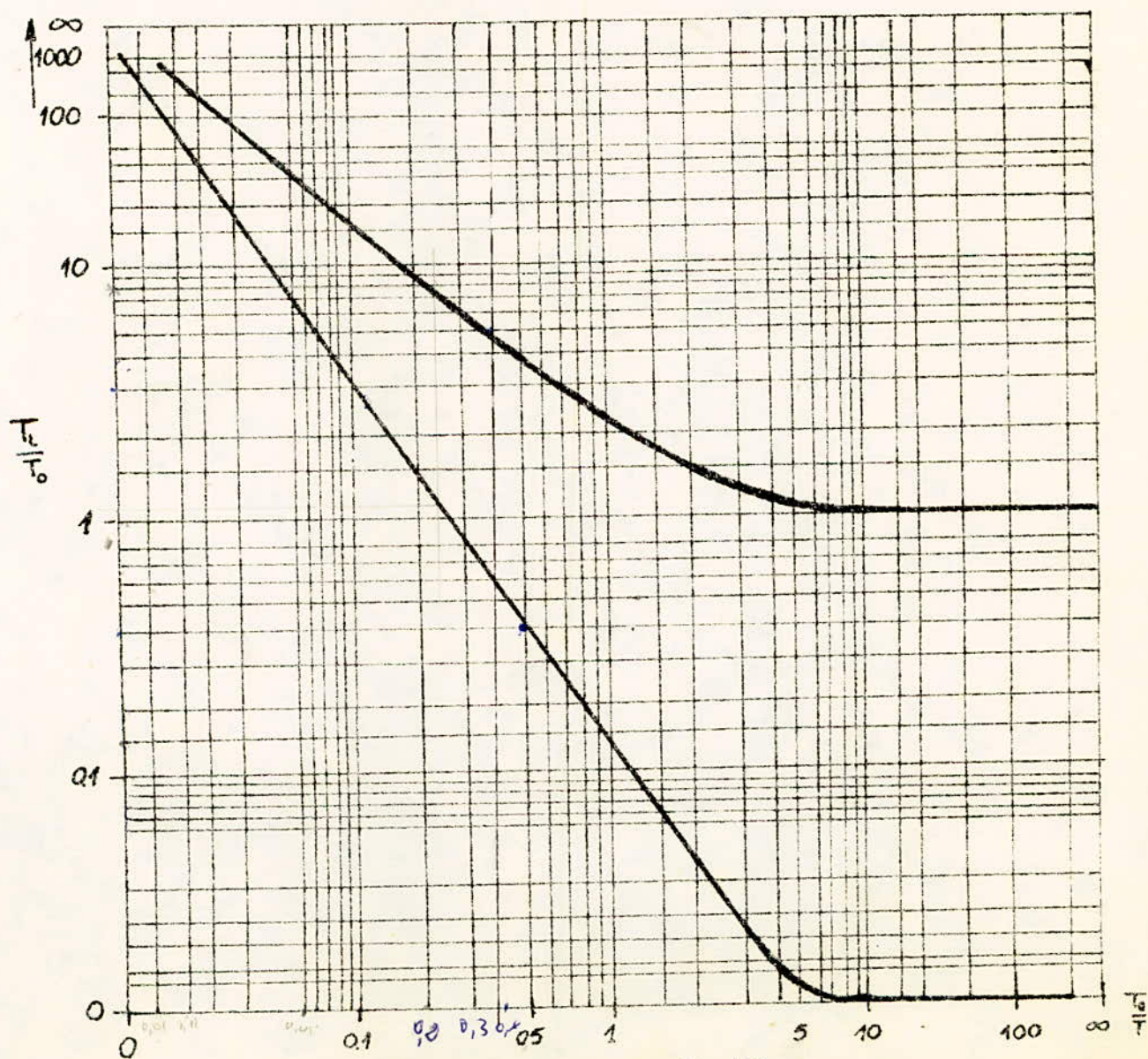


Fig 5.1

5.2.2. Régulateur proportionnel de l'humidité :a) Dans le local :

$$T_0 = 150 \text{ S}$$

$$T = 1000 \text{ S}$$

$$K_{ob} = 1\%$$

de la même manière que précédemment

$$\frac{T_0}{T} = 0,15 \Rightarrow 2 \leq K_0 \leq 10$$

$$K_0 = K_p K_{ob} \Rightarrow 4 \leq K_p \leq 20$$

5.2.3. Régulateur P.I de Température :a) Dans le local :

$$T_0 = 120 \text{ S}$$

$$T = 1200 \text{ S}$$

$$K_{ob} = 0,2$$

Nous utilisons pour la détermination du PI, la caractéristique de stabilité Fig. 5.2

Elle est donnée aussi en fonction de $\frac{T_0}{T}$

Dans ce cas : $\frac{T_0}{T} = 0,1 \Rightarrow 10 \leq K_0 \leq 20$

par extrapolation linéaire, on a déduit que $K_0 = 16$

$$K_r K_{ob} = K_0 \Rightarrow K_r = \frac{16}{0,2} = 80$$

le coefficient d'amplification du régulateur $K_r = 80$

D'après le diagramme de stabilité, il faut que :

$\frac{T_i}{T_0} < 4$ pour que le système soit stable.

$$\text{Donc } T_i \leq 4 T_0 \Rightarrow \frac{T_i}{T} < \frac{4 \times 120}{1200} = 0,4$$

Afin d'assurer la stabilité, il faut que $\frac{T_i}{T} \leq 0,4$

b) Dans la centrale de climatisation :

$$T_0 = 25 \text{ S}$$

$$T = 150 \text{ S}$$

$$K_{ob} = 0,5^\circ\text{C}/\%$$

La même remarque que dans l'étude théorique, le temps de retard est surtout dû à la gaine.

$$\frac{T_0}{T} = 0,15 \Rightarrow 10 < K_0 < 20$$

par extrapolation linéaire on trouve $K_0 = 11$

le système est stable pour $\frac{T_1}{T_0} \leq 5$

$$T_1 \leq 5T_0 \Rightarrow T_1 \leq 1255$$

Donc $\frac{T_1}{T} \leq 0,83$

5.2.4. Régulation P.I de l'humidité :

a) Dans le local climatisé :

$$T_0 = 150 \text{ s}$$

$$T = 1000 \text{ s}$$

$$K_{ob} = 1\%$$

$$\frac{T_0}{T} = 0,15 \Rightarrow 10 \leq K_0 \leq 20$$

par extrapolation linéaire on trouve $K_0 = 11$

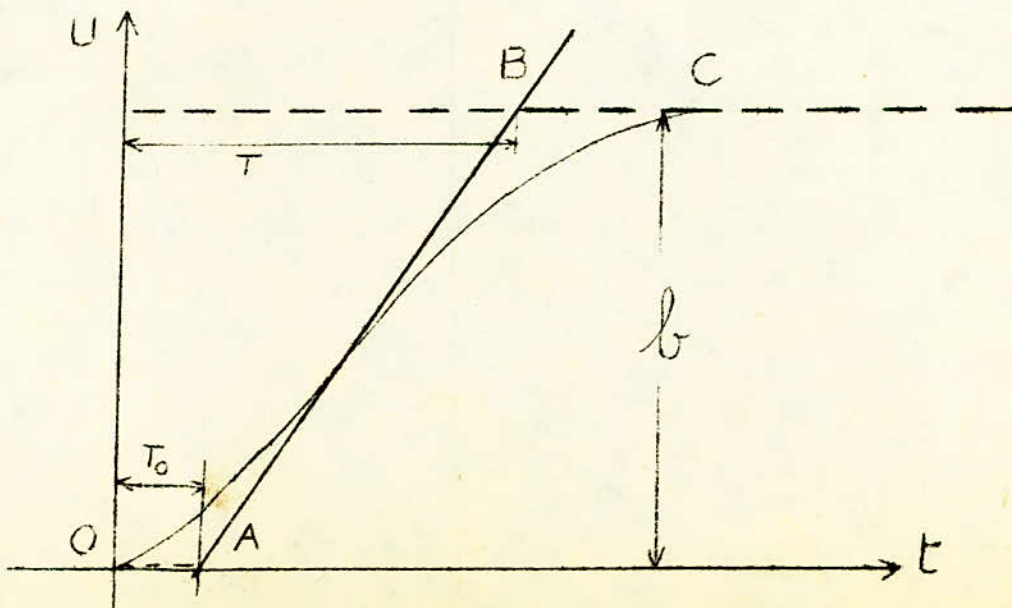
le système est stable pour $\frac{T_1}{T_0} \leq 5$

$$T_1 \leq 5T_0 \quad T_1 \leq 1255 \text{ s} \quad \text{et} \quad \frac{T_1}{T} \leq 0,83$$

5.3. Etude de la stabilité :

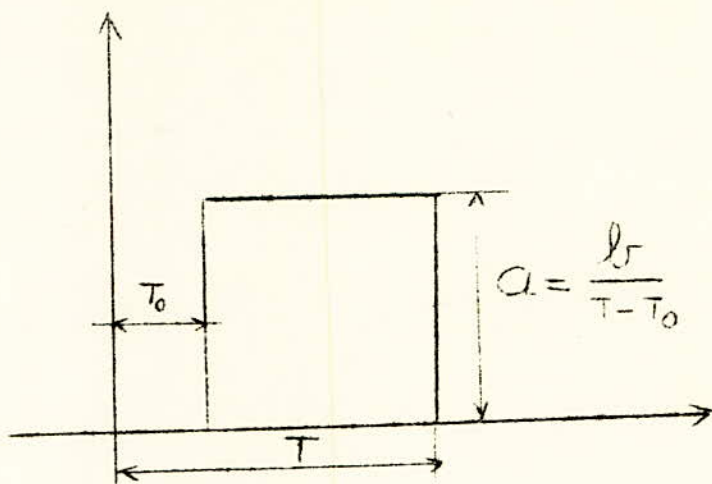
5.3.1. Généralités :

Etant donné la réponse indicielle obtenue par enregistrement direct en boucle ouverte



En traçant la tangente au point d'inflexion et en la remplaçant par les tronçons OA, AB et BC, on facilite le calcul des dérivés.

D'où la dérivé de la réponse indicielle a la forme rectangulaire suivante :



$$h(t) = \frac{dU(t)}{dt} = aY(t-T_0) - aY(t-T)$$

en appliquant le théorème du retard

$$H(p) = \frac{a}{p} [e^{-pT_0} - e^{-pT}] \text{ avec } p = j\omega$$

$$H(j\omega) = \frac{a}{\omega} [(\sin \omega T_0 - \sin \omega T) + j(\cos \omega T_0 - \cos \omega T)]$$

La partie réelle $R(\omega) = \frac{a}{\omega} (\sin \omega T_0 - \sin \omega T)$

imaginaire $X(\omega) = \frac{a}{\omega} (\cos \omega T_0 - \cos \omega T)$

or la stabilité exige que pour un déphasage π .

L'intersection de la courbe avec l'axe des réels

le gain se confondant avec la partie réelle soit inférieur à l'unité en module

$$\cos \omega T_0 - \cos \omega T = 2 \sin \frac{\omega(T-T_0)}{2} \sin \frac{\omega(T_0+T)}{2}$$

comme la phase de $\sin(\frac{T_0+T}{2})$ varie plus vite que celle de $\sin(\frac{T-T_0}{2})$ donc c'est elle qui sera à l'origine au 1er point d'intersection :

$$\omega \left(\frac{T_0+T}{2} \right) = \pi \quad \omega = \frac{2\pi}{T_0+T}$$

$$R(\omega) = \frac{a}{\omega} 2 \sin \frac{\omega(T-T_0)}{2} \cos \frac{\omega(T+T_0)}{2}$$

$$= - \frac{2a}{\omega} \sin \left(\omega \frac{T-T_0}{2} \right)$$

en remplaçant ω par sa valeur :

$$b < \frac{1 - \frac{T_0}{T}}{1 + \frac{T_0}{T}} \frac{1}{\sin \left(\frac{1 - T_0/T}{1 + T_0/T} \pi \right)}$$

Nous remarquons que la stabilité est fonction de τ_0/T d'une part et qu'un retard important ne peut être contre balancer que par une augmentation du temps de montée qui caractérisé par T.

5.3.2. Etude par la courbe Amplitude-phase :

C'est une méthode souvent employée pour définir le fonctionnement d'un système.

L'amplitude est portée en ordonnée et la phase en abscise. La réponse de fréquence d'un système comportant un nombre d'éléments dynamiques différents peut se calculer en utilisant les caractéristiques d'amplitude et de phase de chaque élément séparément.

Le critère de stabilité :

Si le retard de phase est inférieur à 180° à la fréquence la plus élevée pour laquelle l'amplitude est égale à 1, la boucle fermée est stable. Inversement, s'il est supérieur à 180° , le système est instable.

Tout d'abord, nous déterminons l'amplitude et la phase de l'objet sans gain statique.

$$G(p) = \frac{e^{-T_0 p}}{1 + T p} = G_1(p) \cdot G_2(p)$$

avec

$$G_1(p) = e^{-T_0 p}, \quad G_2(p) = \frac{1}{1 + T p}$$

la réponse de fréquence pour un élément à temps mort se calcule de la manière habituelle.

En remplaçant $p = j\omega$ nous aurons :

$$G_1 = e^{-j\omega T_0} = \cos \omega T_0 + j \sin \omega T_0$$

$$|G_1| = 1 \text{ et la phase } \varphi_1 = -\omega T_0 \text{ (rd)}$$

$$G_2 = \frac{1}{1 + j\omega T} = \frac{1 - j\omega T}{1 + \omega^2 T^2}$$

$$|G_2| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}, \quad \varphi_2 = -\text{Arctg } \omega T$$

Nous obtenons finalement :

$$|G| = |G_1| \cdot |G_2| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}} = |G_2|$$

$$\varphi = -\varphi_1 + -\varphi_2 = -\omega T_0 (2d) - \text{Arctg } \omega T (2d)$$

D'où le tableau suivant pour $\frac{T_2}{T} = 0,4$

ωT	$ e^{-j\omega T} $	$ G_2 $	φ_1	φ_2	$ G(\omega) $	φ
0	1	1	0	0	1	0
0,5	"	0,8	- 3	- 26,5	0,8	-29,5
1	"	0,7	- 6	- 45	0,7	-51
2	"	0,44	- 12	- 63	0,44	-75
4	"	0,24	- 24	- 75	0,24	-99
8	"	0,12	- 48	- 82	0,12	-130
16	"	0,06	- 96	- 86	0,06	-182
32	"	0,03	- 182	- 88	0,03	-260

5.3.2.1. REGULATEUR P

Après avoir obtenu le tableau nous traçons les graphes correspondant fig.5.3

En utilisant les valeurs limites de la constante du régulateur P assurant la stabilité du système, nous déterminons la bande proportionnelle du régulateur P. C'est la zone comprise entre les courbes 2 et 3 du graphe 5.3

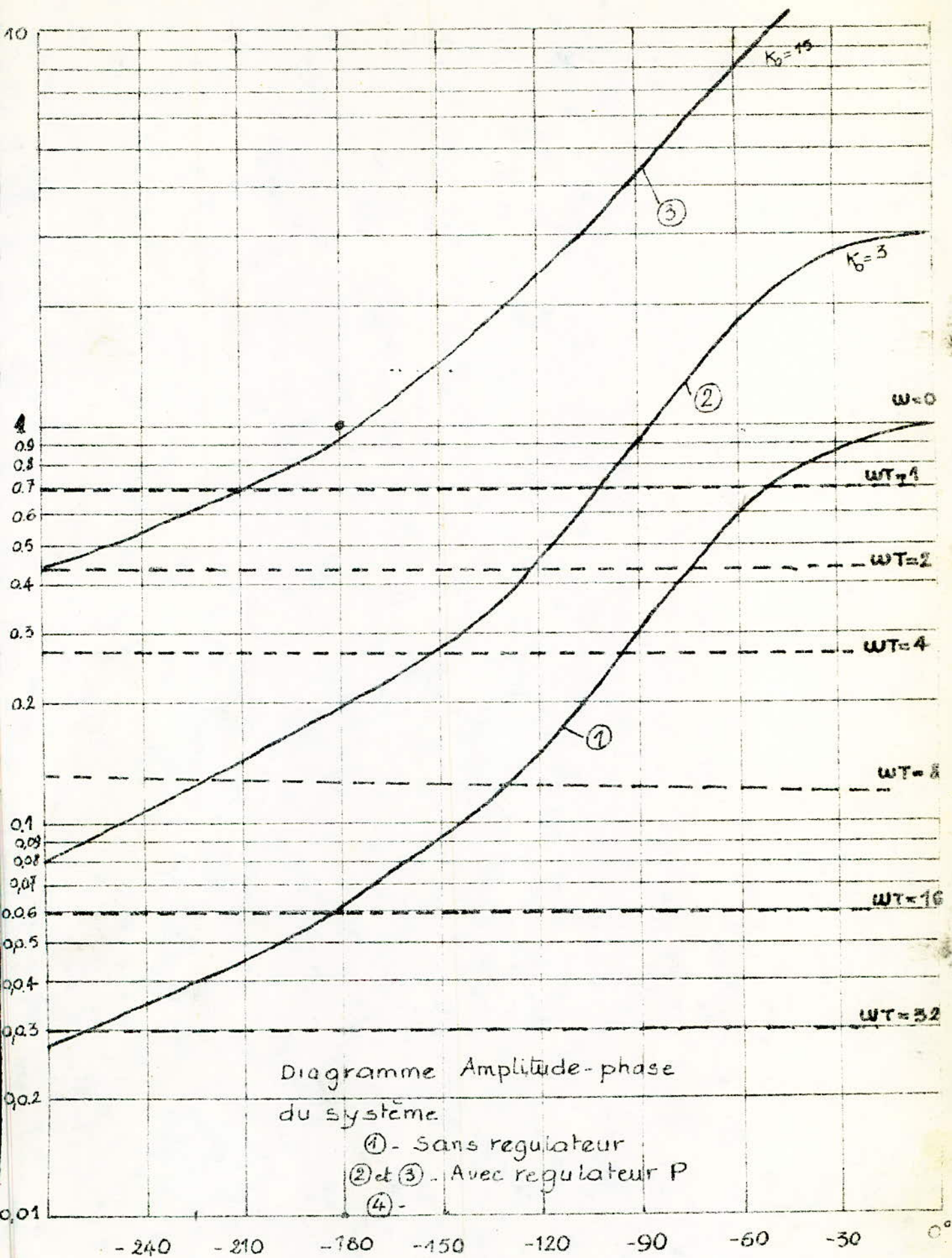


Fig: 5.3

5.3.2.2. Régulateur PI :

Même analyse que précédemment sauf que cette fois-ci nous avons la transmittance suivante du régulateur :

$$G_3(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I p} \right)$$

en remplaçant $p = j\omega \Rightarrow G_3 = K_p \left(1 + \frac{1}{j\omega T_I} \right)$

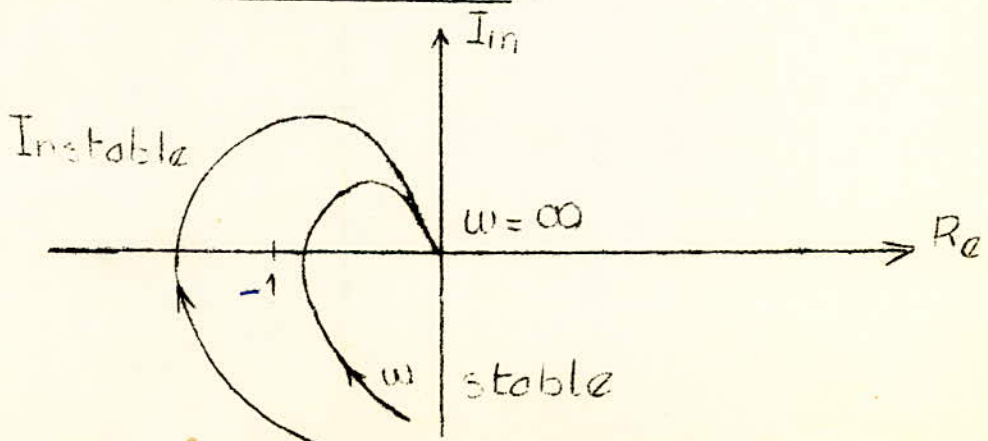
$$G_3 = K_p \frac{-\omega T_I + j}{\omega T_I} \quad \text{d'où}$$

$$|G_3| = K_c \sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 T_I^2}} \quad ; \quad \varphi_3 = -\text{Arctg} \frac{1}{\omega T}$$

Nous calculons l'amplitude et la phase pour $T_0/T = 0,1$

TABLEAU/

ωT	$\left \frac{e^{-j\omega T_0}}{1+j\omega T} \right $	φ_1	$\left 1 + \frac{1}{j\omega T} \right $	φ_2	$K_0/\sigma_3/ G_4 $	φ
0	1	0	∞	∞	∞	90
0,5	0,8	- 29,5	5,090	78°,69	65,14	108,19
1	0,7	- 51	2,69	68°	30,16	119
2	0,44	- 75	1,6	51	11,25	126
4	0,24	- 99	1,54	39,8	5,9	139
8	0,12	- 130	1,04	17,35	1,99	147,35
16	0,06	- 182	1,01	8,88	0,96	191
32	0,03	- 260	1,003	4,6	0,48	- 264,6

5.3.3. Etude par la méthode de Nyquist :5.3.3.1. Plan de Nyquist :

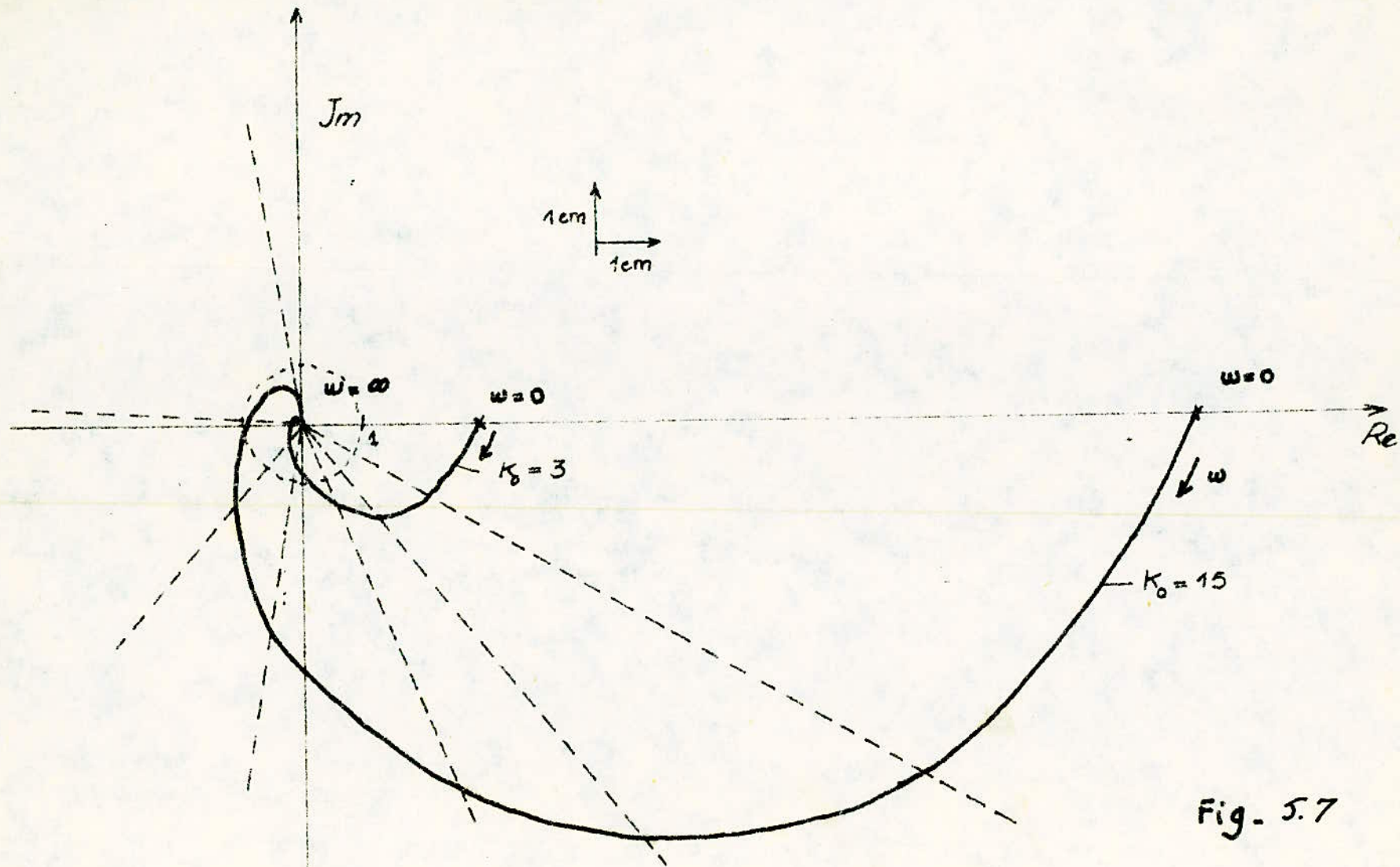


Fig. 5.7

Diagramme de Nyquist du
 système avec régulateur P
 à gain variable

Le système de régulation n'est stable que si en décrivant le lieu de transfert en boucle ouverte dans le sens des fréquences croissantes, on l'aisse le point critique $(-1, 0)$ à sa gauche.

Ainsi nous traçons les 2 courbes correspondant aux $K_0 = 3$ et $K_0 = 15$
diagramme 5.7

5.4. OPTIMISATION

5.4.1. Généralités :

Le but de tout régulation automatique d'un processus industriel est d'obtenir pour le système réglé le meilleur résultat en quantité et en qualité et au prix le plus bas autrement dit avec un minimum de consommation d'énergie. Ainsi, dans une installation, le but recherché est l'obtention d'un confort maximum des individus en minimisant la dépense d'énergie.

Il existe 2 méthodes générales de réalisations d'une régulation optimisante :

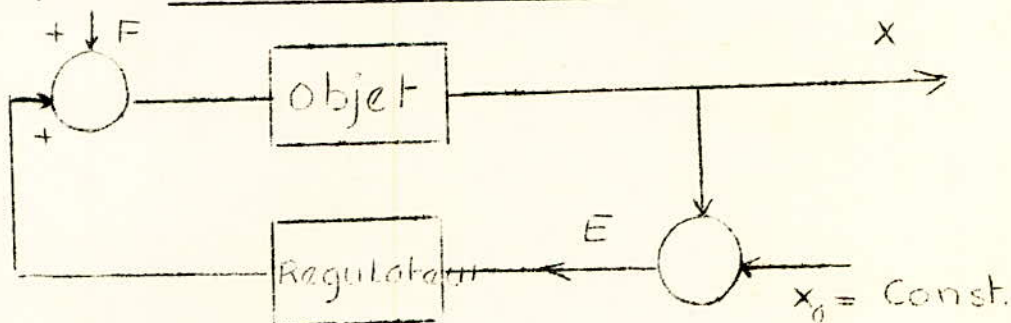
- . Une méthode par perturbation, dans laquelle les divers variables indépendantes du système sont modifiées pas à pas jusqu'à ce que l'on constate un maximum pour un critère de fonctionnement déterminé.
- . Une méthode de calcul continu, dans laquelle les relations définissant le fonctionnement optimal du système sont obtenues et le système de régulation conçu de façon à manoeuvrer les grandeurs du processus de manière à ce que les conditions optimales soient réalisées.

Il existe 2 difficultés à surmonter avec cette méthode de régulation : premièrement, le comportement du système peut ne pas être connu sous forme analytique générale et deuxièmement le système peut comporter des retards importants. Pour que l'on puisse utiliser la méthode de calcul continu, le comportement du système doit être connu dans une certaine mesure.

Ce comportement peut être étudié expérimentalement et des relations empiriques trouvées par des méthodes transitoires, harmoniques ou par des méthodes de corrélation.

Il est souvent suffisant de connaître la forme générale du comportement.

5.4.2. Critères d'optimisation :

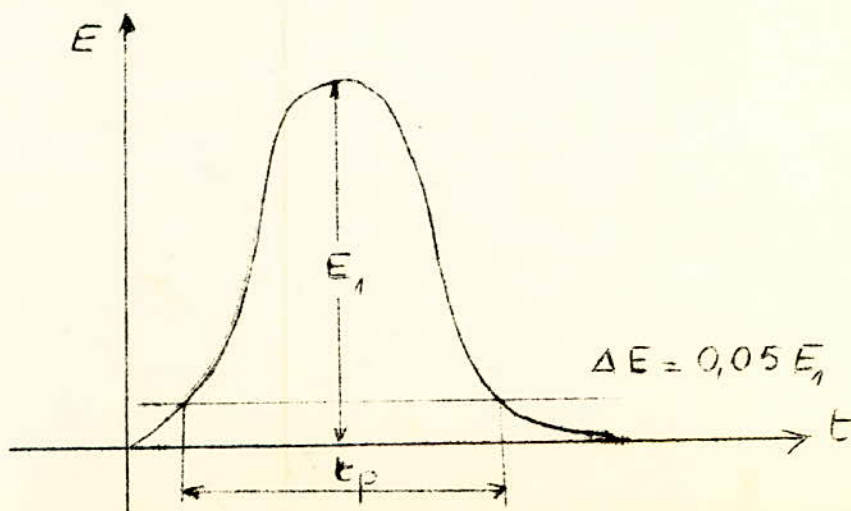


La détermination des paramètres optimaux des régulateurs se fera dans le but d'aboutir à des réponses obéissant aux critères suivants :

- . Temps de réponse faible
- . Bon amortissement
- . Un écart permanent faible

Ces valeurs seront qu'approchées en raison du caractère de simplicité et de l'universalité des formules utilisées. Mais une détermination grossière des actions est suffisante étant donné la non linéarité et non stationnarité du processus.

5.4.2.1. Minimisation du temps de réponse :



En utilisant les caractéristiques optimums des régulateurs pour les objets ayant pour transmittance

$$G(p) = K_{ob} \frac{e^{-T_0 p}}{1 + T p} \text{ nous choisissons la valeur de } K_0$$

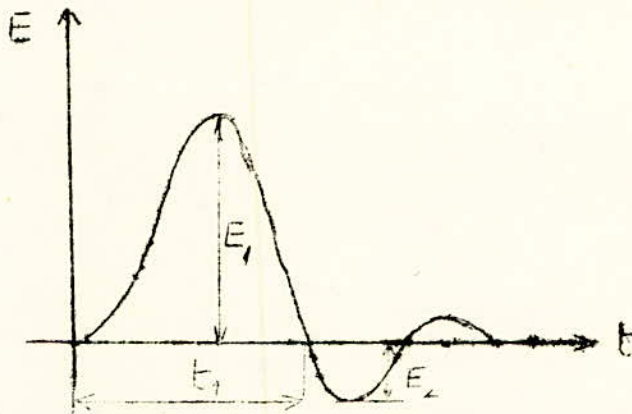
Fig. 5.5.a Régulateur P

Fig. 5.6 Régulateur P.I

Dans notre cas

$$\frac{T_0}{T} = 0,1 \Rightarrow \begin{cases} K_0 = 3 \text{ pour P} \\ K_0 = 5 \text{ " " P.I} \end{cases}$$

5.4.2.2. Minimisation du coefficient d'amortissement



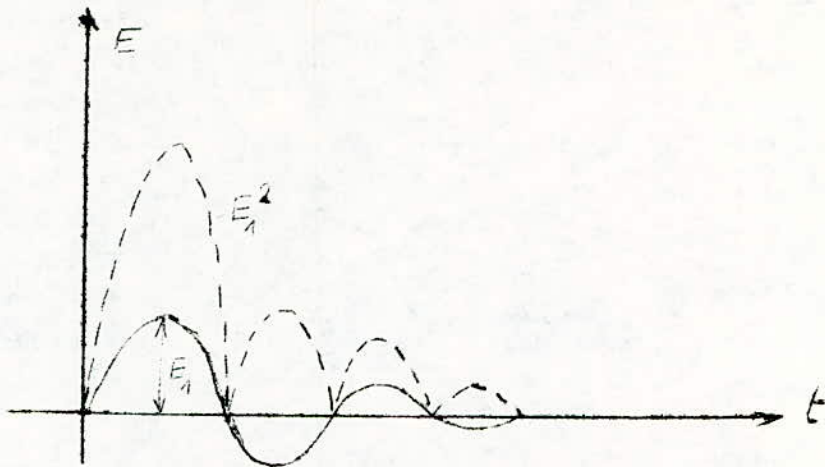
Un régime transitoire doit avoir 2 qualités fondamentales. Il doit être bien amorti tout en demeurant assez rapide.

Pour que le système soit assez amorti, il faut que le 1^{er} dépassement ne soit pas trop élevé.

Pour concilier ces 2 qualités contradictoires qui, sont la stabilité et la précision, nous sommes amené à rechercher un temps t₁ minimum en admettant 20 % de suroscillation autrement dit nous devons rechercher le gain statique le plus élevé qui soit compatible avec le coefficient d'amortissement.

En utilisant Fig. 5.5.b pour P nous obtenons $K_0 = 7$

et pour P.I Fig. 5.8 $K_0 = 7$, $\frac{T_1}{T_0} = 3$

5.4.2.3. Critère de l'intégral du carré de l'écart

Elle constitue la première méthode d'optimisation des systèmes asservis linéaires.

$$I = \int_0^{\infty} E^2(t) \cdot dt$$

La performance d'un système asservi sera d'autant meilleure que la qualité de l'intégrale I est plus faible.

En fonction de T_0/T on peut choisir la valeur du gain statique du régulateur optimum Fig. 5.9

$$K_0 = 11, \quad \frac{T_0}{T} = 4$$

En utilisant ce critère, on remarque l'absence de l'écart permanent car sinon l'intégrale serait l'infini d'une part et un temps du régime transitoire faible puisque comme le montre la Fig. Les valeurs de l'erreur au début du régime transitoire jouent un rôle important dans l'expression de l'intégrale d'autre part.

Enfin le degré d'amortissement faible étant donné que les oscillations de part et d'autre s'ajoutent dans l'expression de I.

TABLEAU RECAPITULATIF

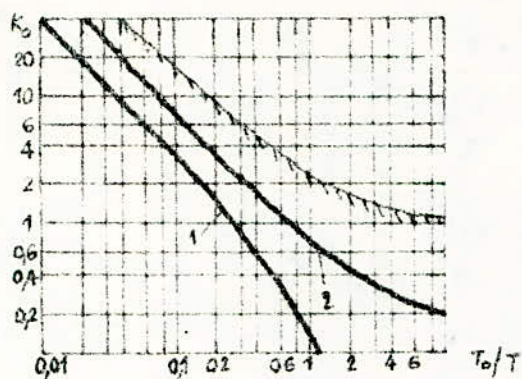


Fig. 5.5

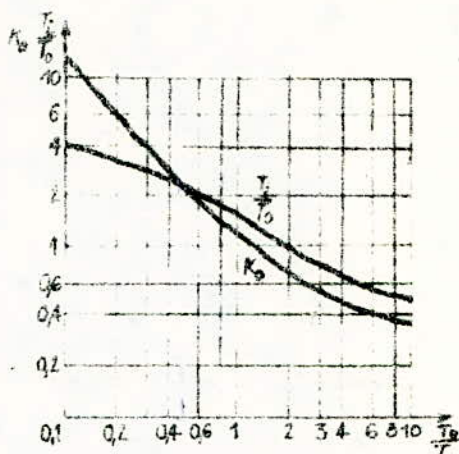


Fig. 5.9

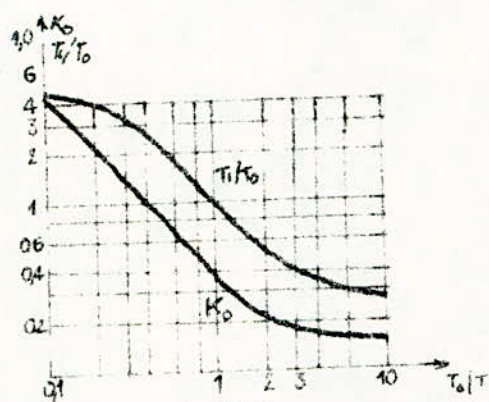


Fig. 5.6

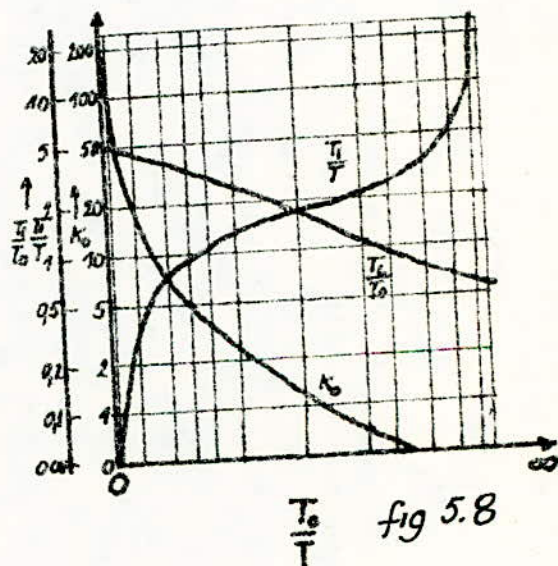


fig 5.8

caracteristiques des regulateurs

- TABLEAU RECAPITULATIF -

REGULATEUR DE TEMPERATURE

		Type	Ko	To/T	Ti/To
CALE	20 % sur	P	7	0,1	/
		PI	7	0,1	0,3
	tp	P	3	0,1	/
		PI	4,5	0,1	4
	$I = \int e(t) dt$	P	/	/	/
		P.I	11	0,1	4,3
TRALE	20 % sur	P	4,2	0,16	/
		PI	2,5	0,16	4
	tp	P	1,8	0,16	4
		PI	2,5	0,16	4
	$I = \int e(t) dt$	P	/	/	/
		PI	7	0,16	3,5
REGULATEUR D'HUMIDITE					

T°/T					
CALE	20 % sur	P	4,2	0,15	/
		PI	2,5	"	4
	tp	P	1,8	"	/
		PI	2,5	"	4
	$I = \int e(t) dt$	P	7 /	"	/
		PI	7	"	3,5

6. Choix et calcul des vannes de réglage

6.1. Généralités :

Les vannes de régulation sont des éléments essentiels dans tout contrôle de procédé industriel dont le rôle consiste à régler de la manière la plus stable un débit de fluide dans une canalisation. du point de vue dynamique les vannes sont considérées comme des éléments sans retard

Les vannes de régulation peuvent se classer en 3 grandes catégories :

- . Les vannes à corps droit : où le clapet est animé d'un mouvement linéaire
- . Les vannes rotatives : où le clapet qui peut être un disque excentré, un papillon, une boule est animée d'un mouvement rotatif
- . Les vannes spéciales : suivant leur usage ou leur conception (vanne d'angle, à membrane etc...) et suivant leur système de commande (vanne électrostatique, hydraulique, numérique etc...)

Le marché se divise en :

- . 50 % de vannes droites (- 20 % sont à clapet) - 30 % sont à cage
- . 50 % de vannes rotatives : leur pourcentage est en augmentation car elles sont plus économiques
- . Les vannes spéciales sont rarement utilisées.

6.2. Caractéristiques des vannes de réglage :

Le débit qui traverse une vanne de réglage avec une perte de charge ΔP est donnée par :

$$(1) \quad Q = k_v \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \cdot \sqrt{1000} \quad [m^3/h]$$

- + k_v = coefficient de débit (m^3/h)
- + ρ = masse volumique du fluide (m^3/h)
- + ΔP = perte de charge (kgp/cm^2)

Le régime d'écoulement d'une vanne est représentée par une courbe appelée caractéristique de débit, elle représente la façon dont le débit varie dans certaines conditions suivant la course.

Remarque : On a introduit pour la mesure du débit le coefficient " K_v ", qui est la valeur du débit d'eau en (m^3/h) traversant la vanne pour une perte de charge de 1 Kgf/CM² et pour une course donnée. Sa valeur pour une pleine ouverture de la vanne ($H = H_{100}$) est désignée par K_{v100}

On distingue 2 type de caractéristiques particulièrement importantes du point de vue technique.

6.2.1. Vanne de réglage à caractéristique linéaire :

Avec la caractéristique linéaire on a pour des courses égales des variations égales de la valeur de K_v c'est-à-dire qu'on obtient un coefficient de transfert constant indépendant de la course

H étant l'ouverture de la vanne (mm)

H_{100} étant l'ouverture maximum de la vanne (mm)

Le coefficient de débit est donné par

$$(2) \quad \frac{K_v}{K_{v100}} = a + b \frac{H}{H_{100}} \quad (\text{voir fig 3.7})$$

6.2.2. Vanne de réglage à caractéristique logarithmique :

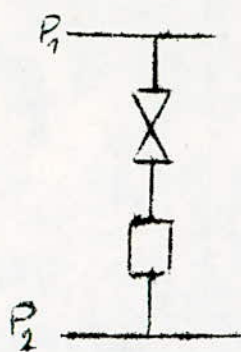
Cette caractéristique se distingue en ce que l'on peut le représenter par une droite en coordonnées logarithmiques.

A des courses égales correspondent des variations de même pourcentage de la valeur K_v dans ce cas le coefficient de transfert n'est pas constant et le coefficient de débit est donné par :

$$(3) \quad \frac{K_v}{K_{v100}} = a e^{b \frac{H}{H_{100}}}$$

Comme en pratique la vanne de réglage se trouve juxtaposée dans les installations avec des éléments résistants la caractéristique réelle est alors déformée.

Considérant l'installation pratique suivante



$P_1 + P_2 =$ étant les pressions statiques d'entrée et de sortie

$\Delta P = P_1 - P_2$ étant la chute de pression totale
La chute de pression dans la vanne est donnée par

$$\Delta P_v = \Delta P - (\Delta P - \Delta P_{v100}) \left(\frac{Q}{Q_{100}} \right)^2$$

$\Delta P_{v100} =$ volume de vanne à pleine ouverture

On peut alors représenter par une courbe la relation entre la chute de pression dans l'installation et dans la vanne (Voir Fig 9.2)

Si l'on applique la relation (1) à Q et Q_{100} on obtient l'équation de la caractéristique de fonctionnement :

$$\frac{Q}{Q_{100}} = \frac{1}{\left[1 + \frac{\Delta P_{v100}}{\Delta P} \left(\frac{k_{vs}^2}{k_s^2} - 1 \right) \right]^{1/2}}$$

En remplaçant $\frac{k_{vs}}{k_v}$ par sa valeur dans les équations (2) et (3) on peut représenter graphiquement les caractéristiques du débit pour les deux types de vannes (linéaire et log) en ajoutant comme paramètre l'autorité de la vanne c'est-à-dire le rapport de perte de charge de la vanne entièrement ouverte (ΔP_{v100}) sur la perte de charge totale ΔP .

Les figures 9.3 montrent nettement la déformation de caractéristiques par comparaison à la caractéristique théorique et la façon dont elles dépendent de l'autorité de la vanne.

6.3. Choix des vannes de réglage :

Le choix de la vanne est très important dans une régulation car la stabilité du système peut dépendre de ce choix. Pour bien choisir la vanne il faudrait savoir si l'objet de régulation est linéaire ou bien logarithmique. Pour cela, il faudrait faire des essais sur l'objet malheureusement dans notre cas cela n'a pas été possible et cela pour des raisons techniques. Ne connaissant pas si l'objet est linéaire ou logarithmique alors on considère pour le choix des vannes le cas le plus défavorable et on procède par élimination.

Critère de stabilité :

Une vanne de réglage est stable quand on a :

$$\frac{K_{ob \max}}{K_{ob \min}} = 2 \text{ à } 3$$

Application :

. Supposant le cas d'une vanne linéaire :

La vanne étant linéaire et ne connaissant pas la caractéristique de l'objet alors on doit assurer la stabilité pour les 2 types de caractéristiques.

Ce qui n'est pas le cas car d'après la Fig 9.5 pour le cas d'un objet linéaire on a :

$$\frac{K_{ob\ max}}{K_{ob\ min}} = \frac{f}{1,5} > 3$$

Le critère de stabilité n'étant pas vérifié, alors le choix d'une vanne linéaire est à éliminer.

Pour le cas d'une logarithmique, on a une stabilité dans les domaines suivants :

6.3.1. Objet Logarithmique : Fig 9.6

Il ya stabilité pour $\frac{K_{ob\ max}}{K_{ob\ min}} = 2 \text{ à } 3$ c'est à dire

$$\frac{\Delta P_{100}}{P} = 0,1 \text{ à } 1,0$$

6.3.2. Objet linéaire : Fig 9.7

Il y a stabilité pour $\frac{\Delta P_{100}}{\Delta P} = 0,1 - 0,4$

Comme le choix de la vanne est fait telle qu'elle soit stable pour les 2 types d'objet donc on doit choisir la vanne ayant pour autorité :

$$\frac{\Delta P_{100}}{\Delta P} = 0,3 \text{ à } 0,4$$

Les caractéristiques Fig 9.3.a représentent la déformation des caractéristiques par comparaison à la caractéristique théorique et on sait que la vanne est d'autant plus stable que sa caractéristique est proche d'une droite, c'est-à-dire dans notre cas la vanne ayant $\frac{\Delta P_{100}}{\Delta P}$ le plus faible. Pour cela notre choix se fait sur la vanne logarithmique d'autorité

$$\frac{\Delta P_{100}}{\Delta P} = 0,3$$

6.4. Dimensionnement des vannes :

Le dimensionnement convenable d'une vanne est un facteur très importante du fonctionnement d'une régulation automatique.

Si les dimensions sont très grandes par exemple la vanne doit fonctionner avec une faible ouverture et le débit minimal réglable est trop élevé, de plus la partie inférieure est de forme assez irrégulière par contre si la vanne est trop petite, le débit maximal prescrit pour le fonctionnement d'un processus peut ne pas être obtenu.

La détermination de la dimension de la vanne, du débit, de la différence de pression est faite, dans la plupart des applications industrielles en se servant d'Abaques et de règles à calcul. En général, les abaques et les règles à calcul sont basés sur les coefficients de dimensions déterminées expérimentalement et par les équations dynamiques ou sur des relations expérimentales déterminées empiriquement.

Il est important de remarquer que les vannes ne sont pas fabriquées dans un nombre infini de dimensions, mais que l'on ne peut en général se les procurer que dans des dimensions standard.

En résumé pour le choix de la dimension d'une vanne on pourra procéder comme suit :

6.4.1. Processus à régler :

Il faut déterminer :

- la valeur maximale du débit requise pour être sûr d'obtenir la grandeur réglée dans toutes les conditions de fonctionnement du processus c'est-à-dire le débit maximale normal
- la valeur du débit nécessaire pendant la plus grande partie du temps c'est-à-dire le débit normal
- la valeur du débit minimale normale

Pour calculer les différents débits on utilise les formules suivantes :

a) Pour la vapeur

$$- \text{si } p_2 > \frac{p_1}{2}, \Delta P < \frac{p_1}{2}, \text{ on a : } k_v = \frac{G}{\sqrt{1000}} \sqrt{\frac{v_2}{\Delta P}}$$

$$G = \sqrt{1000} k_v \sqrt{\frac{\Delta P}{v_2}} \quad [\text{kgf/h}]$$

$$- \text{si } p_2 < \frac{p_1}{2}, \Delta P > \frac{p_1}{2} \text{ on a : } k_v = \frac{G}{\sqrt{1000}} \sqrt{\frac{2v^*}{p_1}}$$

$$G = \sqrt{1000} k_v \sqrt{\frac{p_1}{2v^*}}$$

b) Pour un fluide :

$$k_v = Q \sqrt{\frac{p}{1000 \Delta P}}, \quad Q = k_v \sqrt{\frac{1000 \Delta P}{p_1}} \quad (\text{m}^3/\text{h})$$

- Q [m^3/h] : débit volumique
- p_1 et p_2 [kgf/cm^2] : pression d'entrée et de sortie.
- ΔP [kgf/cm^2] : chute de pression
- G [kg/h] : débit massique
- ρ [kg/m^3] : masse volumique

- v_2 [m^3/h]: volume spécifique pour P_2 et t_1
- v_2^* [m^3/h]: volume spécifique pour $\frac{P_1}{2}$ et t_1

6.4.2. Choix du débit maximal :

Pour le choix du débit maximal que la vanne doit fournir on se base généralement sur un débit maximal normal d'environ 70 % du débit maximal. Cet excédent de 30 % est un facteur de sécurité en cas de sous estimation des pertes de pression. Le débit maximal choisi est habituellement égal à environ 1,4 fois le débit maximal normal.

6.4.3. Choix du type de vanne :

On choisit le genre et le type de vanne de manière à obtenir le meilleur fonctionnement pour le fluide utilisé et on vérifie l'étendue relative de régulation pour s'assurer que le débit minimal réglable est largement inférieur au débit minimal prescrit.

6.4.4. Dimensionnement :

Les dimensions de la vanne sont déterminées à partir d'abaques, tableaux et réglés à calcul fournis par les constructeurs.

6.4.5. Calcul du coefficient caractéristique :

différence de pression pour pleine ouverture de la vanne

différence de pression pour vanne fermée

Si α est relativement faible c'est-à-dire

$$- \text{si } \alpha < 0,1$$

$$- \text{si } \alpha < \frac{1}{2500} \left(\frac{Q}{Q_{\min}} \right)^2$$

La vanne devra alors fonctionner à moins de 2 % de la hauteur totale d'ouverture. En pareil cas, la position de la vanne devra être déterminée très exactement par un organe de commande (servo moteur) puissant et l'orifice de la vanne et la soupape doivent être usinés avec précision.

7. Description du système de régulation et de mesure

Les figures (1) représentées en annexe sont les schémas bloc de la régulation de la température et d'humidité dans un hopital.

7.1. Schéma de base

La figure 2 représente le schéma du système automatique comprenant 4 boucles principales de réglages. C'est le cas le plus général dans les installations de climatisation.

- . Régulation de température après préchauffeur
- . Régulation de la température après humidificateur
- . Régulation de la température dans les compartiments avec sommation des impulsions
- . Régulation de l'humidité dans le compartiment avec sommation des impulsions.

Le système est en outre équipé d'un circuit de commande à distance des moteurs et a qui appartient 2 boutons poussoirs d'utilisation pour la commande à distance du moteur et régulateur avec sommation des impulsions et des lampes indicatrices pour le service de l'appareil de commande des impulsions et l'arrêt du moteur.

Comme on le voit sur la figure, les boutons poussoirs (19) sont à l'aide de l'appareil de commande des impulsions pour la commande à distance (18) reliés au moteurs (29).

Les thermomètres à résistances (10) sont reliés au régulateur électronique (RE) de température (3) qui à l'aide d'amplificateur commande l'impulsateur de régulation (17) qui à son tour actionne le servo-moteur.

Les thermostats à 2 positions (8) et les hygromètres à 2 positions (9) sont reliés aux régulateurs (RS) (2) et (5) respectivement régulateurs électroniques de température avec sommation des impulsions et régulateurs électroniques de l'humidité avec sommation des impulsions. Les régulateurs agissent de nouveau sur les moteurs (29).

Et enfin, le système de commande est équipé d'une alimentation générale en courant (20).

7.2. Schémas blocs

7.2.1. Bloc opératoire Fig. 1b:

Ce schéma représente le schéma de la régulation de température et d'humidité dans un bloc opératoire.

Tout d'abord, on procède à la régulation de la température dans la centrale de climatisation, on place un capteur de température après préchauffeur (10) qui en cas de variation de la température en ce point agit par l'intermédiaire du régulateur électronique (3) sur le servo-moteur qui en fonction du signal reçu, ouvre ou ferme la vanne de commande (15) de l'alimentation du préchauffeur de la centrale de climatisation et ceci constitue la première régulation de l'air d'apport.

De même, un capteur identique est placé après l'humidificateur, agit par l'intermédiaire du régulateur électronique (3) sur l'organe de commande d'arrivée d'eau froide et chaude par l'intermédiaire d'un servo-moteur qui selon le cas ferme ou ouvre l'une ou l'autre des arrivées.

Ensuite dans chaque compartiment, où la température doit rester constante est installé un capteur de température (8) qui agit selon l'écart de température. Par exemple, pour une température supérieure à la température de consigne le capteur agit sur le régulateur (27) dont le rôle principal est d'éviter le travail en opposition de l'installation en actionnant l'élément de commande du chauffage central. Ce régulateur est à 2 positions avec sommation des impulsions dont le temps d'enclenchement et de déclenchement sont en fonction de la température à l'intérieur des compartiments.

Néanmoins, si l'action de ce dernier n'est pas suffisante c'est-à-dire, la température d'ambiance est toujours supérieure, un signal est envoyé sur le régulateur autoadaptatif avec sommation des impulsions (1). Celui-ci agit selon le thermostat (12) dont le rôle est déterminé le mode de travail en fonction de la température extérieure, dans ce cas, le thermostat est dans la position telle que le signal du régulateur soit transmis au moteur de commande des registres du by-pass (29) qui à son tour ouvre les clapets du by-pass. Dans le cas contraire, le thermostat sera dans l'autre position, et le signal sera transmis à l'élément de commande du réchauffeur.

Un système identique au précédent est employé pour la régulation d'humidité. On utilise en plus un humidificateur supplémentaire à vapeur qui est commandé par une vanne électromagnétique (15) recevant les impulsions (des signaux) du régulateur autoadaptatif avec sommation des impulsions en cas de variation de l'humidité dans les compartiments.

7.2.2. Bloc de Thérapie intensive Fif 12:

Dans les salles de blocs de thérapie intensive, il est recommandé des températures et l'humidité différentes selon les maladies traitées. Afin de répondre à ces exigences des dépenses supplémentaires sont nécessaires. On utilise en effet des chaînes de régulation supplémentaires dans les compartiments.

Le traitement de l'air dans la centrale de climatisation est identique à celui décrit précédemment. Dans les locaux climatisés, on utilise d'abord une régulation de température avec sommation des impulsions qui permet le maintien constant des paramètres moyens de l'air.

7.2.2.1. Régulation de base :

On dispose des capteurs (8) et 28 respectivement capteurs de températures et d'humidité qui agissent selon l'écart de température ou d'humidité d'abord sur le régulateur électronique avec sommation des impulsions (27) qui actionne le dispositif de chauffage de base (chauffage centrale) afin d'éviter le travail en opposition. Si l'action de ce dernier s'avère insuffisante des signaux sont émis au régulateur (2) qui agit sur les éléments de la centrale de climatisation selon les signaux reçus.

7.2.2.2. Régulation supplémentaire :

a) Selon l'énergie supplémentaire dont dispose l'utilisateur, on peut adapter un système de régulation supplémentaire. L'utilisation de l'énergie électronique pour un chauffage offre de gros avantages du point de vue installation et fonctionnement. La mise en place dans chaque compartiment n'impose aucune sorte de restriction. On utilise dans ce cas la régulation représentée en annexe dont le fonctionnement est le suivant :

Dans chaque compartiment où l'on veut garder la température rigoureusement constante, sont disposés, un réchauffeur électrique (22) un thermomètre à contact (8) un relais (23) et un contacteur (21).

Nous avons également 2 demi régulateurs avec sommation des impulsions (6) (Régulateurs "MAX" et Régulateur "MIN") et enfin des thermostats extérieurs (8) réglés respectivement...

La durée du cycle (T) est égale à la somme de la durée des impulsions et la durée de coupure, $T = T_z + T_w$ avec T_z temps d'enclenchement et T_w temps de déclenchement.

Si par exemple $T = 120$ s, quand le régulateur "MAX" est connecté, $T_z = 100$ s et $T_w = 20$ s. Dans le cas contraire où c'est le régulateur "MIN" qui est connecté alors $T_z = 20$ s et $T_w = 100$ s. Quand la température du local signalée par le thermomètre (8) est inférieure à la température de consigne, le contacteur (21) connecté l'élément de réglage au conducteur "MAX" et dans ce cas $T_z = 100$ s, $T_w = 20$ s.

Ainsi, nous pouvons faire varier la dynamique par la proportion $\frac{T_z}{T_w}$ de façon à obtenir une température moyenne

à l'intérieur du local rigoureusement constante malgré les perturbations extérieures, conformément à la Fig 7C en annexe. Lorsque la température extérieure $\theta_z < -10^\circ \text{C}$ nous avons $\frac{T_z}{T_w} \rightarrow \infty$ ($T_w \ll T_z$), de même quand $\theta_z > +10^\circ \text{C}$

$$\frac{T_z}{T_w} = 0 \quad (T_z \ll T_w).$$

b) Dans le cas où la distribution est réalisée au départ de la centrale par 2 circuits séparés, on utilise une autre régulation supplémentaire, fonctionnant de la manière suivante :

Fig 7b de l'annexe, dans chaque compartiment est installé un capteur de température (8). Quand un écart de réglage se produit dans l'un des compartiments, un signal est émis et amplifié par l'amplificateur électronique (24) qui le transmet au relais (23), selon le cas le relais agit directement sur la vanne d'arrivée de l'air conditionné par l'intermédiaire de la vanne électromagnétique (15) qui augmente ou réduit la quantité d'air.

Néanmoins, si l'action n'est pas suffisante, le relais (23) envoie une impulsion au régulateur auto-adaptatif avec sommation des impulsions (1) qui actionne le servomoteur (13) par l'intermédiaire du relais (23), de la vanne électromagnétique et de l'impulsateur (17) qui actionne la vanne d'arrivée d'air comprimé. Ainsi le servomoteur ouvre ou ferme la vanne de la centrale de climatisation.

CHAPITRE 8 : - SPECIFICATION DES ELEMENTS DE MESURE
ET DE REGULATION

- 8.1.1 : Les capteurs.
- 8.1.1.1 : Capteurs de température.
- 8.1.1.1 : Thermomètre à gaz.

Ce thermomètre est basé sur la loi des gaz parfait $PV = RT$, qui montre que l'on peut connaître T (Température) en mesurant la pression et le volume d'une masse de gaz connue.

- 8.1.1.2 : Thermomètre à dilatation de liquide.

Le thermomètre de ce type le plus courant est le thermomètre à mercure.

Cet appareil est constitué par une ampoule surmontée d'un tube de faible diamètre intérieur dans lequel s'effectue la dilatation.

Les liquides employés sont :

- Mercure : - 35° à 300° C sans remplissage d'azote
- Mercure : - 35° à 800° C avec remplissage d'azote
- Alcool : - 80° à 70° C
- Toluène : - 80° à 100° C
- Pentane : - 200° à 30° C
- Alliage de Gallium : - 0° à 1050° C.

- 8.1.1.3 : Thermomètre à dilatation de solide.

Dans ces appareils on exploite la linearité de la dilatation du solide avec la température, il existe plusieurs thermomètres de ce type parmi lesquels on a :

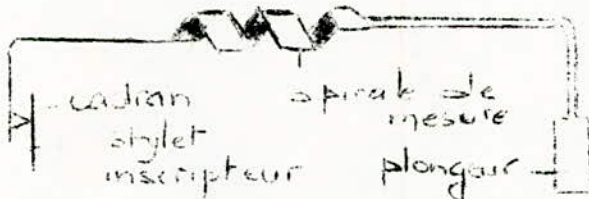
- Les thermomètres à tige :

Ce type d'appareil est très robuste et on peut les utiliser jusqu'à 1000° C.

- Thermomètres à bilames :

Une bilame thermique est constituée de 2 bandes d'alliages dont les coefficients de dilatation sont très différents et soudées en ruban continu sous forme de spirale, une variation de la température provoque une déformation de la spirale qui est amplifiée puis transmise pour lecture sur un cadran graduée.

- 8.1.1.4 : Thermomètre à dilatation de Mercure à enveloppe métallique :



un plongeur est relié par un tube capillaire à une spirale déformable, l'ensemble en acier est rempli totalement de mercure sous pression.

La variation de la température entraîne une déformation du tube spirale qui se traduit par un déplacement du stylet sur le cadran.

Ces thermomètres sont utilisables de : - 35° C. à 540° C.

- 8.1.1.5 : Thermomètre à dilatation de gaz à enveloppe métallique :

C'est le même système que le précédent dont tout est rempli de gaz (hélium, N, H, CO, etc...), l'étendue de la mesure est de : - 100° C. à 600° C.

8.1.1.6 : Thermomètre à pression de vapeur.

C'est le même système ou le réservoir plongeur est rempli avec un liquide en équilibre avec sa vapeur. (- 30° C. à 300° C.).

8.1.1.7 : Thermistances.

Les thermistances sont des corps semi-conducteurs, constitués par des oxydes métalliques, dont la résistance électrique décroît lorsque la température croît ceci contrairement aux métaux.

: Différentes catégories de thermistances :

- Thermistance à coefficient de température négative (ou CTN), dans cet appareil la résistance diminue de façon monotone quand la température augmente.

- Thermistance C.T.P. c'est une céramique à base de tetanate de baryum, la résistance présente une anomalie de variation avec la température.

- Thermistance au silicium ou sillistors.

- Thermistance C.T.N. à variation brusque.

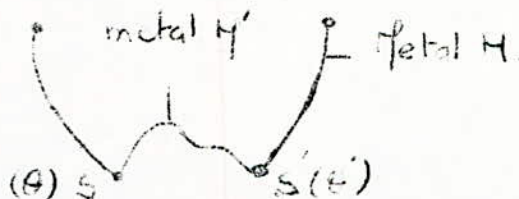
8.1.1.8 : Couple thermo-électrique.

Si deux fils de métaux de nature différentes sont soudés en deux points S et S' et si ces deux points de soudures sont à des températures : une f.e.m. "e" existe entre les deux points A et B.

L'ensemble constitue un thermo-couple pour une température θ de la soudure S' dite soudure froide le f.e.m. "e" dépend :

- de la différence de température ($\theta - \theta'$)

- de la nature des deux fils.



Les fabricants des fils thermo-couples donnent des tables de correspondance entre le f.e.m. "e" et la température θ du 2° point de soudure S. Le 1er point de soudure S' étant à 0° C, il suffit pour connaître θ de mesurer le f.e.m. "e".

8.1.1.9 : Thermomètre à résistance .

La résistance électrique d'un conducteur métallique **croît avec** la température, cette variation est parfaitement réversible, on peut donc établir une relation $R = f(T)$ entre la résistance R et la température T et repérer ainsi T par des mesures de R.

On constitue pour cela des sondes appelées thermo-sondes à résistance ou sondes à résistance, dont l'élément sensible est un conducteur métallique enroulé autour d'un noyau en céramique ou en verre (pyrex).

Elles sont incluses dans un pont de mesure et éventuellement de régulation, ce qui constitue un thermomètre à résistance.

Les métaux les plus employés sont :

- Cuivre - 200° C. à 150° C.

- Nickel - 200° C. à 150° C.

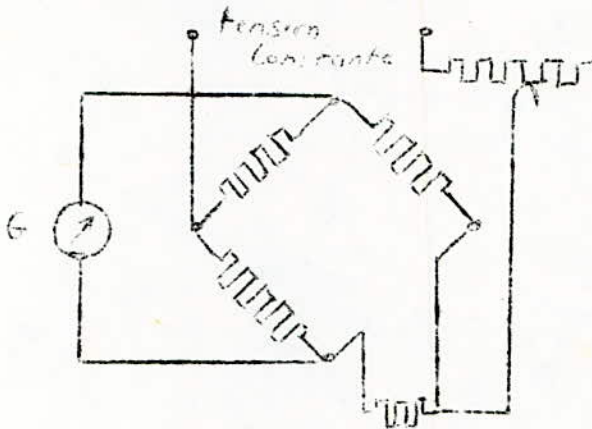
- Platine - 230° C. à 550° C.

Le platine permet de constituer un thermomètre à résistance adapter à des besoins variés, chacun de ses besoins peut se définir par l'importance plus au moins grande que l'on attache à chacune des qualités générales caractéristiques de tout appareil de mesure : Exactitude - Sensibilité - Fidélité - Vitesse de réponse - Robustesse - Encombrement etc ..., sur lesquelles se fait le choix du métal. Le platine est le métal le plus utilisé.

La mesure de la résistance de la sonde se fait par deux méthodes.

8.1.1.9.1: Méthode directe.

On utilise généralement un montage en pont dans lequel une des branches, est constituées par la sonde, et les autres résistances étant connues.



La déviation du galva est proportionnelle à la résistance.

8.1.1.9.2 : Méthode zéro.

On remplace R_s par un rhéostat avec lequel on ramène le galvanomètre à la position zéro et on détermine R_0 .

8.1.1.9.3 : Utilisation des thermomètres à résistance .

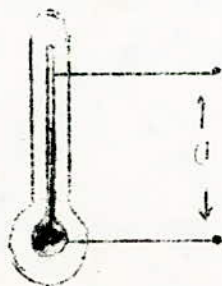
L'avantage des thermomètres à résistance est de pouvoir mesurer des basses températures ($- 220^{\circ} C$ à $550^{\circ} C$.) et surtout d'obtenir des mesures sur des échelles très réduits, $10^{\circ} C$ d'étendue par exemple 15° à $25^{\circ} C$. C'est l'appareil idéal pour régler avec précision une température d'ordre climatique.

Leurs inconvénients :

- petite taille (50 à 100 m/m), ce qui veut dire fragile.
- problème de liaison.

8.1.1.10 : Thermomètre à contact.

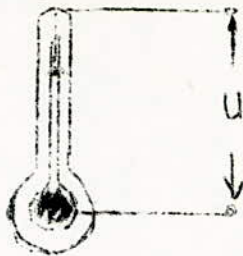
C'est un thermomètre qui déclenche un contact électrique à partir d'une certaine température qui peut être régler.



Dans ce thermomètre la température de déclenchement est fixée à la construction et on peut plus la changée.

.../...

Mais il existe aussi des thermomètres à contact où l'on peut varier la température de consigne par un dispositif de réglage.

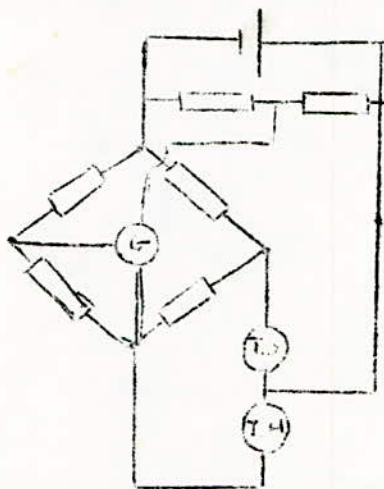


8.1.2. : Capteurs d'humidité.

8.1.2.1. : Psychomètre.

Les psychomètres sont constitués par deux thermomètres sensibles, l'un exposé en atmosphère sèche, l'autre ayant son réservoir constamment humidifié à l'aide d'un tissu imbibé d'eau sous l'effet de l'évaporation, la température indiquée par le 2^e thermomètre est inférieure à celle indiquée par le thermomètre sec.

Cette différence permet de connaître le point de rosée et le degré hygrométrique, si la température de l'air est variable on utilise alors deux thermomètres à résistance, l'un sec, l'autre humide monté dans un pont comme l'indique la figure.



8.1.2.2. : Hygromètre mécanique.

8.1.2.2.1. Hygromètre à cheveux :

Le principe de cet appareil repose sur la propriété qu'ont les cheveux de s'allonger proportionnellement avec l'humidité du gaz dans lequel ils se trouvent.

Cet appareil s'emploie pour la détermination de l'humidité relative entre -30° et $+70^{\circ}$ C, si les cheveux ont été maintenus très secs pendant plusieurs jours, les indications sont ensuite faussées par excès. Les cheveux craignent les vapeurs acides, ammoniacales et les poussières salines.

8.1.2.2.2. Hygromètre à acetate de cellulose.

Les contractions d'une membrane vont varier le volume d'un réservoir rempli de mercure. Ces hygromètres sont commodes mais peu précis et demandent à être souvent réétalonnés.

8.1.2.3. : Hygromètre électrique.

Le chlorure de lithium (LiCl) est un corps hygroscopique dont la résistance électrique est fonction de la teneur en humidité. Cette teneur dépend du degré hygroscopique de l'air.

On recouvre la sonde de température avec un manchon (en verre tissé), imbibé de LiCl, autour duquel deux électrodes sont enroulées en hélice, qui sont alimentées en courant alternatif. En raison de la résistance de la solution de LiCl, qui est variable en fonction de la teneur en eau, il s'établit un courant et le thermomètre à résistance indique une certaine température pour obtenir l'humidité relative on a mis au point des montages de pont de mesures.

Avantages de ce principe :

- grande précision
- Grande plage de mesure
- les dépôts de poussières ne perturbent pas la mesure.

8. 2. : Régulateurs.

8.2.1. : Régulateurs pneumatiques.

Le problème de positionnement précis, se rencontre fréquemment dans la manoeuvre des vannes insérées dans les circuits de régulations.

Le recours à l'air comprimé présente les avantages suivants :

- Simplicité des moteurs (à membranes, à soufflet, à pistons, à engranages etc...).
- Sécurité contre l'incendie.
- Réalisation simple et peu coûteuse des régulateurs de divers types.
- Appareillage peu sensible aux variations extérieures de températures.

Les seules précautions à prendre sont : le filtage et la déshydratation de l'air afin d'éviter l'encrassement des conduites.

Le principe général des régulateurs pneumatiques est de créer sur un circuit d'air comprimé, une fuite stable déterminant une diminution de pression proportionnelle à la position relative d'une valeur de mesure et d'une valeur de consigne.

Les régulateurs pneumatiques se classent en trois grandes familles :

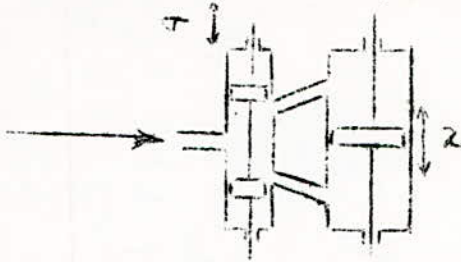
- Les appareils à déplacement.
- Les appareils à balancement de forces.
- Les appareils à membrane.

RQ : Les régulateurs pneumatiques varient aussi par leur mode d'action :

- à action proportionnelle.
- à action intégrale.
- à action dérivée.
- à action proportionnelle - intégrale etc...

8.2.2. : Régulateurs hydrauliques.

Ils utilisent généralement soit la variation de débit obtenue en étranglant plus au moins la conduite (par exemple à l'aide d'une vanne à commande manuelle ou automatique), soit la variation de débit provoquée par un jet, dont la direction d'action peut être commandée suivant la figure :



- Avantages et inconvénients des régulateurs hydrauliques :

Les régulateurs hydrauliques présentent l'avantage de disposer d'une réserve de force importante et de pouvoir développer un couple très grand au début de leur action.

Ils offrent les inconvénients d'avoir une puissance massique assez faible c.a.d., que leur poids est important par rapport à leur force, de plus ces régulateurs nécessitent de nombreux circuits hydrauliques.

RQ: Comme les régulateurs pneumatiques, les régulateurs hydrauliques diffèrent par leur mode d'action ().

8.2.3. : Régulateur électrique et électro-mécanique.

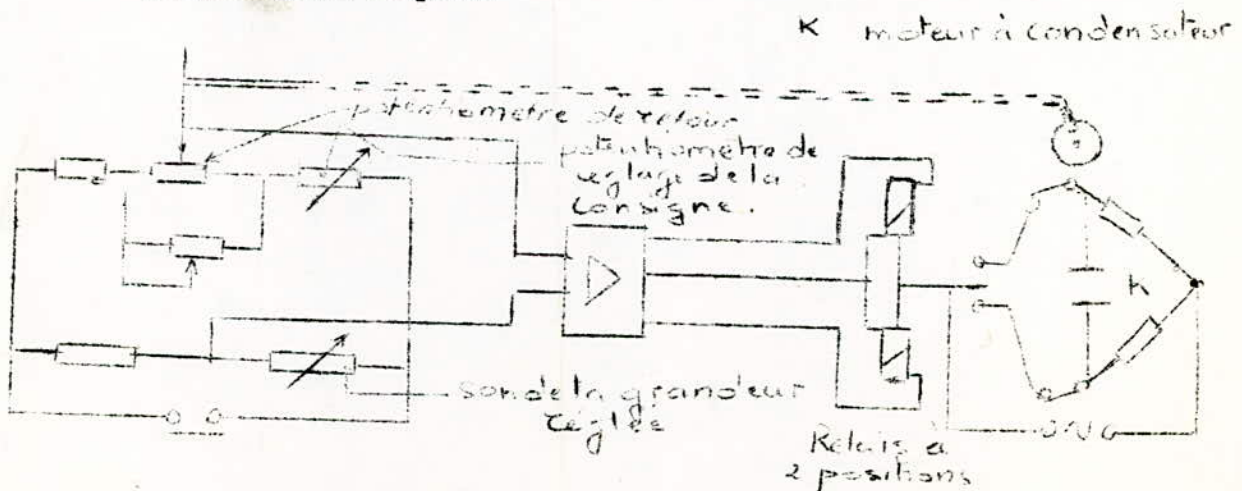
Dans les régulateurs électro-mécaniques, la grandeur réglée est souvent mise sous forme d'une force et comparée à la force d'un ressort qui représente la grandeur de consigne.

La comparaison a pour résultat de décaler le curseur d'un potentiomètre qui agit sur le servomoteur de réglage de la position de la vanne.

Pour améliorer les propriétés statiques et dynamiques on utilise un régulateur électronique, dont les grandeurs correspondantes sont comparées dans un pont sous forme de résistance, la résistance variable avec la température est un thermomètre à résistance.

Selon la polarité de la tension créée, il en résulte que l'un des relais est actionné, le servomoteur tourne alors dans un sens ou dans l'autre.

Un potentiomètre de retour actionné par le moteur, modifie alors l'écart du pont.



8.2.4. : Régulateur à deux positions.

Les régulateurs à deux positions différentes des régulateurs déjà étudiés par leur signal de sortie qui ne peut avoir que deux états, on peut utiliser comme régulateur à deux positions une sonde bimétallique qui ferme un contact lorsque la valeur de consigne n'est pas atteinte et l'ouvre lorsqu'elle est dépassée.

8.3 : Servomoteurs.

8.3.1. : Généralité:

Le signal émis par le régulateur à pour mission de commander l'exécution des ordres par l'intermédiaire d'un servomoteur agit sur l'organe de réglage, suivant le type de régulateur choisi, le signal de commande est hydraulique, pneumatique ou électrique. L'ordre étant une action sur le débit, donc il doit être traduit par une ouverture plus au moins grande du clapet de la vanne.

8.3.2. : Servomoteur hydraulique.

ils sont composés élémentairement par un cylindre dans lequel se déplace un piston, l'une des faces du piston reçoit la pression modulée issue de régulation et le piston se déplace jusqu'à ce qu'un équilibre s'établisse entre les pressions exercées sur les deux faces du piston, ce qui entraîne une ouverture ou une fermeture du clapet de la vanne, la faible inertie des parties mobiles, leur permet des performances recherchées pour de nombreuses applications.

8.3.3. : Servomoteur pneumatique.

Ils sont essentiellement composés d'une membrane souple qui en se déformant sous l'action de la pression d'air envoyée 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.

Toute déformation de la membrane, entraîne un déplacement du piston qui agit sur l'ouverture de la vanne, un relais d'asservissement est utilisé dans tous les cas ou une grande précision de réglage est requise.

8.3.4. : Servo-moteur électrique.

Ce type de servomoteurs, comprend un moteur électrique à deux sens de marche, agissant sur l'organe de réglage par l'intermédiaire d'un reducteur à engrenage ou à roue tangente.

Un relais d'asservissement permet comme pour les servomoteurs ~~pneumatiques~~ de positionner le moteur avec précision.

Les moteurs d'un servomoteur peuvent être :

- Monophasés à ~~spères~~ de déphasage ou monophasés avec capacité permanente sur une phase auxiliaire, ces deux moteurs ne tournent que dans un sens, ils conviennent aux vannes relatives pouvant pivoter de 360°.

- Monophasés à capacité permanente avec un stator à deux enroulements, bobinés en sens inverse l'un de l'autre. Ce moteur peut tourner dans les deux sens, suivant la mise sous tension directe ou inverse.

8.3.5. : Servomoteur électro-pneumatique.

C'est un servomoteur qui sous l'action d'un piston d'air comprimé fait tourner le servomoteur d'un pas dans un sens ou dans un autre, comme le montre la figure 11 en annexe. Ce servomoteur est actionné par un régulateur à deux positions.

8.4. : Vannes de réglage .

Selon les conditions du processus, la vanne peut être choisie parmi un certain nombre de modèles, on distingue deux grandes familles de vannes :

- Les vannes à clapet .
- Les vannes à papillon.

8.4.1. : Vannes à clapet .

Dans cette famille il existe trois groupes de vannes :

- Les vannes à simple siège.
- Les vannes à double siège
- Les vannes à trois voie.

chacun des groupes se décompose en deux sous-groupes.

- Les vannes à action directe définies comme étant celles qui se ferment sous l'action croissante du signal.
- Les vannes à action indirecte (inverté).

8.4.2. Technologie des vannes de réglage à clapet.

Trois types principaux sont utilisés suivant le mode de régulation.

2.1. Régulation tout ou rien.

On utilise pour ce mode de régulation des vannes à soupapes ou à membrane (voir figure).



Ce type de vanne possède une caractéristique du type exponentiel à faible étendue de réglage, qui ne permet que le tout ou rien.

8.4.2.2. : Régulation continue.

8.4.2.2.1. Sur liquide et sur vapeur :

On utilise de vannes à plongeur à simple ou à double siège avec ou sans guide, parfois le plongeur est un pointeau dont la caractéristique a été particulièrement calculée pour le type de réglage voulu.

8.4.2.2.2. Sur les gaz :

Les vannes à plongeur sont utilisées pour de petits débit ou bien lorsque la pression statique du gaz est importante.

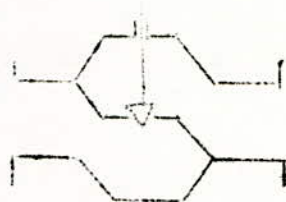
8.4.2.2.3. : Caractéristiques des clapets.

- Le clapet à simple siège est utilisé lorsque la pression statique du fluide réglé ne risque pas de compromettre le fonctionnement de la vanne en s'opposant à l'action du servomoteur.

- Le clapet à double siège assure un équilibre des forces hydrostatiques satisfaisant.



Vanne à double siège



Vanne à simple siège

8.4.3. : Vannes à trois voies.

Ces vannes sont utilisées pour régler soit un mélange, soit une déviation du fluide. La vanne mélangeuse comporte deux entrées et une sortie, alors que la vanne de déviation comporte une entrée et deux sorties.

8.4.4. Vannes à papillons.

Si le gaz se présente sous **faible** pression on utilise des vannes à papillon. Dans ce cas à pleine ouverture, la section de passage du fluide est égale à la différence entre la section de la conduite et la section de l'épaisseur maximale du papillon. Pour les fluides normaux, la fonte est le métal le plus fréquemment utilisé tant pour le corps que pour le papillon. Pour les fluides corrosifs, on choisira un métal approprié, sinon l'on procèdera à l'ébonitage des pièces. Le papillon doit de préférence être monté sur roulements à billes.

9. Minimisation de la consommation d'énergie :

De tous les temps l'homme cherchait et cherche toujours dans la mesure de ses connaissances de minimiser le coût de toutes les créations. Actuellement, les difficultés d'approvisionnement pétrolier mondial poussent l'homme à économiser au maximum l'énergie et à développer de nouvelles productions d'énergie.

Dans le cadre de la climatisation cette économie se fait de deux manières :

- . par l'amélioration du rendement de tous les éléments du système de climatisation par l'optimisation de leur fonctionnement
- . par la récupération partout où cela est possible de l'énergie fournie

9.1. Optimisation : système auto-adaptatif :

On sait que tout système réel est soumis à des perturbations extérieures, les plus importantes dans le cas d'un système de climatisation sont la température et l'enthalpie du milieu extérieur. Certaines perturbations s'introduisent d'une façon très complexe et modifient l'expression des lois physiques du système. Ces modifications provoquent une variation des qualités statiques et dynamiques du système en fonction des perturbations extérieures.

Ces systèmes complexes dans lesquels les perturbations sont extrêmement graves et difficiles à compenser peuvent être résolus en employant des systèmes de régulation automatiques très compliqués et très chers.

Mais il est beaucoup plus intéressant de résoudre ces problèmes très compliqués par des moyens simples et bon marché, pour cela on utilise une compensation qui varie avec toute variation des propriétés statiques et dynamiques du système on dit on adapte le système si cette adaptation est automatique, on parle souvent d'auto-adaptation.

L'auto adaptation revient à l'insertion entre le système de commande et les servo-moteurs actionnant les différents éléments de la climatisation, d'un organe qui tient compte des paramètres extérieurs.

Dans le cas de notre système de climatisation, on a utilisé des régulateurs auto-adaptatifs avec sommation des impulsions qui nous donnent une valeur moyenne des impulsions de commande tout en tenant compte des variations des perturbations extérieures.

Les systèmes de régulations auto-adaptatifs permettent de stabiliser la température avec une précision de 1°C et l'humidité avec une précision de 5 %, indépendamment des perturbations extérieures et intérieures et des changements des qualités dynamiques des objets.

9.2. Minimisation de la consommation d'énergie :

Il existe plusieurs méthodes de récupération d'énergie en climatisation dont les plus importantes sont :

- . Introduction d'un By-Pass au niveau du laveur
La récupération d'énergie par cette méthode peut être mise en évidence par l'étude des changements d'état de l'air dans le diagramme psychrométrique
- . Utilisation d'une régulation avec point de rosée variable.
Elle évite le gaspillage d'énergie en régulant la température en un point qui n'influe pas sur la qualité de notre climatisation.
- . Recyclage de l'air traité :
Cette méthode consiste en la récupération d'une partie de l'air déjà traité et de le mélanger à de l'air extérieur à l'aide des registres by-pass de la chambre de mélange.
Elle permet d'avoir après mélange un air dont les paramètres sont d'autant plus proches des paramètres de consignes que les proportions en air recyclé sont importantes.

Cette méthode permet une minimisation de la consommation d'énergie, mais plus la récupération est importante c'est-à-dire que les proportions en air recyclé sont importantes, moins notre installation est hygiénique. Ce mode de récupération d'énergie ne peut être utilisé que pour les installations des locaux qui ne nécessitent pas un degré d'hygiène élevé :

. Introduction d'une régulation locale :

Cette régulation est utilisée afin d'avoir de différents paramètres dans les compartiments qu'on ne peut pas réaliser en agissant sur les éléments de notre centrale de climatisation.

Comme dans le cas du bloc de thérapie intensive la centrale nous donne une valeur moyenne de paramètres à contrôler par sommation des impulsions tandis que l'ajustement des paramètres est réalisé par la régulation supplémentaire.

Comme le montre la figure 8 cette régulation est assurée par des boucles de régulation qui actionnent les batteries d'humidification ou de chauffage pour refroidir ou bien chauffer les compartiments

Cette régulation est très précise étant donné que chaque batterie est constituée de plusieurs éléments de différentes puissances pour le chauffeur et de différents débits pour l'humidificateur.

Cette précision est d'autant plus grande que le nombre d'éléments est important. Cette installation permet une récupération car elle est très précise c'est-à-dire qu'il n'y a pas un excès de chauffage important à refroidir et inversement.

- . Utilisation d'une régulation quasi continue et discontinue

En général les non linéarités rencontrées dans les systèmes asservis (saturation, hystérésis, seuil etc..) sont indésirables par certains sont souhaitables et sont délibérément introduites en vue d'améliorer les performances du système et d'abaisser le prix de revient de l'installation.

10. Conclusion :

Notre étude est incomplète du fait que nous n'avions pas pu faire des essais pour déterminer les propriétés dynamiques réelles de l'objet de régulation d'une part et nous n'avions pas eu les données techniques nécessaires pour choisir un matériel adéquat d'autre part.

Le système étudié présente beaucoup d'avantages. Il présente la possibilité de connaître les impulsions de mesure provenant des locaux à climatiser avec le réglage de correction pour chacun des locaux.

Le système de régulation auto adaptatif permet la stabilité de la température et de l'humidité avec une grande précision indépendamment des perturbations extérieures et intérieures en utilisant des appareils simples et bon marché.

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

1. Traité de chauffage et climatisation
Tome I et II H. Rietchel W. Raiss
2. Chauffage et climatisation
BELIAKHOWSKI
3. Guide de mesure et de régulation industriel
R. FARDIN
4. Technologie et calcul pratique dessystèmes asservis
NASLIN
5. Régulation automatique industriel
D.P ECKMANN
6. Introduction aux systèmes asservis extremaux et adaptatifs
P. DECAULNE. J. CH. GILL. M. PELEGRIN
7. Technique de l'ingénieur
Contrôle et mesure Tomme III
8. Appareils électriques d'autamatisme et de commande
I. TAEV
9. Détermination des propriétés des échangeurs de chaleur
à partir des caractéristiques structurelles
DAVOUST. Thèse Dr. Ingénieur

+ Articles :

- . Régulation automatique auto adaptative
Z. BARSKI

+ Revue :

- . Automatisme
- . Revues carrier
- . Mesure

- LEGENDE -

- (1) . Régulateur adaptatif de la température avec sommation des impulsions
- (2) . Régulateur de température avec sommation des impulsions
- (3) . Régulateur électronique de la température
- (4) . Régulateur adaptatif d'humidité avec sommation des impulsions
- (5) . Régulateur d'humidité avec sommation des impulsions
- (6) . Demi-régulateur avec sommation des impulsions
- (7) . Régulateur auto adaptatif
- (8) . Capteur de température à 2 positions (thermomètre à contact)
- (9) . Capteur d'humidité à 2 positions (hygromètre à contact)
- (10) . Capteur à résistance (Pt 100)
- (11) . Eléments de la dépendance de mise au point du régulateur en fonction des perturbations extérieures (thermomètre manométrique ou 3 capteurs à 2 positions qui actionnent pas à pas)
- (12) . Thermostat extérieur qui sert à changer le mode de travail en fonction de la température extérieure
 - T 20° C il actionne le réchauffeur
 - 20° C il actionne le registre By-Pass du lvaeur
- (13) . Servo-moteur pas à pas électropneumatique
- (14) . Vanne de contrôle
- (15) . Vanne électromagnétique
- (16) . Vanne à 3 voies
- (17) . Impulsateur de la chaîne de régulation
- (18) . Impulsateur de commande à distance
- (19) . Bouton poussoir de commande à distance
- (20) . Alimentation générale
- (21) . Contacteur
- (22) . Batterie supplémentaire

- (23) . Relais
- (24) . Amplificateur
- (25) . Clapet de régulation de l'air
- (26) . Sommateur
- (27) . Régulateur avec sommation des impulsions pour le chauffage
- (28) . Capteur de température et d'humidité
- (29) . Servo moteur

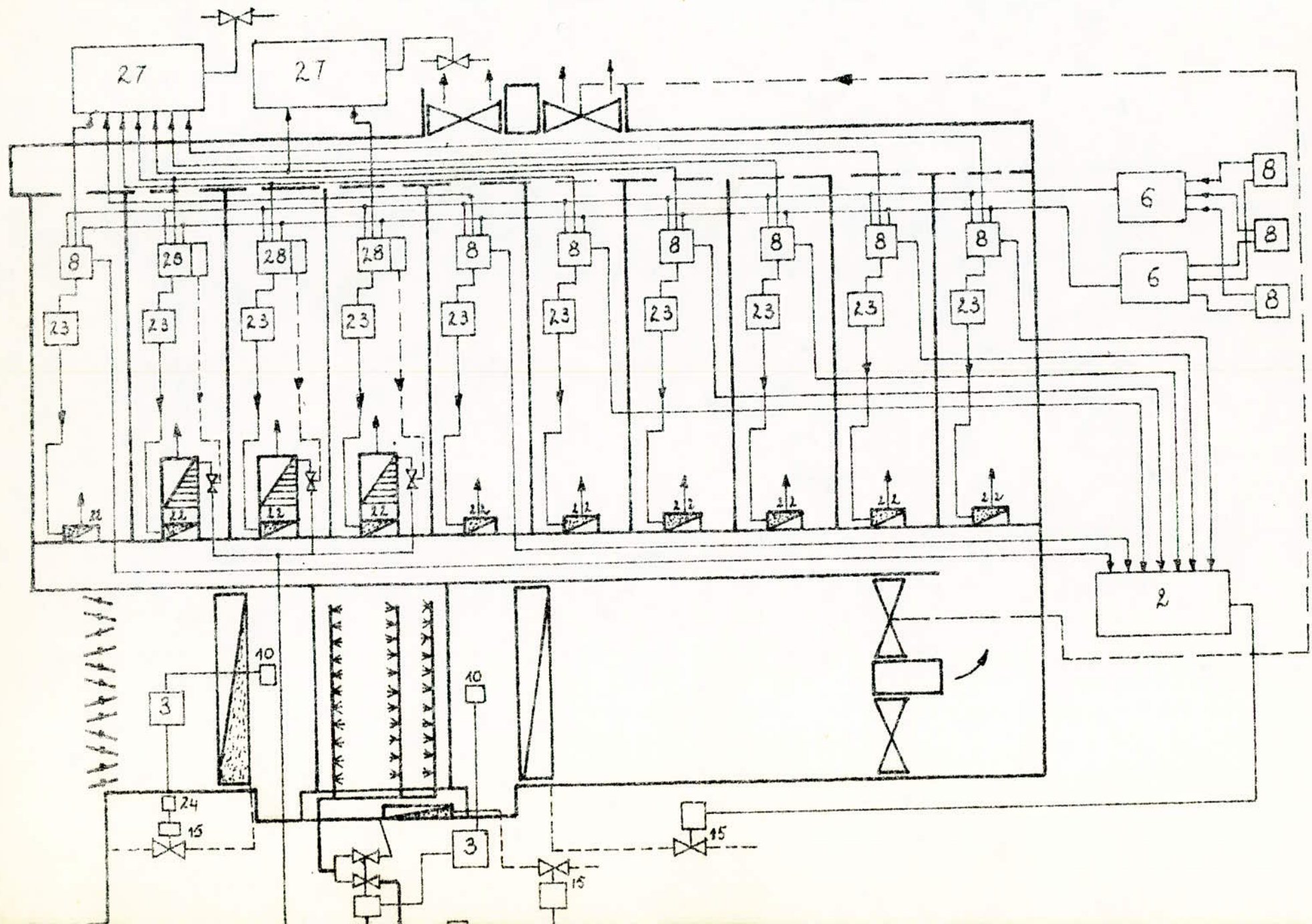


Fig-1a

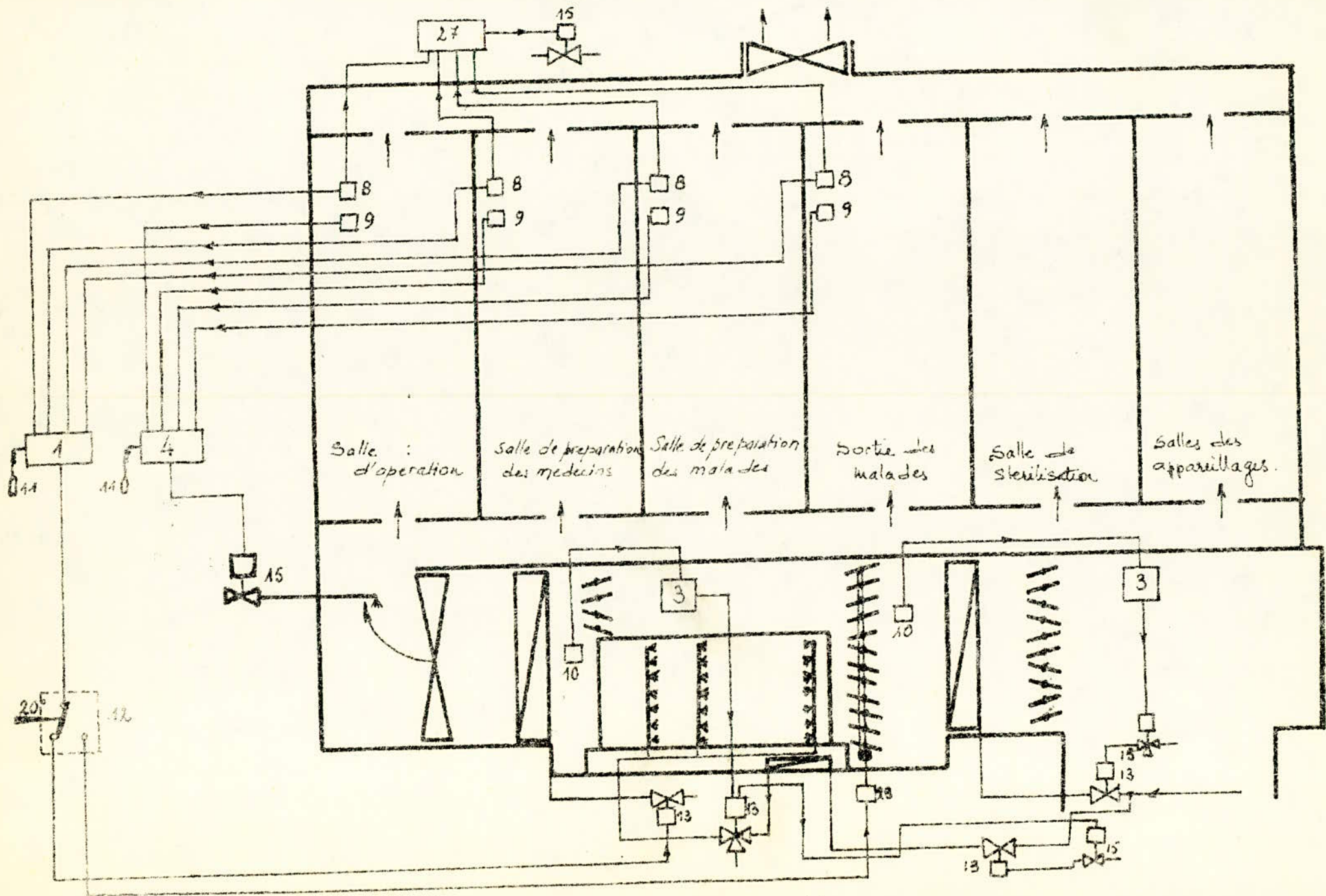


Fig-1b.

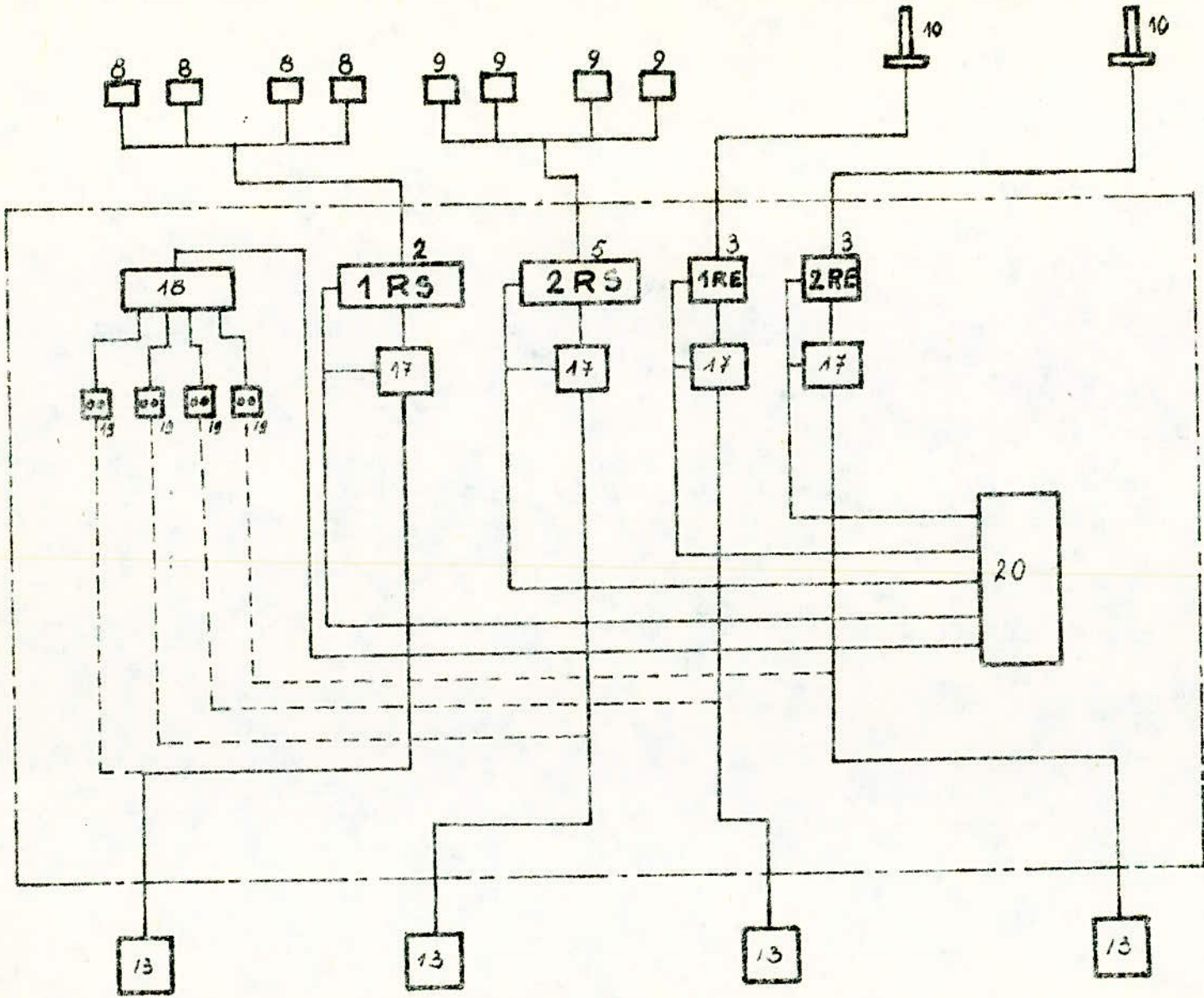
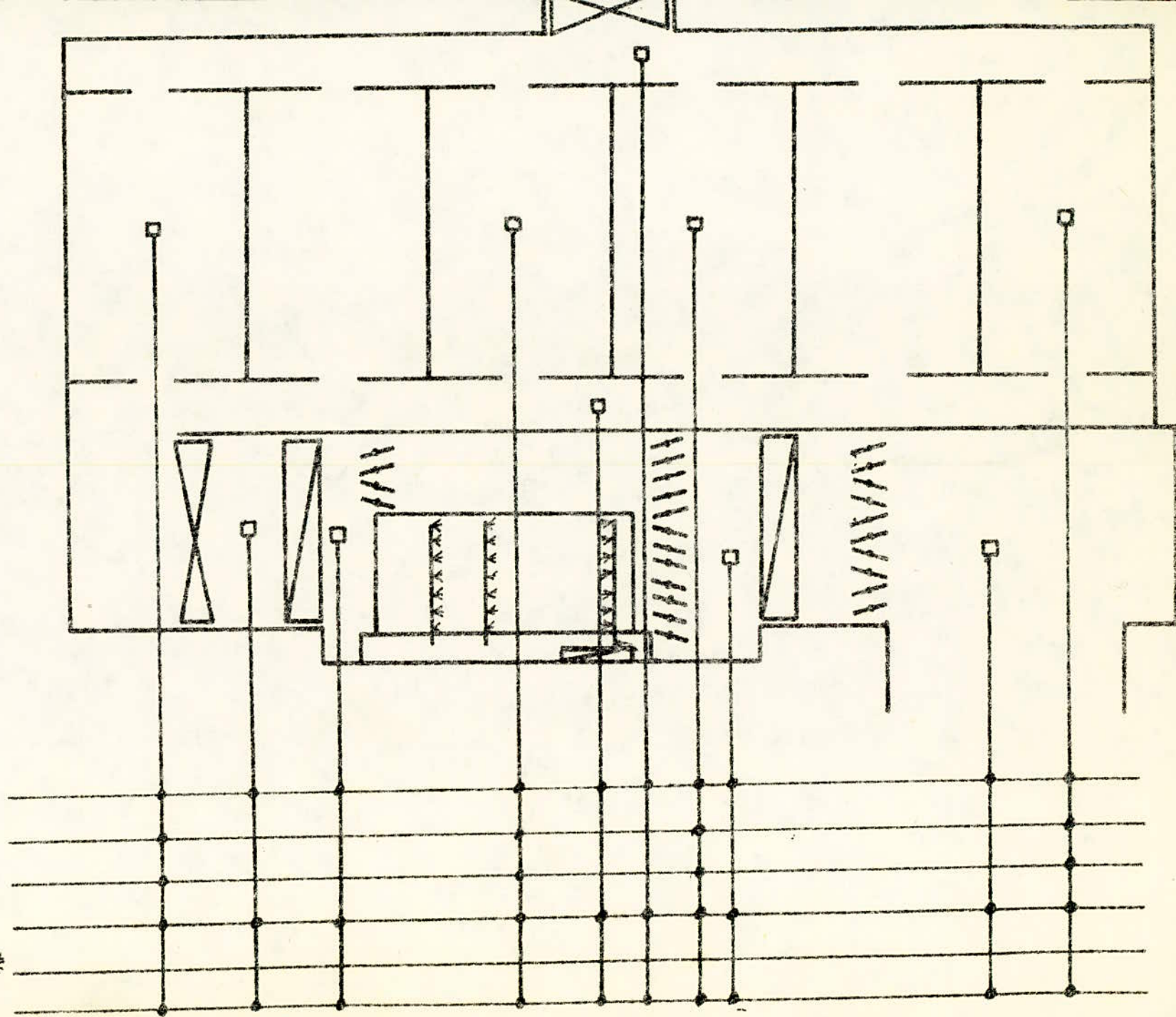


Fig. 2

Fig. 5

Temperature
humidité
mesure directe
mesure à distance
mesure avec enregistreur
mesure sans enregist.



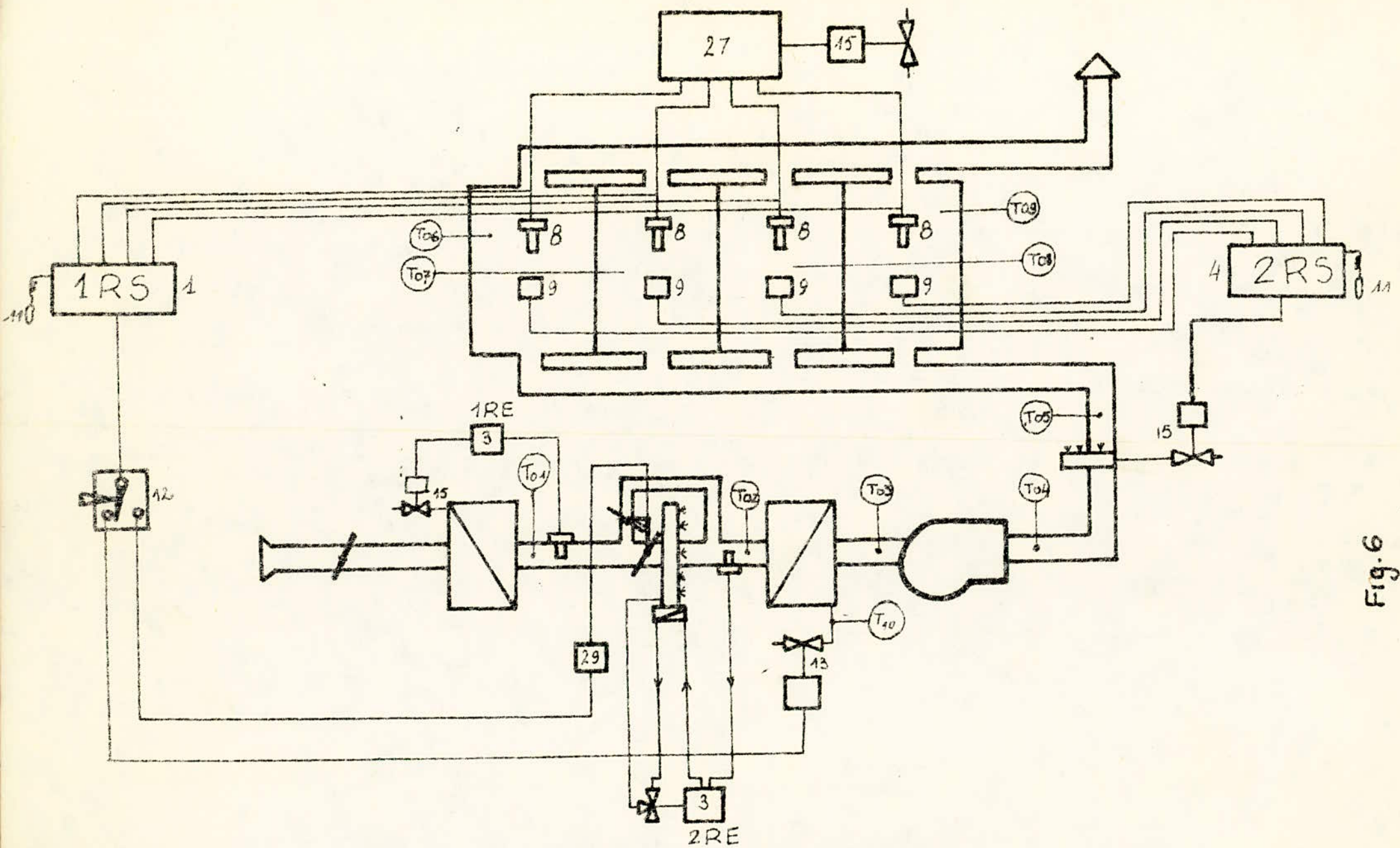


Fig. 6

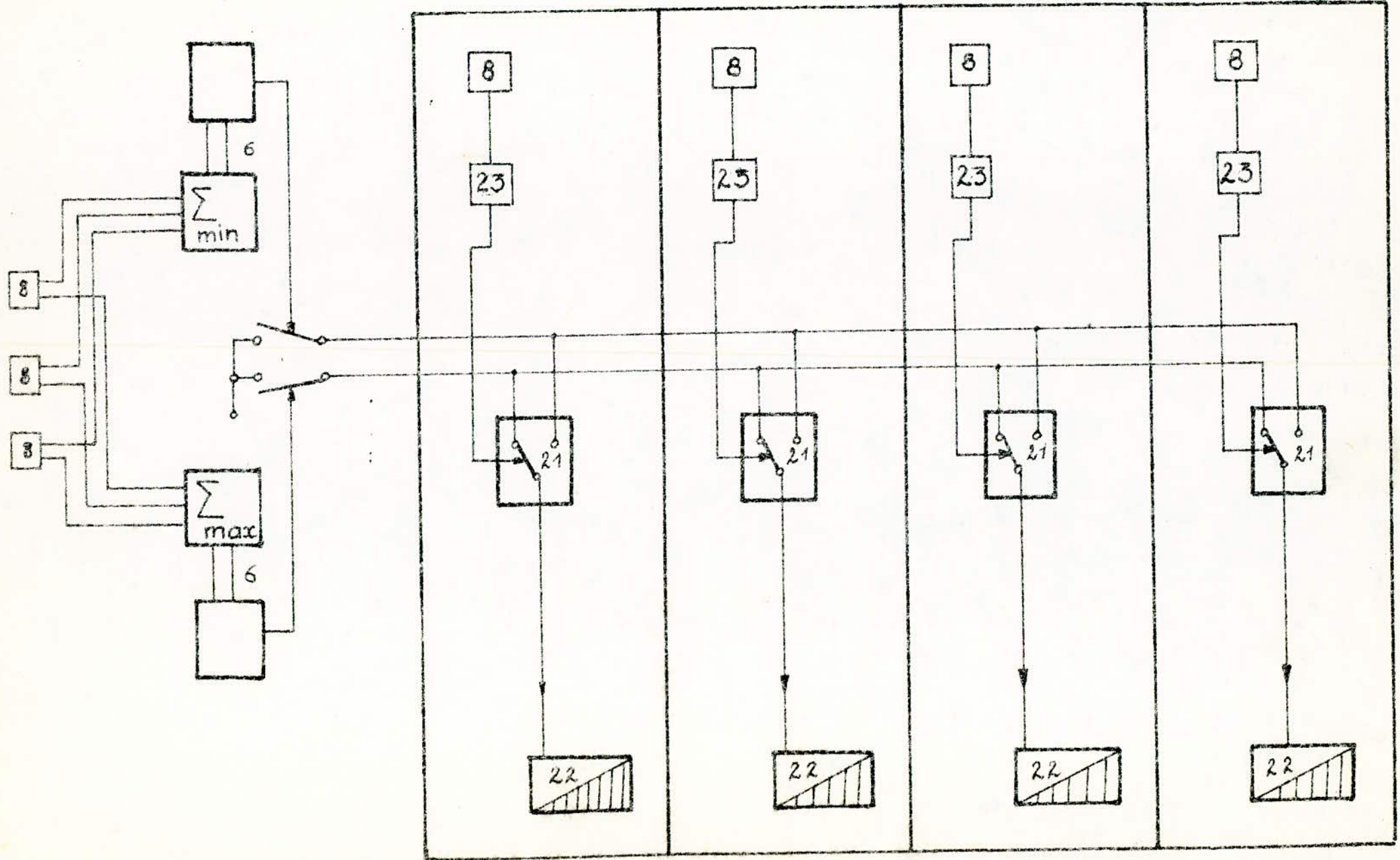
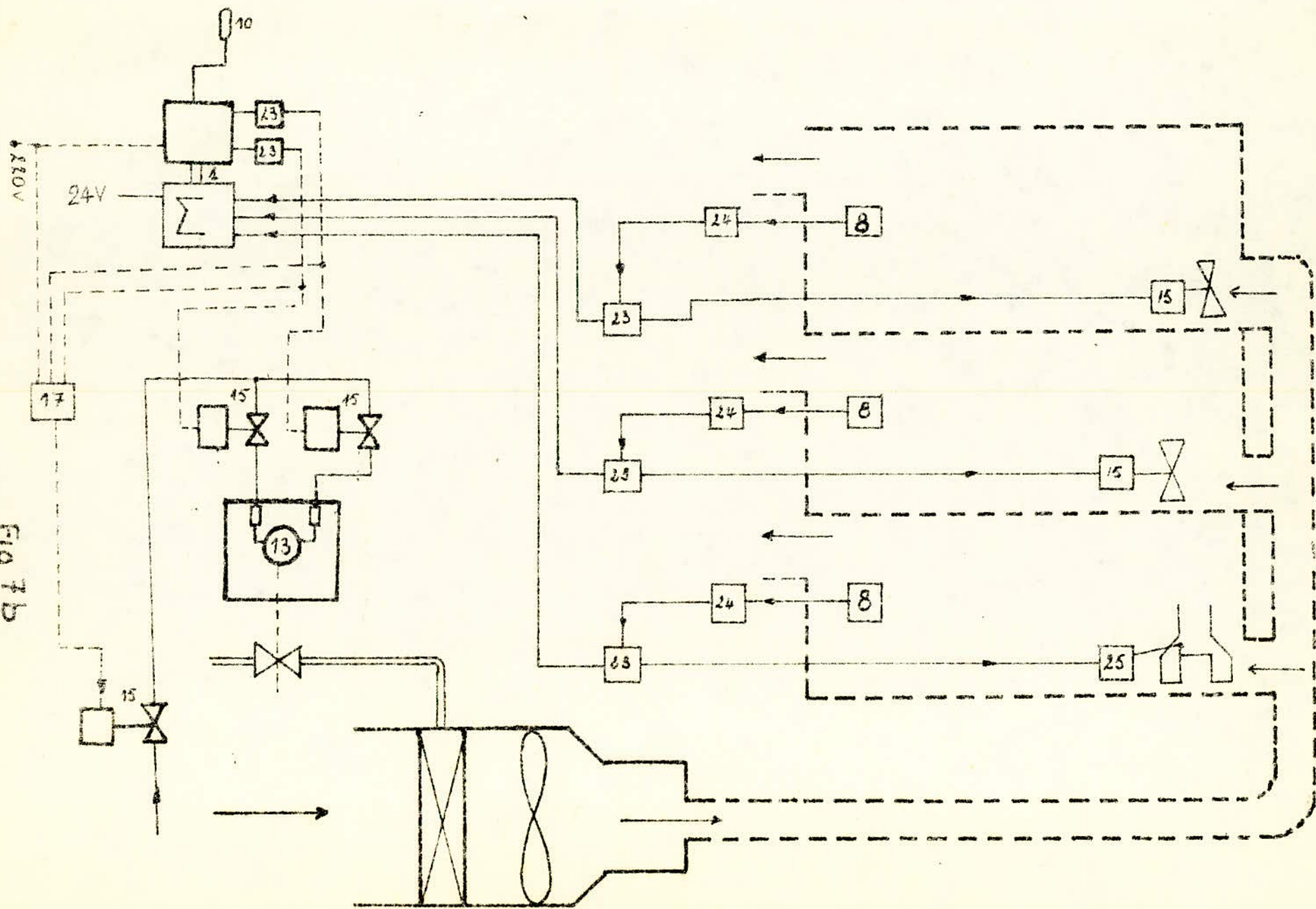


Fig-7a

Fig 7b



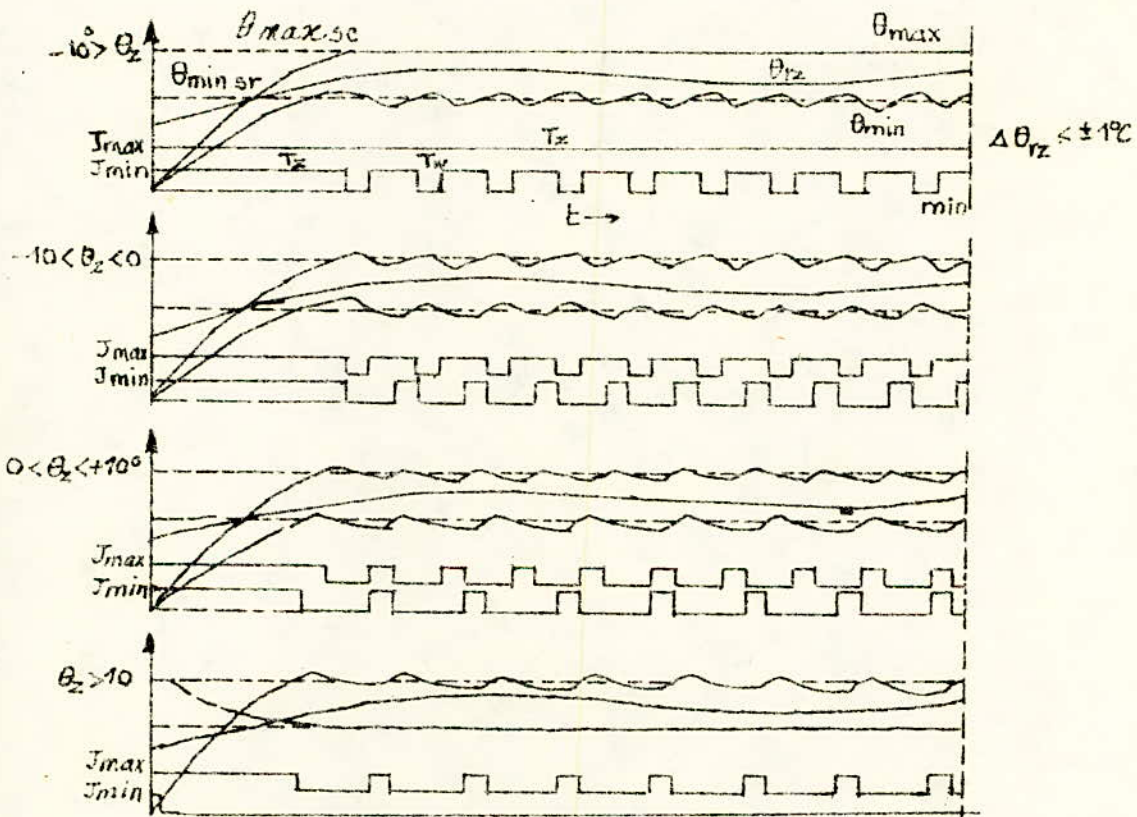
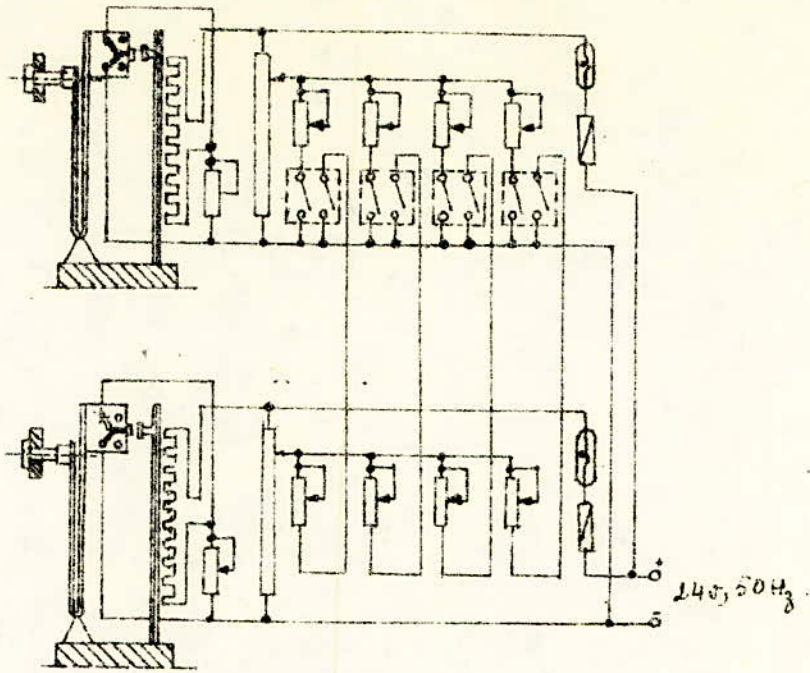
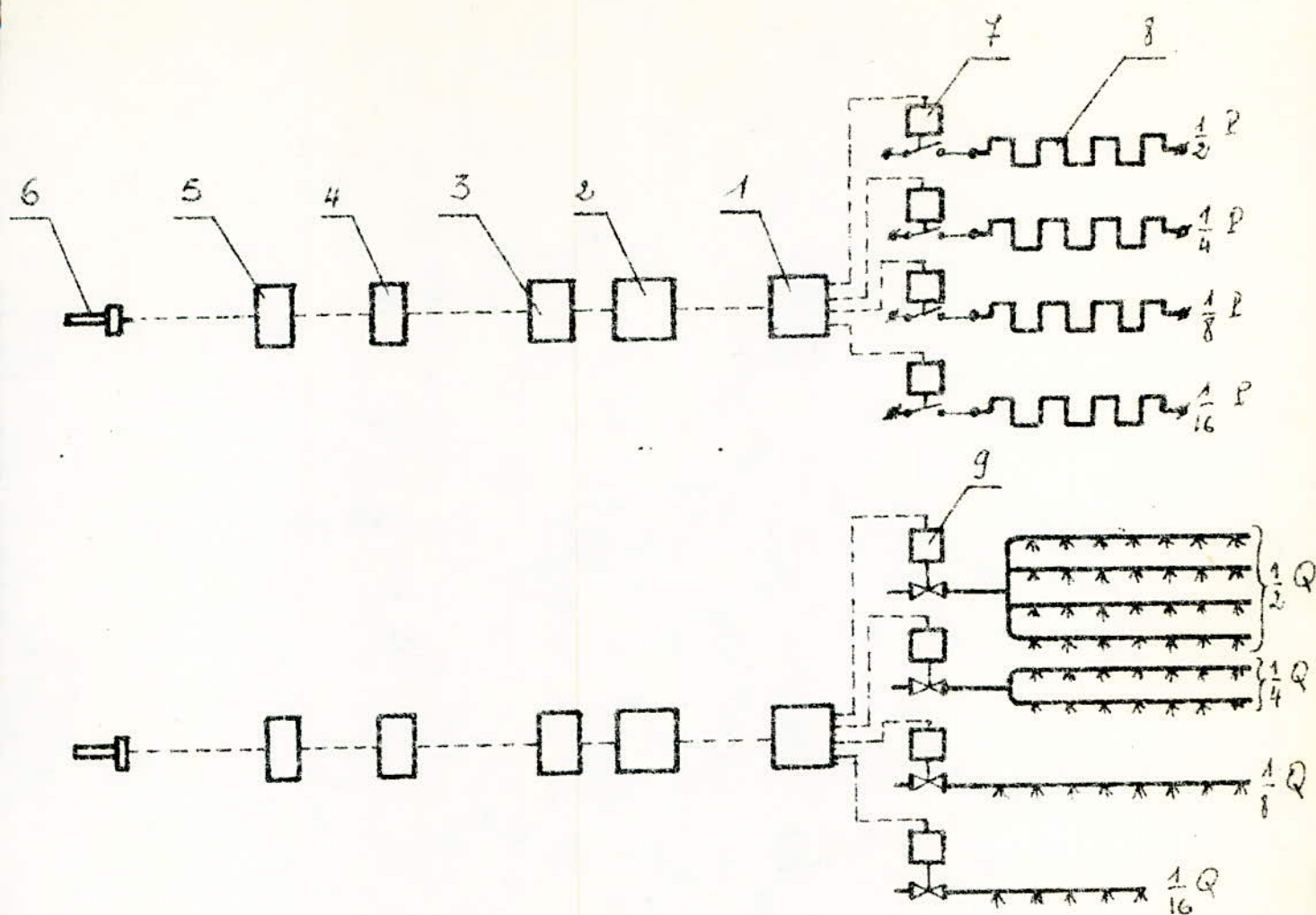


Fig. 7c



- 1- Bloc logique
- 2- Convertisseur analogique - numérique
- 3- système de changement de temps des impulsions
- 4- Amplificateur de courant alternatif
- 5- Régulateur avec pont de mesure.
- 6- Thermometre à resistance
- 7- Commutateur ou relais à 2 positions
- 8- Rechauffeur électrique (avec éléments de différentes puissances)
- 9- Sonne électromagnétique

Fig-8

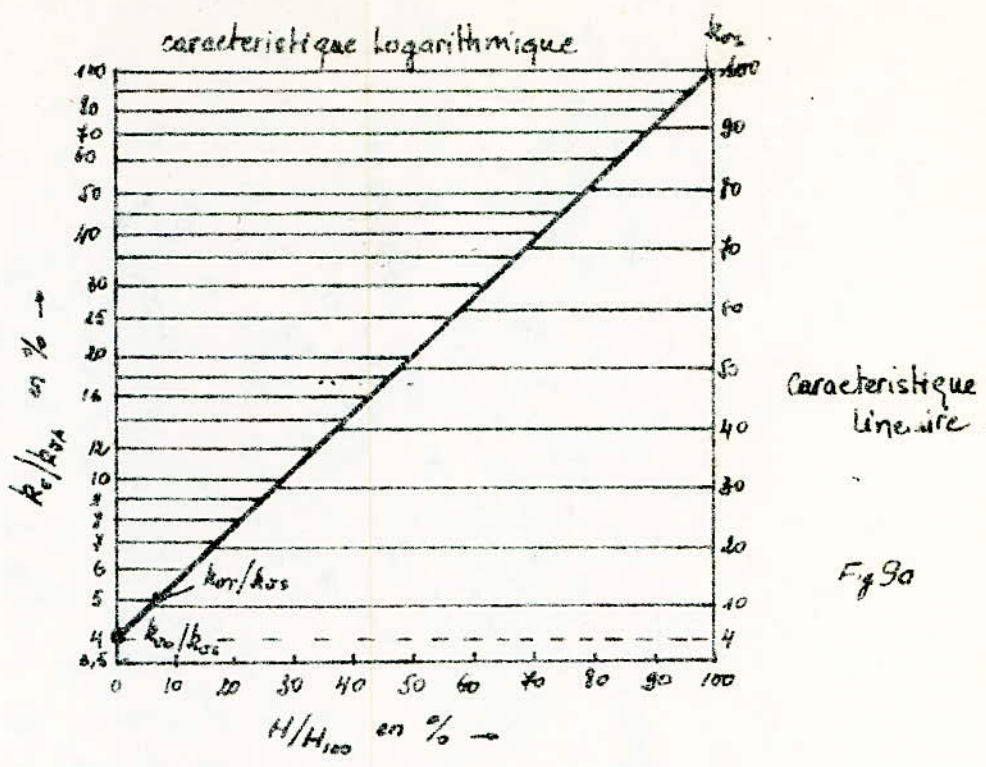


Fig 9a Caractéristiques des vannes de Régulation.

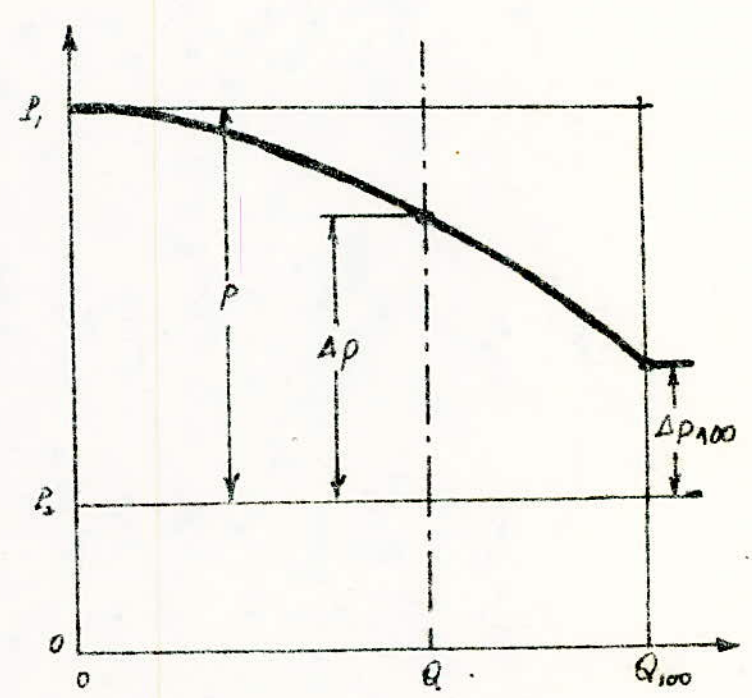


Fig 9b Relation entre les chutes de pression dans l'installation et dans la vanne.

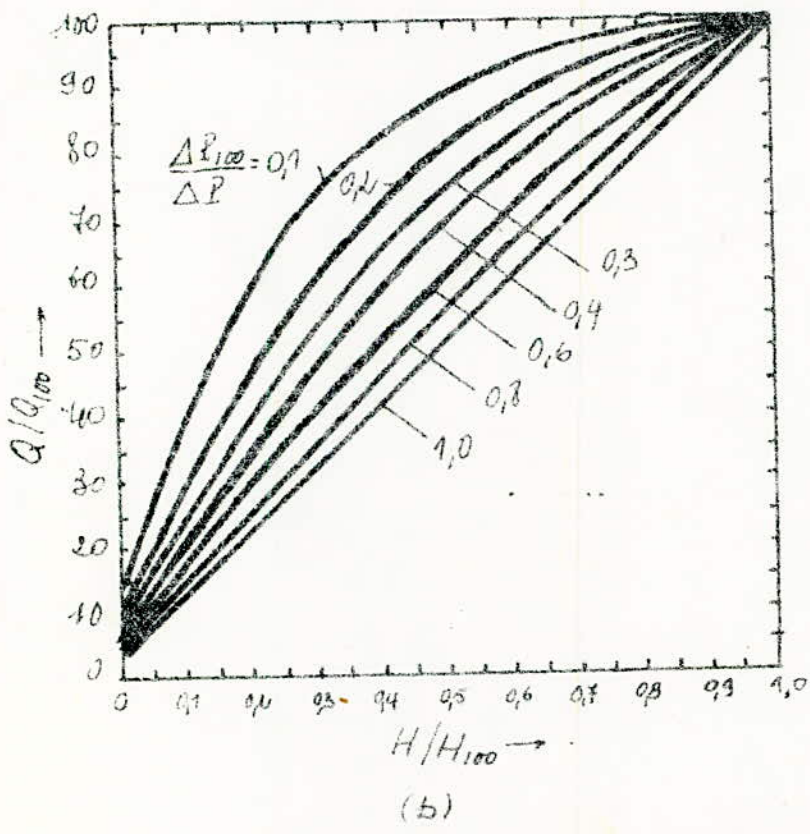
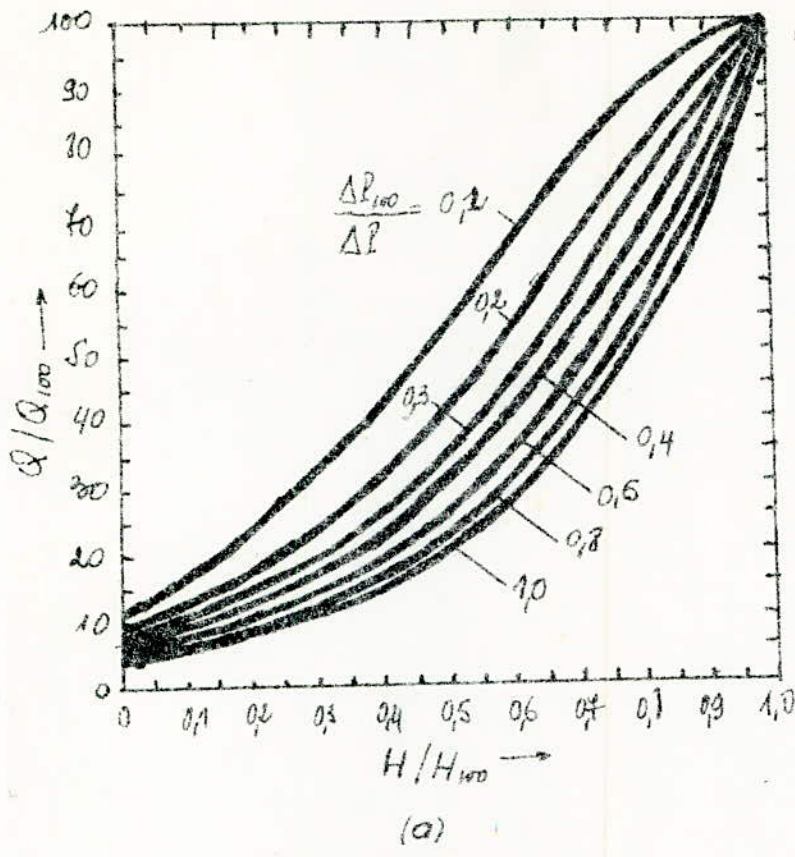


Fig 8.3 Caractéristiques en fonctionnement : (a) tangente logarithmique (b) tangente linéaire

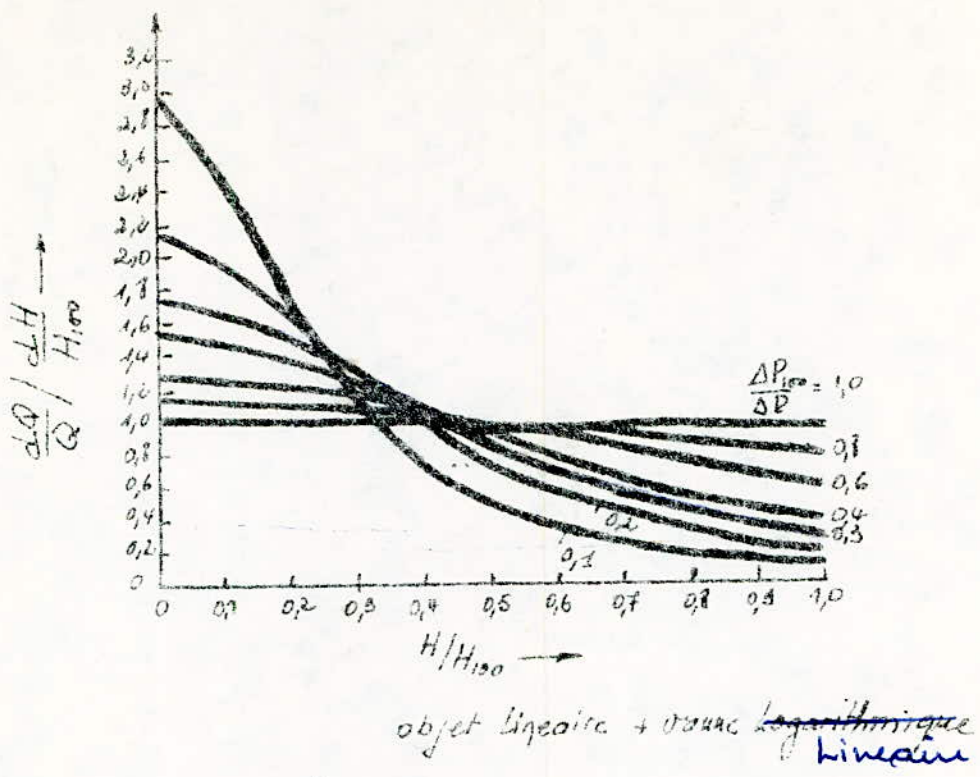


Fig 3.4

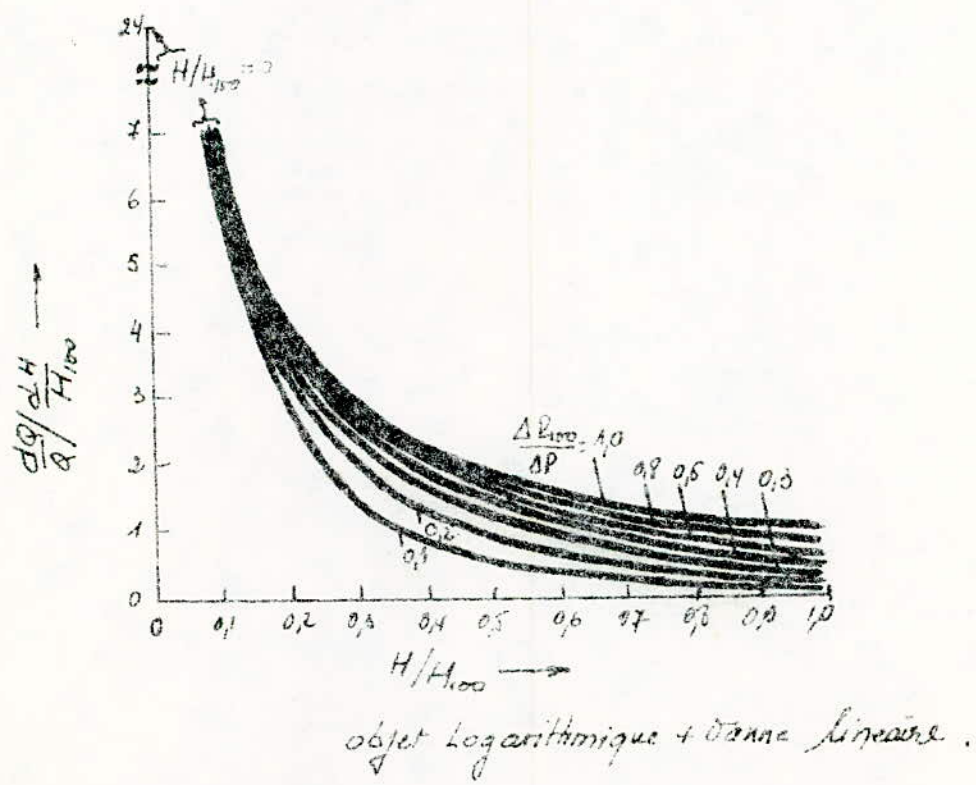


Fig 3.5

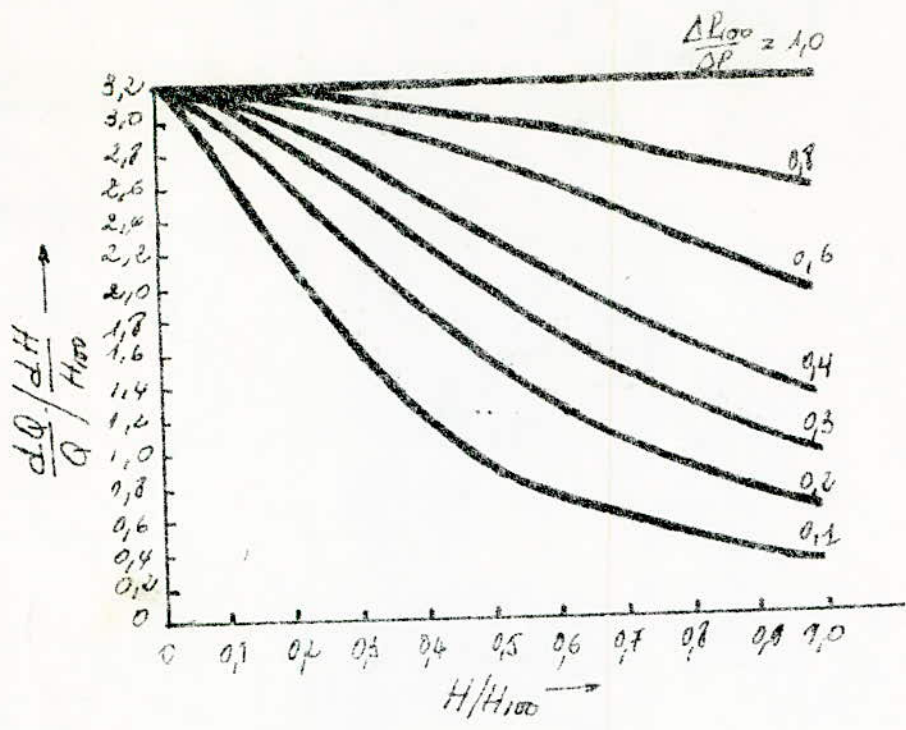


Fig 8.6 objet Logarithmique avec logarithmique.

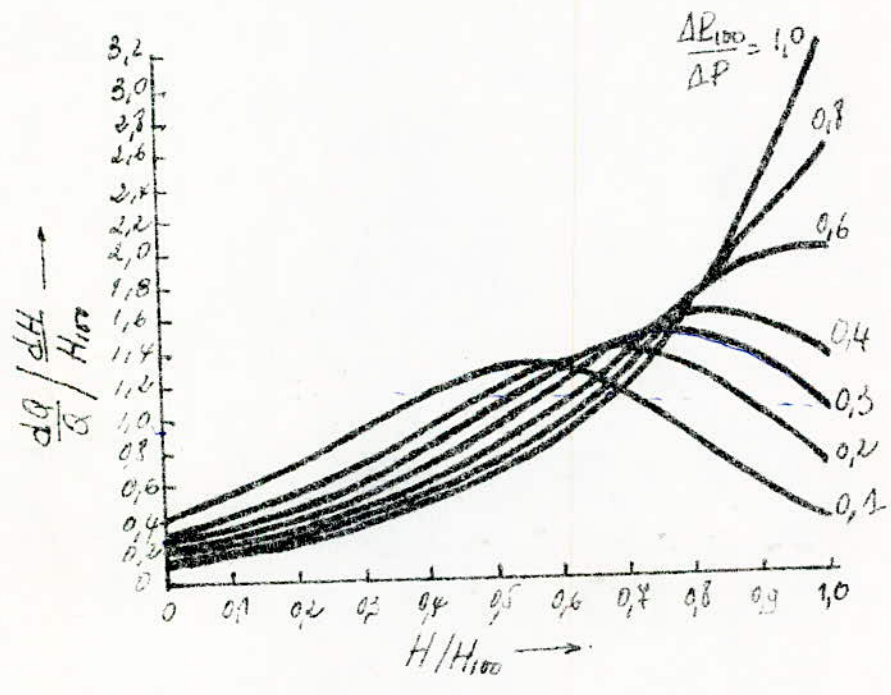


Fig 9.7. objet lineaire + avec logarithmique.

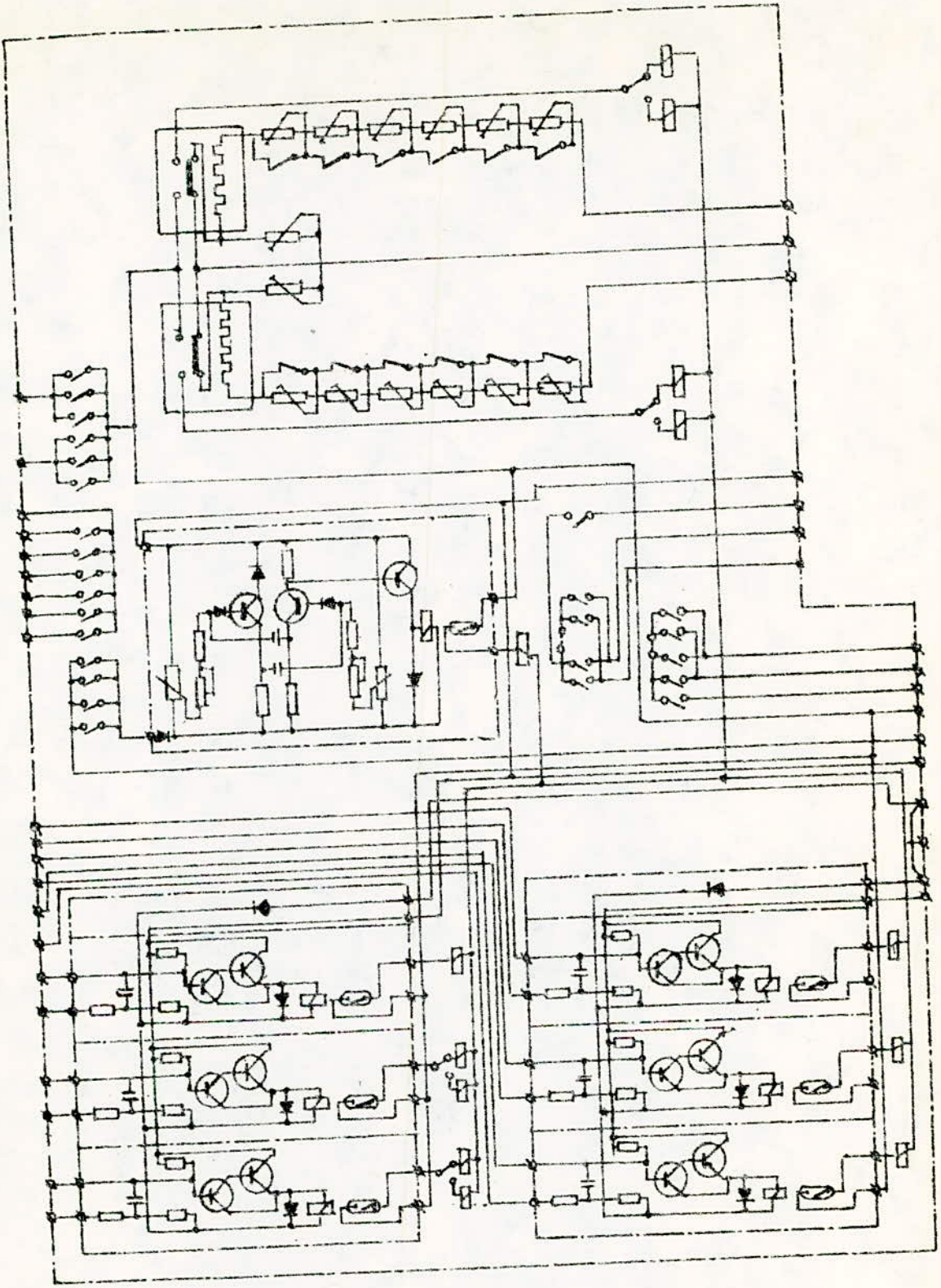


Fig-10

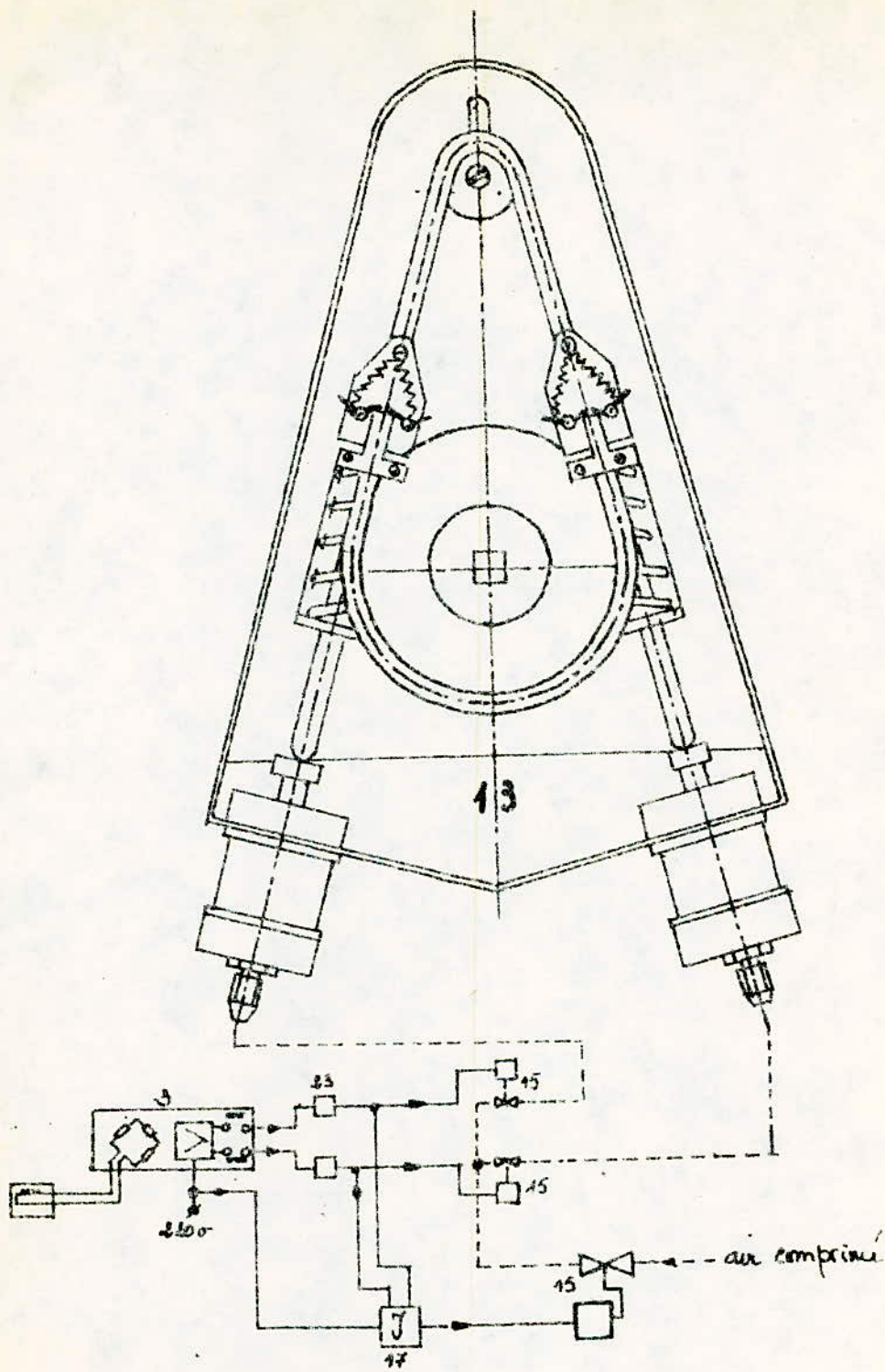


Fig-11

