

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

HOUARI BOUMEDIENNE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



PROJET DE FIN D'ETUDES

FILIERE D'INGENIEUR EN ELECTRONIQUE

**AUTOMATISATION DU PROCESSUS DE RECUPERATION
D'ENERGIE DANS LA PARTIE DU SÉCHAGE D'UNE
MACHINE A PAPIER**

PROPOSE PAR :

Z. BARSKI

DOCTEUR ES-SCIENCES

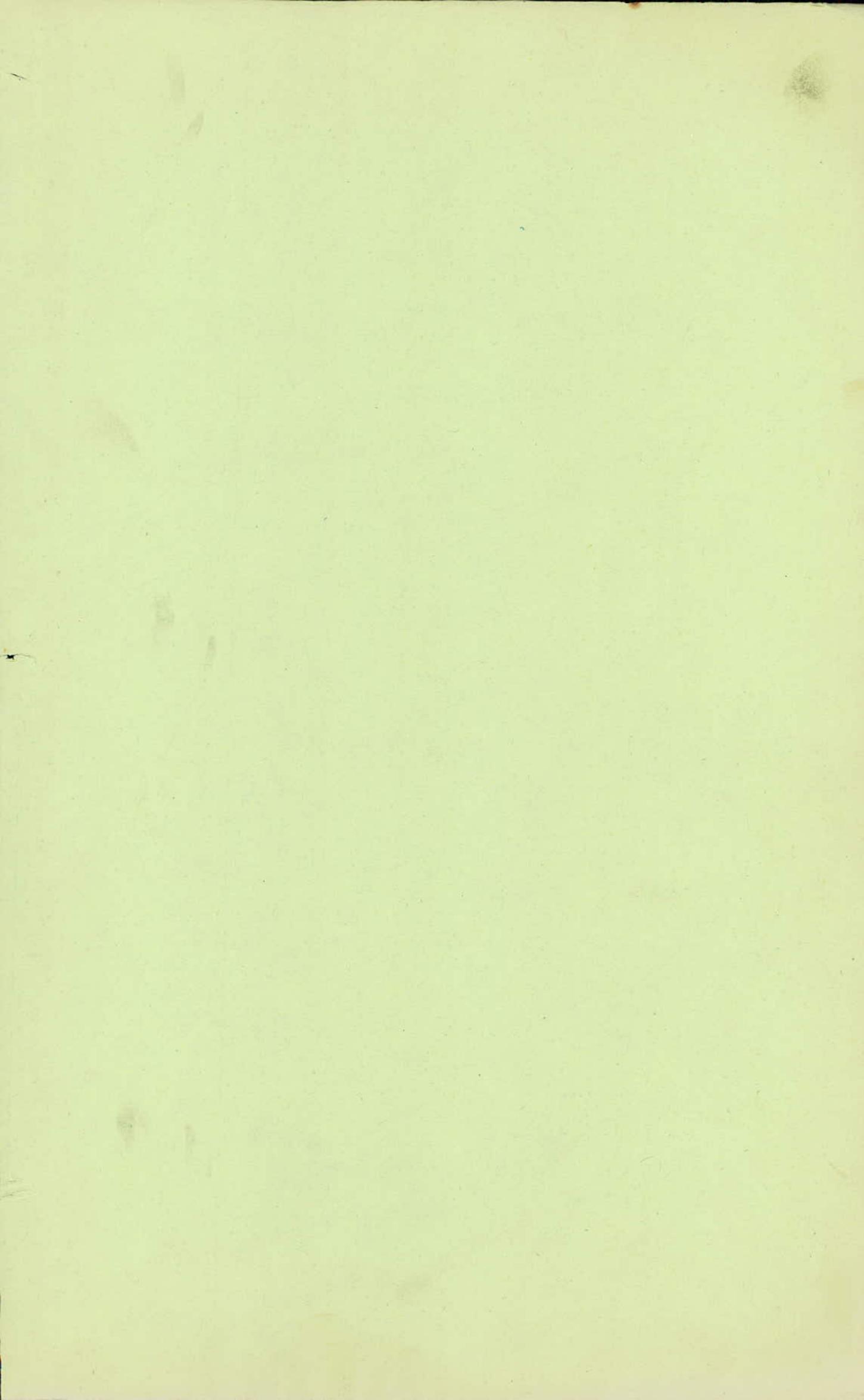


ETUDIE PAR :

MM. S. BERCHICHE

A. YESLI

PROMOTION JUIN 1980



UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
HOUARI BOUMEDIENNE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRICITE

PROJET DE FIN D'ETUDES

FILIERE D'INGENIEUR EN ELECTRONIQUE

**AUTOMATISATION DU PROCESSUS DE RECUPERATION
D'ENERGIE DANS LA PARTIE DU SECHAGE D'UNE
MACHINE A PAPIER**

PROPOSE PAR :

Z. BARSKI

DOCTEUR ES-SCIENCES

ETUDIE PAR :

MM. S. BERCHICHE

A. YESLI

PROMOTION JUIN 1980

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier vivement Monsieur E. BARSKI "Maitre de conférence" pour nous avoir proposé ce projet de fin d'études et nous avoir guidé inlassablement durant toute sa durée.

Nous remercions également tous les responsables de la SONIC, en particulier Mr. IDEL chef de la régulation qui nous à reçu dans son service et nous a procuré toute la documentation disponible.

Nos remerciements vont également aux personnes qui ont contribué à la frappe de ce polycopé,

Que tous les professeurs qui ont contribué à notre formation trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

L E D I C A C H S

[A] la mémoire de ma grand-mère.

[A] mon père.

[A] ma mère.

[A] ma femme & mes enfants.

[A] toute la famille.

[A] tous mes amis.

BROCHICHE Saïd

[A] la mémoire de mes grands parents.

[A] mon père.

[A] ma mère.

[A] mes frères & sœurs.

[A] tous mes amis.

YESLI Ali

S O M M A I R E

	Page
INTRODUCTION.....	I
CHAPITRE PREMIER.....	2
<u>ETUDE DE LA PARTIE DU SECHAGE DE LA MACHINE A PAPIER</u>	
1.- Description de la sécherie.....	2
2.- Installation de la vapeur dans les cylindres.....	2
3.- Installation de l'air humide sous la hotte.....	4
CHAPITRE DEUXIEME.....	8
<u>ANALYSE DES PROPRIETES DYNAMIQUES DU PROCESSUS AUTOMATISE</u>	
1.- Analyse des propriétés dynamiques à l'aide de la méthode théorique.....	9
1.1.- Dynamique de la température.....	9
1.2.- Dynamique de l'humidité.....	18
2.- Analyse des propriétés dynamiques à l'aide de la méthode expérimentale.....	22
2.1.- Méthode de mesure à l'aide de la réponse indicielle..	22
2.2.- Identification par la méthode de STREJC.....	24
CHAPITRE TROISIEME.....	29
<u>ANALYSE ET CHOIX DES CAPTEURS DE MESURE DE L'HUMIDITE DE L'AIR ET DE LA TEMPERATURE</u>	
1.- Capteurs pour la mesure de la température.....	29
2.- Capteurs pour la mesure de l'humidité.....	32
3.- Analyse et choix d'un système de mesure.....	36

CHAPITRE QUATRIÈME.....	38
-------------------------	----

RÉGULATION AUTOMATIQUE

1.- Les régulateurs.....	38
2.- La régulation en boucle fermée.....	46
3.- Régulation de la température dans les cylindres.....	51
4.- Régulation de la température sèche et mouillée sous la hotte.....	58
5.- Système de mesure de la température et de l'humidité de l'air.....	65
CHAPITRE CINQUIÈME.....	66
1.- Spécification et choix des vannes.....	66
2.- Les chaleurs dans l'air humide.....	71
CONCLUSION.....	74
BIBLIOGRAPHIE.....	74

I N T R O D U C T I O N

Dans la plupart des processus thermiques industriels, les pertes d'énergie ne sont pas négligeables. En particulier dans l'industrie du papier, où quand celui-ci est séché, les pertes de chaleur sont considérables, d'où la nécessité de la récupération de cette énergie s'impose.

Ceci a fait l'objet de notre étude à la SONIC d'El-Harrach où beaucoup de problèmes restent posés.

- Régulation manuelle de la température dans les cylindres sécheurs en augmentant ou en diminuant le débit de vapeur à l'aide d'une vanne : ce qui est un problème car on ne peut pas contrôler la température à chaque instant, alors que théoriquement pour une meilleur qualité du papier les températures dans les cylindres doivent être constantes pour chacun d'eux et variables suivant qu'on passe d'un cylindre à un autre.
- Inexistence d'un système de récupération de l'énergie résultant du papier séché.

Le but de notre étude est de proposer des systèmes de régulation de la température et de l'humidité pour diminuer l'énergie et faire sa récupération.

CHAPITRE PREMIER

ETUDE DE LA PARTIE DU SECHAGE DE LA MACHINE A PAPIER

1.-Description de la sécherie.

La section dite sécherie se compose de vingt neuf cylindres (séchateurs) de 1524 mm de diamètre avec une largeur de table de 3606,8 mm. La section sécherie au complet est aménagée en cinq batteries dont la première comprend huit séchateurs de feuilles, la seconde dix séchateurs de feuilles, les troisième et quatrième chacune quatre séchateurs de feuilles et la cinquième ayant trois séchateurs de feuilles. Un cylindre refroidisseur est situé en bout de la cinquième batterie.

Les 29 cylindres sont répartis en trois groupes alimentés différemment en vapeur. Le premier groupe est constitué des cylindres de 1 à 6, le deuxième groupe de 7 à 18 plus 2 séchateurs feutres, le troisième groupe est constitué de 19 à 29.

Notons qu'un cylindre Clupak est placé entre le deuxième et troisième groupe dont le rôle est d'améliorer la dureté du papier.

2.-Installation de la vapeur dans les cylindres.

Deux sources de vapeur saturée sont prévues pour l'alimentation de ces cylindres. La plus petite de ces deux sources est à une pression de $10,5 \text{ kg/cm}^2$ et n'alimente le cylindre Clupak que lors du fonctionnement normal.

La plus grande à une pression de $5,3 \text{ kg/cm}^2$ alimente le reste du système et aussi le cylindre Clupak lors du chauffage initial.

La pression de la petite source est plus grande car, le Clupak demande plus de chaleur pour le séchage du papier.

Remarque :

Le Clupak est mis hors service à la SONIC d'El-Harrach pour éviter de desservir uniquement le marché de la S.N.M.C.

Dans un premier temps, la vapeur issue de la grande source à $5,3 \text{ kg/cm}^2$ rencontre une vanne maitresse fonctionnant manuellement ; puis elle passe dans une soupape de contrôle automatique (CV72 - 118) commandée par un contrôleur-indicateur de pression PIC relié à un détecteur PX, qui transmet la pression au PIC réglé déjà à une valeur de consigne. L'écart entre la consigne et la pression détectée permet au régulateur PIC d'agir sur le réglage de la soupape CV72-118 pour rétablir l'état de pression désiré.

La vapeur sortant de la vanne passe dans un collecteur de vapeur qui la distribue dans les différents groupes de cylindres.

Le papier passant sur les différents cylindres doit être séché d'une façon progressive, d'où la nécessité d'avoir un différentiel de pression entre un groupe et un autre. Afin d'éviter l'engorgement des cylindres par l'eau, il est nécessaire en tout temps de maintenir une chute de pression minimale de $0,25 \text{ kg/cm}^2$ à chaque groupe de cylindres. Les pressions minimales auxquelles les cylindres pourront fonctionner sont les suivantes :

cylindres n° 1 à 6	$0,10 \text{ kg/cm}^2$
" n° 7 à 18	
plus sècheurs feutres I et II	$0,35 \text{ kg/cm}^2$
cylindre Clupak	$0,35 \text{ kg/cm}^2$
" n° 19 à 29	$0,60 \text{ kg/cm}^2$
rouleaux de calendrage	$0,35 \text{ kg/cm}^2$
enrouleuse	$0,10 \text{ kg/cm}^2$

Il importe que lors de l'élévation des pressions au dessus des minimas indiqués, cela s'effectue de telle sorte à maintenir ou augmenter la chute de pression de $0,25 \text{ kg/cm}^2$ aux groupes de cylindres associés, en aucun cas, on ne devra diminuer cette chute de pression.

L'alimentation des deux premiers groupes de cylindres se fait à partir du collecteur de vapeur, chacun par l'intermédiaire d'une vanne de contrôle automatique, commandée par un contrôleur-indicateur de pression différentielle (PIC diff), relié à un transmetteur de pression différentielle (détecteur de différence de pression PX diff).

Ainsi les différences de pression entre un groupe de cylindres et un autre sont à chaque fois contrôlées par le détecteur de pression différentielle et doivent correspondre à la consigne affichée au PIC diff.

Par conséquent les passages de vapeur dans les différents groupes sont dépendants.

Remarque :

Le troisième groupe n'étant pas muni d'un régulateur, cependant le passage de la vapeur dans ce groupe est contrôlé par les régulateurs des deux autres groupes grâce aux deux PX diff existant. La soupape CV-118 est conçue pour le contrôle de détente, de pression et entretiendra une pression constante pré-réglée dans le collecteur de vapeur et dans le groupe comprenant les cylindres n° 19 à 29. Après utilisation optimale dans ces cylindres, le mélange résultant de vapeur et de condensat est refoulé dans le séparateur de vapeur et de condensat S₁. Le condensat est refoulé dans la conduite de condensat via la soupape à flotteur de séparateur et la vapeur d'échappement est utilisée pour alimenter le groupe principal de présècheurs comprenant les cylindres n° 7 - 18 et les sècheurs feutres n° I et II.

La soupape CV 116 conçue pour le contrôle différentiel de pression et entretiendra un différentiel de pression constant préréglé entre le groupe de cylindres après sécherie et le groupe principal de cylindre avant sécherie. Après utilisation optimale au sein du groupe principal de présécherie, le mélange résultant de vapeur et de condensat est refoulé dans le séparateur de vapeur et condensat S2. Le condensat est refoulé dans la conduite vers les chaudières et la vapeur d'échauffement est utilisée pour alimenter le groupe extrémité humide de présécheurs comprenant les cylindres n° 1 à 6.

La soupape CV 115 est conçue pour le contrôle différentiel de pression et entretiendra un différentiel de pression constant préréglé entre le groupe principal de cylindres avant sécherie et le collecteur de vapeur alimentant les groupes pré-sécheurs (extrémité humide).

Les six sécheurs extrémité humide sont dotés de soupapes de réglage manuel et de manomètres à leur entrée. Il est ainsi possible de créer une courbe ascendante de pression et de température en travers de ces cylindres. Après utilisation optimale dans les cylindres, le mélange résultant de vapeur et de condensat est refoulé sous vide partiel dans l'échangeur de chaleur, où il est condensé, refroidi et ensuite refoulé à la cuve réceptrice de condensat par la pompe EP1.

Les six premiers sécheurs sont dotés de soupapes de commande et de lucarnes d'inspection individuelle à leur sortie. Un bon réglage de ces soupapes assurera un déchargement optimum de condensat avec un écoulement minimum de vapeur vers l'échangeur de chaleur.

3.-Installation de l'air humide sous la hotte.

3.1-Notion d'humidité de l'air

L'air sec et la vapeur d'eau forment le mélange "air humide". La tension partielle de la vapeur d'eau peut donc, dans un mélange air-vapeur d'eau, prendre toute valeur comprise entre zéro et la tension de saturation correspondant à la température donnée.

La tension de saturation est celle pour laquelle de l'eau (glace) et de la vapeur d'eau se trouvent à l'équilibre à une température donnée. Il ne peut plus y avoir d'évaporation après l'établissement de la tension de saturation.

En général la vapeur d'eau n'atteint pas sa tension de saturation dans l'air, mais une valeur inférieure. Cette valeur, à savoir le pourcentage réel de vapeur d'eau dans l'air, ou humidité de l'air peut s'exprimer de diverses façons, sous forme par exemple :

- tension de vapeur : qui est la tension de vapeur présente dans l'air, elle s'exprime en mm de mercure

- humidité absolue : qui est la masse de vapeur d'eau par unité de volume d'air, elle s'exprime en gramme par m^3 d'air.
- humidité spécifique : qui est la masse de vapeur d'eau par unité de masse d'air, elle s'exprime en gramme par kg d'air sec ou humide,
- humidité relative ou degré hygrométrique H, qui est le rapport entre la tension de vapeur existante e dans l'air et la tension de saturation E correspondant à la même température.

$$H = \frac{e}{E}$$

L'humidité relative peut s'exprimer aussi par le rapport de la quantité de vapeur d'eau réelle à la quantité maximale possible de vapeur d'eau.

$$H = \frac{\text{Quantité de vapeur d'eau réelle}}{\text{Quantité maximale possible de vapeur d'eau}}$$

Entre les masses et les volumes de l'air humide et de ses éléments constitutifs, on a les relations suivantes :

$$M_v + M_a = M$$

$$V_v = V_a = V$$

avec :

M_v [kg] : masse de la vapeur d'eau

M_a [kg] : masse de l'air sec

M [kg] : masse du mélange

V [m^3] : volume occupé par l'air humide

V_v [m^3] : volume occupé par la vapeur d'eau

V_a [m^3] : volume occupé par l'air sec

Avec une grande approximation on peut considérer les deux éléments constitutifs air sec et vapeur d'eau comme gaz parfaits et leur appliquer l'équation d'état correspondante.

$$PV = RT \quad \text{ou} \quad PV = MRT$$

$$\text{soit, } M = \frac{V}{T} \cdot \frac{1}{R} \cdot P \quad (1)$$

On peut définir la pression de vapeur dans l'air humide comme une fraction x de la pression de saturation à la température considérée.

$$P_v = x \cdot P_s$$

L'air humide occupe un volume V (m^3) caractérisé, par sa pression P (pression barométrique) et la température t en ($^{\circ}C$) ou T en ($^{\circ}K$).
 En notant par P_v la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air humide et par P_a la pression partielle de l'air sec, on peut écrire (Loi de Dalton).

$$P = P_a + P_v$$

Nous écrivons les deux pressions partielles

$$P_v = x \cdot P_s$$

$$P_a = P - P_v = P - x \cdot P_s$$

De l'égalité (1) on tire :

Pour l'air :

$$M_a = \frac{V}{T} \cdot \frac{1}{R_a} \cdot P_a = \frac{V}{T} \cdot \frac{P - x P_s}{R_a} \quad (1.01)$$

Pour la vapeur d'eau :

$$M_v = \frac{V}{T} \cdot \frac{P_v}{R_v} = \frac{V \cdot x \cdot P_s}{T \cdot R_v} \quad (1.02)$$

Pour le mélange :

$$M = \frac{V}{T} \left[\frac{P}{R_a} - x \cdot P_s \left(\frac{1}{R_a} - \frac{1}{R_v} \right) \right] \quad (1.03)$$

R_a et R_v sont les constantes spécifiques du gaz idéal pour l'air sec et pour la vapeur d'eau.

De l'égalité (1.02) résulte qu'un volume V [m^3] d'air humide contient les masses suivantes de vapeur d'eau :

à l'état non saturé : $M_v = \frac{V}{T} \cdot \frac{x P_s}{R_v}$

à l'état de saturation : $M_{vs} = \frac{V}{T} \cdot \frac{P_s}{R_v}$

Ce dernier est la teneur maximale en vapeur d'eau généralement possible à la température considérée.

Il vient que :

$$H = \frac{M_v}{M_{v_s}} = \frac{\alpha P_s}{P_s} = \alpha = \frac{P_v}{P_s} \quad (1.04)$$

Ceci montre que l'humidité relative est le rapport de la pression de vapeur à la pression de saturation.

Exemple :

Supposons un mètre cube d'air à 18°C. S'il est saturé de vapeur d'eau, il contient 15,4g d'eau dont la tension E est de 15,36mm Hg. Si toujours à la même température de 18°C, ce même mètre cube d'air ne contient que 3,05g de vapeur d'eau dont la tension e est de 3,071mm de mercure.

L'humidité relative sera :

$$H = \frac{e}{E} = \frac{M_v}{M_{v_s}} = \frac{3,071}{15,36} = \frac{3,05}{15,4} \approx 20\%$$

On définit aussi la température de rosée comme étant la température en (°C) à laquelle la teneur de l'air en vapeur d'eau est égale à la teneur maximale possible. Lorsque l'état de saturation est atteint, l'air n'est plus en mesure d'absorber davantage, et la vapeur éventuellement en excès, se condense ou reste en suspension sous forme d'un brouillard visible. Pour quitter l'état de saturation il faut augmenter la température de l'air.

3.2-Installation de l'air humide.

La hotte est une couverture pour la sécherie. Dans cette partie où le papier est séché, il y a un dégagement intense de vapeur d'eau. Celle-ci combinée avec l'air de la hotte donne naissance à de l'air humide dont l'humidité relative et la température influent beaucoup sur la qualité du papier. Pour cette raison, une régulation de ces deux paramètres s'impose.

Cet air humide contient de la chaleur, il sera donc très utile de le récupérer pour servir au séchage du papier. Donc il faudrait canaliser cet air humide par l'intermédiaire de gaines et le mélanger avec de l'air extérieur pour avoir selon le cas, l'humidité relative et la température voulues. Il est ensuite recyclé vers la hotte comme le montre le schéma de la figure 5 chapitre 4.

Un système d'évacuation de l'air vers l'extérieur est prévu pour le renouvellement de cet air.

CHAPITRE DEUXIEME

ANALYSE DES PROPRIETES DYNAMIQUES DU PROCESSUS AUTOMATISE

Le fonctionnement d'une boucle de régulation ne doit pas seulement être considéré du point de vue statique, c'est à dire d'un point de vue d'où le temps est exclu et où l'on ne tient compte que des situations permanentes. On doit au contraire tenir compte des modifications des différentes grandeurs dans le temps. Nous dirons qu'il s'agit de l'aspect dynamique des phénomènes. A titre d'exemple nous choisirons un phénomène de régulation, dû à la variation d'une grandeur perturbatrice. Comme le réchauffeur possède une certaine capacité thermique, la grandeur réglée n'augmente pas immédiatement. En outre, il se passe du temps jusqu'à ce que la sonde annonce ce changement au régulateur, car elle possède aussi une inertie thermique. La transmission de ce signal au comparateur est relativement rapide et le régulateur lui même envoie également avec un retard relativement faible le signal de commande en fonction de l'écart, de telle sorte que finalement le débit d'eau chaude traversant le réchauffeur est réduit, pour ramener de nouveau la valeur actuelle de la grandeur à la valeur de consigne. Le signal de commande est de même retardé, de sorte qu'il se passe de nouveau du temps jusqu'à ce que la sonde enregistre l'effet de la lutte contre la grandeur perturbatrice par le régulateur.

Ce comportement intéressant du point de vue régulation est appelé comportement au transfert ; on distingue le comportement à l'état d'équilibre (comportement statique) et le comportement dans le temps (comportement dynamique).

Le comportement statique est généralement donné sous forme d'une courbe caractéristique représentant la relation entre la grandeur de sortie et la grandeur d'entrée. Très souvent la grandeur de sortie est également fonction d'autres grandeurs (grandeurs perturbatrices).

Le comportement dynamique est très clairement indiqué par la réponse au signal échelon. Il faut entendre par là, le comportement dans le temps de la grandeur de sortie lorsque la grandeur d'entrée fait un saut brusque. Il concerne donc le mode de passage d'un état à un autre.

Dans notre cas, cette analyse se fera pour la gaine, la hotte considérée comme un local, les échangeurs et les capteurs.

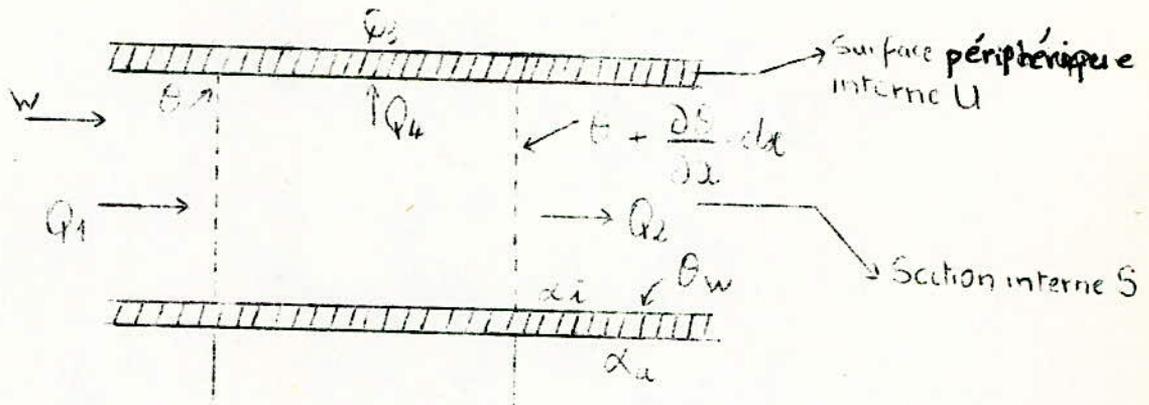
1.-Analyse des propriétés dynamiques à l'aide de la méthode théorique.

1.1-Dynamique de la température.

1.1.1-La gaine.

On considère un morceau de gaine de section interne S et de surface périphérique interne U .

La vapeur qui traverse cette gaine est caractérisée par une masse volumique f_L , une chaleur massique C_{pL} , une vitesse d'écoulement w exprimée en m/s.



On part du bilan thermique.

$$Q_1 = f_L C_{pL} w S \cdot \theta \cdot dt$$

qui représente la chaleur amenée par la vapeur d'eau.

$$Q_2 = f_L C_{pL} w S \left(\theta + \frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot dx \right) dt$$

celle sortant de la vapeur d'eau.

$$Q_3 = \alpha_i (\theta - \theta_w) U dx \cdot dt$$

qui est la chaleur cédée à la paroi.

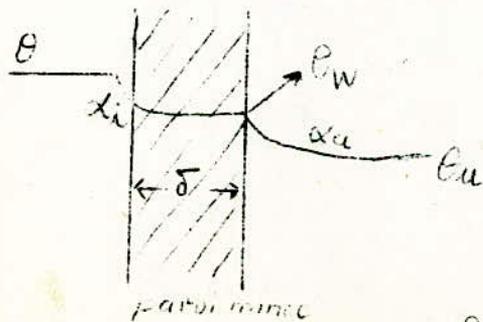
où : α_i coefficient d'échange thermique

θ température d'entrée de la vapeur

θ_w température interne de la paroi

et
$$Q_4 = f_L C_{pL} S \frac{\partial \theta}{\partial t} dx \cdot dt$$

qui est la chaleur emmagasinée.



On considère que notre gaine a une paroi d'épaisseur δ
le principe de la conservation d'énergie s'applique.

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4$$

$$\rho_L C_{pL} w S \cdot \theta dt = \rho_L C_{pL} w S \left(\theta + \frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot dx \right) dt + \alpha_i (\theta - \theta_w) U dx dt \\ + \rho_L C_{pL} S \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot dx \cdot dt$$

On en tire de cette égalité après simplification.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + w \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\alpha_i U (\theta - \theta_w)}{\rho_L C_{pL} S} = 0 \quad (1)$$

La température de paroi θ_w n'est pas une constante, mais elle est également une fonction du temps en dynamique. La paroi mince est caractérisée par le fait que la variation de la température y est constante et qu'elle est par suite une fonction du temps et non du lieu. On obtient pour elle, avec θ_a température d'ambiance constante, à partir du bilan calorifique, avec de faibles variations l'équation différentielle.

$$\frac{\rho_w C_w \delta}{(\alpha_i + \alpha_a)} \Delta \theta_w + \Delta \theta_w = \frac{\alpha_i}{\alpha_i + \alpha_a} \cdot \Delta \theta \quad (2)$$

Cette équation est celle d'un élément de transfert du premier ordre.

$T = \rho_w C_w \delta / (\alpha_i + \alpha_a)$ est la constante de temps et
 $K_p = \alpha_i / (\alpha_i + \alpha_a)$ le coefficient de transfert. On obtient alors la réponse harmonique :

$$\frac{\Delta \theta_w}{\Delta \theta} = \frac{\frac{\alpha_i}{(\alpha_i + \alpha_a)}}{1 + \left[\frac{\rho_w C_w \delta}{(\alpha_i + \alpha_a)} \right] P} = F(P) \quad (3)$$

On peut maintenant à l'aide des équations (2) et (3) résoudre l'équation (1)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + w \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\alpha_i U (\theta - \theta_w)}{\rho_L C_{pL} S} = 0$$

Car on connaît la relation entre la température de la gaine et la température superficielle de la paroi ($\theta_w = F(P) \cdot \theta$)

L'équation (1) devient alors:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + w \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\alpha_i U \theta (1-F(P))}{\beta_L C_{pL} S} = 0$$

D'où en passant aux notations de Laplace:

$$\frac{P \theta(P)}{w} + \frac{\alpha_i U \theta(P) [1-F(P)]}{\beta_L C_{pL} S w} + \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \Rightarrow$$

$$\theta(P) \left[\frac{P}{w} + \frac{\alpha_i U (1-F(P))}{\beta_L C_{pL} S w} \right] + \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$$

Donc $k \theta(P) + \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \Rightarrow \theta = A e^{-kx}$

$\theta = \theta_0$ pour $x=0 \Rightarrow A = \theta_0$

$\theta = \theta_L$ pour $x=L$ d'où

$$\frac{\theta_L}{\theta_0} = e^{-kL} \text{ avec } k = \frac{P}{w} + \frac{\alpha_i U (1-F(P))}{\beta_L C_{pL} S w}$$

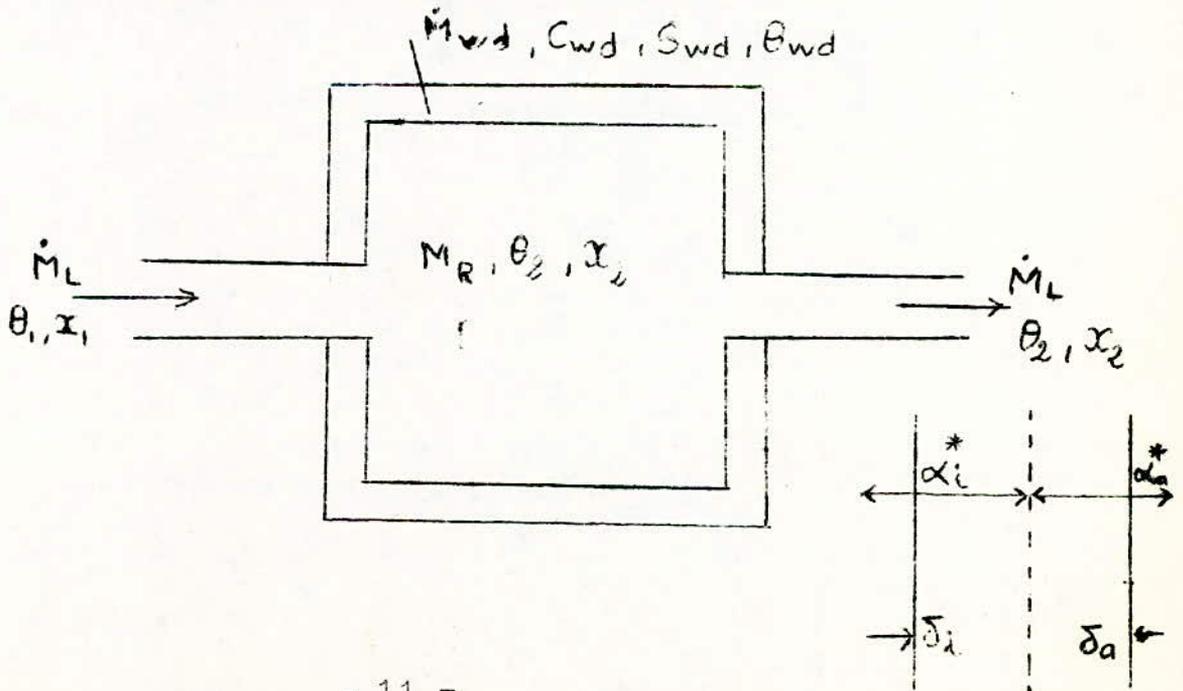
d'où

$$\frac{\Delta \theta_L}{\Delta \theta_0} = \exp\left(-\frac{PL}{w}\right) \cdot \exp\left[-\frac{\alpha_i U L}{\beta_L C_{pL} S w} (1-F(P))\right]$$

En posant $\frac{L}{w} = T_0'$, on obtient la fonction de transfert générale pour la gaine:

$$\boxed{\frac{\Delta \theta_L}{\Delta \theta_0} = \exp(-PT_0') \cdot \exp\left[-\frac{\alpha_i U L}{\beta_L C_{pL} S w} (1-F(P))\right]}$$

1.1.2- La hotte considérée comme un local



Le local est dans un système régulé un élément de transfert relativement compliqué. On parvient à une représentation claire des processus variables dans le temps avec le mode de simplification adopté par Lenz. Exactement comme pour le comportement de transfert de la gaine, la vapeur intérieure du local agit par inertie, avec le coulage dynamique des parois qui ont une inertie thermique. Pour simplifier, on fait le calcul avec une température de mur moyenne θ_{wd} . On écrit les équations différentielles à partir des bilans sous les formes suivantes:

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

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

Si l'on applique sur les deux équations, la transformation de Laplace, on obtient, par la fonction de transfert, la réponse complexe:

En effet la deuxième équation peut s'écrire:

$$\Delta \theta_{wd} + \frac{M_{wd} C_{wd}}{\varepsilon [S_{wd} (\alpha_i^* + \alpha_a^*)]} \cdot \Delta \theta_{wd} = \frac{\sum \alpha_i^* S_{wd} \cdot \Delta \theta_2}{\sum [S_{wd} (\alpha_i^* + \alpha_a^*)]}$$

D'où en posant $T_1 = M_{wd} C_{wd} / \sum [S_{wd} (\alpha_i^* + \alpha_a^*)]$

on a une fonction de transfert du premier ordre:

$$\frac{\Delta \theta_{wd}}{\Delta \theta_2} = \frac{\sum \alpha_i^* S_{wd} / \sum [S_{wd} (\alpha_i^* + \alpha_a^*)]}{1 + T_1 P}$$

D'où en remplaçant $\Delta \theta_{wd}$ par sa valeur en fonction de $\Delta \theta_2$, dans la première équation et en posant

$$T_1 = M_{wd} C_{wd} / \varepsilon [S_{wd} (\alpha_i^* + \alpha_a^*)] ; T_2 = M_R C_{PL} / b$$

$$K_P = a M_R C_{PL} / b ; b = a M_R C_{PL} + \frac{\sum (\alpha_i^* S_{wd}) \sum (\alpha_a^* S_{wd})}{\sum [(\alpha_i^* + \alpha_a^*) S_{wd}]}$$

$$\text{et } a = \frac{\dot{M}_L}{M_R}$$

on obtient la fonction de transfert générale de la hotte:

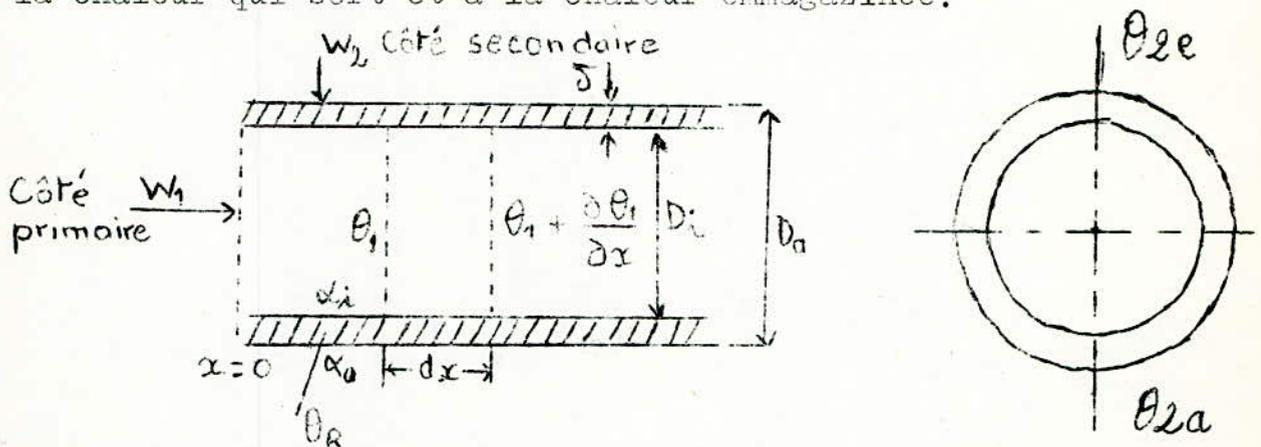
$$\frac{\Delta \theta_2}{\Delta \theta_1} = \frac{K_P (1 + T_1 P)}{T_1 T_2 P^2 + (T_2 + a T_1 T_2 + \frac{\Sigma \alpha_i^2 S_w d}{b}) P + 1}$$

1.1.3-Echangeur d'air alimenté en vapeur

On considère un simple tube cylindrique avec transfert de chaleur à deux dimensions ; la dépendance radiale reste donc négligeable. Les équations différentielles décrivant le système s'obtiennent à partir du bilan calorifique pour les trois parties:

- Débit primaire
- Tube
- Débit secondaire

La base de chaque bilan est que la chaleur apportée est égale à la chaleur qui sort et à la chaleur emmagasinée.



W_1 : est la vitesse de l'écoulement de la vapeur dans le cylindre

W_2 : est la vitesse de l'air

D_i : est le diamètre intérieur du cylindre

D_a : est le diamètre extérieur

θ_1 : est la température d'entrée

θ_R : est la température à l'intérieur de la paroi

α_i et α_a sont les coefficients d'échange thermique

Le bilan calorifique pour le premier débit s'énonce:

$$\rho_1 w_1 c_1 \pi \frac{D_i^2}{4} \theta_1 dt = \rho_1 w_1 c_1 \pi \frac{D_i^2}{4} \left(\theta_1 + \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \right) dt$$

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

Ce qui conduit à l'équation différentielle:

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} + w_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial x} + \frac{4 \alpha_i}{f_1 c_1 D_i} (\theta_1 - \theta_R) = 0$$

Le bilan calorifique du tube s'écrit:

$$\pi D_i \alpha_i (\theta_1 - \theta_R) dx \cdot dt = \pi D_a \alpha_a (\theta_R - \theta_{2m}) dx \cdot dt + f_R c_R \pi D_m \delta \frac{\partial \theta_R}{\partial t} dx \cdot dt$$

$$\theta_{2m} = \frac{(\theta_{2e} + \theta_{2a})}{2} \quad : \text{c'est la température moyenne du tube}$$

et si on prend D_m comme diamètre moyen du tube, on obtient l'équation différentielle:

$$\frac{\partial \theta_R}{\partial t} + \frac{\alpha_a D_a}{f_R c_R D_m \delta} (\theta_R - \theta_{2m}) - \frac{\alpha_i D_i}{f_R c_R D_m \delta} (\theta_1 - \theta_R) = 0$$

Le bilan calorifique pour le côté secondaire se simplifie, et l'on obtient pour le réchauffage du fluide l'équation:

$$\theta_{2a} = \theta_{2e} + \frac{\pi D_a \alpha_a}{f_2 w_2 c_{p2} R_a} (\theta_R - \theta_{2m})$$

R_a est l'écartement des tubes. En dynamique les grandeurs se composent d'une partie fixe et d'une partie variable ($\theta = \bar{\theta} + \Delta\theta$). On obtient alors selon Gartner et Harrison les équations de la forme suivante:

$$\Delta \theta'_1 + \frac{\partial \Delta \theta_1}{\partial \xi} + \beta_1 (\Delta \theta_1 - \Delta \theta_R) = 0$$

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

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

En posant $\Delta \theta' = \frac{\partial \theta}{\partial \tau}$, $\tau = \frac{w_1 t}{l}$ et $\xi = \frac{x}{l}$;

les coefficients s'obtiennent ainsi:

$$\beta_1 = \frac{4l\alpha_i}{f_1 c_1 D_i w_1}$$

$$\beta_2 = \frac{D_o l \alpha_a}{f_R c_R D_m \delta w_1}$$

$$\beta_3 = \frac{D_i l \alpha_i}{f_R c_R D_m \delta w_1}$$

$$\beta_4 = \frac{D_i l \alpha_i}{f_R c_R D_m \delta w_1}$$

Après élimination des grandeurs intermédiaires et emploi de la transformation de Laplace, il en résulte alors les équations différentielles:

$$\begin{aligned} & [(S + \beta_2 + \beta_3)(\beta_4 + 2) - \beta_2 \beta_4] \Delta \theta_{2a}(S, \xi) + \\ & [(S + \beta_2 + \beta_3)(\beta_4 - 2) - \beta_2 \beta_4] \Delta \theta_{2e}(S, \xi) - 2\beta_3 \beta_4 \Delta \theta_1 = 0 \end{aligned}$$

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

La réponse unitaire devient alors, avec la température de l'air à la sortie $\Delta \theta_{2m}$ comme grandeur de sortie et la température de la vapeur à l'entrée $\Delta \theta_{1e}$ comme grandeur d'entrée (en posant $a = \frac{\beta_3 + 2\beta_2}{2 + \beta_4 + 2}$)

$$\frac{\Delta \theta_{2om}(s)}{\Delta \theta_1(s)} = \frac{2\beta_3 \beta_4 [1 - e^{-s} e^{-\theta_1} e^{\frac{\beta_1 \beta_2}{s+a}}]}{(2 + \beta_4) [(s + \beta_1)(s + a) - \beta_1 \beta_2]}$$

En posant $S = j\omega$, elle se transforme en fonction de transfert

1.1.4-Capteur de température

-Temps de mise en équilibre:

Schématiquement c'est le temps qui s'écoule entre l'instant où le thermomètre est mis en action et celui où ses indications sont utilisables. Si l'on plonge un thermomètre à mercure dans un bain d'eau chaude, la température indiquée s'élève lentement au fur et à mesure de l'échauffement du mercure.

Le temps au bout duquel l'indication est stable (c'est à dire lorsque l'équilibre thermique est atteint) correspond à ce qu'on appelle souvent, le temps de réponse.

-Fonction de transfert :

La loi d'échauffement d'un détecteur dont la température T varie avec le temps, au cours de la mise en équilibre thermique avec un milieu à la température T' , s'écrit à l'aide d'une loi de Newton simplifiée :

$$\phi = KS(T' - T)$$

Avec ϕ = flux de chaleur se propageant du milieu vers le détecteur. ($\phi > 0$ ou $\phi < 0$)

S : surface du détecteur.

K : coefficient moyen de transfert de chaleur, fonction de la conduction thermique, de la convection et du rayonnement.

La quantité de chaleur transférée au détecteur pendant le temps dt s'exprime par :

$$Q = \phi dt = mc dT$$

d'où l'on tire : $T' - T = \frac{mc}{KS} \frac{dT}{dt}$

Où m : masse du détecteur

c : chaleur massique du détecteur.

En passant à la transformation de Laplace :

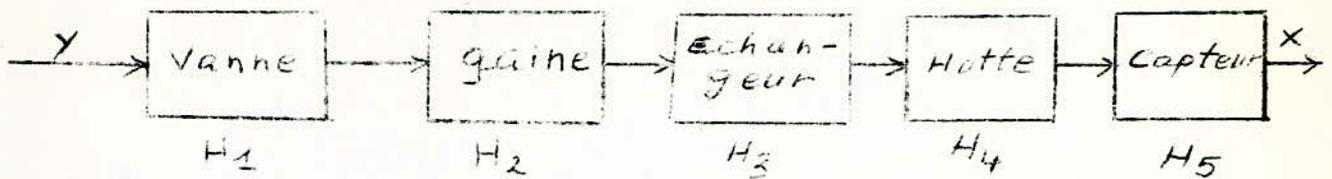
$$T'(P) - T(P) = \tau P T(P) \Rightarrow$$

$$\frac{T(P)}{T'(P)} = \frac{1}{1 + \tau P}$$

La constante de temps τ est définie par $\tau = \frac{mc}{KS}$ - elle est donc fonction d'une part des caractéristiques du thermomètre m, c, S d'autre part des caractéristiques du milieu ainsi que des contacts thermiques entre le détecteur et le milieu, par l'intermédiaire de K , coefficient de transfert de chaleur.

1.1.5- Etude de la fonction de transfert du processus

Le schéma bloc du processus est le suivant :



La fonction de transfert du processus en boucle ouverte est donc le produit des fonctions de transfert de chacun des éléments.

$$\frac{X}{Y} = H_1 \cdot H_2 \cdot H_3 \cdot H_4 \cdot H_5$$

En remplaçant chaque fonction de transfert par sa valeur, nous trouvons une fonction de transfert très compliquée, d'où la nécessité de l'assimiler par une fonction de transfert qui répond au cas le plus défavorable. Cette fonction de transfert est de la forme :

$$\frac{X}{Y} = \frac{K_{ob} \cdot e^{-T_0 \cdot P}}{1 + T P}$$

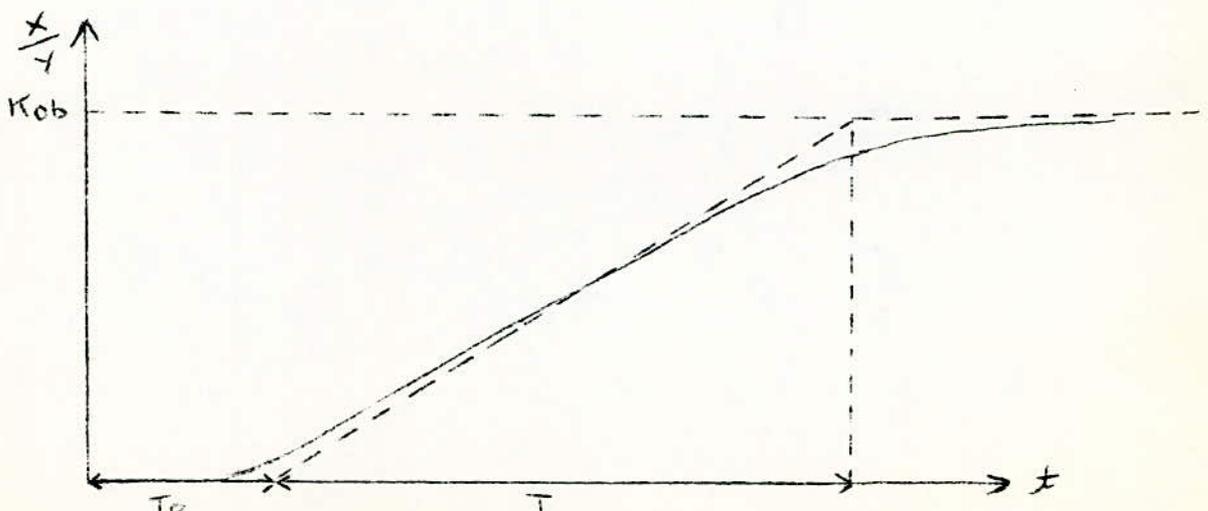
Où :

K_{ob} [°C/%] représente le gain statique du processus.

T_0 [°C] représente le temps mort du processus.

T [°C] représente la constante de temps.

La réponse de cette fonction de transfert est la suivante :



1.2-Dynamique de l'humidité

1.2.1-La gaine

La gaine d'air en tant qu'élément de transfert pour l'humidification se comporte comme un temps mort. Les gaines de construction habituelle n'emmagasinent pas l'humidité, de sorte qu'en raison de la vitesse forcément limitée de l'air il se produit seulement un temps mort. On le calcule ainsi : $T_t = \frac{L}{w}$, avec L longueur de la gaine et w vitesse de l'air, on obtient alors la réponse harmonique.

$$\frac{\Delta x_L}{\Delta x} = K_p \exp\left(-\frac{L}{w} P\right)$$

Où :

Δx [%] représente l'humidité relative à l'entrée de la gaine

Δx_L [%] représente l'humidité relative à l'extrémité de la gaine.

Comme par ailleurs il ne doit se produire aucune condensation, on a $K_p = 1$

On obtient donc la fonction de transfert pour la gaine :

$$\boxed{\frac{\Delta x_L}{\Delta x} = \exp(-PT_t)}$$

1.2.2-La hotte considérée comme un local

On parvient à une relation simple, si, comme pour la gaine, la capacité d'emmagasinement des parois est négligeable. Il faut de même éviter la condensation. Si l'on tient compte encore de petites variations et que l'on se base sur un mélange idéal, on obtient une équation différentielle simple :

$$M_R \Delta x_2 + \dot{M}_L \Delta x_2 = \dot{M}_L \Delta x_1$$

Où :

Δx_2 [%] représente l'humidité relative de l'air à la sortie de la hotte

Δx_1 [%] représente l'humidité relative à l'entrée de la hotte

M_R [kg] représente la masse de la quantité d'air contenue dans la hotte.

\dot{M}_L [kg/h ; kg/s] représente le débit masse à l'entrée et à la sortie de la hotte.

En résolvant l'équation différentielle dans le cas d'une excitation périodique, on obtient la réponse harmonique :

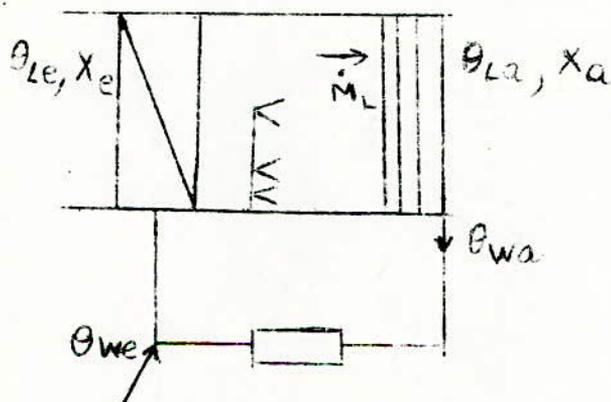
$$\frac{\Delta x_2}{\Delta x_1} = \frac{K_P}{(1 + TP)}$$

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

La constante de temps est $T = \frac{M_R}{\dot{M}_L}$

$$\boxed{\frac{\Delta x_2}{\Delta x_1} = \frac{1}{1 + TP}}$$

1.2.3-L'échangeur



On peut considérer que la variation d'humidité par apport de vapeur se produit sans retard. La variation x de l'humidité relative est fournie par une variation de la température de l'air. La relation entre la variation de température du courant d'air et la puissance calorifique transportée est exprimée par l'équation suivante :

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

dans laquelle :

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

De plus l'équation :

$$\begin{aligned} \dot{M}_w C_w (\Delta\theta_{wa} - \Delta\theta_{we}) + \lambda \nabla S \left(\Delta x_{sm} - \frac{\Delta x_a}{2} \right) = \\ \alpha S (\Delta\theta_{Lm} - \Delta\theta_{wm}) \end{aligned}$$

Exprime que la chaleur apportée par le courant d'air \dot{M}_L doit couvrir la chaleur nécessaire pour la variation de la température de l'eau et pour la vaporisation de l'eau.

∇ est le coefficient de transfert de matière, λ la chaleur de vaporisation, S la surface extérieure de l'eau pulvérisée et $\Delta x_{sm} = \frac{(\Delta x_{se} + \Delta x_{so})}{2}$. La relation entre la matière transférée et l'humidité de l'air est donnée par l'équation :

$$\nabla S \left(\Delta x_{sm} - \frac{\Delta x_a}{2} \right) = \dot{M}_L \Delta x_a$$

La dernière équation du bilan décrit le processus d'emmagasinement dans le récipient collectant l'eau :

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

$\Delta\theta'_{we}$ étant la dérivée par rapport au temps. On obtient après élimination des grandeurs intermédiaires et emploi de la transformation de Laplace la réponse harmonique complexe :

$$\boxed{\frac{\Delta x_a}{\Delta x_e} = K \cdot \frac{1 + T_1 P}{1 + T_2 P}}$$

La signification des grandeurs introduites ici est la suivante :

$$K = \frac{A}{C} \quad ; \quad T_1 = \frac{B}{A} \quad ; \quad T_2 = \frac{D}{C}$$

$$A = \frac{2\alpha S \dot{M}_L C_{PL}}{2\dot{M}_L C_{PL} + \alpha F} \quad ; \quad B = \frac{M_s}{2\dot{M}_w} A$$

$$C = e - \dot{M}_w c_w \frac{2\dot{M}_L C_{PL} + \alpha S}{d\alpha \cdot S} \quad ; \quad D = \frac{M_s}{2\dot{M}_w} e$$

$$d = \frac{\Delta x_s}{\Delta \theta_w}$$

$$e = \left(\dot{M}_w c_w + \frac{\alpha F}{2} + \frac{d r \alpha F}{2 C_{PL}} \right) \frac{2\dot{M}_w C_{PL} + \alpha F}{d\alpha F}$$

$$- \frac{\alpha F}{2d} - \frac{r\alpha F}{2C_{PL}}$$

et connaissant les fonctions de transfert de la gaine, de la hotte et de l'échangeur, on peut calculer la réponse globale du processus.

$$H(P) = \frac{\Delta x_L}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta x_2}{\Delta x_1} \cdot \frac{\Delta x_a}{\Delta x_e} =$$

$$\exp(-PT_t) \cdot \frac{1}{1+TP} \cdot K \frac{1+T_1P}{1+T_2P} =$$

$$\boxed{\exp(-PT_0) \cdot \frac{K}{1+TP}}$$

T : est la constante de temps moyenne.

T₀ : temps mort.

2.-Analyse des propriétés dynamiques à l'aide de la méthode expérimentale

2.1-Méthode de mesure à l'aide de la réponse indicielle

Cette méthode consiste à décrire le comportement de la sortie d'un système en fonction du temps quand l'entrée est soumise généralement à un échelon.

La sortie $S(t)$ est déduite à partir d'essais temporels. Dans cette partie on se proposera d'étudier le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel.

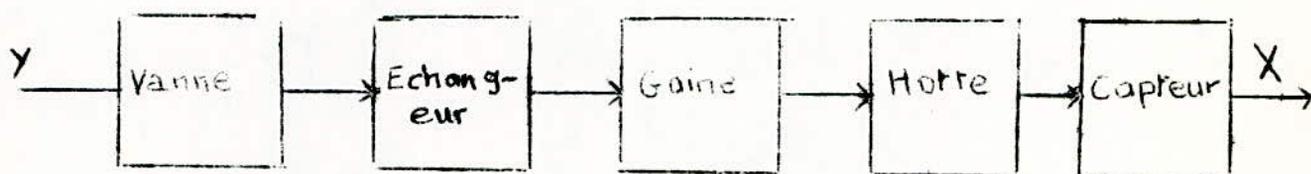
Principe de la méthode

On peut recevoir la réponse indicielle à l'aide de la méthode simplifiée en utilisant seulement les appareils de mesure simple sans enregistrement. Ceci concerne avant tout les processus thermiques et industriels lents avec les paramètres comme la température et l'humidité.

Les principaux appareils utilisés pour ces expériences sont :

- Thermomètre à résistance.
- Chronomètre.
- Appareil pour mesurer les déplacements des vannes.

Soit le schéma suivant du processus :



Avec :

Y [%] représentant l'ouverture de la vanne.

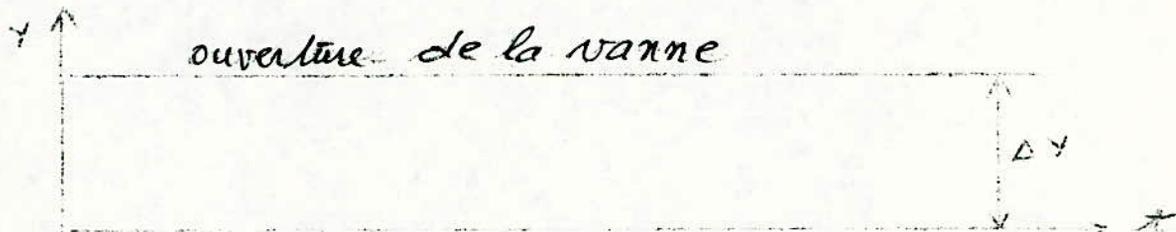
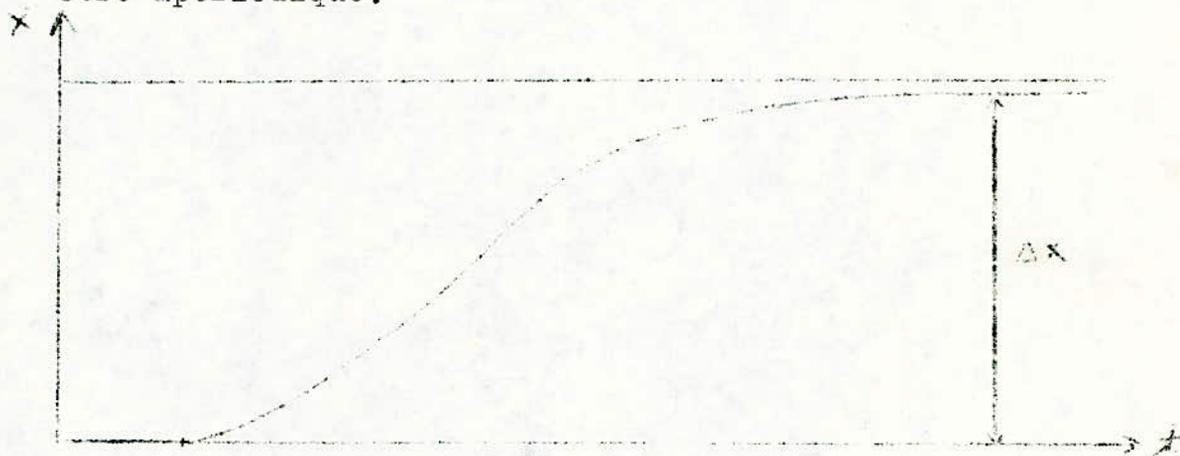
X [°C] représentant la température captée par le thermomètre.

On fait une brusque variation de l'entrée en changeant la position de la vanne à 30% par exemple et on relève la température X en fonction du temps toutes les 15s par exemple.

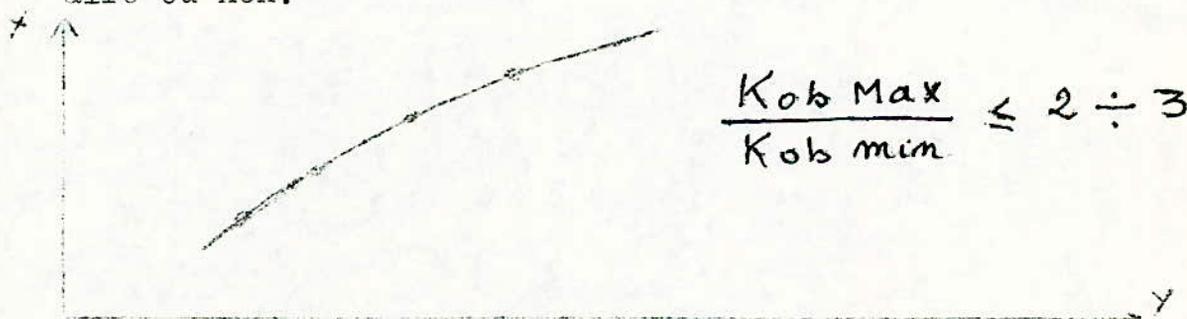
On dresse ensuite un tableau de X en fonction du temps.

$t(s)$	0	15	30	45	60	75
X	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5

A un certain moment, la température ne varie plus pour l'ouverture de la vanne affichée, nous avons alors atteint le régime statique. Le régime étant stable, la réponse doit être apériodique.



Après ce premier régime statique atteint, nous faisons une autre variation brusque de l'entrée à 50% par exemple et on refait la même expérience pour avoir un autre état statique. Une fois qu'on ait fait plusieurs essais, on peut maintenant tracer la courbe $X = F(Y)$ et voir si le processus est linéaire ou non.



A partir de la courbe $X = F(Y)$, on peut déterminer le gain statique du processus.

$$K_{obj} = \frac{\Delta X}{\Delta Y} \left[\frac{OC}{mm} \right]$$

Nous savons que le processus est caractérisé par un temps mort T_0 et une constante de temps T . Pour la plupart des processus thermiques, $\frac{T_0}{T} = 0,1$ à $0,3$

2.2-Identification par la méthode de STERJC

Il s'agit d'une méthode pratique permettant de passer du domaine temporel au domaine fréquentiel dans le cas d'un système soumis à un échelon unité.

Elle est utilisée en particulier dans la plupart des systèmes thermiques.

Le système peut présenter un retard pur τ et dont la transmittance exprimée en fonction de la variable P comporte une constante au numérateur et un polynôme à racines réelles négatives au dénominateur.

Si le polynôme est de la forme

$$(1 + PT_1)(1 + PT_2) \dots (1 + PT_n)$$

STERJC propose de le remplacer par $(1 + PT)^n$, T étant la constante de temps comprise entre la plus forte et la plus faible des constantes de temps des éléments du système.

L'expression proposée pour approcher la transmittance est :

$$H(P) = \frac{G_0 \cdot e^{-P\tau}}{(1 + PT)^n}$$

G_0 est le gain statique du système, donc le rapport :
amplitude finale de la grandeur de sortie
amplitude de l'échelon

G_0 s'obtient directement par la mesure de l'amplitude de la sortie d'une part, de l'amplitude de l'échelon appliquée à l'entrée d'autre part.

La réponse indicielle étant enregistrée, la valeur finale de la sortie étant prise par convention égale à 1. La détermination de n, T, τ nécessite le trajet de la tangente au point d'inflexion B, le relevé des temps T_u , T_a et l'utilisation du tableau ci-après :

n	$\frac{T_a}{T}$	$\frac{T_w}{T}$	$\frac{T_w}{T_a}$	$\frac{t_i}{T}$	φ_a	$\frac{T_m}{T}$	$\frac{T_m}{T_a}$
1	1	0	0	0	0	1	1
2	2,718	0,282	0,104	1	0,264	2,000	0,736
3	3,695	0,805	0,218	2	0,323	2,500	0,677
4	4,463	1,425	0,319	3	0,353	2,888	0,647
5	5,119	2,100	0,410	4	0,371	3,213	0,629
6	5,699	2,811	0,493	5	0,384	3,510	0,616
7	6,226	3,547	0,570	6	0,394	3,775	0,606
8	6,711	4,307	0,642	7	0,401	4,018	0,599
9	7,164	5,084	0,709	8	0,407	4,245	0,593
10	7,59	5,869	0,773	9	0,413	4,458	0,587

T_i : représente le point d'analyse et B (point d'inflexion)

$$T_m = T_p - T_i$$

ϕ_i : représente la valeur relative de la fonction de 0 à B

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

Avec T'_0 : temps mort naturel ou temps de retard

T''_0 : temps mort artificiel

$$T_p = T_u + T_a$$

: représente le temps mort total artificiel donné par la méthode de STERJC

Les triangles semblables conduisent aux relations :

$$\frac{\tau_u}{1} = \frac{T_u}{T_a} \qquad \frac{T_m}{(1 - \phi_i)} = \frac{T_a}{1}$$

1) On calcule le rapport $\frac{T_u}{T_a}$ et l'on relève dans le tableau la valeur de n. Comme ce rapport tombe habituellement entre deux valeurs du tableau, on relève la valeur de n la plus faible.

2) En partant de n on relève la valeur $\frac{T_u}{T}$ ou $\frac{T_a}{T}$ et l'on calcule T.

3) STERJC propose

$$\tau = T_a \cdot \left[\frac{T_u}{T_a} (\text{relevé sur la courbe}) - \frac{T_u}{T_a} (\text{figurant au tableau}) \right]$$

Exemple :

Soit $T_u = 2,4s$ et $T_a = 6,7s$

on a : $\frac{T_u}{T_a} = 0,358$ donc $n = 4$ d'après le tableau.

T peut être calculé de deux façons à partir des rapports :

$$\frac{T_a}{T} = \frac{6,7}{T} = 4,463 \text{ (tableau)}$$

$$\Rightarrow T = \frac{6,7}{4,463} = 1,5 \text{ s}$$

$$\frac{T_u}{T} = \frac{2,4}{T} = 1,425$$

$$\Rightarrow T = \frac{2,4}{1,425} = 1,68 \text{ s}$$

d'où une légère divergence.

$$\text{Comme } \left(\frac{T_u}{T_a} \right)_{\text{courbe}} - \left(\frac{T_u}{T_a} \right)_{\text{tableau}} = \frac{2,4}{6,7} - 0,319 =$$

$$0,358 - 0,319 = 0,039$$

$$\zeta = 0,039 \cdot T_a = 0,039 \cdot 6,7 = 0,26 \text{ s}$$

donc la fonction de transfert est :

$$H(P) = \frac{G_0 \cdot e^{-0,26 P}}{(1 + 1,6 P)^4}$$

Le reproche majeur généralement formulé est la détermination assez arbitraire du temps de retard pur.

CHAPITRE TROISIEME

ANALYSE ET CHOIX DES CAPTEURS DE MESURE DE L'HUMIDITE DE L'AIR ET DE LA TEMPERATURE.

*Rôle du capteur dans la chaîne de mesure.

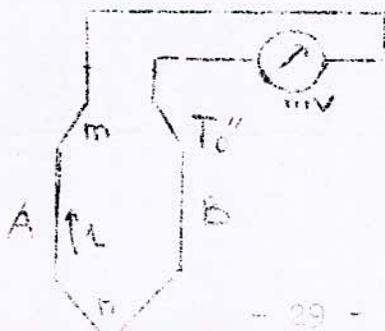
Dans une chaîne de mesure, le capteur constitue le premier élément et doit saisir le mesurande, il doit donc être à la fois sensible à sa nature et adapté à sa valeur. Les principes utilisés pour la réalisation d'un capteur sensible à une grandeur quelconque sont très variables et dépendent en grande partie de la nature de la grandeur de sortie. Dans la plupart des réalisations industrielles, les capteurs effectuent la transformation analogique du mesurande, mais cette transformation n'est pas forcément unique à l'intérieur du capteur, il peut y avoir plusieurs transformations successives de la forme de l'énergie.

1.-Capteurs pour la mesure de la température.

Dans une chaîne de régulation de la température, la nécessité d'utiliser des capteurs électroniques est que ceux-ci traduisent directement la température en une tension ou un courant électrique. Pour la mesure des températures, on peut employer comme transducteurs des thermocouples, des résistances variables avec la température, des semi-conducteurs, des tubes photo-électriques, etc. Parmi ceux-ci, les thermocouples et les thermorésistances sont les plus répandues.

1.1-Etude des thermocouples

Les thermocouples se composent de deux conducteurs A et B, de nature différente, dont les extrémités sont disposées comme sur la figure. Lorsque les jonctions m et n sont à des températures différentes, dans le circuit du thermocouple on constate l'existence d'une tension électromotrice proportionnelle à la différence des températures. Si les extrémités de la jonction m sont maintenues à une température constante, 0°C ou 50°C, la valeur de la tension électromotrice peut être utilisée directement comme indicateur de la température de la jonction n, c'est à dire de la température du milieu où celle-ci est introduite.



Dans notre cas, on va essayer par exemple de maintenir la jonction m à la température de consigne et la jonction n sera introduite sous les blindages de la partie de la hotte et elle sera portée à la température réelle.

$$\text{On aura } V = K (T - T_0'')$$

Si $T = T_0''$, ceci se traduira par une tension nulle dans le galvanomètre : c'est le cas idéal.

Si $T \neq T_0''$, la tension ne sera pas nulle et elle sera comprise entre quelques dixièmes de millivolts et quelques dizaines de millivolts. On voit que c'est une tension assez faible, qu'il faudra donc amplifier pour faire la régulation.

Les différents métaux utilisés pour les couples sont :

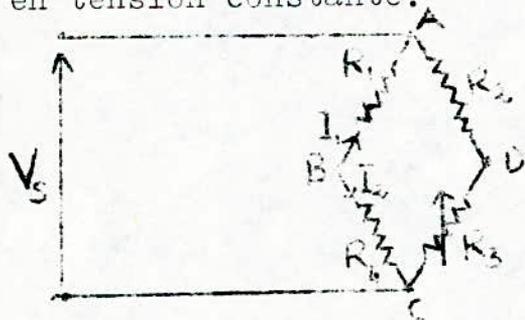
- le couple cuivre-constantan qui a un domaine d'emploi de $- 200^{\circ}\text{C}$ à $+ 300^{\circ}\text{C}$.
- le couple fer- constantan qui a un domaine d'emploi de $+ 200^{\circ}\text{C}$ à 700°C .
- nickel-chrome-nickel allié de 300°C à 1100°C .
- platine rhodié-platine de 1000°C à 1500°C .

Comme notre température à mesurer varie de 20°C à 100°C au maximum, si on choisit comme capteur le thermocouple, il est normal de prendre le couple cuivre-constantan.

1.2-Thermomètre à résistance de platine.

1.2.1-Mesure de la température sèche.

Le principe de cette mesure est assez simple. On dispose de quatre résistances R_1, R_2, R_3, R_4 , en forme de pont. Les deux résistances R_1 et R_2 sont constantes et indépendantes de la température. R_3 sera une résistance variable en constantan et servira à afficher la consigne et à la faire varier éventuellement. R_4 sera une résistance en platine variable en fonction de la température. Le pont sera alimenté en tension constante.



Principe de la mesure :

La résistance R_3 sera affichée en fonction de la consigne voulue. Pour cela on regardera dans la caractéristique de R_4 , la valeur de la résistance correspondant à la température voulue de consigne, et on fera $R_3 = R_4$, de même qu'on prendra $R_1 = R_2$ pour simplifier la mesure.

Si la température ne varie pas à l'intérieur du lieu considéré, R_4 sera toujours égal à R_3 et comme $R_1 = R_2$, on aura $V_S = 0$ car $R_1 \cdot I_1 = - R_4 \cdot I_2$ donc, tant que la température à mesurer reste toujours égale à la consigne, on aura toujours $V_S = 0$. Si maintenant T change, R_4 aussi va changer et V_S ne sera plus nulle, d'où la régulation va tendre à ramener $V_S = 0$ en augmentant ou en diminuant la température suivant le cas.

1.2.2- Mesure de la température mouillée.

Pour la mesure de la température humide, il suffit de mettre R_4 entouré d'un manchon humide, en coton à fines mailles. L'eau sur le manchon entourant cette résistance, s'évapore plus ou moins vite suivant la température et l'état hygrométrique de l'air. Il en résulte un refroidissement du bulbe d'autant plus important que l'évaporation est plus rapide. Le thermomètre humide indiquera moins que le thermomètre sec et cela dans une proportion déterminée par rapport à la tension de vapeur existante et indirecte par rapport à l'humidité relative de l'air.

1.2.3- Calcul de la résistance de platine.

Si on désire avoir une température sèche sous la hotte à peu près égale à 50°C , donc on doit savoir la valeur de la résistance de platine lui correspondant. Sachant que la loi de variation de la résistance de la platine en fonction de la température est à peu près linéaire, on a une augmentation de $0,34$ ohm tous les 1°C et on a $R = 100$ ohm à 0°C .

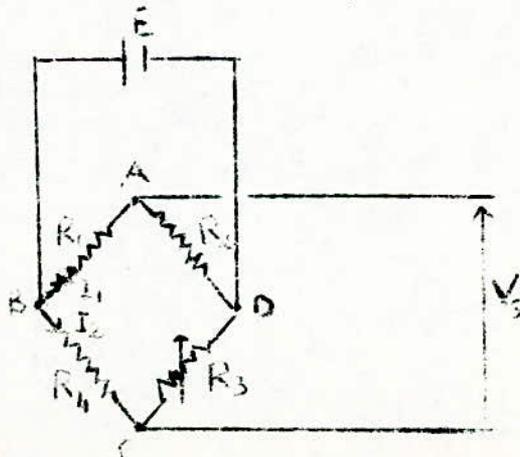
Pour 50°C , $R = 100 + 50 \times 0,34 = 117$ ohms

donc on ajustera $R_3 = 117$ ohm

Il on est de même pour la température mouillée, on désire avoir 35°C , donc :

$$R_3 = 100 + 35 \times 0,34 = 112 \text{ ohms}$$

1.2.4- Variation de V_S en fonction de R_4 donc en fonction de la température.



On suppose que $R_4 \neq R_3$ et que toujours $R_1 = R_2$

$$V_s = V_a - V_c = R_2 \cdot I_1 - R_3 \cdot I_2 = R_4 \cdot I_2 - R_1 \cdot I_1$$

$$V_b - V_d = (R_1 + R_2) \cdot I_1 = (R_3 + R_4) \cdot I_2 = 2R_2 \cdot I_1$$

$$I_1 = \frac{R_3 + R_4}{2R_2} \cdot I_2$$

$$V_s = R_2 \cdot \frac{R_3 + R_4}{2R_2} \cdot I_2 - R_3 \cdot I_2 = I_2 \cdot \left[\frac{R_4 - R_3}{2} \right]$$

$$\text{Comme } I_2 = \frac{E}{R_4 + R_3} \quad V_s = \frac{E}{2} \cdot \left[\frac{R_4 - R_3}{R_4 + R_3} \right]$$

La loi de variation de la platine en fonction de la température est :

$$R_4 = R_0 + \Delta T = 100 + 0,34T$$

$$\text{Donc : } V_s = \frac{E}{2} \cdot \left[\frac{R_0 + \Delta T - R_3}{R_0 + \Delta T + R_3} \right]$$

$$R_0 = 100 \text{ ohms}$$

$$R_3 = 117 \text{ ohms pour } 50^\circ\text{C}$$

Lorsque la température varie au dessus ou au dessous de 50°C , nous pouvons écrire que :

$$T = 50 + \Delta T$$

$$\text{d'où : } V_s = \frac{E}{2} \cdot \left[\frac{0,34 (50 + \Delta T) - 17}{217 + 0,34 (50 + \Delta T)} \right]$$

$$V_s = \frac{E}{2} \cdot \left[\frac{0,34 \cdot \Delta T}{234 + 0,34 \cdot \Delta T} \right]$$

Si on prend une tension $E = 100\text{V}$, on trouve une tension $V_s = 14 \text{ mV}$ pour une variation de température de 1°C . Cette tension étant faible, il est nécessaire de l'amplifier.

- pour la température mouillée où $T = 35^\circ\text{C}$ on a :

$$V_s = \frac{E}{2} \cdot \left[\frac{0,34 \cdot \Delta T}{224 + 0,34 \cdot \Delta T} \right]$$

ΔT représente la variation de la température.

2.- Capteurs pour la mesure de l'humidité

2.1- Thermomètres à résistances

En mesurant les températures sèche et humide, à l'aide de deux thermomètres à résistances décrits précédemment, on détermine l'humidité relative, à l'aide de la formule de Sprung, applicable aux températures supérieures à 0°C.

$$e = e_s - A (t_s - t_h) \frac{P_b}{760}$$

Formule dans laquelle :

e [mm Hg] est la tension de vapeur

e_s [mm Hg] est la tension de saturation de la vapeur correspondant à la température du thermomètre humide.

t_s [°C] est la température mesurée au thermomètre sec

t_h [°C] est la température mesurée au thermomètre humide

P_b [mm Hg] est la pression barométrique

A : est coefficient psychrométrique qui dépend de la vitesse de l'air sur les thermomètres et du matériau constituant le manchon d'humidification. D'après Edelman, la valeur du coefficient psychrométrique A est pratiquement constante et proche de 0,5 lorsque la vitesse de l'air est supérieure à 2m/s. Donc on s'efforcera pour avoir des mesures précises d'assurer une vitesse égale ou supérieure à 2m/s. Cette condition est assurée grâce à un ventilateur.

Précisons encore que le tissu utilisé pour le manchon d'humidification doit avoir un bon pouvoir absorbant. On veillera à n'utiliser que de l'eau distillée ou de l'eau de pluie propre pour l'humidification aux températures inférieures à 100°C ; d'où la nécessité d'avoir une humidification automatique au moyen d'un réservoir d'eau. En divisant par e_s , on en déduit l'humidité relative

$$H_r = 1 - \frac{0,5(t_s - t_h) P_b}{e_s \cdot 760}$$

$$A = 0,5 \text{ [mm Hg/°C]}$$

On voit que l'humidité relative ne dépend que de t_s et de t_h à pression constante.

Remarque :

Si $t_s = t_h$, on a une humidité relative de 100%. L'air est alors saturé de vapeur.

2.2-Humidomètre à transducteur capacitif :

Les appareils électroniques pour la mesure de l'humidité, se distinguent notamment par le temps bref nécessaire pour obtenir un résultat exact.

A cet effet, on emploie fréquemment des transducteurs capacitifs car le contenu d'humidité cause des modifications importantes de la permittivité et de la conductivité électrique.

Dans les appareils industriels d'usage courant, on a affaire presque exclusivement à des transducteurs capacitifs. Ces transducteurs se composent essentiellement d'une paire d'électrodes métalliques dont la forme est adaptée aux échantillons à analyser.

Les transducteurs capacitifs ont comme diélectrique le matériau dont la quantité d'humidité est inconnue. L'humidité du matériau détermine la valeur de la capacité qui apparaît entre les électrodes du transducteur. Les variations des capacités qui en résultent sont généralement faibles, de l'ordre des dizaines de PF. Elles sont mesurées par la variation de fréquence des circuits oscillants où le transducteur capacitif est introduit.

2.2.1-Analyse de la méthode

La méthode consiste à faire varier la constante diélectrique de l'air en fonction de l'humidité. On sait que l'indice de réfraction de l'air n et par conséquent sa constante diélectrique relative ϵ_R , varient en fonction de la pression, de la température mais aussi en fonction du taux d'humidité.

Lorsque l'air à analyser circule entre les plaques d'un condensateur à air, la variation de constante diélectrique entraîne une variation de la valeur de la capacité. En incluant ce condensateur dans une chaîne de détection capacitive, on dispose en sortie d'un signal électrique dont la valeur est fonction de la teneur en vapeur.

2.2.2-Evaluation des possibilités de la méthode

L'indice de réfraction est fonction de la température, de la pression et de la concentration en vapeur d'eau, suivant l'expression:

$$n = 1 + \frac{77,6 \cdot 10^6}{T} \left(P + \frac{4810 P'}{T} \right) \quad (1)$$

Où:

T [°K] est la température

P [Pa] est la pression totale

P' [Pa] est la pression partielle de la vapeur d'eau

L'indice de réfraction n , la perméabilité magnétique relative μ_R (égale à 1 dans l'air) et la constante diélectrique relative ϵ_R sont liés par la relation:

$$\mu_R \epsilon_R = n^2 \quad (2)$$

D'autre part la pression de vapeur P , le rapport W de la masse d'eau à la masse d'air sec et la densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air $d=0,621$ sont reliés par l'expression:

$$\frac{P'}{P} = \frac{W}{d} \quad (3)$$

Ces deux relations reportées dans (1) vont nous donner la valeur de la constante diélectrique de l'air en fonction de la pression, de la température et de l'humidité.

$$\epsilon_R = 1 + \frac{1,552 \cdot 10^{-5} P}{T} + \frac{1,19 \cdot 10^{-2} P W}{T^2} \quad (4)$$

Ceci en faisant l'approximation $(1 + \epsilon)^2 = 1 + 2\epsilon$ la variation $\Delta \epsilon_R$ de la constante diélectrique peut être calculée ^{en fonction} des fluctuations de pression, de température et d'humidité pour les conditions habituelles d'ambiance.

Si $P=10^5 \text{ Pa}$; $T=300^\circ \text{ K}$ et $W=10^{-2} \text{ kg d'eau/kg d'air}$ on a :

$$\Delta \epsilon_R = 6,5 \cdot 10^{-9} \Delta P - 2,6 \cdot 10^{-6} \Delta T + 1,32 \cdot 10^{-2} \Delta W$$

Pour accéder à la seule information humidité lorsque les paramètres d'influence pression et température évoluent, une correction doit être apportée à la mesure de $\Delta \epsilon_R$ à l'aide d'informations de compensation délivrées par des capteurs de pression et de température.

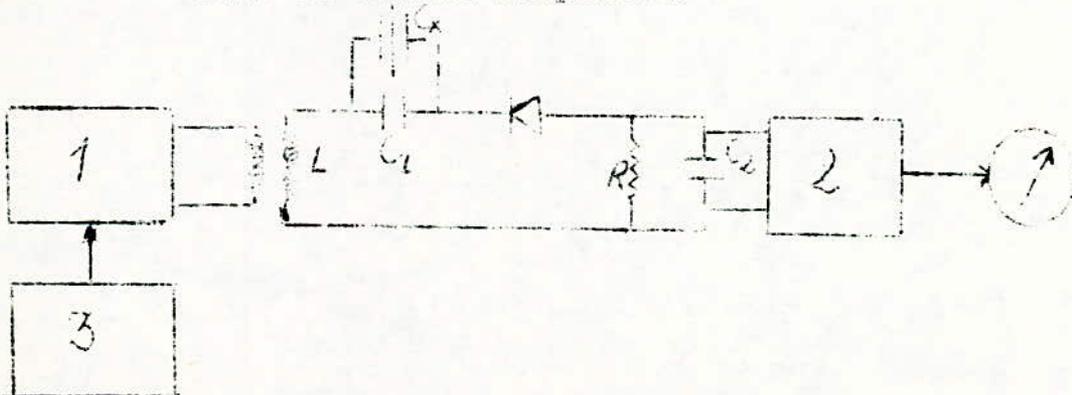
A la seule fluctuation d'humidité correspond une variation relative de la capacité de mesure.

$$\frac{\Delta C_x}{C_x} = \frac{\Delta \epsilon_R}{\epsilon_R} = \Delta \epsilon_R = 1,32 \cdot 10^{-2} \Delta W$$

2.2.3-Aspect de l'humidification

Le transducteur est connecté dans un circuit résonant série (LC_1), accordé sur une fréquence proche de la fréquence du générateur 1.

Soit le schéma simplifié:



- 1-Générateur haute fréquence
- 2-Amplificateur de courant alternatif
- 3-Générateur basse fréquence pour modulation

Dans ces conditions, les faibles variations de capacité, dues aux modifications de la teneur d'humidité de l'air, augmentent ou diminuent le désaccord. Le résultat est la diminution ou l'augmentation du courant traversant le circuit. Sur la résistance R on obtiendra un signal basse fréquence dont l'amplitude reproduit, pratiquement de manière linéaire, les variations de la teneur d'humidité. Le signal est amplifié et appliqué à un instrument indicateur approprié.

3. - Analyse et choix d'un système de mesure

3.1 - Exigences générales pour les capteurs

Pour les industriels, la précision n'est pas un but en soi et les rares thermomètres à résistance de haute précision qu'ils utilisent ne quittent pas leurs laboratoires de contrôle ou de recherches. Dans les ateliers, on n'a jamais besoin de repérer la température à mieux qu'à 1/10 de degré près et encore ne s'agit-il là, le plus souvent, que d'assurer la reproductibilité de conditions opératoires.

Les diverses qualités que doivent satisfaire les thermomètres sont:

- Construction robuste pour résister aux vibrations et à des manipulations parfois brutales.

- Formes et dimensions adaptées aux emplois particuliers, une exigence très fréquemment formulée en ce sens étant souvent celle de l'encombrement minimal.

- Sensibilité, c'est à dire fourniture d'un signal de réponse intense afin de permettre l'emploi d'appareils de lecture simples, robustes.

- Interchangeabilité.

- Prix peu élevé.

- Rapidité de réponse, linéarité.

3.2 - Choix entre le thermomètre à résistance et le couple thermo-électrique

Les raisons que l'on peut avoir de préférer l'un à l'autre sont les suivantes:

- Sensibilité: La sensibilité d'un thermomètre à résistance est supérieure d'un ordre de grandeur à celle d'un thermocouple. Une sonde à résistance de platine de 100 ohms à 0°C, traversé par un courant de 1 mA présente entre ses bornes une d.d.p qui varie d'environ 0,4 mV/°C. Avec un des couples thermoélectrique les plus sensibles, le couple cuivre-constantan, la variation de f.é.m est voisine de 0,04 mV/°C.

-Finesse: La finesse d'un instrument de mesure est d'autant meilleure que cet instrument perturbe moins le milieu dans lequel il est introduit.

-Facilité d'affichage de la consigne: Avec un thermomètre à résistance, on affiche facilement la consigne grâce à une résistance. Eventuellement on a la possibilité de faire varier cette consigne si le besoin l'exige.

-Prix: Du fait de leur plus grande sensibilité, les sondes à résistance peuvent être associées à des appareils de lecture et de régulation moins coûteux que ceux des couples thermo-électriques.

Conclusion:

Compte-tenu de tous ces avantages, nous avons choisi de mettre un thermomètre à résistance dans notre chaîne de régulation.

CHAPITRE QUATRIEME
REGULATION AUTOMATIQUE

1. - Les Régulateurs

1.1. - Généralité et définition

Le mot régulateur n'a malheureusement pas une signification unique. Dans beaucoup de cas on appelle régulateur l'ensemble des éléments placés entre le servomoteur et le capteur. Dans d'autres cas le régulateur comprend aussi le capteur et le servomoteur.

Le mot régulateur a donc deux significations et selon le contexte, on se rend compte de quelle sorte de régulateur il s'agit. Le régulateur comprend toujours un comparateur. Il compare la grandeur réglée, appelée aussi valeur instantanée avec la valeur de consigne qui est constante ou variable en fonction du temps. La différence entre ces deux valeurs qui s'appelle écart de réglage doit souvent être amplifiée pour obtenir un signal de sortie assez fort pour pouvoir agir sur le système à régler. Il faut souvent donner au régulateur certaines propriétés qui sont fonction du temps, soit pour stabiliser l'installation réglée, soit pour en augmenter la précision.

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

1.2. - Classification des régulateurs

En général on distingue deux types :

- les régulateurs discontinus
- les régulateurs continus.

1.2.1. - Les régulateurs discontinus

Le réglage s'opère par impulsions déclenchées lorsque le signal de mesure dépasse la consigne et par impulsions arrêtées lorsque le signal devient inférieur à cette dernière.

Les régulateurs discontinus se subdivisent en :

- Régulateur tout ou rien

Ce mode ne confère à la grandeur réglante que deux valeurs maximale ou nulle.

- Régulateur tout ou peu

Ce mode diffère seulement du précédent par la variation de la grandeur réglante entre deux valeurs, maximale et minimale non nulle.

- Régulateur plus ou moins (à trois positions)

Dans ce mode la grandeur réglante à une valeur moyenne comprise entre les deux positions de la grandeur de mesure encadrant la valeur de consigne.

1.2.2. - Les régulateurs continus

Les grandeurs qui les caractérisent sont de nature continue, le signal de ces grandeurs peut prendre à chaque instant toutes les valeurs possibles entre deux limites. Le réglage par action continue est seul capable de s'appliquer au processus complexe.

Les régulateurs continus se décomposent en régulateurs

P, I, PI, D, PD, PID.

1.3. - Les différents types de régulateurs

Nous allons maintenant étudier en détail les caractéristiques de chacun de ces régulateurs. On se limitera au cas des systèmes linéaires et nous étudierons successivement à l'aide d'exemples simples.

- La réponse d'un élément de boucle de régulation à une brusque variation du signal d'entrée (échelon).

1.3.1. - Régulateur à action proportionnelle

1.3.1.1. - Définition :

C'est un régulateur où la sortie (grandeur réglante) est liée à l'entrée (écart entre grandeur réglée et la consigne) par la relation linéaire du type

$$X = K_r \cdot e + m \quad (1)$$

X : grandeur réglante

K_r : sensibilité proportionnelle

e : écart

La sensibilité proportionnelle K_r est la variation de la grandeur réglante produite par une variation d'une unité de l'écart.

Remarque :

On définit aussi l'étendue (ou bande) proportionnelle comme étant l'inverse de la sensibilité proportionnelle, elle est exprimée généralement en

%

$$X_r = \frac{1}{K_r}$$

Afin d'avoir un système plus souple, on introduit la sensibilité proportionnelle qui permet le réglage de l'action de régulation.

La constante m peut être constante de remise à zéro manuelle.

(le choix de la valeur de m permet de déterminer la valeur normale, c'est à dire pour un écart nul de la grandeur réglante).

Le fonctionnement de la régulation P est représenté par le schéma ci-dessous.

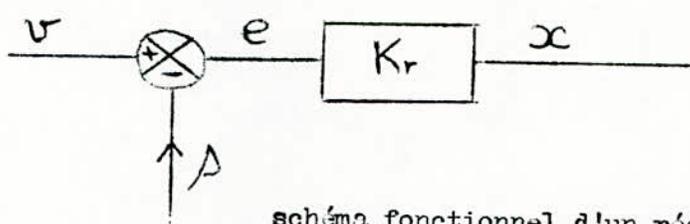
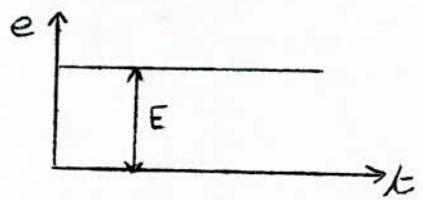


schéma fonctionnel d'un régulateur P

U : consigne

Δ : grandeur réglée



Pour une brusque variation de l'écart e
 $e = 0$ pour $t < 0$
 $e = E$ pour $t \geq 0$

Si on choisit $m = 0$ l'équation (1) devient

$$X = K_r \cdot e$$

Cette dernière relation nous montre qu'un régulateur proportionnel n'est autre qu'un amplificateur avec K_r variable (c'est à dire un amplificateur avec gain réglable)

En effet la variation de la grandeur réglante correspond exactement à celle de l'écart avec un degré d'amplification qui dépend du réglage de la sensibilité proportionnelle K_r

1.3.1.2. - Fonction de transfert

Sous forme opérationnelle la relation $X = K_r \cdot e$ va s'écrire

$$X(P) = K_r \cdot E(P) \quad (2)$$

La fonction de transfert est donnée par

$$H(P) = \frac{X(P)}{E(P)} = K_r \quad (3)$$

1.3.1.3. - Réponse indicielle

Appliquons à l'entrée du régulateur un signal échelon unité et voyons quelle sera l'allure de sa réponse.

Pour une brusque variation de l'écart e

$$e(t) = 0 \text{ pour } t < 0$$

$$e(t) = 1 \text{ pour } t \geq 0$$

Dans ce cas $E(P) = \frac{1}{P}$

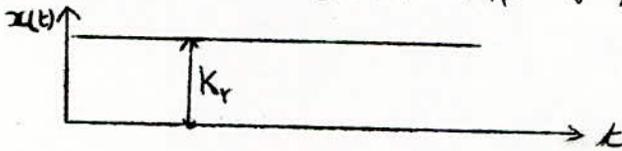
en remplaçant dans l'équation (2)

$$X(P) = K_r \cdot E(P) = K_r \cdot \frac{1}{P}$$

Par transformation inverse on a :

$$x(t) = K_r \quad \forall t \geq 0 \quad (4)$$

Cette dernière relation nous montre que la réponse unitaire du régulateur P est constante et égale à $K_r \quad \forall t \geq 0$



Réponse unitaire du régulateur P

1.3.2. - Régulateur à action intégrale

1.3.2.1. - Définition :

C'est un régulateur où le signal de sortie est proportionnel à l'intégrale du signal d'entrée à une constante près

$$x(t) = K \int_0^t e(t) dt + m_0 \quad (5)$$

on pose $m_0 = 0$ constante d'intégration nulle.

sous forme opérationnelle la relation (5) va s'écrire

$$X(P) = \frac{K}{P} \cdot E(P) = \frac{1}{T_i P} \cdot E(P) \quad (6)$$

avec $T_i = \frac{1}{K}$

T_i étant le temps d'intégration, il est défini comme étant la durée de la variation d'une unité de la grandeur réglante produite par unité de variation de l'écart.

1.3.2.2. - Fonction de transfert

$$H(P) = \frac{X(P)}{E(P)} = \frac{K}{P} = \frac{1}{T_i P} \quad (7)$$

Ceci nous donne le schéma fonctionnel ci-dessous

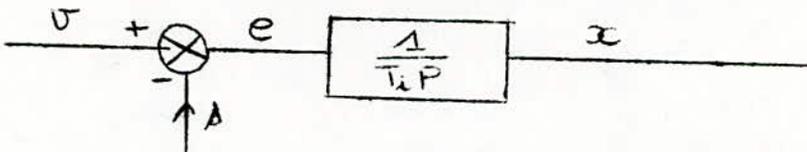


schéma fonctionnel d'un régulateur

1.3.2.3. - Réponse indicielle

Si le système est soumis par exemple à un échelon unité alors

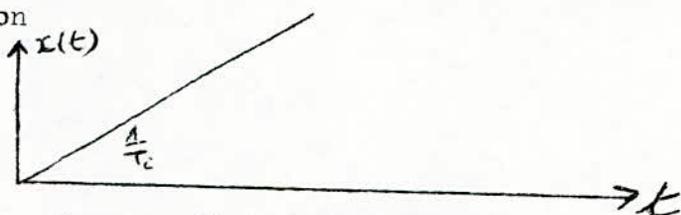
$$E(P) = \frac{1}{P}$$

$$X(P) = \frac{1}{T_i P} \cdot E(P) = \frac{1}{T_i P^2}$$

En utilisant la transformée inverse de Laplace on a :

$$x(t) = \frac{1}{T_i} \cdot t \quad (8)$$

Ainsi la grandeur réglante $x(t)$ varie linéairement en fonction du temps. Pour un échelon unité de l'écart, la pente de la courbe est inverse au temps d'intégration



réponse unitaire du régulateur

1.3.3. - Régulateur PD

1.3.3.1. - Définition

Dans ce cas la sortie est la somme (à une constante près) de deux termes proportionnels respectivement à l'entrée et à sa dérivée.

$$x(t) = K_r \cdot e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + m_0 \quad (9)$$

avec $m_0 = 0$

sous forme opérationnelle l'équation (9) va s'écrire

$$X(P) = K_r \cdot E(P) + K_d \cdot P \cdot E(P) \quad (10)$$

avec $K_d = T_d K_r$

La relation précédente devient :

$$X(P) = K_r (1 + T_d \cdot P) \cdot E(P) \quad (11)$$

K_r : sensibilité proportionnelle

T_d : constante de temps de dérivation

La constante de temps de dérivation est définie par la grandeur de l'avance de l'action de régulation exprimée en unité de temps. en d'autres termes la constante de temps de dérivation est l'intervalle de temps dont l'action par dérivation avance l'effet de la régulation proportionnelle pour une variation linéaire de l'écart.

1.3.3.2. - Fonction de transfert

$$H(P) = \frac{X(P)}{E(P)} = K_r (1 + T_d \cdot P) \quad (12)$$

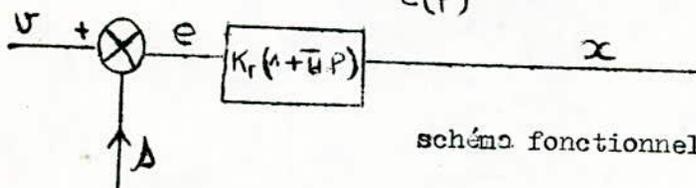


schéma fonctionnel d'un régulateur PD

1.3.3.3. - Réponse indicielle

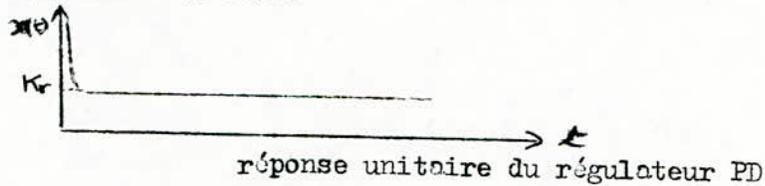
On suppose le système soumis à un échelon unité, on a donc $E(p) = \frac{1}{p}$

$$X(p) = K_r (1 + T_d \cdot p) \cdot \frac{1}{p} = K_r \left(\frac{1}{p} + T_d \right) \quad (13)$$

en utilisant la transformée inverse on a :

$$x(t) = K_r + K_r \cdot T_d \cdot \delta(t) \quad (13)$$

$\delta(t)$ impulsion de Dirac



Remarque importante

L'action proportionnelle et par dérivation ne peut être correctement définie en utilisant une variation d'un échelon de l'écart parce que la dérivée par rapport au temps d'un échelon est infinie à l'instant de variation.

On doit donc faire varier linéairement l'écart

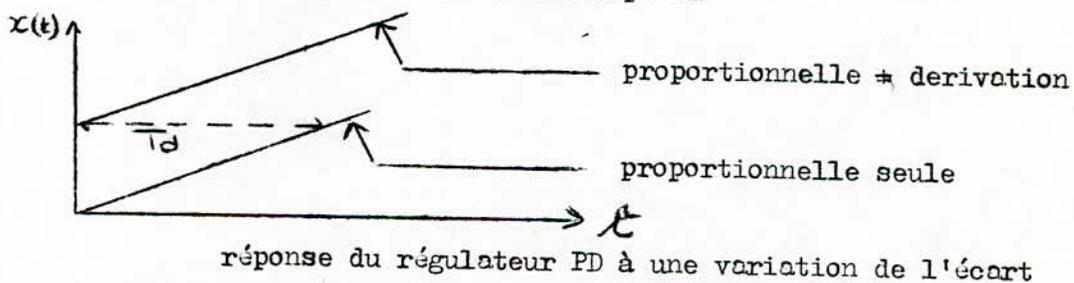
$$e(t) = E \cdot t \text{ avec } E = \text{constante} \Rightarrow E(p) = E \cdot \frac{1}{p^2}$$

$$X(p) = K_r (1 + T_d \cdot p) \frac{E}{p^2} = K_r E \left(\frac{1}{p^2} + \frac{T_d}{p} \right)$$

par transformation inverse on obtient :

$$x(t) = K_r \cdot E (t + T_d) \quad (14)$$

L'écart est défini à l'instant t alors que la grandeur réglante est définie à l'instant $(t = T_d)$, de sorte que l'effet obtenu est le décalage de la grandeur réglante "vers l'avant" d'un temps T_d



Comme on le voit sur cette figure, la réponse du régulateur est immédiatement en avance sur la variation de l'écart dans le temps. En quelque sorte la réponse par "déviation anticipée". Cependant elle ne peut jamais être en avance sur une action qui n'a pas encore lieu.

1.3.4. - Régulateur PI

1.3.4.1. - Définition

Dans ce cas la sortie est la somme de deux termes (à une constante près) dont l'un est proportionnel à l'entrée et l'autre à son intégrale.

$$x(t) = K_r \cdot e(t) + K_2 \int_0^t e(t) \cdot dt + m_0 \quad (15)$$

pour faciliter le calcul on suppose $m_0 = 0$
 sous forme opérationnelle la relation (15) va s'écrire

$$X(P) = K_r \cdot E(P) + \frac{K_2}{P} \cdot E(P)$$

avec: $K_2 = K \cdot K_r = \frac{1}{T_i} \cdot K_r$

on aura finalement :

$$X(P) = K_r \cdot E(P) + \frac{1}{T_i P} \cdot K_r E(P) = K_r \left(1 + \frac{1}{T_i P} \right) E(P) \quad (16)$$

Ces équations montrent bien que les deux actions, proportionnelle et par intégration, s'ajoutent simplement. L'action de régulation proportionnelle et par intégration a deux paramètres de réglages K_r et T_i

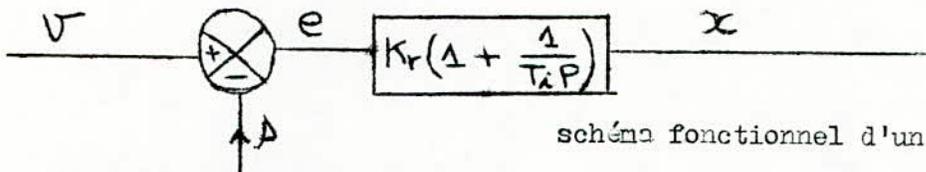
Remarque :

K_r intervient dans l'action proportionnelle ainsi que dans l'action par intégration.

T_i n'intervient que pour permettre le réglage de l'action I

1.3.4.2. - Fonction de transfert

$$H(P) = \frac{X(P)}{E(P)} = K_r \left(1 + \frac{1}{T_i P} \right) \quad (17)$$



1.3.4.3. - Réponse indicielle

Pour une variation d'un échelon de l'écart e : on choisit l'échelon unité défini comme suit

$$\begin{aligned} e &= 0 \text{ pour } t < 0 \\ e &= 1 \text{ pour } t \geq 0 \end{aligned} \Rightarrow E(P) = \frac{1}{P}$$

Par conséquent :

$$X(P) = K_r \left(1 + \frac{1}{T_i P} \right) \cdot \frac{1}{P} = K_r \left(\frac{1}{P} + \frac{1}{T_i P^2} \right)$$

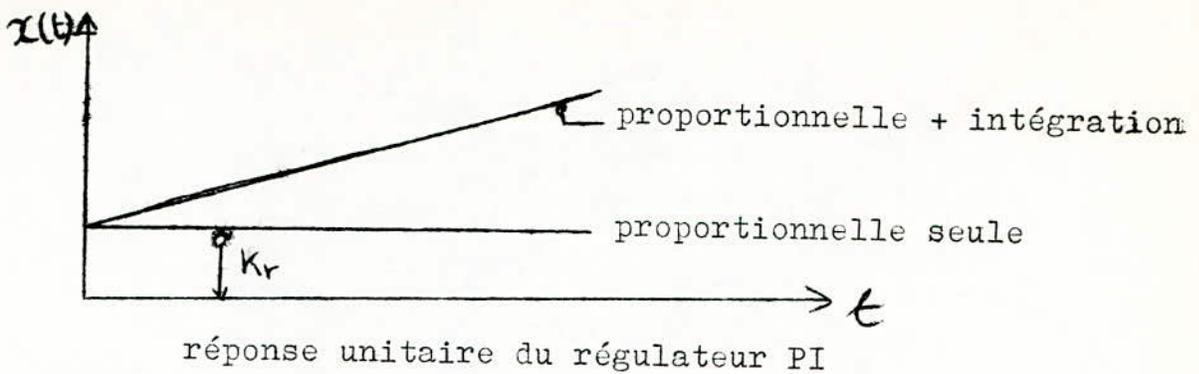
en utilisant la transformée inverse on obtient

$$x(t) = K_r \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i} \cdot t \right) \quad (18)$$

cette relation représente l'équation d'une droite, le premier terme correspond à la réponse proportionnelle, tandis que le second à la réponse par intégration.

Remarque :

La réponse de l'action PI est simplement l'addition de la réponse de l'action P toute seule et de celle de l'action I toute seule.



1.3.5-Régulateur PID

1.3.5.1-Définition :

C'est un régulateur qui réunit les trois actions, en quelque sorte la sortie est la somme (à une constante près) de trois termes proportionnels respectivement à l'entrée, à sa dérivée et à son intégrale.

$$x(t) = K_r \cdot e(t) + K_1 \frac{de}{dt} + K_2 \int_0^t e(t) dt + m_0 \quad (19)$$

en supposons: $m_0 = 0$

et en posant :

$$K_1 = T_d K_r$$

$$K_2 = K K_r = \frac{1}{T_i} \cdot K_r$$

sous forme opérationnelle l'équation devient

$$X(P) = \left(K_r + K_1 P + \frac{K_2}{P} \right) E(P)$$

$$X(P) = \left(K_r + T_d K_r P + \frac{1}{T_i} K_r \right) E(P)$$

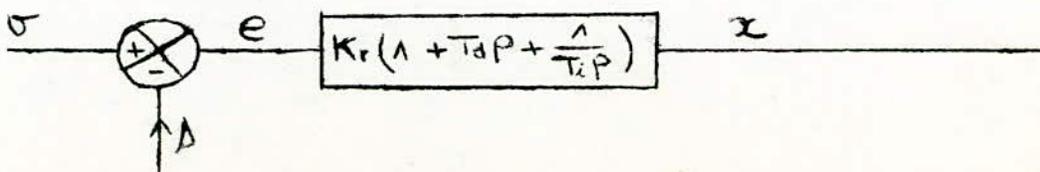
$$X(P) = K_r \left(1 + T_d P + \frac{1}{T_i} P \right) E(P) \quad (20)$$

Les trois paramètres de réglage : sensibilité proportionnelle K_r , constante de temps de dérivation T_d , constante de temps d'intégration T_i sont définies de la même façon que pour l'action proportionnelle et par dérivation et l'action proportionnelle et par intégration.

1.3.5.2-Fonction de transfert

$$H(P) = \frac{X(P)}{E(P)} = K_r \left(1 + T_d P + \frac{1}{T_i} P \right) \quad (21)$$

D'après cette relation on établit un schéma fonctionnel du régulateur PID.



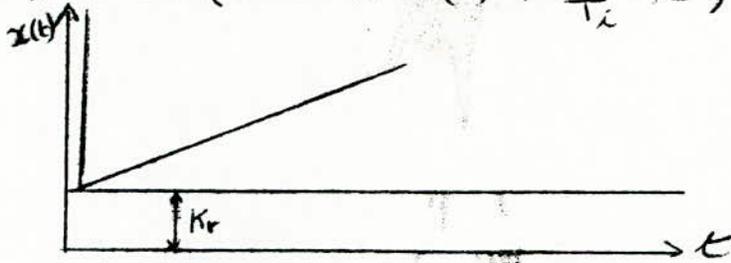
1.3.5.3-Réponse indicielle

On suppose que l'écart est donné par un échelon unité
 $E(P) = \frac{1}{P}$ donc :

$$X(P) = K_r \left(1 + T_d P + \frac{1}{T_i P} \right) E(P) = K_r \left(\frac{1}{P} + T_d + \frac{1}{T_i P^2} \right)$$

par transformation inverse on obtient :

$$x(t) = K_r \left(1 + T_d \delta(t) + \frac{1}{T_i} t \right) \quad (22)$$



réponse unitaire du régulateur PID.

2.-Régulation en boucle fermée

Un système réglé est constitué par ^{le} régulateur automatique et le processus agissant ensemble. Le système à boucle fermée est obtenu en réunissant le processus et le régulateur de la façon suivante.

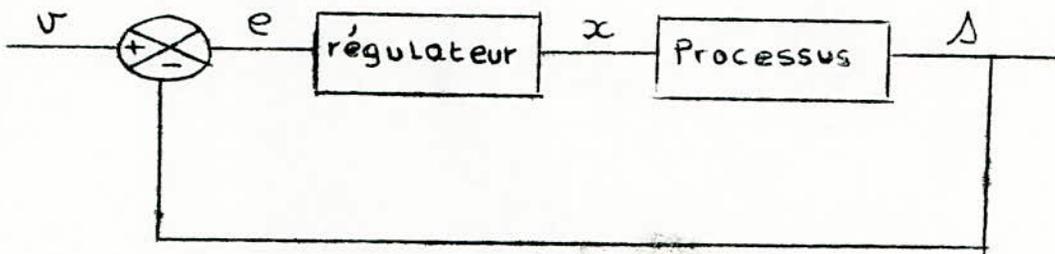
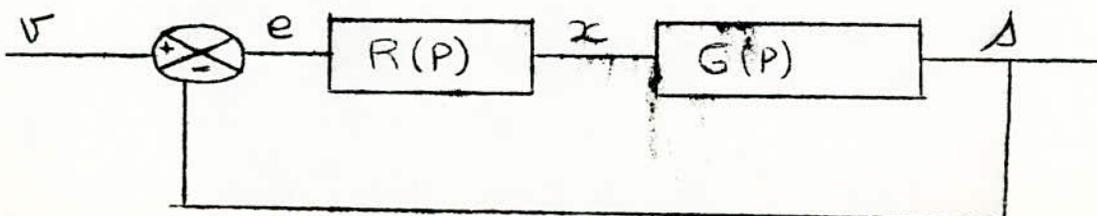


schéma fonctionnel à retour unitaire.

Comme le fonctionnement du système dépend à la fois des caractéristiques du régulateur et de celles du processus, il est donc préférable d'analyser le système dans lequel, on introduira tour à tour les différents types de régulateurs (P, I, PI, PD, PID) et voir les différences vis-à-vis de l'écart permanent.

2.1-Régulateur P



$R(P)$: fonction de transfert du régulateur

$G(P)$: fonction de transfert du processus

2.1.1-Fonction de transfert en boucle fermée

$$S(P) = R(P).G(P).E(P) = R(P).G(P).[V(P) - S(P)]$$

$$S(P)[1 + R(P).G(P)] = R(P).G(P).V(P)$$

$$H(P)_{B.F} = \frac{S(P)}{V(P)} = \frac{R(P).G(P)}{1 + R(P).G(P)}$$

Dans notre cas ; on a :

$$R(P) = K_r$$

$$G(P) = K_{ob} \frac{e^{-T_0 P}}{1 + TP}$$

alors :

$$H(P)_{B.F} = \frac{K_r \cdot K_{ob} \frac{e^{-T_0 P}}{1 + TP}}{1 + K_r \cdot K_{ob} \frac{e^{-T_0 P}}{1 + TP}} = \frac{K_0 e^{-T_0 P}}{K_0 e^{-T_0 P} + TP + 1}$$

$$H(P)_{B.F} = \frac{K_0}{K_0 + TP e^{T_0 P} + e^{T_0 P}}$$

2.1.2-Ecart permanent :

Exprimons la relation liant l'écart à la grandeur d'entrée du système en boucle fermée.

$$E(P) = V(P) - S(P) = V(P) \cdot \left(1 - \frac{S(P)}{V(P)} \right)$$

$$E(P) = V(P) \cdot \left[1 - \frac{R(P).G(P)}{1 + R(P).G(P)} \right] = V(P) \frac{1}{1 + R(P).G(P)}$$

Dans le cas du régulateur proportionnel

$$E(P) = V(P) \frac{1}{1 + K_r \cdot K_{ob} \frac{e^{-T_0 P}}{1 + TP}}$$

Pour un échelon unité à l'entrée du système, c'est-à-dire.

$$V(t) = 0 \quad \text{pour } t < 0$$

$$V(t) = 1 \quad \text{pour } t \geq 0$$

on a : $V(P) = \frac{1}{P}$ et alors :

$$E(P) = \frac{1}{P} \cdot \frac{1}{1 + K_0 \frac{e^{-T_0 P}}{1 + TP}}$$

L'écart permanent E_0 est par définition la valeur de l'écart lorsque le système atteint sur régime permanent c'est à dire au bout d'un temps assez grand :

$$E_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) \quad \text{ou} \quad E_0 = \lim_{P \rightarrow 0} P \cdot E(P)$$

$$E_0 = \lim_{P \rightarrow 0} P \cdot \frac{1}{P} \frac{1}{1 + K_0 \frac{e^{-T_0 P}}{1 + TP}} = \frac{1}{1 + K_0}$$

Plus K_0 est grand, plus l'écart est faible. Cependant K_0 est limité par la stabilité.

2.2-Régulateur I.

Dans ce mode de régulation la fonction de transfert est :

$$R(P) = \frac{1}{T_i P}$$

2.2.1-Fonction de transfert enboucle fermée.

Pour le même processus que dans le cas précédent, la fonction de transfert du système en boucle fermée est :

$$H(P) = \frac{S(P)}{V(P)} = \frac{R(P) \cdot G(P)}{1 + R(P) \cdot G(P)} = \frac{\frac{1}{T_i P} \cdot \frac{K_{ob} e^{-T_0 P}}{1 + TP}}{1 + \frac{1}{T_i P} \cdot \frac{K_{ob} e^{-T_0 P}}{1 + TP}}$$

2.2.2-Ecart permanent :

On a :

$$E(P) = \frac{1}{1 + \frac{1}{T_i P} \cdot \frac{K_{ob} e^{-T_0 P}}{1 + TP}} V(P)$$

$$E(P) = \frac{T_i P (1 + TP)}{T_i P (1 + TP) + K_{ob} e^{-T_0 P}} V(P)$$

Si toujours $V(P) = \frac{1}{P}$, l'écart permanent est alors :

$$E_0 = \lim_{P \rightarrow 0} P E(P) = \lim_{P \rightarrow 0} P \frac{T_i P (1 + TP)}{T_i P (1 + TP) + K_{ob} e^{-T_0 P}} \frac{1}{P} = 0$$

On remarque donc que la régulation par intégration permet d'éliminer l'écart permanent.

2.3.-Régulateur PI

L'action P et l'action I sont combinées additivement pour donner ce qu'on appelle la régulation PI et ceci dans le but de profiter des avantages des deux modes de régulation, à savoir la stabilité grâce à l'action P et l'élimination de l'écart permanent grâce à l'action I. Dans ce cas la fonction de transfert du régulateur est :

$$R(P) = K_r \left(1 + \frac{1}{T_i P} \right)$$

2.3.1-Fonction de transfert en boucle fermée

Toujours pour le même processus, on a :

$$H(P)_{c.f.} = \frac{R(P).G(P)}{1 + R(P).G(P)} = \frac{K_r \left(1 + \frac{1}{T_i P} \right) \left(K_{ob} \frac{e^{-T_o P}}{1 + TP} \right)}{1 + K_r \left(1 + \frac{1}{T_i P} \right) \left(K_{ob} \frac{e^{-T_o P}}{1 + TP} \right)}$$

$$H(P)_{B.F.} = \frac{K_o \left(1 + \frac{1}{T_i P} \right) \frac{e^{-T_o P}}{1 + TP}}{1 + K_o \left(1 + \frac{1}{T_i P} \right) \frac{e^{-T_o P}}{1 + TP}}$$

2.3.2- Ecart permanent

$$E(P) = \frac{V(P)}{1 + K_o \left(1 + \frac{1}{T_i P} \right) \frac{e^{-T_o P}}{1 + TP}}$$

Pour un échelon unité à l'entrée du système bouclé, l'écart permanent est :

$$E_o = \lim_{P \rightarrow 0} P E(P) = \lim_{P \rightarrow 0} P \frac{1}{1 + K_o \left(1 + \frac{1}{T_i P} \right) \frac{e^{-T_o P}}{1 + TP}} \frac{1}{P} = 0$$

Comme dans le cas précédent, la présence de l'action I annule l'écart.

2.4-Régulateur PD

En combinant additivement une action P et une action D, on obtient ce qu'on appelle une régulation PD.

2.4.1- Fonction de transfert du système en boucle fermée

Dans ce cas la fonction de transfert du régulateur est :

$$R(P) = K_r \left(1 + T_d P \right)$$

Pour le même processus, on a :

$$H(P)_{B.F} = \frac{R(P) \cdot G(P)}{1 + R(P) \cdot G(P)} = \frac{K_r (1 + T_d P) \left(K_{ob} \frac{e^{-T_o P}}{1 + TP} \right)}{1 + K_r (1 + T_d P) \left(K_{ob} \frac{e^{-T_o P}}{1 + TP} \right)}$$

$$H(P)_{B.F} = \frac{K_o (1 + T_d P) e^{-T_o P}}{1 + TP + K_o (1 + T_d P) e^{-T_o P}}$$

2.4.2- Ecart permanent

$$E(P) = \frac{V(P)}{1 + R(P) \cdot G(P)} = \frac{V(P)}{1 + K_o (1 + T_d P) \frac{e^{-T_o P}}{1 + TP}}$$

Toujours pour $V(P) = \frac{1}{P}$, l'écart permanent est :

$$E_o = \lim_{P \rightarrow 0} P E(P) = \lim_{P \rightarrow 0} \frac{1}{1 + K_o (1 + T_d P) \frac{e^{-T_o P}}{1 + TP}} \frac{1}{P} = \frac{1}{1 + K_o}$$

si K_o augmente, l'écart diminue ; mais il ne faut pas perdre de vue que si K_o devient très grand, le système peut avoir une réponse oscillatoire amortie.

2.5- Régulateur PID

Une combinaison additive des trois régulations P, I, D donne une régulation PID.

2.5.1- Fonction de transfert du système en boucle fermée

La fonction de transfert du régulateur PID est :

$$R(P) = K_r \left(1 + T_d P + \frac{1}{T_i P} \right)$$

$$H(P)_{B.F} = \frac{R(P) \cdot G(P)}{1 + R(P) \cdot G(P)} = \frac{K_o \left(1 + T_d P + \frac{1}{T_i P} \right) \frac{e^{-T_o P}}{1 + TP}}{1 + K_o \left(1 + T_d P + \frac{1}{T_i P} \right) \frac{e^{-T_o P}}{1 + TP}}$$

2.5.2- Ecart permanent

$$E(P) = \frac{V(P)}{1 + R(P) \cdot G(P)} = \frac{V(P)}{1 + K_o \left(1 + T_d P + \frac{1}{T_i P} \right) \frac{e^{-T_o P}}{1 + TP}}$$

Pour $V(P) = \frac{1}{P}$, l'écart permanent sera :

$$E_0 = \lim_{P \rightarrow 0} P E(P) = \lim_{P \rightarrow 0} P \frac{1}{1 + K_0 \left(1 + T_d P + \frac{1}{T_i P} \right) \frac{e^{-T_0 P}}{1 + T_P P}} \frac{1}{P} = 0$$

Là aussi grâce à l'action I l'écart permanent est éliminé

2.6-Conclusion :

Lors d'une régulation d'un processus, il faut toujours chercher une régulation optimale, en d'autres termes, essayer d'avoir :

- un temps de réponse faible
- un bon amortissement
- un écart permanent faible

3.- Régulation de la température dans les cylindres

Comme nous l'avons déjà signalé, chaque cylindre est muni d'une vanne à fonctionnement manuel. La température dans chaque cylindre appartenant au même groupe dépend du pourcentage d'ouverture de la vanne. Ainsi le réglage manuel des vannes détermine des températures différentes dans les différents cylindres. Ce qui se traduit par une courbe de température en travers de ces derniers.

La variation de température ou de pression au sein d'un cylindre se répercute dans le même sens dans les autres cylindres du même groupe. Pour des raisons d'économie on fera une régulation de température par groupe de cylindre.

3.1-Description et principe de fonctionnement du schéma - bloc (fig.3.1)

A chaque instant la température régnant à la surface du quatrième cylindre est captée au moyen d'un thermomètre à résistance qui la traduit en tension. Afin de permettre un bon séchage du papier, la température moyenne à la surface du cylindre devra être constante et égale à une consigne choisie de telle sorte à avoir une bonne qualité du papier. Si la température relevée ne respecte pas sa consigne, il en résulte un écart, le régulateur en fonction de tout écart constaté va émettre un signal d'action qui agira sur les organes de réglage chargés de rétablir l'état désiré du système. Trois cas sont à envisager :

-L'écart entre la température de consigne et celle mesurée est nul (c'est toujours l'objectif visé dans la régulation) dans ce cas le régulateur ne réagit pas et tous les organes de réglage ne fonctionnent pas.

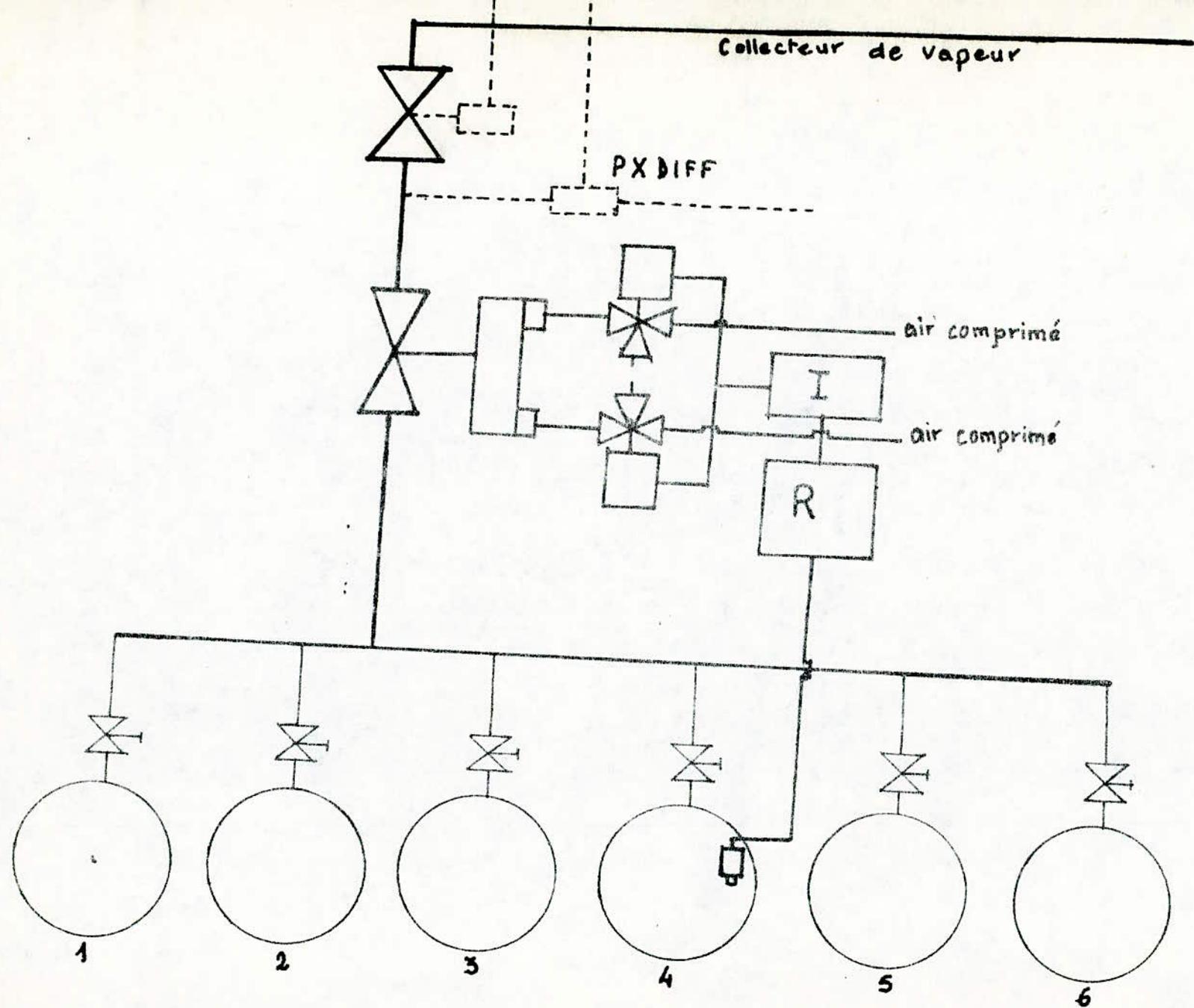


fig 3.1 Schéma - Bloc du Système de régulation de la température dans les unités

-Si la température mesurée est inférieure à celle de la consigne, ceci entraîne un écart positif. Un signal électrique est alors traduit à la sortie du pont de mesure et attaque le régulateur qui agit sur un impulsateur. Les impulsions produites sont de telle sorte qu'elles excitent une seule bobine qui agira sur une vanne de commande à trois voies.

-Une voie alimentée en air comprimée.

-Une voie d'évacuation de l'air d'alimentation en excès dans l'atmosphère.

-Une voie reliée à un servomoteur électropneumatique pas à pas par l'intermédiaire d'un piston.

Cette vanne commande donc la rotation de ce servomoteur, il tourne d'un certain nombre de pas dans un sens bien déterminé, en fonction des impulsions délivrées. Ce sens est celui tendant à ouvrir la vanne de réglage pour laisser passer plus de vapeur dans les différents cylindres, ce qui aura pour effet l'augmentation de la température dans les cylindres.

-Si la température est supérieure à celle de la consigne, ce qui entraîne un écart négatif. Le régulateur va agir dans le sens inverse à celui décrit précédemment, ce qui aura pour effet la diminution de la vapeur dans les cylindres, donc la diminution de la température.

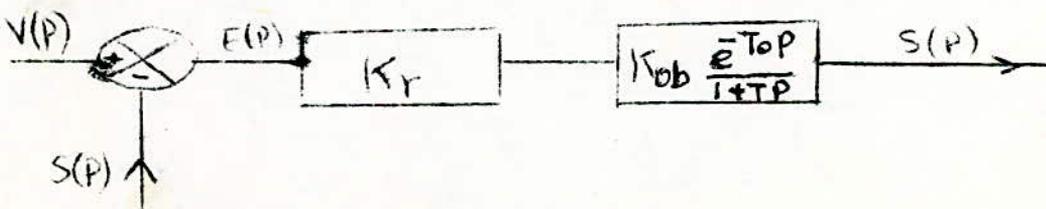
3.2-Calcul et mise au point des régulateurs et choix d'un système de régulation

On va analyser les propriétés dynamiques et statiques de chaîne de régulation ouverte pour déterminer les conditions de stabilité et de précision de régulation concernant les chaînes fermées.

Pour commander le processus, on utilisera deux types de régulateurs dans la chaîne et le choix du système de régulation dépendra de la précision et de la stabilité qui seront obtenues.

3.2.1-Régulateur proportionnel P

Soit le schéma fonctionnel suivant :



Gain en boucle ouverte :

$$\frac{S(P)}{E(P)} = K_r K_{ob} \frac{e^{-T_0 P}}{1+TP} = K_0 \frac{e^{-T_0 P}}{1+TP}$$

On donne les paramètres du processus :

$$T_0 = 40 \text{ s}$$

$$T = 200 \text{ s}$$

$$K_{ob} = \frac{0,4^\circ\text{C}}{1\%}$$

Soit le rapport :

$$\frac{T_0}{T} = \frac{40}{200} = 0,2$$

La sensibilité proportionnelle K_r , du régulateur P sera calculée à partir de la caractéristique des régulateurs P (Voir fig.3.2/1). Cette caractéristique des régulateurs P comporte trois zones :

- Zone I (aperiodique)
- Zone II (oscillations amorties)
- Zone III (zone d'instabilité)

On choisira K_0 dans la zone II, tout en laissant une marge de stabilité. Dans cette zone la réponse est rapide alors que dans la zone I la réponse est lente.

On choisit $K_0 = 5$

$$\text{Comme } K_0 = K_r \cdot K_{ob} \implies K_r = \frac{K_0}{K_{ob}}$$

La sensibilité proportionnelle du régulateur P est alors :

$$K_r = \frac{5}{\frac{0,4^\circ\text{C}}{1\%}} = \frac{12,5\%}{^\circ\text{C}}$$

3.2.1.1-Précision

La précision de régulation est donnée par :

$$E_0 = \frac{V_0}{1 + K_0}$$

La température de consigne dans le quatrième cylindre est fixée à 80°C . D'autre part le régulateur P utilisé a une marge de régulation $20 \pm 100^\circ\text{C}$ d'où on en déduit

$$V_0 = \frac{T^\circ\text{C de consigne}}{\text{marge de régulation}} = \frac{80^\circ\text{C}}{80^\circ\text{C}} = 1$$

Alors :

$$E_0 = \frac{1}{1 + 5} = \frac{1}{6} = 16 \%$$

3.2.1.2-Stabilité

Pour étudier la stabilité, il existe plusieurs critères :

-Les critères algébriques tels que la règle de Routh.

En fait, on connaît les limitations de ces techniques algébriques. D'une part, complexité et difficulté d'interprétation des calculs pour les systèmes d'ordre élevé, d'autre part nécessité de connaître explicitement la fonction de transfert en boucle ouverte, ce qui empêche d'étudier des systèmes caractérisés par des données expérimentales. Ces considérations expliquent l'intérêt des critères graphiques, qui permettent de juger de la stabilité d'un asservissement à partir de son lieu de transfert en boucle ouverte.

Dans notre cas, un bon choix de K_0 (gain statique), sur la caractéristique du régulateur P (fig. 3.2/1) permet de satisfaire la stabilité. Cependant, il sera quand même utile de vérifier par un critère graphique appelé méthode de Nyquist améliorée qui donne le module en fonction de la phase pour plusieurs valeurs de la fréquence, dans le plan de coordonnées logarithmique - linéaire.

Le système sera dit stable dans ce plan si, en décrivant le lieu de transfert en boucle ouverte dans le sens des fréquences croissantes, on laisse le point critique (1, -180°) à sa droite.

Pour nous simplifier le travail, on fera la vérification de la stabilité uniquement pour la régulation de la température dans les cylindres.

-Tableau de valeurs

$wT(\text{rd})$	0	0,5	1	2	4	8	12	16
$\left \frac{e^{-T_0P}}{1 + TP} \right $	1	0,9	0,7	0,45	0,25	0,125	0,083	0,062
ϕ_1	0°	$-32,3^\circ$	$-56,5^\circ$	$-86,3^\circ$	$-121,7^\circ$	$-174,4^\circ$	$-222,8^\circ$	-270°
$5 \left \frac{e^{-T_0P}}{1 + TP} \right $	5	4,5	3,5	2,25	1,25	0,625	0,41	0,31

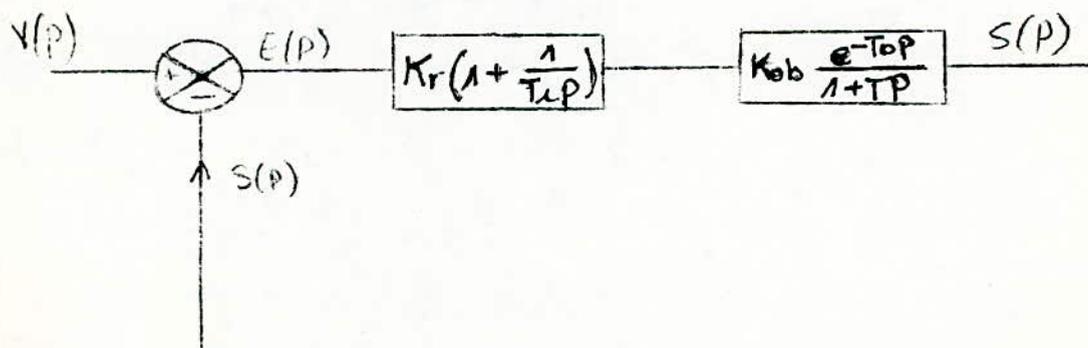
-Pour la représentation graphique de ce tableau, voir courbe de stabilité à la page suivante.

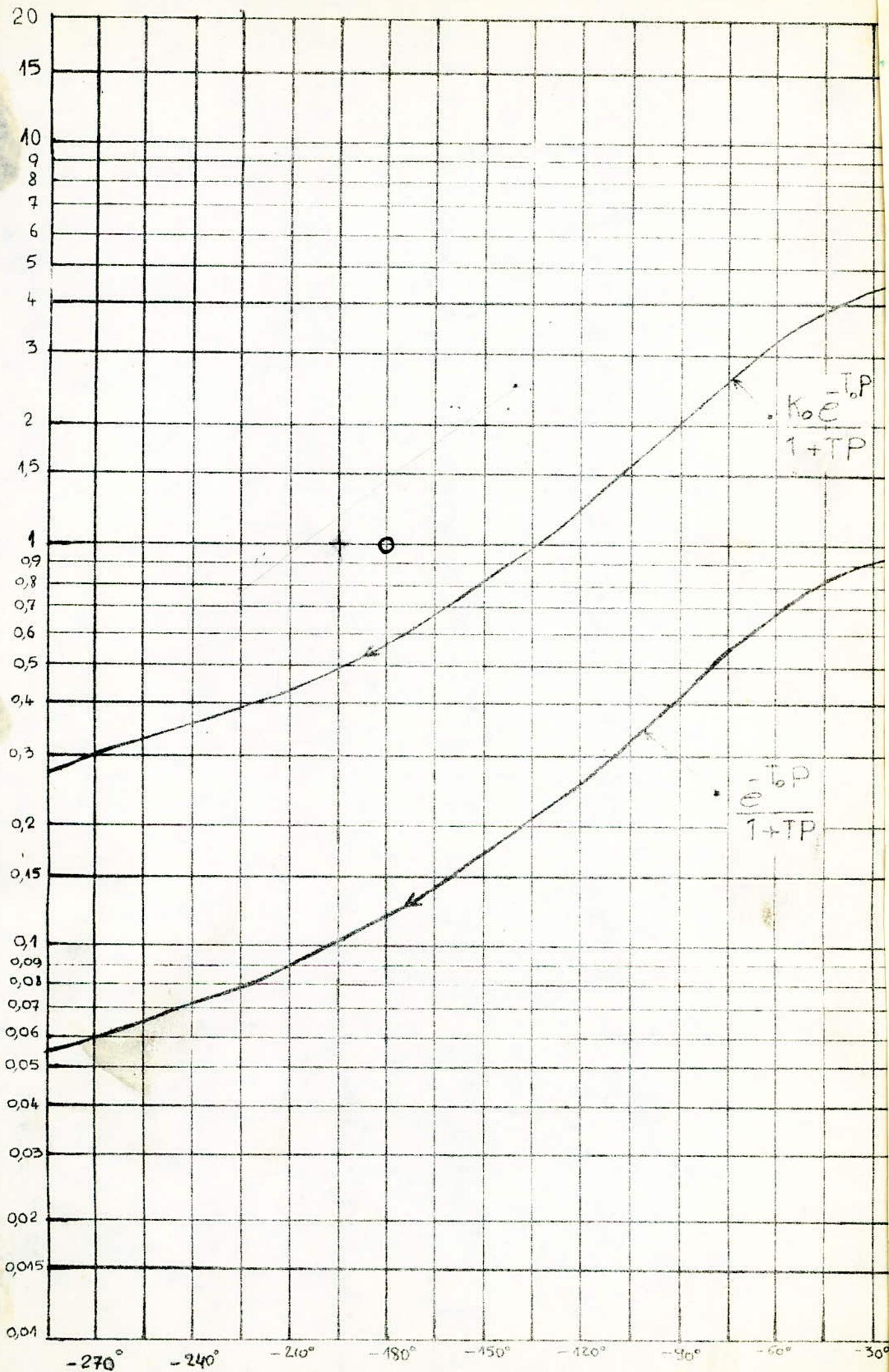
3.2.1.3-Conclusion

On remarque d'après la courbe que le système est stable et possède une marge de stabilité satisfaisante. Plus K_0 augmente, plus l'écart permanent diminue, cependant il ne faut pas croire que les plus grandes valeurs de K_0 sont les meilleures. Car si K_0 augmente, la réponse du système présentera des oscillations.

3.2.2-Régulateur proportionnel intégral PI

Soit le schéma fonctionnel suivant :





Curbes de stabilité

Gain en boucle ouverte :

$$\frac{S(p)}{E(p)} = K_r \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right) \left(K_{obj} \frac{e^{-T_0 p}}{1 + T_p p} \right) = K_0 \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right) \frac{e^{-T_0 p}}{1 + T_p p}$$

Les paramètres du processus sont toujours :

$$T_0 = 40 \text{ s}$$

$$T = 200 \text{ s} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_0}{T} = \frac{40}{200} = 0,2$$

$$K_{obj} = \frac{0,4^\circ\text{C}}{1\%}$$

En se rapportant à la caractéristique des régulateurs PI (fig.3.2/2) on en déduit par un calcul simple la sensibilité proportionnelle K_r et la constante de temps d'intégration du régulateur PI de la façon suivante.

Pour $\frac{T_0}{T} \text{ obj} = 0,2$ on relève $K_0 = 4$

A cette valeur de $K_0 = 4$ correspond $\frac{T_i}{T_0} = 1,3$ qui est la limite de stabilité.

$$\frac{T_i}{T_0} > 1,3 \quad \text{le système est stable.}$$

$$\frac{T_i}{T_0} < 1,3 \quad \text{le système est instable.}$$

Comme pour la plupart des systèmes $\frac{T_i}{T_0}$ varie entre 2 et 4, alors on prendra :

$$\frac{T_i}{T_0} = 3 \quad \Rightarrow \quad T_i = 3 \cdot T_0 = 3 \cdot 40 = 120 \text{ s}$$

$$K_0 = K_r \cdot K_{obj} \quad \Rightarrow \quad K_r = \frac{K_0}{K_{obj}} = \frac{4}{0,4^\circ\text{C}/1\%} = 10\%/^\circ\text{C}$$

Les paramètres du régulateur PI sont donc :

-Sensibilité proportionnelle :

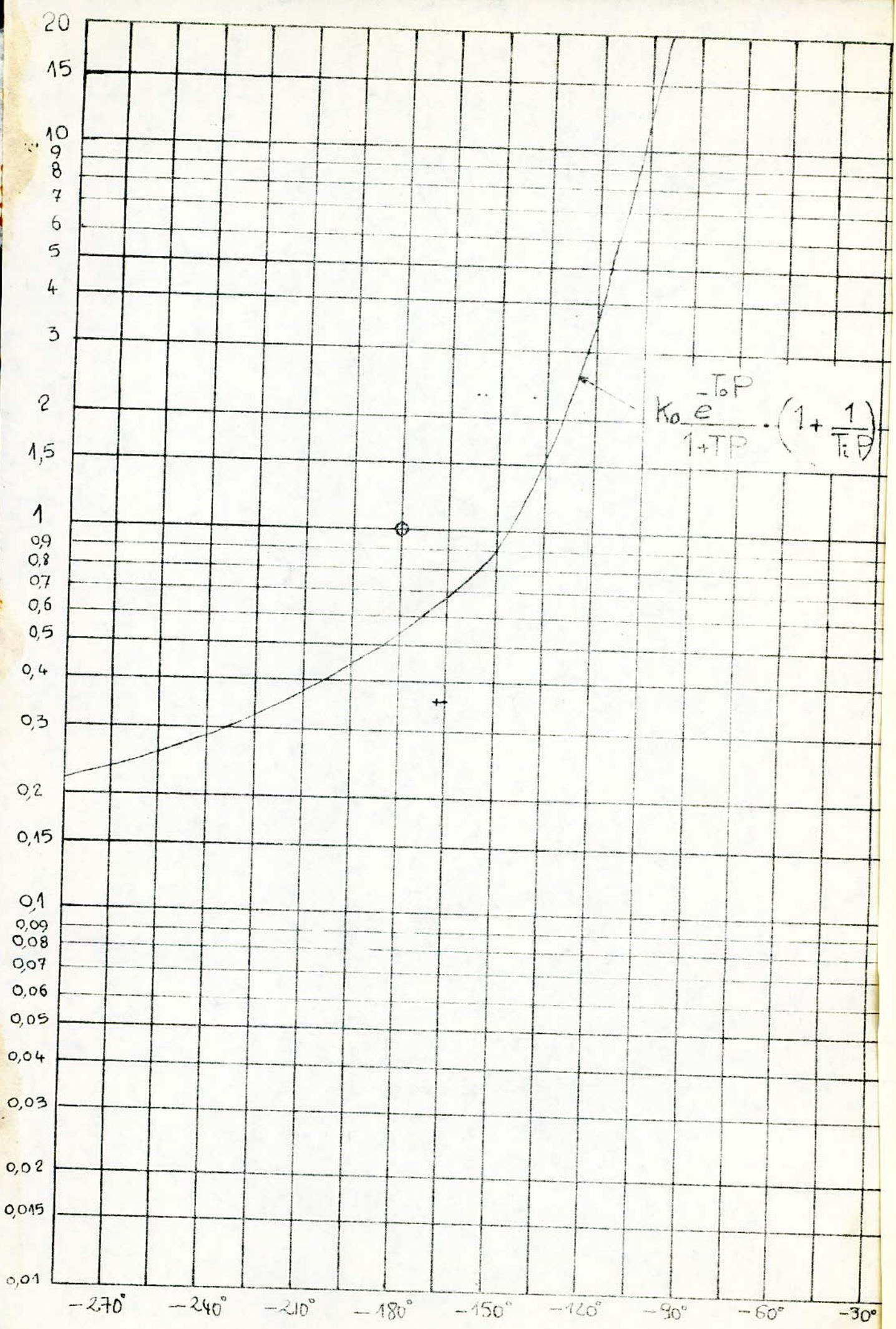
$$K_r = 10\%/^\circ\text{C}$$

-Constante de temps d'intégration :

$$T_i = 120 \text{ s}$$

WT [ra]	w [r/s]	$\left \frac{\bar{\epsilon}^{-Top}}{1+TP} \right $	$\bar{\Phi}_1 [^\circ]$	$\left 1 + \frac{1}{\bar{\epsilon}_2 P} \right $	$\bar{\Phi}_2 [^\circ]$	$\left \frac{\bar{\epsilon}^{-Top}}{1+TP} \right \cdot \left 1 + \frac{1}{\bar{\epsilon}_2 P} \right $	$\bar{\Phi}_1 + \bar{\Phi}_2 [^\circ]$	$K_0 \left \frac{\bar{\epsilon}^{-Top}}{1+TP} \right \left 1 + \frac{1}{\bar{\epsilon}_2 P} \right $
0	0	1	0	∞	-90	∞	-90	∞
0,5	0,0025	0,9	-32	3,48	-73	3,13	-105	12,52
1	0,005	0,7	-56	1,94	-59	1,36	-115	5,44
2	0,01	0,45	-86	1,3	-39	0,58	-126	2,32
4	0,02	0,25	-121	1,08	-12	0,27	-144	1,08
8	0,04	0,125	-174	1,02	-11	0,127	-186	0,508
12	0,06	0,083	-222	1,01	-7	0,083	-230	0,332
16	0,08	0,062	-270	1,005	-5	0,062	-275	0,248

Tableau de valeurs



Courbe de stabilité

3.2.2.1- Précision

La précision de régulation est donnée par l'écart permanent $E_0 = 0$ grâce à l'action I.

3.2.2.2- Stabilité

La stabilité sera toujours vérifiée par le même critère graphique que précédemment (voir courbe stabilité)

3.2.2.3- Conclusion

Tenant compte des résultats obtenus des deux régulations (P et PI), il est tout à fait logique de choisir la régulation PI. Avec cette régulation PI, on profite des avantages des deux modes de régulations, à savoir la stabilité grâce à l'action P et l'élimination de l'écart permanent grâce à l'action I.

La régulation PI est la plus utilisée quoiqu'elle présente un inconvénient : temps de stabilisation excessif quand le système présente plusieurs éléments ou un temps mort.

4.- Régulation de la température sèche et humide sous la hotte

4.1- Description et principe de fonctionnement du schéma bloc (fig.4.1)

4.1.1- Température sèche

La température sèche de la hotte varie d'un endroit à un autre, notre régulation va maintenir une température moyenne constante. La nécessité de placer un capteur de température sèche à un endroit bien déterminé s'impose. Il sera placé à l'endroit où il relèvera à chaque instant, la température de l'air réchauffé introduit dans le but de permettre un séchage supplémentaire du papier. Le principe de cette régulation de température sèche est identique à celui décrit dans le paragraphe 3.1.

Dans cette régulation le servomoteur commande l'ouverture ou la fermeture, en fonction des impulsions reçues, d'une vanne de réglage alimentée par une source de vapeur. Cette source de vapeur servira à réchauffer l'air dans un échangeur. Cet air sera ensuite introduit dans la hotte et servira au séchage du papier.

4.1.2- Température mouillée ou humidité absolue

L'humidité absolue déjà définie comme étant le rapport de la quantité de vapeur en g par kg d'air sec influe directement sur la température du thermomètre mouillé.

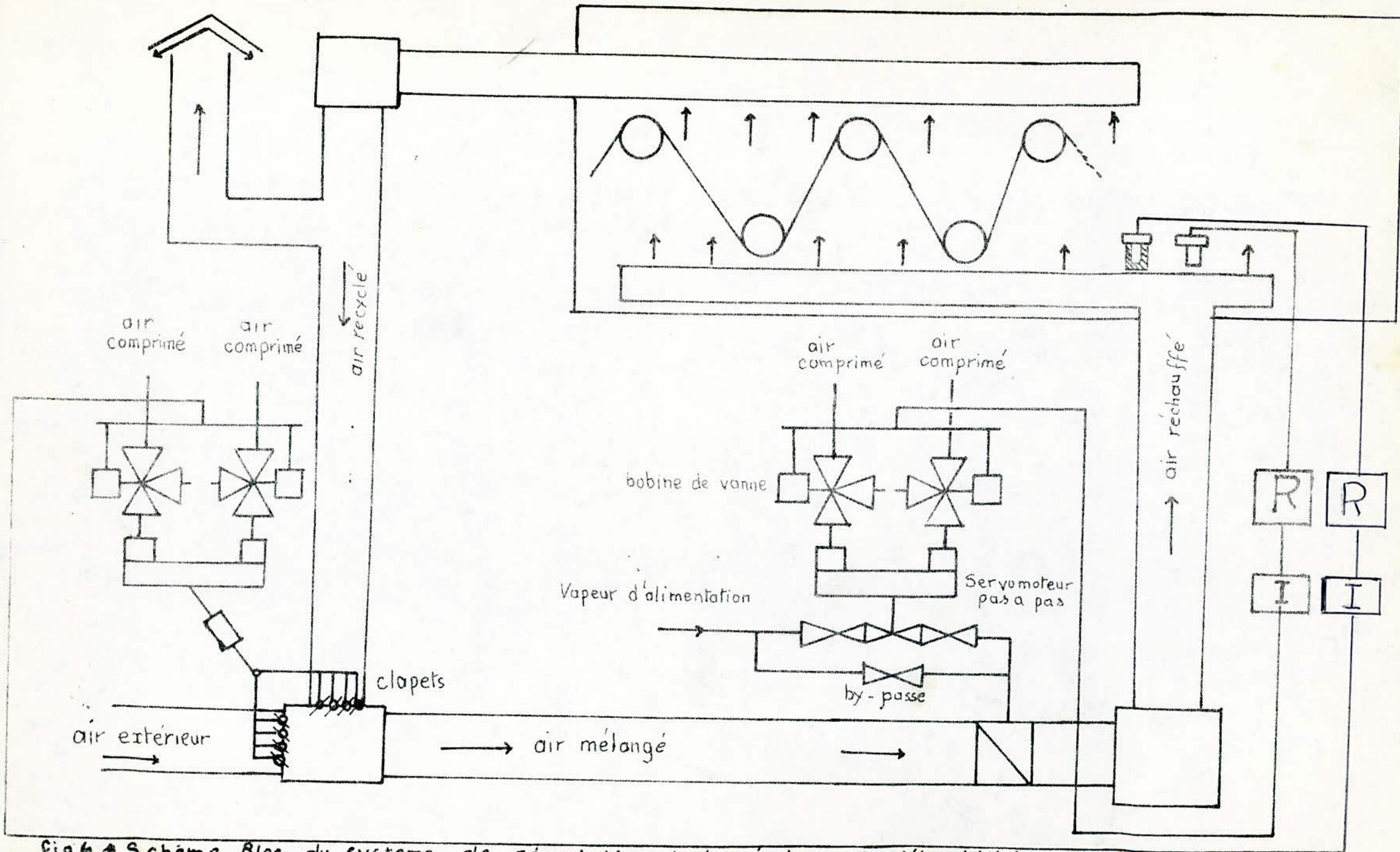


fig. 1. Schéma. Bloc du système de régulation de température et d'humidité de l'air sous la Hotte

En effet si l'humidité absolue augmente, cela signifie que la quantité de vapeur a augmenté ou la quantité d'air sec a diminué. Le pouvoir d'évaporation de l'eau distillée dans le thermomètre mouillé diminue, donc la température mouillée indiquée par celui-ci augmente. Par un raisonnement analogue si l'humidité absolue diminue, la température mouillée diminue. Donc réguler l'humidité absolue revient à réguler la température mouillée. Cette température mouillée sera captée par un thermomètre humide dont le principe est déjà expliqué. Ce thermomètre humide sera placé à côté du thermomètre sec, dans le but de connaître l'humidité relative à cet endroit. Cette humidité relative a un rôle important dans le processus du séchage du papier. Le principe de la régulation de la température mouillée est identique à celui décrit dans le paragraphe 3.1. Dans cette régulation de température mouillée, le servomoteur, en fonction des impulsions délivrées, commande à la fois l'ouverture ou la fermeture des deux clapets. Un clapet permet le passage d'air extérieur et un autre le passage d'air recyclé.

Notons qu'au mouvement de rotation pas à pas du servomoteur correspond un mouvement de translation à la fois des deux clapets. Ce servomoteur agit sur les clapets de telle sorte que lorsque l'un d'eux s'ouvre, l'autre se ferme automatiquement et réciproquement.

- Si l'écart entre la température mouillée et celle de la consigne est nul, le régulateur ne réagit pas, aucune impulsion n'est délivrée pour agir sur les organes de réglage.

- Si la température mouillée mesurée est inférieure à celle de consigne, il en résulte un écart et la chaîne de régulation agira de telle sorte à fermer d'un certain pourcentage le clapet pour l'air extérieur et à ouvrir celui de l'air recyclé. Ce qui aura pour effet l'augmentation de l'humidité absolue.

- Si la température mouillée mesurée est supérieure à celle de la consigne, il en résulte un écart. La chaîne de régulation va agir dans un sens qui aura pour effet final une augmentation d'air extérieur et une diminution d'air recyclé, donc l'humidité absolue diminue.

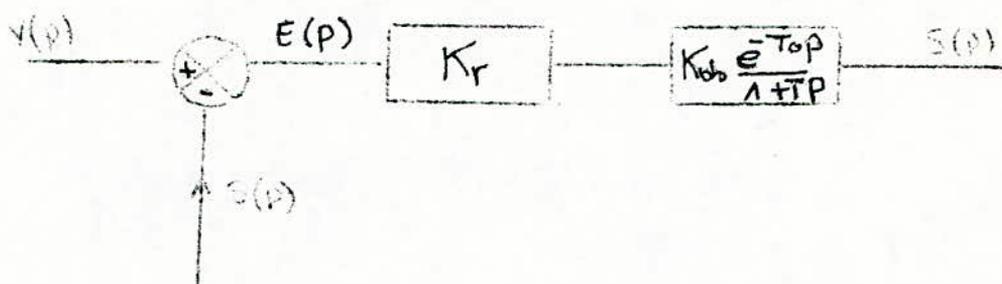
4.1.3- Humidité relative

On sait que l'humidité relative est une fonction de la différence entre la température sèche et la température mouillée. Tenant compte de cette propriété, nous voudrions avoir l'état d'équilibre à l'aide des deux chaînes de régulation distinctes, mais influençables l'une sur l'autre. On peut supposer quand même que les deux chaînes de régulation sont indépendantes et que nous voudrions déterminer seulement les propriétés dynamiques pour ces deux chaînes différentes. Les deux régulations consistent à maintenir les deux températures sèche et mouillée constantes et égales à leur valeur de consigne. Donc on maintient une différence constante, ce qui aura pour effet de maintenir une humidité relative constante.

4.2- Choix du système de régulation de la température sèche et calcul de mise au point

4.2.1- Régulateur proportionnel P

Soit le schéma fonctionnel suivant :



Gain en boucle ouverte :

$$\frac{s(p)}{E(p)} = K_r K_{obs} \frac{e^{-T_0 p}}{1 + T_1 p} = K_0 \frac{e^{-T_0 p}}{1 + T_1 p}$$

On donne les paramètres du processus :

$$T_o = 80 \text{ s}$$

$$T = 800 \text{ s}$$

$$K_{obj} = \frac{0,5^\circ\text{C}}{1\%}$$

Soit le rapport :

$$\frac{T_o}{T} = \frac{80}{800} = 0,1$$

En se référant à la caractéristique des régulateurs P et en laissant une marge de stabilité, on choisit $K_o = 10$ ce qui entraîne la sensibilité proportionnelle K_r :

$$K_r = \frac{K_o}{K_{obj}} = \frac{10}{0,5^\circ\text{C}/1\%} = \frac{20\%}{^\circ\text{C}}$$

4.2.1.1- Précision

La précision de régulation est donnée par :

$$E_o = \frac{V_o}{1 + K_o}$$

la température sèche de consigne est fixée à 50°C , le régulateur P utilisé a une marge de régulation $0^\circ\text{C} \rightarrow 60^\circ\text{C}$ d'où on déduit :

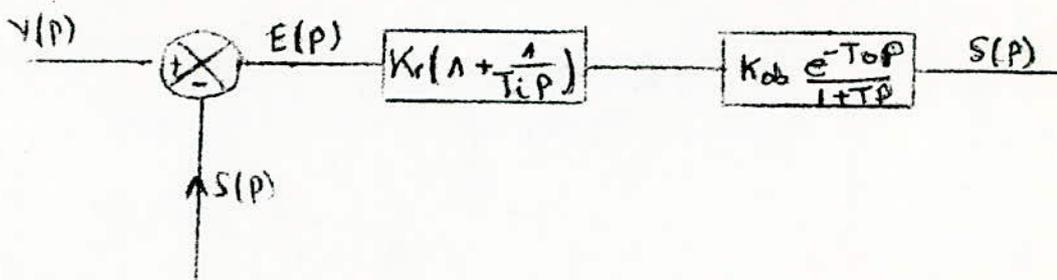
$$V_o = \frac{50}{60} = 0,83$$

$$E_o = \frac{0,83}{1 + 10} = \frac{0,83}{11} = 0,075 = 7,5 \%$$

$$E_{max} = 0,075 \cdot 60^\circ\text{C} = 4,5^\circ\text{C}$$

4.2.2- Régulateur proportionnel intégral PI

Soit le schéma fonctionnel suivant :



Gain en boucle ouverte :

$$\frac{S(p)}{E(p)} = K_r \left(\lambda + \frac{1}{T_d p} \right) \left(K_{obj} \frac{e^{-T_0 p}}{1 + T_1 p} \right) = K_0 \left(\lambda + \frac{1}{T_d p} \right) \frac{e^{-T_0 p}}{1 + T_1 p}$$

Les paramètres du processus sont toujours :

$$T_0 = 80 \text{ s}$$

$$T = 800 \text{ s}$$

$$K_{obj} = \frac{0,5^\circ\text{C}}{1\%}$$

Soit le rapport :

$$\frac{T_0}{T} = 0,1$$

En se référant à la caractéristique du régulateur PI (voir fig.3.2/2), tenant compte des conditions de stabilité on choisit $K_0 = 10$. A ce moment là le rapport $\frac{T_i}{T_0}$ qui donne la limite de stabilité est 1,5.

$$\frac{T_i}{T_0} > 1,5 \text{ le système est stable.}$$

$$\frac{T_i}{T_0} < 1,5 \text{ le système est instable.}$$

Comme pour la plupart des systèmes $\frac{T_i}{T_0}$ varie de 2 à 4 alors on prendra :

$$\frac{T_i}{T_0} = 3 \implies T_i = 3 \cdot T_0 = 3 \cdot 80 = 240 \text{ s}$$

$K_0 = 10$, on déduit la sensibilité proportionnelle :

$$K_p = \frac{K_0}{K_{obj}} = \frac{10}{0,5^\circ\text{C}/1\%} = \frac{20\%}{^\circ\text{C}}$$

4.2.2.1- Précision

$E_0 = 0$ grâce à l'action I

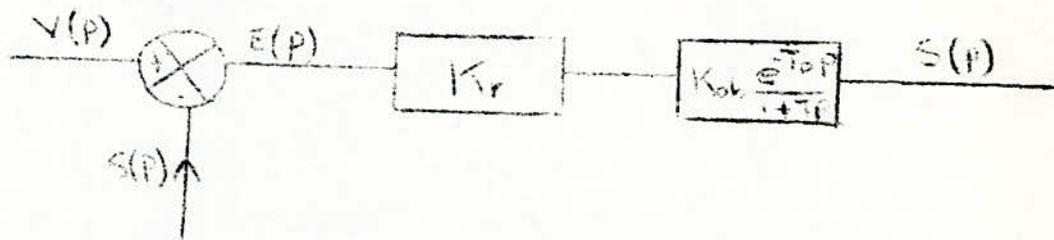
4.2.2.2- Conclusion

On choisira pour notre régulation, le régulateur PI, car en plus de la stabilité satisfaite l'écart permanent est nul.

4.3- Choix du système de régulation de la température mouillée et calcul de mise au point

4.3.1- Régulateur proportionnel P

Soit le schéma fonctionnel suivant :



Gain en boucle ouverte :

$$\frac{S(p)}{E(p)} = K_r K_{obj} \frac{e^{-T_0 p}}{1 + T p} = K_0 \frac{e^{-T_0 p}}{1 + T p}$$

On donne les paramètres du processus :

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

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

$$K_{obj} = \frac{0,2^\circ\text{C}}{1\%}$$

Soit le rapport :

$$\frac{T_0}{T} = 0,12$$

En se référant à la caractéristique du régulateur P (voir fig.3.2/1), on choisit dans la zone II, en laissant une marge de stabilité, $K_0 = 9$

$$K_0 = K_r \cdot K_{obj} \Rightarrow K_r = \frac{K_0}{K_{obj}} = \frac{9}{0,2^\circ\text{C}/1\%} = \frac{45\%}{^\circ\text{C}}$$

4.3.1.1- Précision

La précision de régulation est donnée par :

$$E_0 \approx \frac{V_0}{1 + K_0}$$

La température mouillée de consigne est fixée à 35°C . Comme la température sèche est fixée à 50°C , ce qui donne une humidité relative de 35%.

Le régulateur P utilisé a une marge de régulation $0^{\circ}\text{C} \pm 60^{\circ}\text{C}$
 On déduit :

$$V_0 = \frac{35^{\circ}\text{C}}{60^{\circ}\text{C}} = 0,58$$

L'écart permanent est dans ce cas :

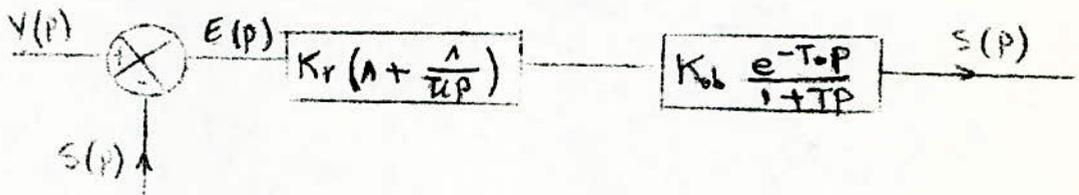
$$E_0 = \frac{0,58}{1 + 9} = 0,058 = 5,8\%$$

L'erreur maximale ramenée en $^{\circ}\text{C}$ est :

$$E_{0\text{max}} = 5,8\% \cdot 60^{\circ}\text{C} = 3,48^{\circ}\text{C}$$

4.3.2- Régulateur PI

Soit le schéma fonctionnel suivant :



Gain en boucle ouverte :

$$\frac{S(p)}{E(p)} = K_r \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right) \left(K_{obj} \frac{e^{-T_o p}}{1 + T p} \right) = K_o \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right) \frac{e^{-T_o p}}{1 + T p}$$

Les paramètres du processus sont :

$$T_o = 120 \text{ s}$$

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

$$K_{obj} = \frac{0,2^{\circ}\text{C}}{1\%}$$

Soit le rapport :

$$\frac{T_o}{T} = 0,12$$

En se référant à la caractéristique du régulateur PI (voir fig. 3.2/2), on choisit $K_o = 9$ et $\frac{T_i}{T_o} = 3$

Ce qui entraîne :

- La sensibilité proportionnelle $K_r = \frac{9}{0,2^{\circ}\text{C}/1\%} = \frac{45\%}{^{\circ}\text{C}}$

- La constante de temps d'intégration :

$$T_i = 3 \cdot T_o = 3 \cdot 120 = 360 \text{ s}$$

4.3.2.1- Précision :

La précision de régulation est donnée par l'écart permanent $E_0 = 0$ grâce à l'action I.

- Conclusion

Pour les mêmes raisons déjà citées, on choisit la régulation PI.

5.- Système de mesure de la température et de l'humidité de l'air

La connaissance de la température et de l'humidité de l'air en certains points de la hotte et entre certains éléments de régulation, est indispensable pour s'assurer du fonctionnement normal du système. Ces mesures nous permettront de connaître les conditions de température et d'humidité de l'air avant et après séchage du papier. La connaissance de ces mesures détermine les conditions de séchage.

Le système de mesure de température et d'humidité de l'air à différents endroits est représenté à la fig.(5).

- (1) : mesure de la température de l'air extérieur à distance
- (2) : mesure de la température de l'air mélange à distance
- (3) : mesure de la température de l'air recyclé à distance avec enregistrement
- (4) : mesure de la température et de l'humidité relative de l'air recyclé à distance
- (5) : mesure de la température et de l'humidité relative de l'air recyclé à distance
- (6) : mesure de la température **et** de l'humidité de l'air introduit à distance
- (7) : mesure de la température de l'air humide de la hotte à distance.

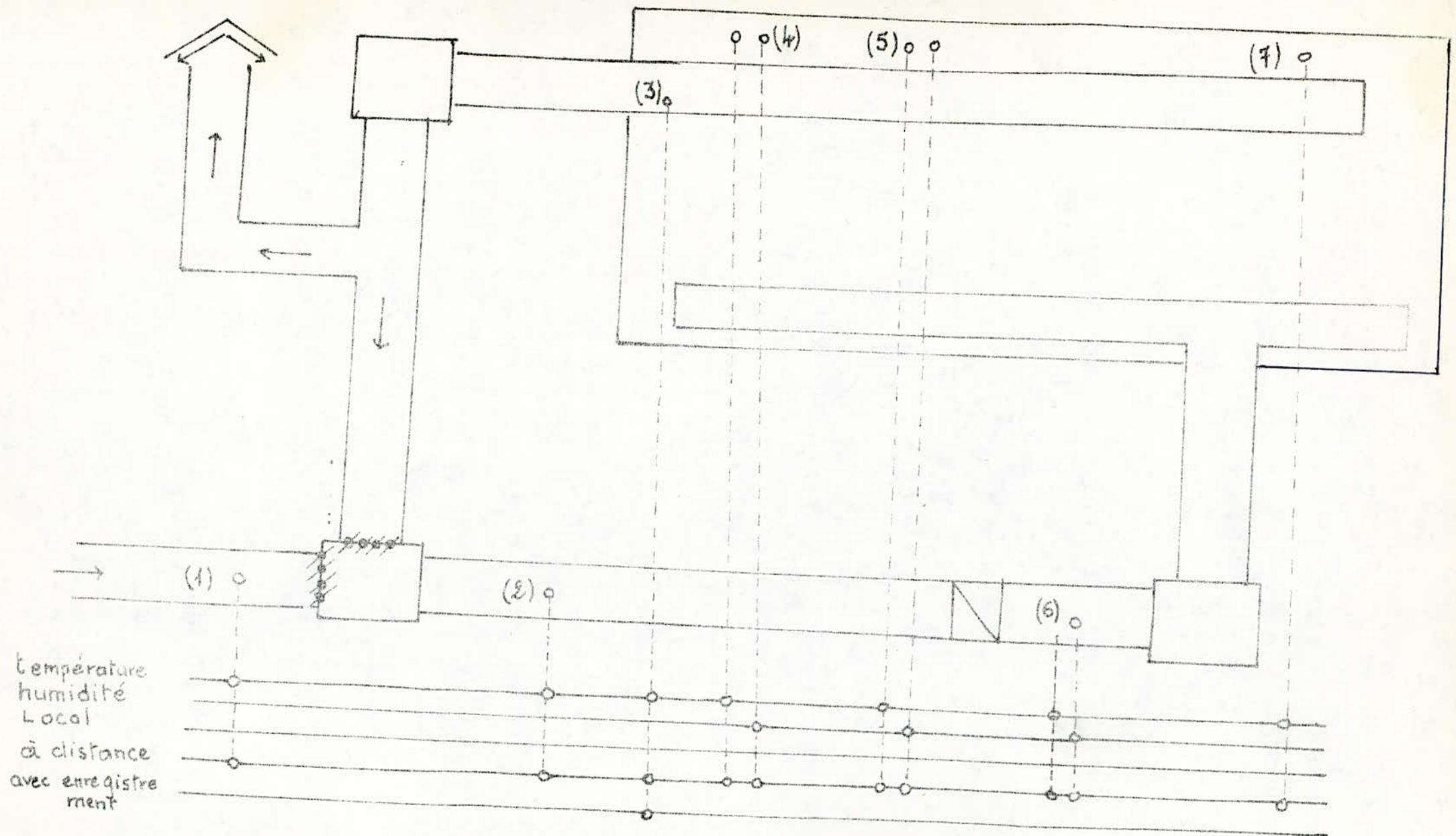


fig 5 : Système de mesure de température et d'humidité.

Fig. 3.2/f caractéristiques des Régulateurs P

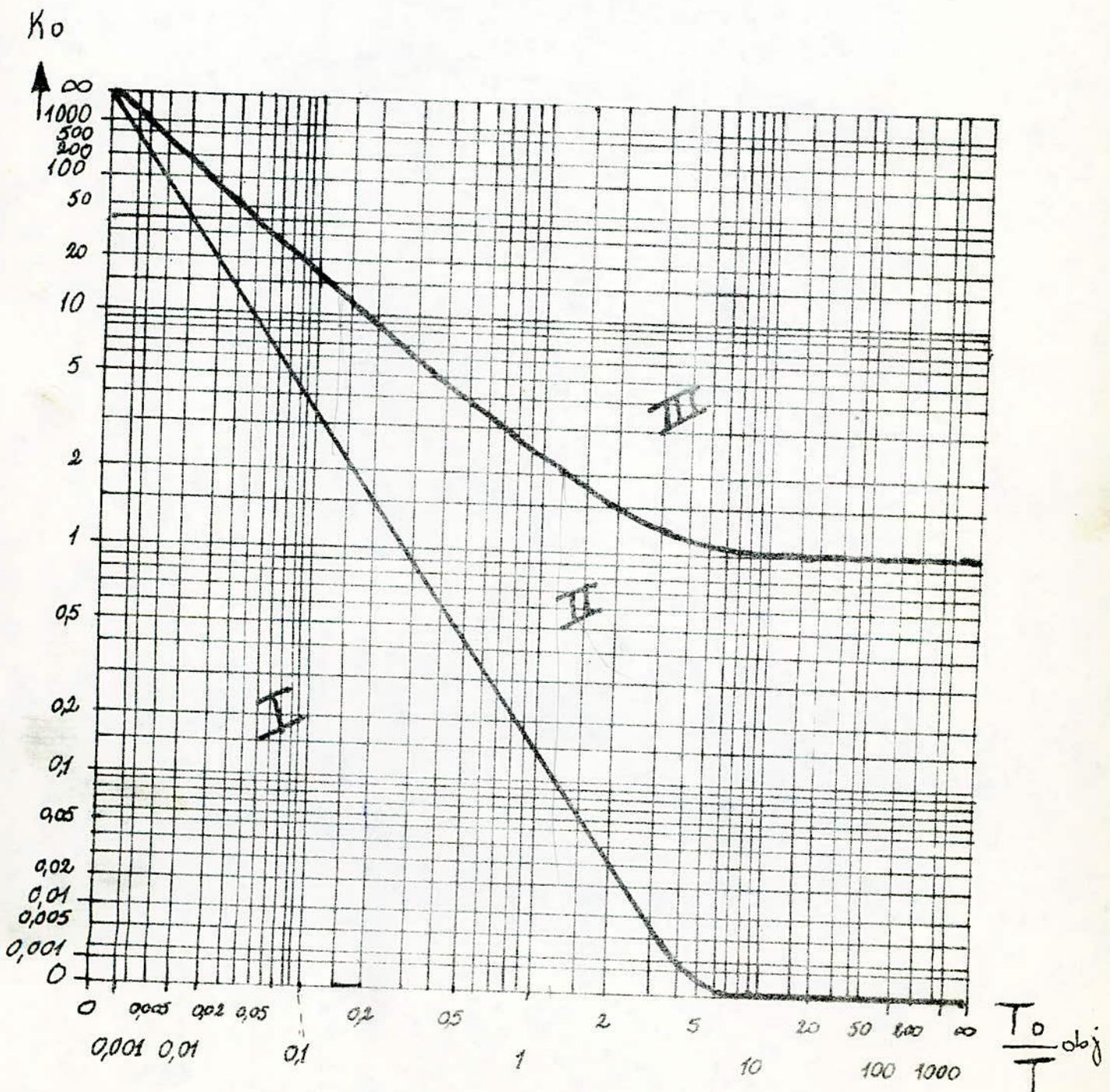
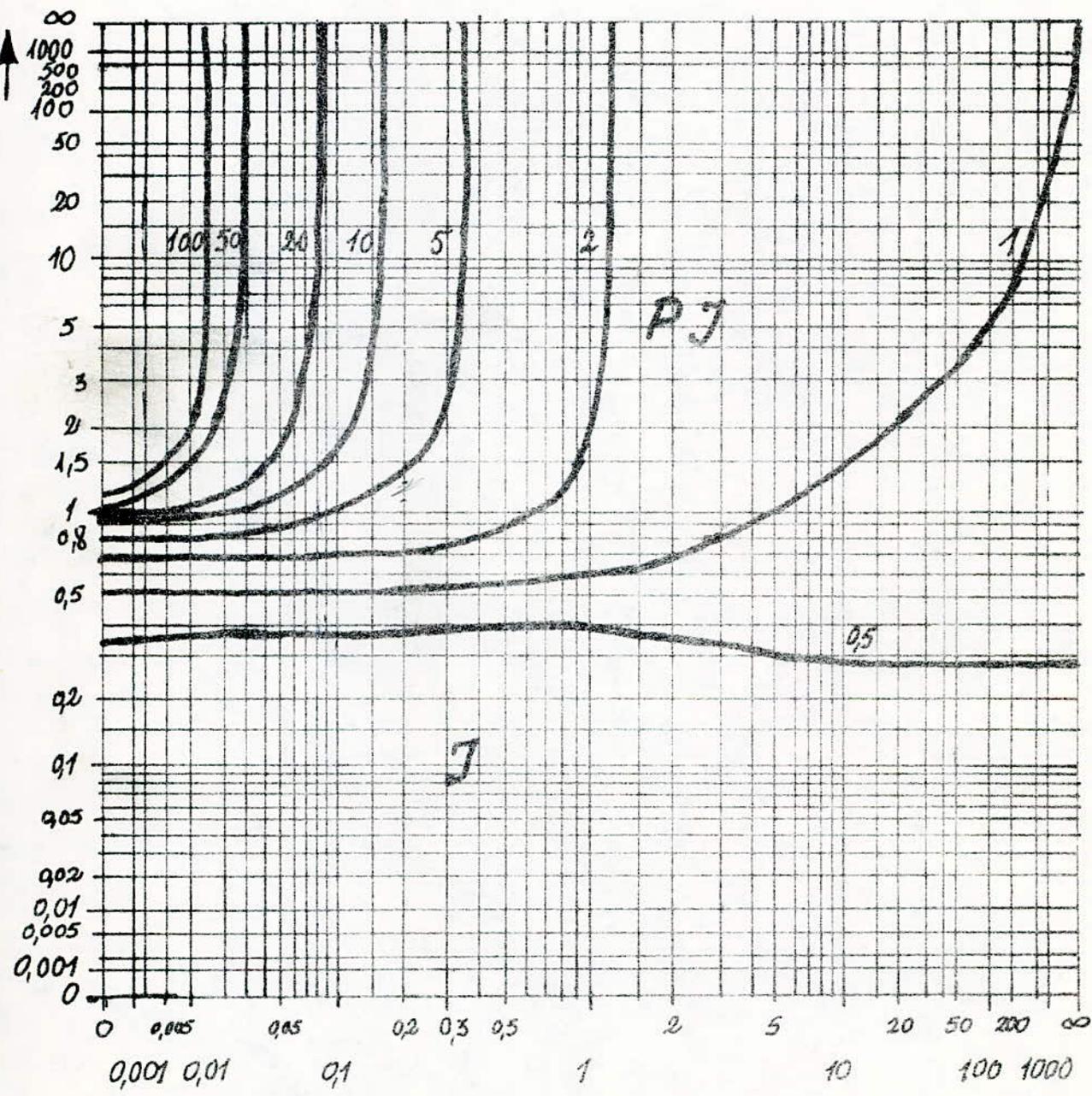


Fig 3 1/2 Caractéristiques des régulateurs PI



$$\frac{T_0}{T} \text{ obj}$$

CHAPITRE CINQUIEME

1.-Spécification et choix des vannes

En régulation des processus thermiques, les flux sont généralement commandés par des organes de réglage dont les principaux sont les vannes et les clapets.

1.1-Mesure du débit d'une vanne

On introduit pour la mesure du débit le coefficient K_V , qui est déterminé par mesure et ramené aux conditions unitaires. On obtient la formule suivante pour le débit :

$$\dot{M} = K_V \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \cdot \sqrt{1000} \quad (1)$$

\dot{M} [m^3/h] : débit

ρ [kg/m^3] : masse volumique

ΔP [kgp/cm^2] : perte de charge

K_V [m^3/h] : débit

On distingue deux sortes de vannes particulièrement utilisées : les vannes de réglage à caractéristique linéaire et celles à caractéristique logarithmique.

Il y'a caractéristique linéaire, si le coefficient K_V varie linéairement avec le déplacement H . Il en résulte l'équation :

$$\frac{K_V}{K_{VS}} = \frac{K_{V0}}{K_{VS}} + \eta_{lin} \frac{H}{H_{100}} \quad (2)$$

H_{100} est le déplacement nominal

K_{VS} est le coefficient K_V prévu pour une série de vannes à pleine ouverture.

K_{V0} est l'intersection de la forme fondamentale de la caractéristique avec l'ordonnée.

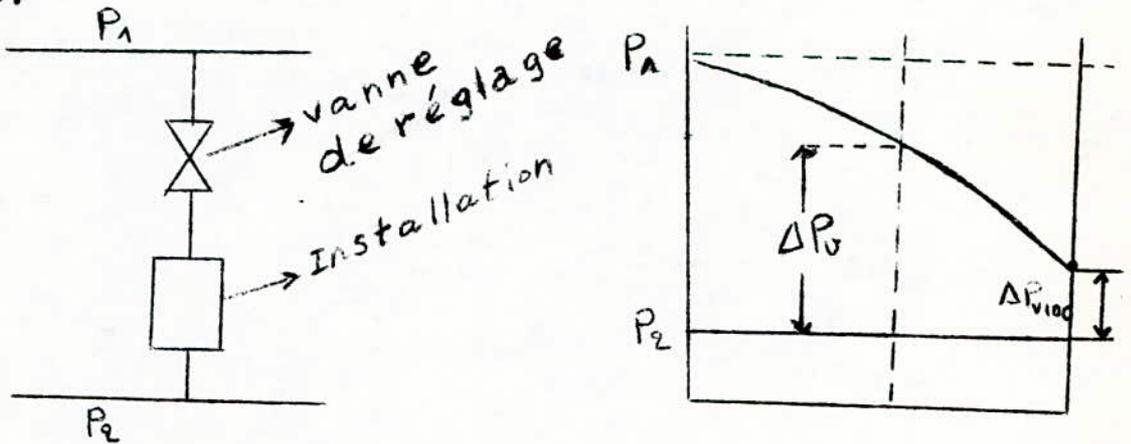
$\eta_{lin} = 1 - \frac{K_{V0}}{K_{VS}}$ représente la pente de la caractéristique, par contre la caractéristique logarithmique se distingue par le fait qu'à des déplacements égaux H correspondent des variations logarithmiques du coefficient K_V , on obtient l'équation :

$$\frac{K_V}{K_{VS}} = \frac{K_{V0}}{K_{VS}} \exp(\eta_{gl} \cdot H/H_{100}) \quad (3)$$

$\eta_{gl} = \log\left(\frac{K_{VS}}{K_{V0}}\right)$ est la pente de la caractéristique.

1.2-Relation entre les chutes de pression dans l'installation et dans la vanne

Comme la vanne de réglage se trouve juxtaposée dans les installations avec d'autres éléments résistants, la courbe caractéristique réelle que l'on appelle caractéristique de fonctionnement, diffère, du fait que la répartition des pressions est fonction du débit, de la caractéristique de débit de la vanne.



ΔP_v : Chute de pression dans la vanne

ΔP_{v100} : Chute de pression dans la vanne ouverte à 100 %

A la sortie de l'installation il règne les pressions statiques P_1 et P_2 indépendantes du débit : $\Delta P = P_1 - P_2$ est par conséquent la chute totale de pression. On a donc pour la chute de pression dans la vanne (en supposant une relation quadratique).

$$\Delta P_v = \Delta P - (\Delta P - \Delta P_{v100}) \left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}_{100}} \right)^2 \quad (4)$$

où \dot{V} [m^3/h] est le débit-volume

On en déduit de cette dernière relation :

$$\left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}_{100}} \right)^2 = \frac{\Delta P_v - \Delta P}{\Delta P_{v100} - \Delta P} = \left(\frac{\dot{M}}{\dot{M}_{100}} \right)^2 \quad (5)$$

D'après la relation (1) on a :

$$\dot{M} = K_v \cdot \sqrt{\Delta P_v / \rho} \cdot \sqrt{1000}$$

$$\dot{M}_{100} = K_{vs} \cdot \sqrt{\Delta P_{v100} / \rho} \cdot \sqrt{1000}$$

on en tire :

$$\left(\frac{\dot{M}}{\dot{M}_{100}} \right)^2 = \frac{K_v^2}{K_{vs}^2} \cdot \frac{\Delta P_v}{\Delta P_{v100}} = \left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}_{100}} \right)^2$$

D'où :

$$\Delta P_V = \frac{K_{VS}^2}{K_V^2} \cdot \Delta P_{V100} \cdot \left(\frac{\dot{M}}{\dot{M}_{100}} \right)^2$$

On reporte cette valeur dans l'équation (5)

$$\left(\frac{\dot{M}}{\dot{M}_{100}} \right)^2 = \frac{\left(\frac{K_{VA}}{K_V} \right)^2 \cdot \Delta P_{V100} \cdot \left(\frac{\dot{M}}{\dot{M}_{100}} \right)^2 - \Delta P}{\Delta P_{V100} - \Delta P}$$

Après transformation de cette expression, on tire :

$$\frac{\dot{M}}{\dot{M}_{100}} = \frac{1}{\left[1 + \frac{\Delta P_{V100}}{\Delta P} \left(\frac{K_{VA}^2}{K_V^2} - 1 \right) \right]^{1/2}} \quad (6)$$

La représentation graphique de cette équation va nous donner les types de base linéaire et logarithmique. Sur les caractéristiques de ces vannes, on distingue très nettement leur déformation et la façon dont elle dépend du rapport $\frac{\Delta P_{V100}}{\Delta P}$ appelé autorité de la vanne.

1.3-Choix des vannes

On part du fait que $\frac{d\dot{M}}{\dot{M}_{100}} / \frac{dH}{H_{100}}$ (qui est la variation du débit masse par rapport à l'ouverture H de la vanne) est proportionnel à K_{ob} qui est le gain statique de la vanne. A cette condition on ajoute que pour que la vanne soit stable, on doit avoir :

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

puis on fait le choix sur les caractéristiques représentées en figures 3, 4, 5, et 6.

-Vanne linéaire : fig. 5-6

à la figure 6 on a : $K_{ob \max} = 7$

$$K_{ob \min} = 1,5$$

$$\Rightarrow \frac{K_{ob \max}}{K_{ob \min}} = \frac{7}{1,5} = 4,67 > 3$$

La condition de stabilité n'est pas satisfaite, on rejette la vanne linéaire.

-Vanne logarithmique et objet logarithmique

*La condition de stabilité est vérifiée pour celles qui ont une autorité $\frac{\Delta P_{100}}{\Delta P} = 0,3 \rightarrow 0,4$ (fig.3)

-Vanne logarithmique et objet linéaire

*La condition est vérifiée pour les vannes ayant une autorité de $\frac{\Delta P_{100}}{\Delta P} = 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4$.

Pour les deux cas la condition de stabilité est satisfaite mais comme on suppose qu'on ne connaît pas notre objet (log ou linéaire), il est préférable de prendre $\frac{\Delta P_{100}}{\Delta P}$ comme étant l'intersection des deux.

$$\text{D'où : } \frac{\Delta P_{100}}{\Delta P} = 0,3 \rightarrow 0,4$$

Après on se reporte à la figure 1 pour choisir la caractéristique la plus linéaire pour une meilleure stabilité, on prend alors celle dont :

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

La vanne la plus stable est celle dont la caractéristique est plus proche d'une droite, d'où on prend celle de 0,3.

1.4-Consignes générales

Pour le 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 maximal normal.

-La valeur du débit nécessaire pendant la plus grande partie du temps c'est-à-dire le débit normal.

-La valeur du débit minimal normal.

Calculer les valeurs K_{Vmin} et K_{Vmax} selon les règles :

$$K_V = \frac{G}{\sqrt{1000}} \cdot \sqrt{\frac{P}{\Delta P}} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

- P_1 [kgf/cm²] : Pression à l'entrée.
- P_2 [kgf/cm²] : Pression à la sortie.
- P [kgf/cm²] : Chute de pression de la vanne.
- G [kg/h] : Débit massique.
- ρ [kg/m³] : Masse volumique.

- Choisir le 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.

- Choisir le genre et le type de vanne pour obtenir le meilleur fonctionnement pour le fluide utilisé. Vérifier l'étendue relative de régulation, pour s'assurer que le débit minimal réglable est largement inférieur au débit minimal prescrit.

- Déterminer la dimension de la vanne à partir d'abaques, tableaux et règles à calcul fournis par les constructeurs.

- Calculer le coefficient caractéristique.

$$\alpha = \frac{\text{Différence de pression pour pleine ouverture de la vanne}}{\text{Différence de pression pour vanne fermée}}$$

$$\alpha = \frac{\Delta P_{100}}{\Delta P}$$

Si α est relativement faible c'est-à-dire $\alpha < 0,1$
ou si

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

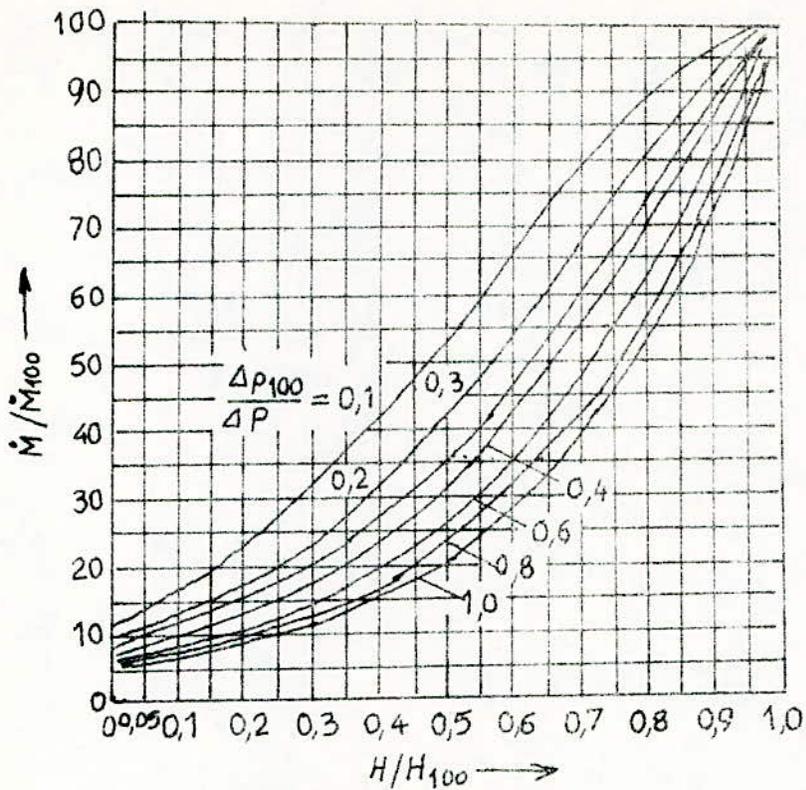
Avec :

Q : Débit maximal.

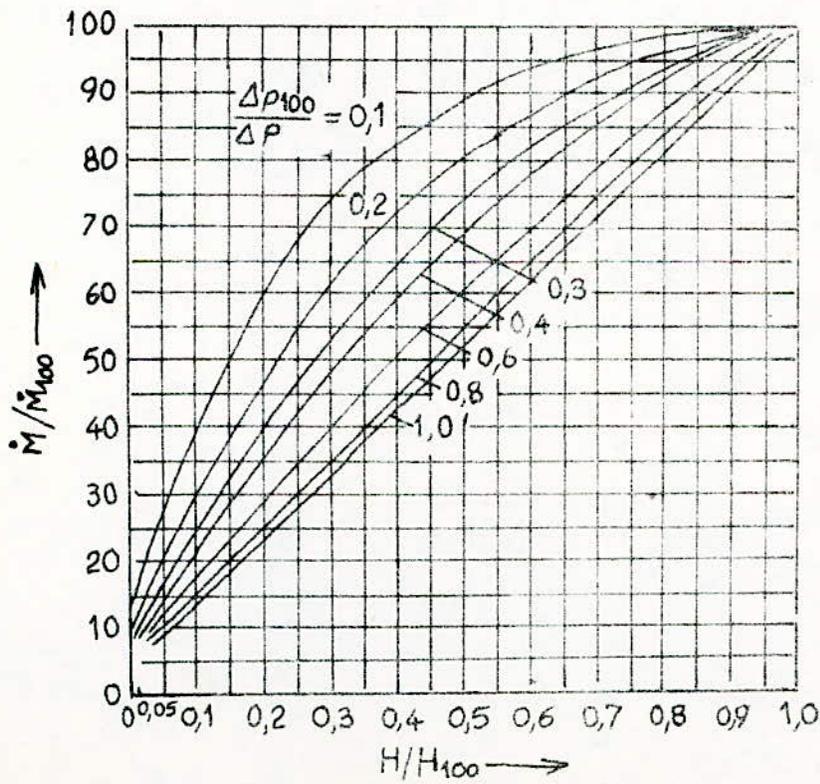
Q_{\min} : Débit minimal normal.

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 (servomoteur) puissant, et l'orifice de la vanne et la soupape doivent être usinés avec précision.



vanne logarithmique (fig. 1)



vanne linéaire (fig. 2)

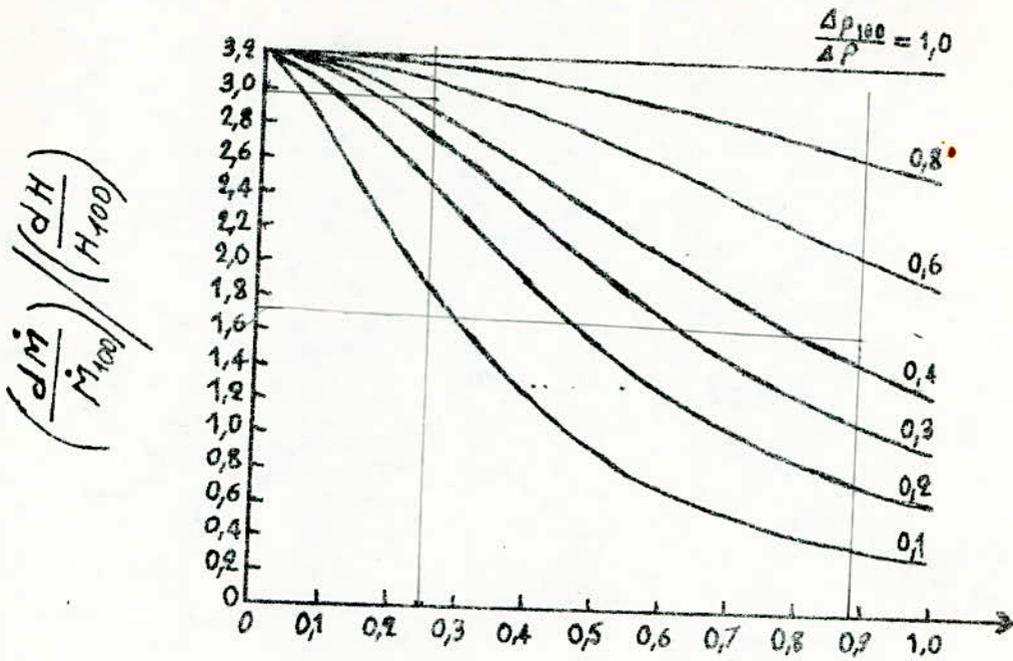


Fig. 3 : objet log + Vanne log

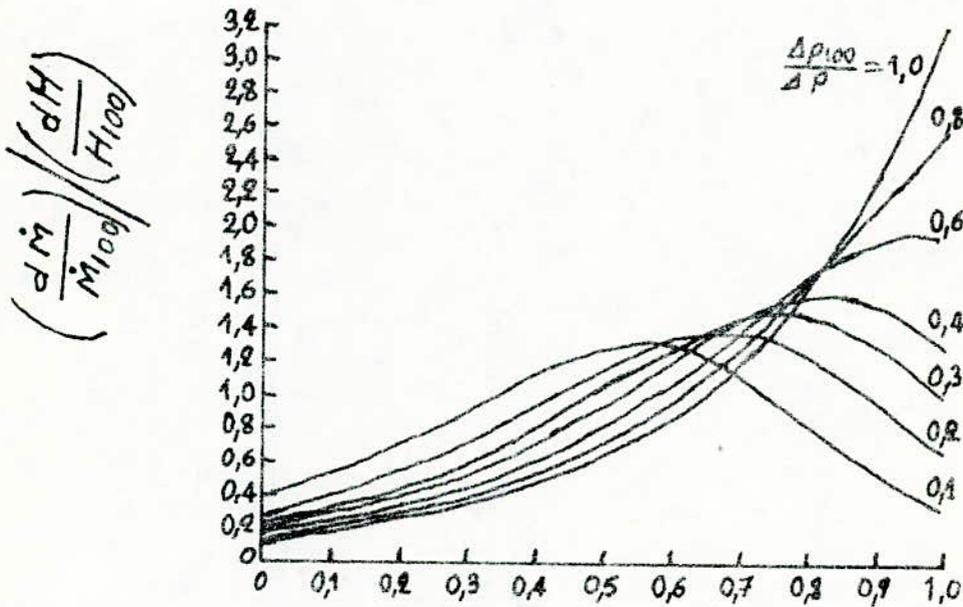


Fig. 4 : Objet linéaire + vanne log

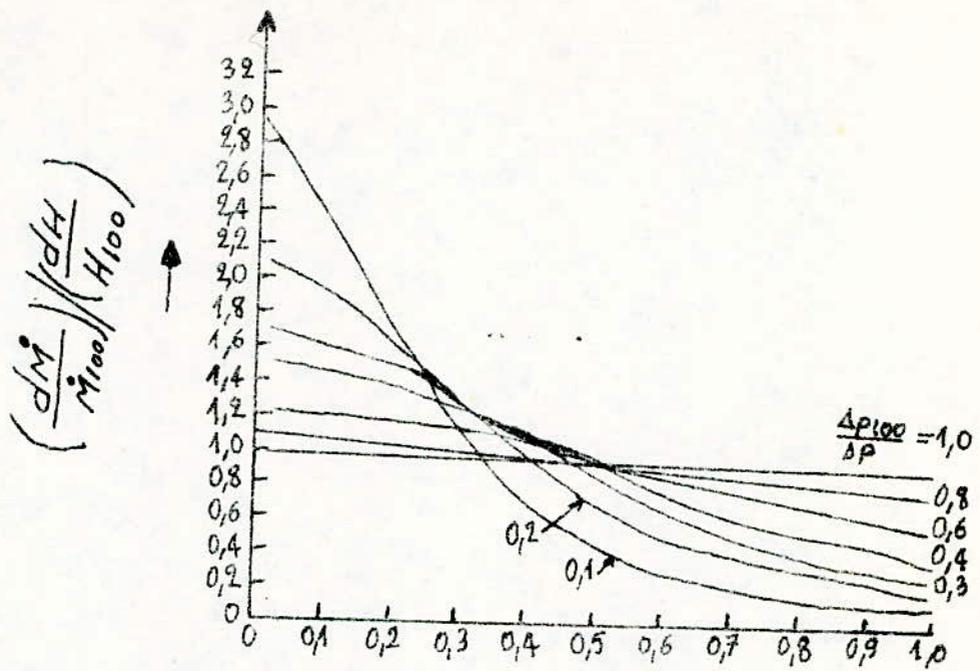


fig. 5 : objet linéaire + vanne linéaire.

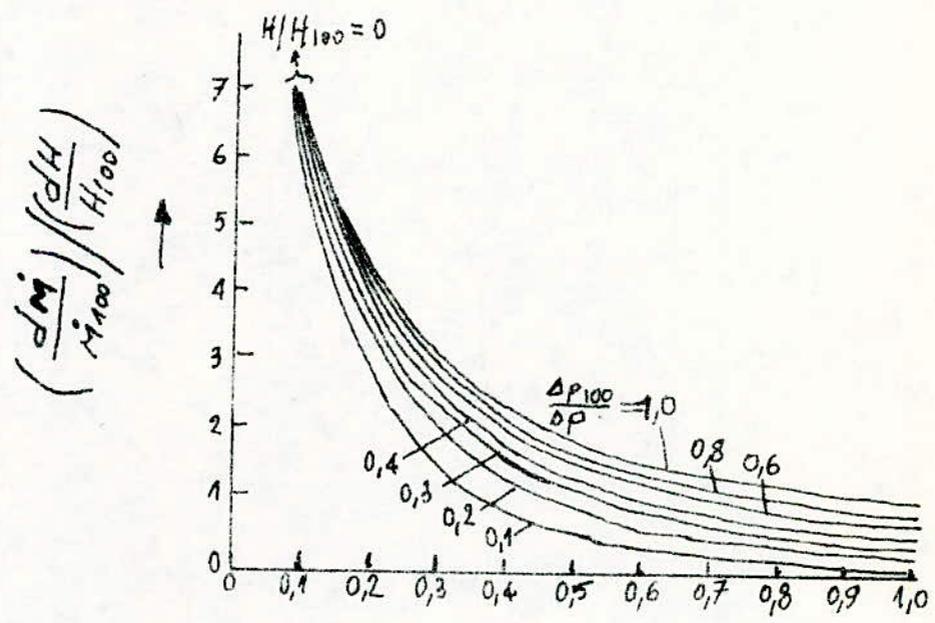


fig 6 : objet log + vanne linéaire.

2-Les chaleurs dans l'air humide

On soumet au séchage le papier, sensible à la température, avec les caractéristiques suivantes :

- Teneur initiale en humidité $X_i = 40\%$
- Teneur finale en humidité $X_f = 5\%$
- Température maximale admissible pour le papier : 60°C
- Débit de la sécherie : $G_f = 2000 \text{ Kg/h}$
- Température initiale du papier : $T_i = 20^\circ\text{C}$
- Température finale maximale du papier : $T_f = 50^\circ\text{C}$

On emploie pour le séchage outre la vapeur dans les cylindres, de l'air chaud à 50°C . L'état hygrométrique du milieu ambiant est déterminé par la température du thermomètre sec 20°C , celle du thermomètre humide 12°C et par la pression de $1,013 \text{ bar}$.

Avec ces données on calcule la quantité de papier introduit dans la sécherie.

$$G_i = G_f \cdot \frac{1 - X_f}{1 - X_i} = 2000 \cdot \frac{1 - 0,05}{1 - 0,4} = 3164 \text{ kg/h}$$

La quantité d'eau éliminée est :

$$U_e = G_i \cdot \frac{X_i - X_f}{1 - X_f} = 3164 \cdot \frac{0,4 - 0,05}{1 - 0,05} = 1164 \text{ kg/h}$$

Sur le diagramme de Mollier qui donne l'enthalpie spécifique h'_{u1} , l'humidité absolue x , l'humidité relative φ à partir de la température du thermomètre sec et celle du thermomètre mouillé, on trouve pour l'air ambiant avec $T_s = 20^\circ\text{C}$ et $T_h = 12^\circ\text{C}$:

- Humidité relative : $\varphi = 40\%$
- Titre en eau : $x_1 = 6\text{g/Kg air sec.}$
- Enthalpie spécifique : $h'_{u1} = 8,2 \text{ K cal/Kg air sec.}$

Sachant que la chaleur massique de l'air est voisine de $0,24 \text{ K cal/Kg.deg}$, on trouve la quantité de chaleur pour l'air sec :

$$Q_s = 0,24 \times 20 = 4,8 \text{ Kcal/Kg. air sec.}$$

On en déduit pour l'humidité de l'air :

$$Q_h = 8,2 - 4,8 = 3,4 \text{ Kcal/Kg. air sec.}$$

Le volume spécifique de l'air humide correspondant à cette enthalpie est : $V_{sp} = 0,839 \text{ m}^3/\text{Kg}$.

L'air qui vient de l'échangeur vers la hotte est chauffé jusqu'à la température du thermomètre sec soit $T_s = 50^\circ\text{C}$ et doit avoir une humidité relative voisine de 35% ; on en déduit du diagramme de Mollier :

- Titre en eau : 27,5 g/Kg d'air sec

- Enthalpie spécifique : 28,5 Kcal/Kg d'air sec

La quantité de chaleur est donc :

pour l'air : $0,24 \times 50 = 12 \text{ Kcal/Kg air sec}$

pour l'humidité de l'air, elle est de :

$$28,5 - 12 = 16,5 \text{ Kcal/Kg.}$$

L'air chargé d'humidité est évacué soit vers l'atmosphère pour être renouvelé, soit pour être recyclé vers l'intérieur de la hotte. L'humidité relative de cet air doit être supérieure à 40 % pour ne pas provoquer une condensation sur le papier. Si on prend pour cette humidité $\varphi = 80\%$ et si on choisit $T_s = 60^\circ\text{C}$ (ce qui est normal car cet air est en contact avec les cylindres portés à une température moyenne de 90°C); on obtient d'après le diagramme de Mollier.

- Enthalpie spécifique : 84,5 Kcal/Kg d'air sec

- Teneur en eau : 112 g/Kg d'air sec

Le volume spécifique correspondant à cette température est :

$$0,947 \text{ m}^3/\text{Kg}.$$

de la chaleur totale $h'_u = 28,5 \text{ Kcal/Kg d'air sec}$, on déduit les quantités de chaleur respectives :

$0,24 \times 60 = 14,4 \text{ Kcal/Kg d'air sec}$ pour l'air
et $84,5 - 14,4 = 70,1 \text{ Kcal/Kg d'air sec}$ pour l'humidité.

de ces données il résulte que l'air chauffé évacue une quantité d'humidité égale à :

$$x_3 = 112 - 6 = 106 \text{ g/Kg d'air sec}$$

les 1164 Kg/h d'humidité nécessitent donc :

$$\frac{1164}{0,106} = 10981 \text{ Kg/h d'air sec}$$

Le volume d'air introduit dans la sécherie est :

$$V_i = 10981 \cdot (1 + x_1) \cdot 0,839 = 9268,3 \text{ m}^3/\text{h}$$

et le volume d'air évacué :

$$V_e = 10981 \cdot (1 + x_2) \cdot 0,947 = 10981 \cdot (1 + 0,106) \cdot 0,947 = 11501,3 \text{ m}^3/\text{h}$$

BILAN THERMIQUE

Les pertes de chaleur Q_p se composent de :

*La chaleur perdue par l'air évacué à 60°C :

La chaleur nécessaire pour chauffer l'air sec résulte de la différence entre la quantité de chaleur contenue dans l'air sec introduit dans la sècherie et celle qui est contenue dans l'air sec évacué, rapportée à la quantité effectivement utilisée.

$$Q_a = (14,4 - 4,8) \times 10981 = 105417,6 \text{ Kcal/h}$$

*La chaleur perdue par le chauffage de l'eau de l'air initial :

La chaleur nécessaire pour le chauffage de l'eau résulte de la différence entre la chaleur contenue dans la vapeur d'eau de l'air chaud à 50°C et celle qui est introduite avec la vapeur d'eau de l'air initial.

$$Q_v = (16,5 - 3,4) \times 10981 = 143851,1 \text{ Kcal/h}$$

*La chaleur du papier chaud évacué :

La chaleur massique du papier étant de 1,74 Kcal/°C.kg on obtient :

$$2000\text{kg/h} \times 1,74 \times (50 - 20) = 104400 \text{ Kcal/h}$$

*La chaleur utile Q_u est celle qui est consommée pour l'évaporation de l'eau éliminée dans le processus du séchage, ou la différence entre la chaleur contenue dans la vapeur d'eau évacuée avec l'air, et celle qui est contenue dans la vapeur d'eau de l'air chaud introduit dans la sècherie rapportée à la quantité d'air sec utilisée.

$$Q_{\text{eau}} = (70,1 - 16,5) \times 10981 = 588579,6 \text{ Kcal/h}$$

C O N C L U S I O N

Le travail effectué pour l'étude de ce sujet n'a été que partiel pour des raisons indépendantes de notre volonté. La commande d'un processus nécessite l'analyse théorique et pratique des propriétés dynamiques et statiques de celui-ci.

L'analyse théorique du processus thermique conduit à des équations très compliquées, ce qui nous a obligé à faire des approximations.

L'analyse expérimentale qui s'obtient à partir de plusieurs essais, décrit la réalité du processus. Cependant à la SONIC d'El-Harrach, nous n'avons pu faire ces essais, ce qui nous a poussé à assimiler la fonction de transfert du processus par le cas le plus défavorable.

L'étude de ce projet ne peut donc correspondre au travail exigé. Nous pensons néanmoins avoir appris certaines bases sur la régulation industrielle.

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

- Le séchage et ses applications industrielles :

A-DASCALES CU

- MESURES (Régulation -Automatisme) Septembre 1976

- Technique de l'ingénieur - Mesure et contrôle:

GUY PICUCHARD

- Brochure de la SONIC d'El-Harrach.

- Traité de chauffage et de climatisation :

H-RIETSCHELL Tome 2

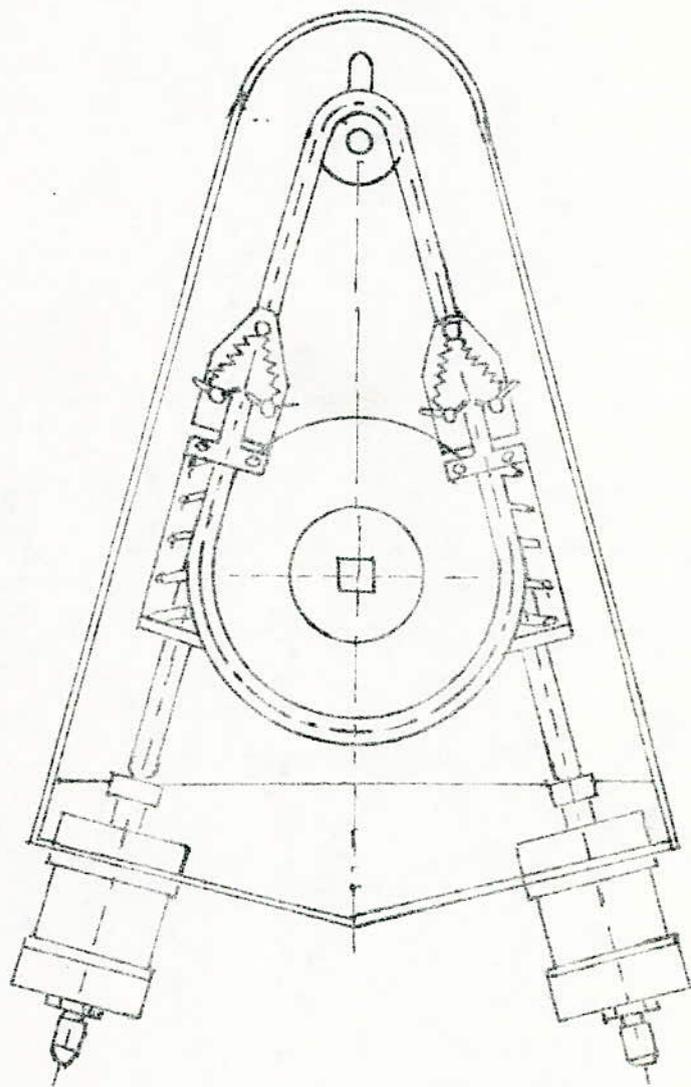
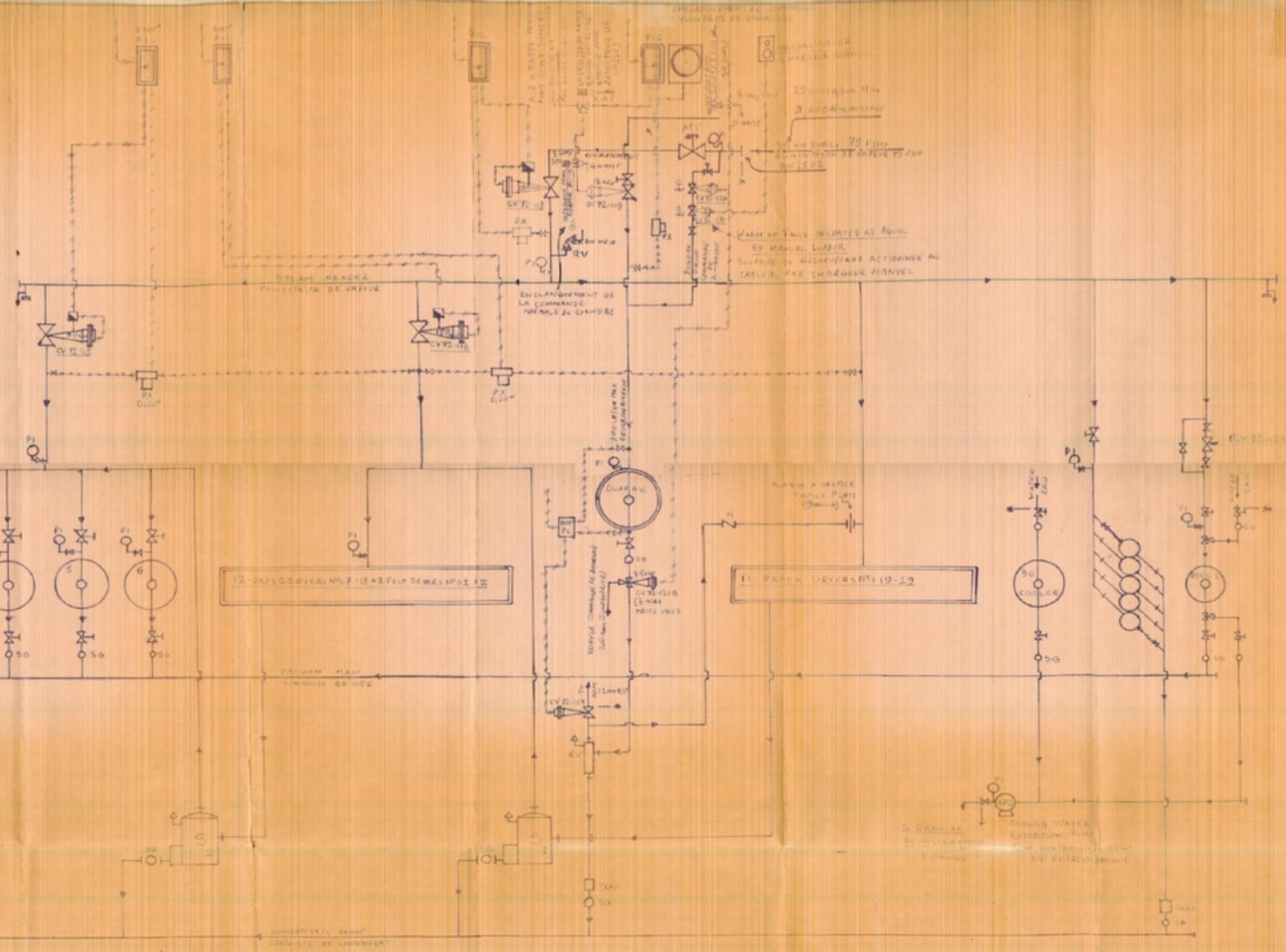


fig Servomoteur electropneumatique pas à pas

SYMBOL	DESCRIPTION
CV	SOUPAPE DE CONTRÔLE AUTOMATIQUE
PX	TRANSMETTEUR DE PRESSION
PX ²	TRANSMETTEUR DE PRESSION DIFFÉRENTIEL
PI	CONTROLEUR INDICATEUR DE PRESSION
PI ²	CONTROLEUR INDICATEUR DE PRESSION DIFFÉRENTIEL
PCV	CONTRÔLEUR DIFFÉRENTIEL DE PRESSION
IP	INDICATEUR DE POSITION DE SOUPAPE
PCV	VALVE DE RÉDUCTION À RESSORT
SOV	ELECTRO-VALVE
RV	SOUPAPE DE RÉGLAGE MANUEL FIN
S	SEPARATEUR DE CONDENSAT ET DE VAPEUR
EV	RÉGULATEUR À VAPEUR D'ÉCHAPPEMENT
SG	RÉGARD POUR CONDENSAT
N	SOUPAPE DE RETENUE
RV	SOUPAPE DE RÉGLAGE
X	VALVE TIRÉE D'ISOLEMENT
PM	MANOMÈTRE
EP	POMPE D'EXTRACTION
MV	SOUPAPE MAÎTRESSE



* LISTES DE TUBÉRIES FOURNIES PAR REC ET ÉTALONNAGE DE BRUC TERMINÉ