

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT

ELECTROTECHNIQUE

المدرسة الوطنية للتكنولوجيا
المكننة
PROJET DE FIN D'ETUDES

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

S U J E T

Automatisation d'une Climatisation par
Calculateur Numérique

Partie A. Commande Optimale de la Climatisation
d'un hotel en fonction de L'enthalpie d'air Frais

Proposé par :

Etudié par :

Dirigé par :

Mr. Z. BARSKI Andrianatoandro V.R & Ouazar Abd. Mr. Z. BARSKI

PROMOTION :

JUIN 1985

ELECTROTECHNIQUE

Automatisation d'une Climatisation par
Calculateur Numérique

Partie A. Commande Optimale de la Climatisation
d'un hotel en fonction de L'enthalpie d'air Frais

Mr. Z. BARSKI Andrianatoandro V.R & Ouazar Abd. Mr. Z. BARSKI

JUIN 1985

REMERCIEMENTS

Nous exprimons nos plus vifs remerciements et notre sincère reconnaissance à notre promoteur Monsieur Z. Barski ,Docteur ~~és~~ sciences qui a dirigé cette thèse , et qui nous a donné des nombreux conseils ainsi que pour sa disponibilité lors de la correction de cette mémoire .

Nous remercions vivement Madame Kaminska qui nous a permis de collaborer efficacement avec nos collègues electroniciens .

Nous tenons à remercier tous les professeurs qui ont contribuer à notre formation .

Nous remercions aussi tous ^{les} les personnes qui nous ont aidé à l'élaboration de cette memoire .

DEDICACES

Je dédie ce modeste présent travail à :

- mes parents , à qui je doit tout , en leur souhaitant une longue et heureuse vie .
- mes frères et soeurs , en leur souhaitant une bonne réussite (dans tous les domaines) dans la vie .
- toute la famille .
- tous les amis , et tous ceux qui me sont chers .

Abdelhamid OUAZAR

Je dédie ce travail à :

- mon père et ma mère
- mes frères et mes soeurs
- tous les copain
- toutes les amies

Victorien Richard

ANDRIANATOANDRO

TABLE DES FIGURES

- 1.2 : Shéma representatif du formule des trois points .
- 2.1 : Shéma d'une chambre de mélange .
(1) Registres ; (2) Filtre à poussières
- 2.2 : Shéma d'un laveur
(1) Buse de pulverisation (2) Pompe
- 2.3 : Methode de point de rosée .
- 2.4 : Traitement de l'air avec recyclage et by-pass .
- 2.5 : Traitement de l'air avec recyclage et simple by-pass du laveur .
- 2.6 : Shéma d'une centrale de climatisation .
1) Registres de l'air recyclé
2) Servomoteur des registres du chambre de mélange
3) Laveur 4) By-pass 5) Rechauffeur secondaire
6) Rechauffeur primaire 7) Refroidisseur
8) Vanne de contrôle du laveur
- 2.7 : Shéma de passage d'une zone à une autre , en tenant compte de l'état de fonctionnement des differents éléments du système .
- 2.8 : Shéma d'un convertisseur autonome de fréquence .
- 2.9 : Caracteristiques couple/fréquence et puissance/fréquence du moteur .
- 2.10 : Shéma technologique d'un convertisseur à boucle de tension intermediaire constante .
- 2.11 : Forme d'onde de la tension à 380 V / 50Hz
- 2.12 : Forme d'onde de la tension et forme d'onde du courant
- 2.13 : Principe de comptage du nombre de personnes occupnt la salle des conférences .
- 3.1 : Shéma synoptique de commande de l'installation existante .
- 4.1 : Notations pour bilan thermique d'un tube alimenté en eau chaude .
- 4.2 : Comportement de transfert de gaines d'air .
- 4.3 : Notations et shéma pour le comportement de transfert du local
- 4.4 : Montages pour faire varier l'humidité de l'air .
- 4.5 :
- 5.1 : Shéma globale du commande en fonction de la minimisation d'énergie
- 5.2 : Shéma d'un thermomètre à resistance .
- 5.3 : Thermocouple .
- 5.4 : Capteur d'humidité en chlorure de lithium .

- 1) Resistance de mesure en platine
 2) Enroulements des électrodes
- 5.7 : Caractéristique de la résistance de l'élément de mesure de température T 30 .
- 5.8 : Montage permettant d'avoir l'humidité absolue ou l'humidité relative .
- a : Sortie pour l'humidité relative
 b : Sortie pour l'humidité absolue
 c : Sonde au chlorure de lithium
- 5.10 : Schéma d'un servomoteur pas à pas électropneumatique .
- 1) Cylindre pneumatique 2) Outil
 3) Verge 4) base du mécanisme de cliquet
 5) Ressort spirale 6) Butoir 7) Ressort de cliquet
 8) Roue de tenseur 9) Chaîne
 10) Mécanisme de cliquet
 11) Roue dentée principale
- 5.11 : Schémas blocs d'une régulation idéale
- 5.12 : Réponse à un échelon .
- 5.13 : Schémas blocs d'une régulation parfaite .
- 5.14 : Réponses à l'échelon d'une régulation parfaite .
- 5.15 : Schéma fonctionnel d'une régulation PI d'un système de 1^{er} ordre .
- 5.16 : Caractéristique de $\Phi_i = f(G_B)$.
- 5.17 : Réponse à l'échelon pour différentes valeurs de G_B .
- 5.18 : Schéma fonctionnel d'une régulation PI d'un système stable du 1^{er} ordre avec retard pur .
- 5.20 : Schéma bloc du fonction de transfert du local .
- 5.19 : Lieu de transfert de Z(p) .
- 5.21 : Boucle de régulation numérique de la température
- 5.22 : Lieu des racines (température)
- 5.23 : Boucle de régulation numérique de l'humidité .
- 5.24 : Lieu des racines (humidité) .
- 5.25 : Schéma du couplage du servomoteur avec le régulateur analogique et les éléments de commande directe.

A : Amplificateur de puissance

C/D : Compteur/décompteur

M : Commutateur de fin de course ; VE : Vanne électropneumatique

C.P : Capteur de nombre de pas ; S : Servomoteur

R : Régulateur analogique ; J : Impulsateur

5.26 : Shéma de mise au point de consigne par calculateur .

TABLE DES ABAQUES

- 1.1 : Diagramme de Mollier .
- 5.5 : Domaine de mesure de l'humidité absolue .
- 5.6 : Domaine de mesure de l'humidité relative .
- 5.9 : Caractéristique des vannes .

TABLE DES TABLEAUX

- 2.1 : Comparaison des trois méthodes de traitement d'air .
- 2.2 : Récapitulatif de fonctionnement du système pour chaque zone d'air extérieur .
- 4.1 : Dynamique des éléments de la centrale de la climatisation
- 5.1 : Dimensionnement des vannes de contrôle .

Symboles utilisés dans les schémas

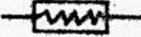
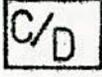
	Sonde d'enthalpie		Vanne à 3 voies
	Sonde de température		Registres
	Sonde d'humidité		Ventilateur
	Regulateur analogique		
	Mémoire temps		Rochefeur ou Batterie froide
	Servomoteur		
	Convertisseur analogique- numérique		Buse de pulvérisation
	Amplificateur de puissance		
	Relais		Filtre
	Refroidisseur		
	Commutateur de fin de course		
	Compteur/Decompteur		

TABLE DES MATIERES

	Pages
PREFACE	
INTRODUCTION	
I. NOTIONS GENERALES SUR LA CLIMATISATION	I
I.1 But de la climatisation	I
I.2 Elements de calcul necessaire au traité de climatisation	I
I.2.1 Formules théoriques des paramètres de l'air	I
I.2.1.1 Humidité relative	I
I.2.1.2 Humidité absolue	I
I.2.1.3 Temperatures	2
I.2.1.4 Enthalpie	2
I.2.2 Diagramme de Mollier	2
I.2.3 Methode de calcul des valeurs de l'enthalpie , de l'humidité absolue , et de la temperature d'un melange "M" d'air humide	2
I.2.4 Formule des trois points	4
2. TRAITEMENT DE L'AIR SELON LE PROCESSUS OPTIMUM	4
2.1 Description des éléments d'une centrale de climatisation	4
2.1.1 Chambre de melange	4
2.1.2 Filtre à poussières	4
2.1.3 Rechauffeur primaire	5
2.1.4 Laveur	5
2.1.5 Ventilateur	5
2.1.6 Rechauffeur secondaire	5
2.2 Traitement d'air selon la minimisation d'énergie	6
2.2.1 Présentation des différentes méthodes de traitement d'air	6
2.2.1.1 Methode de point de rosée	6
2.2.1.2 Traitement de l'air avec recyclage et by-pass	6
2.2.1.3 Traitement avec recyclage et simple by-pass du laveur	6
2.2.1.4 Comparaison des trois méthodes de traitement d'air	7
2.2.2 Commande du système de climatisation en fonction de la minimisation d'énergie	7
2.3 Reglage économique du débit d'air	9
2.3.1 Variation de la vitesse du moteur d'entraînement du ventilateur	13

2.3.2 Technologie optée pour l'association variateur / moteur asynchrone entraînant le ventilateur	13
2.3.2.1 Principe de la boucle intermediaire du type "source de de tension"	14
2.3.2.2 Technique à boucle de tension intermediaire constante	15
2.3.3 Reglage de debit d'air en fonction du nombre des personnes à l'interieur de la salle des conferences	15
3. PRESENTATION DE L'OBJET A ETUDIER	19
3.1 Description du système de régulation et des mesures existants	19
3.2 Données techniques des éléments constituant la centrale de climatisation	19
4. PROPRIETES DYNAMIQUES DES ELEMENTS DU SYSTEME	22
4.1 Methode théorique	22
4.1.1 Dynamique de la temperature	22
4.1.1.1 Rechauffeur d'air alimenté en eau chaude	22
4.1.1.2 Gaine	24
4.1.1.3 Local	26
4.1.2 Dynamique de l'humidité	27
4.1.2.1 Humidificateur avec eau en circulation	27
4.1.2.2 Gaine	29
4.1.2.3 Locale	29
4.2 Identification experimentale de la dynamique de chaque éléments du système de climatisation	30
4.2.1 Salle des conférences	30
4.2.2 Dynamiques des autres éléments du système	32
5. APPLICATION DE LA COMMANDE OPTIMALE	33
5.1 Modifications de l'installation technologique	
5.2 Solution proposée pour effectuer la commande optimale	
5.3 Choix des éléments de commande et leur mise au point	35
5.3.1 Capteurs de mesure	35
5.3.1.1 Capteurs de temperature	
5.3.1.2 Capteurs de l'humidité	36
5.3.2 Vannes de controle	39
5.3.3 Servomoteurs	42
5.3.4 Regulateurs classiques	42
5.3.4.1 Etudes théoriques	42
5.3.4.2 Applications	48

5.3.5	Calcul théorique des régulateurs numériques de température et de l'humidité	49
5.3.5.1	Modélisation	49
5.3.5.2	Calcul du régulateur numérique de la température	50
5.3.5.3	Calcul du régulateur numérique de l'humidité	53
5.3.6	Couplage du servomoteur avec le régulateur analogique et les éléments de commande directe	55
5.3.7	Mise au point de consigne d'un régulateur analogique par le calculateur	55
6.	CALCULS DES CONSIGNES DES REGULATEURS CLASSIQUES POUR CHAQUE ZONE DE FONCTIONNEMENT	58
7.	ALGORITHMES DE COMMANDE ET ORGANIGRAMMES	63
7.1	Equations discrètes des régulateurs numériques	63
7.1.1	Régulateur numérique de température	
7.1.2	Régulateur numérique d'humidité	
7.2	Sous-programme I permettant de positionner l'ouverture ou la fermeture des vannes ou des registres	64
7.3	Organigramme de passage à une zone de fonctionnement du système pour chaque zone	64
7.4	Organigramme de fonctionnement du système pour chaque zone	67

CONCLUSION

Bibliographie

Annexe : Sous-programme de positionnement des vannes ou des registres en langage assembleur .

PREFACE

Le sujet : "Automatisation de la climatisation par ordinateur numérique" a été traité par collaboration de deux départements :

- département d'électrotechnique
- département d'électronique

Le sujet se divise en deux parties :

"Partie A" intitulée : "Commande optimale de la climatisation d'un hôtel en fonction de l'enthalpie d'air frais" a été étudiée par M ANDRIANATOANDRO Victorien Richard et M OUAZAR abdelhamid étudiants au département d'électrotechnique , et dirigée par M. Z Barski , docteur ès sciences , professeur .

"Partie B" intitulée : "Commande des servomoteurs pas à pas par microprocesseur" a été étudiée par M. ROUABHIA Ahmed et M. KADDOURI Ameer Miloud , et dirigée par Madame B Kaminska , docteur ès sciences en informatique .

La partie B consiste à faire :

- le projet d'un système à microprocesseur permettant d'automatiser une installation de climatisation :
- un programme de commande des servomoteurs .
- un modèle de commande de servomoteur

Il faut souligner que cette collaboration a été fructueuse et efficace . À partir de cette expérience , on suggère aussi la collaboration directe avec d'autres départements par exemple "Genie mécanique" pour attaquer les problèmes complexes comme les systèmes de commande automatique en énergie solaire , robotique , etc .

INTRODUCTION

La climatisation , malgré son apparence pratique est un processus complexe et souvent à l'origine d'une grande dépense d'énergie . Des nombreux paramètres y interviennent (température intérieure , température extérieure , humidité , temps , etc ...) . Leurs lois de variation et d'interaction sont difficiles à respecter par des opérateurs , même qualifiés . D'où la nécessité d'automatisation .

Le système de commande automatique d'un processus est en general équipé d'un grand nombre de boucles d'asservissement dont les valeurs des consignes étaient , et sont encore dans beaucoup des cas , fixées par le responsable de la marche du système .

Le but de cette étude sera essentiellement la recherche d'une nouvelle methode de régulation dans les installations de climatisation d'un hôtel agissant dans le sens de l'amélioration du confort tout en minimisant la consommation d'énergie . Ceci n'est possible qu'en utilisant un calculateur numerique , dans la majorité des cas , qui aidera dans un premier stade et remplacera dans le second stade l'homme dans sa fonction de conducteur de l'installation .

Aujourd'hui , le système de commande numerique remplace progressivement la technologie purement analogique dans la plupart de domaines . Cette technologie permet d'améliorer la fiabilité des équipements , d'augmenter la precision des mesures , et aussi offre à nous la possibilité d'introduire des differents programmes qui permettent au système de suivre divers regimes de fonctionnement en fonction de l'enthalpie d'air extérieur , afin de minimiser l'énergie consommée .

Le sujet se compose en quatre grandes parties importantes :

Partie 1 : consiste à citer brièvement des éléments de calcul au traité de climatisation , de décrire les regimes de foctionnement optimum du du système , et enfin de présenter l'objet à étudier .

Partie 2 : permet d'étudier les propriétés dynamiques des éléments du système .

Partie 3 : décrit le nouveau système de régulation qui permet de minimiser au maximum l'énergie consommée .

Partie 4 : traite les algorithmes de commande .

L'étude du calculateur numerique est faite dans la deuxième partie du sujet (Département électronique) .

1 . NOTIONS GENERALES SUR LA CLIMATISATION

1.1 But de la climatisation :

Tout être vivant , placé dans un milieu ambiant essentiellement variable , doit pouvoir adapter , à chaque instant , le comportement de son organisme en fonction même des conditions " climatiques " ambiantes , de façon à maintenir l'équilibre homéotherme et la continuité normale de ses principales fonctions organiques (métabolisme) .

Il est essentiel , en effet , d'assurer à l'organisme sans pour autant fatiguer autre mesure son système d'auto-régulation , en imposant à ce dernier des efforts demésurés .

Pour cela , les installations de climatisation ont pour rôle de maintenir constamment une température sèche et une humidité relative susceptibles d'assurer , en été comme en hiver , les conditions optima de confort physiologique pour les occupants , mais aussi pour éliminer les poussières et les impurités chimiques de l'air (au moyen du laveur d'air par exemple susceptible de dissoudre les gaz des aliments ainsi que le CO_2 dont la solubilité est très grande) , tout en maintenant un mouvement uniforme de l'air dans les locaux , sans remous ou tourbillons néfastes .

1.2 Eléments de calcul nécessaire au traité de climatisation :

1.2.1 Formules théoriques des paramètres de l'air :

1.2.1.1 Humidité relative :

C'est le taux de saturation des vapeurs d'eau dans l'air ou plus exactement , la teneur relative en humidité . Lorsque la pression partielle de vapeur d'eau dans le mélange à $\theta [^{\circ}C]$ est égale à la tension de saturation à la même température ,

$$\varphi = 100 \frac{P_v}{P_s} \quad (\text{Ref : 1})$$

page 23

1.2.1.2 Humidité absolue :

C'est la masse des vapeurs d'eau contenues dans une unité de masse ou de volume d'air sec .

$$X = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (\text{Ref : 1})$$

page 23

1.2.1.3 Températures :

- Température " sèche " θ (mesurée au thermomètre à bulbe sec)
- Température " humide " (mesurée au thermomètre à bulbe humide)
- Température du point de rosée :

C'est la température à laquelle l'air contient la masse maximale de vapeur d'eau qu'il peut contenir par kilogramme d'air sec .

1.2.1.4 Enthalpie :

C'est l'équivalent calorifique de l'énergie totale d'un corps . Nous savons que la chaleur totale est la somme de la chaleur sensible et de la chaleur latente .

Pour l'air humide :

- chaleur sensible : $Q_s = 0,240 \theta$
- chaleur latente : $Q_L = q_{vap} + (C_p \cdot \theta)$

avec $q_{vap} = 595,7$ Kcal et $C_p = 0,24$ Kcal / Kg

d'où $i = Q_s + Q_L$

On aboutit à la formule de RAMZINE et REGNAULT :

$$i = 0,240 \theta + (595,7 + 0,47 \theta) X \quad \begin{matrix} \text{(Ref: 1)} \\ \text{page 24} \end{matrix}$$

1.2.2 Diagramme de MOLLIER :

Les paramètres cités ci-dessus sont étroitement liés entre eux par des relations bien définies . On peut mettre en évidence l'interdépendance de ces paramètres sur un diagramme tel que le diagramme de Mollier (voir figure : 1.1)

1.2.3 Methode de calcul des valeurs de l'enthalpie , de l'humidité absolue , et de la température d'un mélange " M " d'air humide .

Les valeurs de i (Kcal / Kg) de X (g / Kg) et de θ (°C) peuvent se déduire mathématiquement à l'aide des relations ci-dessous :

$$i_m = \frac{i_a + n i_b}{1 + n} \quad \begin{matrix} \text{(Ref : 1)} \\ \text{page 126} \end{matrix}$$

$$X_m = \frac{X_a + n X_b}{1 + n}$$

$$\theta_m = \frac{\theta_a + n \theta_b}{1 + n}$$

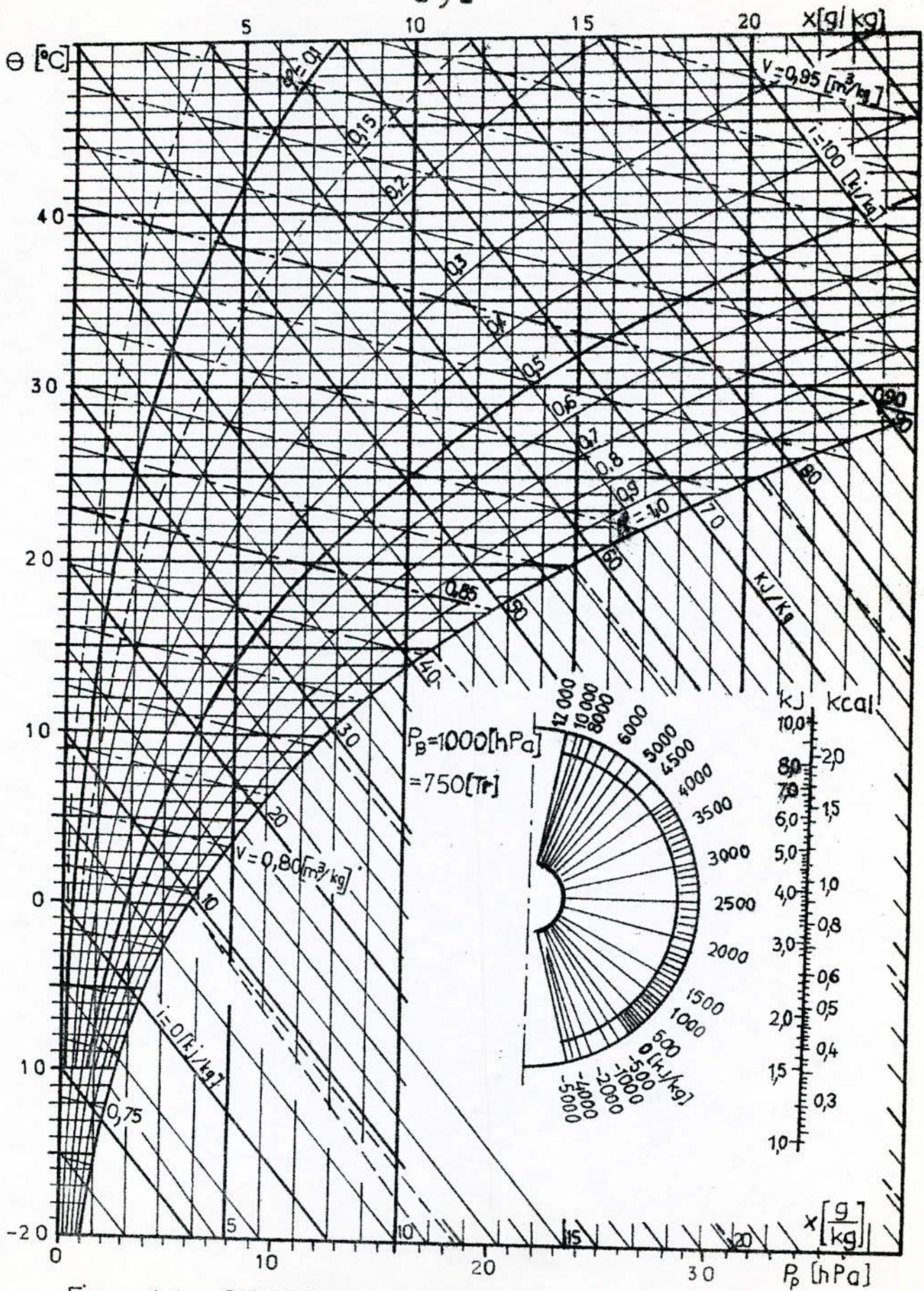


Figure 1.4 : DIAGRAMME DE MOLLIER

Dans lesquelles " n " représente la " proportion " du mélange " , c'est-à-dire le rapport des quantités respectives de l'air à l'état " A " et " B " .

$$n = \frac{P_b (Kg)}{P_a (Kg)}$$

1.2.4 Formule des trois points :

Sur le diagramme de Mollier , la relation entre les enthalpies des points A, B, C et leurs humidités absolues s'écrit :

$$\frac{i_B - i_C}{X_B - X_C} = \frac{i_B - i_A}{X_B - X_A} \rightarrow \frac{i_B - i_C}{i_B - i_A} = \frac{X_B - X_C}{X_B - X_A}$$

(Ref : 5)

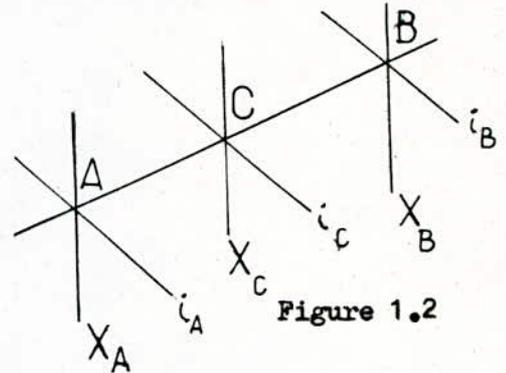


Figure 1.2

2. TRAITEMENT DE L'AIR SELON LE PROCESSUS OPTIMUM

2.1 Description des éléments d'une centrale de climatisation :

Une centrale de climatisation est souvent composée par des éléments suivants :

- chambre de mélange - filtre à poussière - rechauffeur primaire - laveur - ventilateur - rechauffeur secondaire .

2.1.1 Chambre de mélange :

Elle sert à mélanger l'air extérieur avec l'air recyclé . Les proportions de ces deux air sont définies économiquement selon l'état de l'air extérieur .

En hiver cette chambre réduit la consommation de chaleur , tandis qu'en été , elle réduit les besoins en eau de refroidissement .

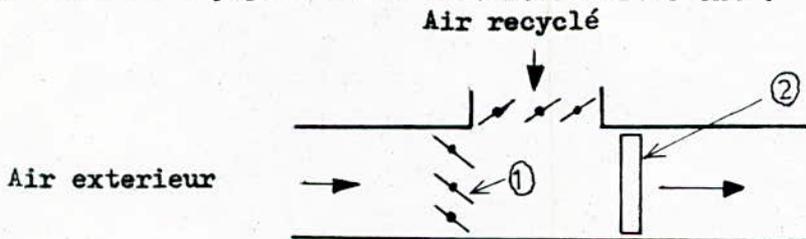


Figure 2.1

2.1.2 Filtre à poussière :

Après la chambre de mélange , on a le filtre qui élimine les poussières et les impuretés contenus dans le mélange d'air . On peut employer les différents types de filtre énoncés ci-dessous :

- filtres métalliques imprégnés d'huile

- filtres secs
- filtres humides
- électrofiltres
- filtres à charbons actifs .

2.1.3 Réchauffeur primaire :

Il n'est nécessaire qu'en hiver , il réchauffe l'air du mélange suffisamment pour que lors de l'humidification ultérieure et du refroidissement concomitant il approche le point de rosée de l'air d'apport .

2.1.4 Laveur d'air :

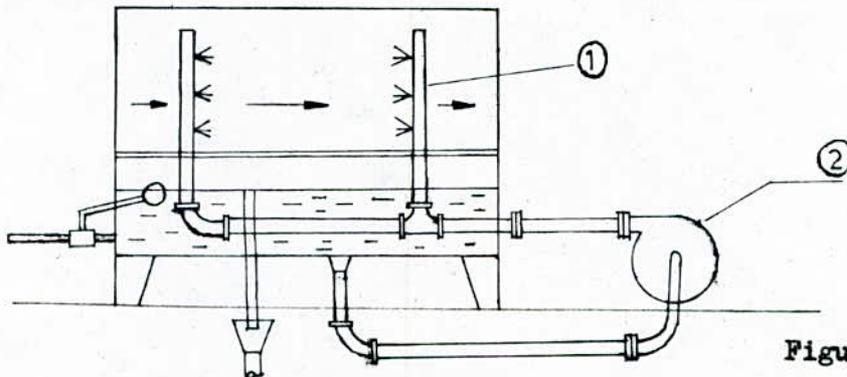


Figure 2.2

Souvent on utilise le laveur à cause de sa capacité de refroidissement de chaleur sensible . Il est connu alors comme un refroidisseur adiabatique . En principe le laveur fonctionne en régime de refroidissement adiabatique mais au moyen d'un système auxiliaire indépendant qui chauffe ou refroidit l'eau du laveur , on peut aussi avoir les différentes évolutions suivantes :

- refroidissement sensible
- refroidissement et déshumidification
- refroidissement et humidification (eau réchauffée)
- chauffage et humidification
- refroidissement et humidification (eau refroidie) .

2.1.5 Ventilateur :

Il sert à souffler l'air vers les locaux .

2.1.6 Réchauffeur secondaire :

Il sert à réchauffer l'air provenant du ventilateur jusqu'à une certaine valeur de température . Lors de cette évolution , l'humidité absolue de l'air est constante .

2.2 Traitement d'air selon la minimisation d'énergie :

2.2.1 Présentation des différentes méthodes de traitement d'air :

2.2.1.1 Méthode de point de rosée (Figure 2.3)

Les évolutions de l'air sur le diagramme de Mollier sont présentées dans la table des notations utilisées .

La variation de l'enthalpie d'air qui passe de M_1 à R est donnée par :

$$i_{Ch} = i_{M_1} - i_R$$

La variation d'enthalpie de l'air qui passe de R à N est :

$$i_G = i_N - i_R$$

Séquence de traitement d'air :

- mélange de deux air ($M_1 = U + Z$)
- préchauffage de l'air du mélange jusqu'au point de rosée
- refroidissement de l'air par le laveur
- réchauffage de l'air jusqu'au point de soufflage N .

2.2.1.2 Traitement de l'air avec recyclage et by-pass (Figure 2.4)

La variation d'enthalpie de l'air quand il passe de l'état M_1 à R est :

$$i'_{Ch} = i_{M_1} - i_R$$

La variation d'enthalpie quand l'air passe de l'état M_2 à N est :

$$i'_G = i_N - i_{M_2} \qquad i'_G < i_G$$

Séquence de traitement d'air :

- mélange de l'air extérieur avec de l'air recyclé ($M_1 = U + Z$)
- refroidissement par le laveur jusqu'au point de rosée (R)
- Une partie d'air recyclé mélangée avec l'air à l'état (R) $M_2 = U + R$
- réchauffage de mélange M_2 jusqu'au point de soufflage N .

2.2.1.3 Traitement avec recyclage et simple by-pass du laveur (Fig 2.5)

La variation d'enthalpie de l'air quand il passe de l'état M_1 à R

$$i''_{Ch} = i_{M_1} - i_R$$

La variation d'enthalpie de l'air qui passe de l'état M_2 à N est :

$$i''_G = i_N - i_{M_2} \quad i''_G < i_G$$

Sequence de traitement d'air :

- mélange de l'air extérieur avec de l'air recyclé ($M_1 = U + Z$)
- refroidissement de l'air par le laveur jusqu'à la température du point de rosée
- mélange d'une partie d'air M_1 avec une partie d'air R ($M_1 + R = M_2$)
- réchauffage du mélange M_2 jusqu'au point de soufflage N

COMPARAISON DES TROIS METHODES DE TRAITEMENT D'AIR :

Elle peut être faite à partir des différentes énergies de refroidissement et énergies de réchauffement selon le tableau ci-dessous .

	Methode de point de rosée	Traitement avec recyclage et by-pass	Traitement avec recyclage et simple by-pass du laveur
Energie de refroidissement	$i'_{Ch} = i_{M_1} - i_R$	$i'_{Ch} = i_{M_1} - i_R$	$i''_{Ch} = i_{M_1} - i_R$
Energie de réchauffement	$i_G = i_N - i_R$	$i'_G = i_N - i_{M_2}$	$i''_G = i_N - i_{M_2}$
		$i'_G < i_G$	$i''_G < i'_G < i_G$

Tableau 2.1

La methode de point de rosée est couramment utilisée . Mais la consommation d'énergie est élevée aussi bien au niveau de refroidissement qu'au niveau de réchauffement . Il a fallu donc chercher un autre moyen pour éviter ce gaspillage en introduisant un simple by-pass au niveau du laveur . Ceci entraine bien une minimisation d'énergie , car du tableau 2.1 on a : $i''_G < i'_G < i_G$.

2.2.2 Commande du système de climatisation en fonction de la minimisation d'énergie :

On a divisé le diagramme de Mollier en treize zones selon l'état de l'air extérieur . Chaque zone correspond à un fonctionnement du système de régulation bien défini .

Zone I :

La régulation de système se fait par la méthode connue du point de rosée .

Zone II :

Dans cette zone , une partie d'air du mélange ($M_1 = U + Z$) est traitée par le laveur . Le reste passe par le by-pass du laveur . En fonction du besoin , l'air avec la température du point de rosée est mélangé avec l'air by-passé . Enfin , ce dernier est réchauffé jusqu'au point de soufflage N .

Zone III :

Une partie du mélange d'air ($M_1 = U + Z$) est refroidie jusqu'à la température de point de rosée , ensuite mélangée avec l'autre partie d'air . Comme résultat , on obtient le point de soufflage $N = M_2$

Zone IV :

Le registre de l'air recyclé est complètement fermé . Une partie d'air extérieur est traité par le laveur , le reste passe directement par le by-pass . Le mélange ci-après donne l'air à l'état ($N = M_1$)

Zone V :

Dans cette zone , l'air extérieur est soufflé directement dans les locaux sans traitement .

Zone VI :

L'air extérieur est mélangé avec l'air recyclé , Le mélange atteint directement le point de soufflage N ($N = M_1 = U + Z$) .

Zone VII :

Une quantité minimale d'air extérieur est mélangée avec l'air recyclé . On aura alors l'état M_1 . Ensuite , on applique le réchauffeur secondaire et on aboutit au point de soufflage N .

Zone VIII :

Le mélange d'air ($M_1 = U + Z$) est traité par le réchauffeur secondaire jusqu'à ce qu'il atteind le point de soufflage N .

Zone IX :

Le registre de l'air recyclé est complètement fermé . Une partie d'air extérieur est traité dans le laveur jusqu'à ce qu'il atteind le point de rosée . Celle-ci est mélangée par la suite avec l'air extérieur by-passé ($Z+R = M_2$)

L'air à l'état M_2 est chauffé par le réchauffeur secondaire jusqu' à aboutir l'état de soufflage N .

Zone X :

Le traitement de l'air est le même que pour la zone IX , mais ici , on obtient le point de soufflage sans l'action de réchauffeur secondaire .

Zone XI :

Une partie d'air du mélange M est refroidit jusqu'au point de rosée , de nouveau mélangée avec l'autre partie by-passé pour obtenir l'état de soufflage N .

Zone XII :

Le traitement d'air est le même que pour la zone XI .

Zone XIII :

Le traitement de l'air est le même que pour la zone XII , mais ici , on applique le réchauffeur secondaire pour atteindre le point de soufflage N .

PASSAGE D'UNE ZONE A UNE AUTRE :

Celui-ci est mis en évidence par le shema de la figure 2.7, Les chiffres arabes de 1 à 8 sont des éléments de la centrale . Les chiffres romains indiquent la zone de fonctionnement .

Signe (+) : signifie que l'element fonctionne dans cette zone .

Signe (-) : signifie que l'element ne fonctionne pas dans cette zone .

2.3 Réglage économique du debit d'air :

Le besoin en air d'un être humain est bien défini . On peut alors minimiser d'avantage l'énergie consommée en faisant varier le débit d'air soufflé en fonction du nombre des personnes occupant la salle . Si par exemple , la salle est vide , on ne souffle qu'une petite quantité d'air . Par conséquent , on diminue le volume d'air qu'on doit traiter , d'où économie d'énergie au niveau de traitement .

Pour régler le debit d'air , les procedés connus et appliqués sont : la commande par registre , la commande aerodynamique (inclineurs) et le réglage de vitesse de rotation de la machine entrainant le ventilateur .

Les deux premiers procedés entrainent des pertes énergetiques très élevées et un rendement décroissant notamment dans le cas de grandes plages de réglage à cause du frottement de l'air au niveau des registres . Le troisième procédé presente des meilleurs avantages parce que lapuissance absorbée du ventilateur

Tableau 2.2 : Récapitulatif de fonctionnement du système pour chaque zone d'air extérieur .

Zone	Etat	Energie mise en jeu
I	Risque de brouillard	Réch 1 + Laveur + Réch 2
II	$M_2 = Z+U+R \neq N$ $M_2 + \text{Réch 2} \rightarrow N$	Laveur + Réch 2
III	$M_2 = Z+U+R = N$	Laveur
IV	$M_2 = Z+R = N$	Laveur
V	$Z = N$	
VI	$M_1 = Z+U = N$	
VII	$M_1 = Z+U \neq N$ $M_1 + \text{Réch 2} \rightarrow N$	Réchauffeur 2
VIII	$M_1 = Z+U \neq N$ $M_1 + \text{Rech 2} \rightarrow N$	Réchauffeur 2
IX	$M_2 = Z+R \neq N$ $M_2 + \text{Réch 2} \rightarrow N$	Laveur + Réch 2
X	$Z+R = N$ ($R \rightarrow R$)	Laveur
XI	$M_2 = Z+U+R = N$	Laveur
XII	$M_2 = Z+U+R = N$	Laveur
XIII	$M_2 = Z+U+R \neq N$ $M_2 + \text{Réch 2} \rightarrow N$	Laveur + Réch 2

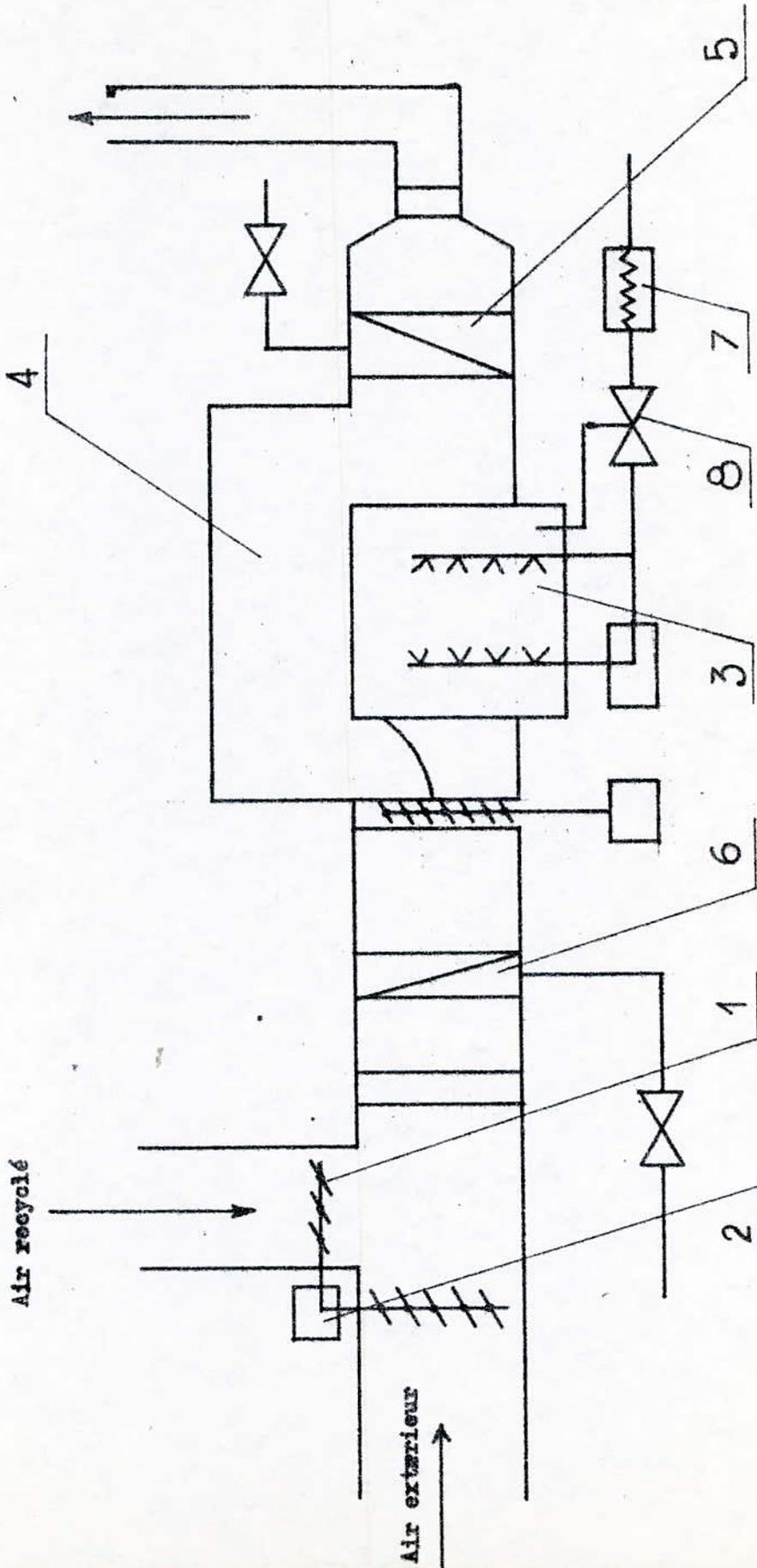


Figure 2.6 : Schéma d'une centrale de climatisation .

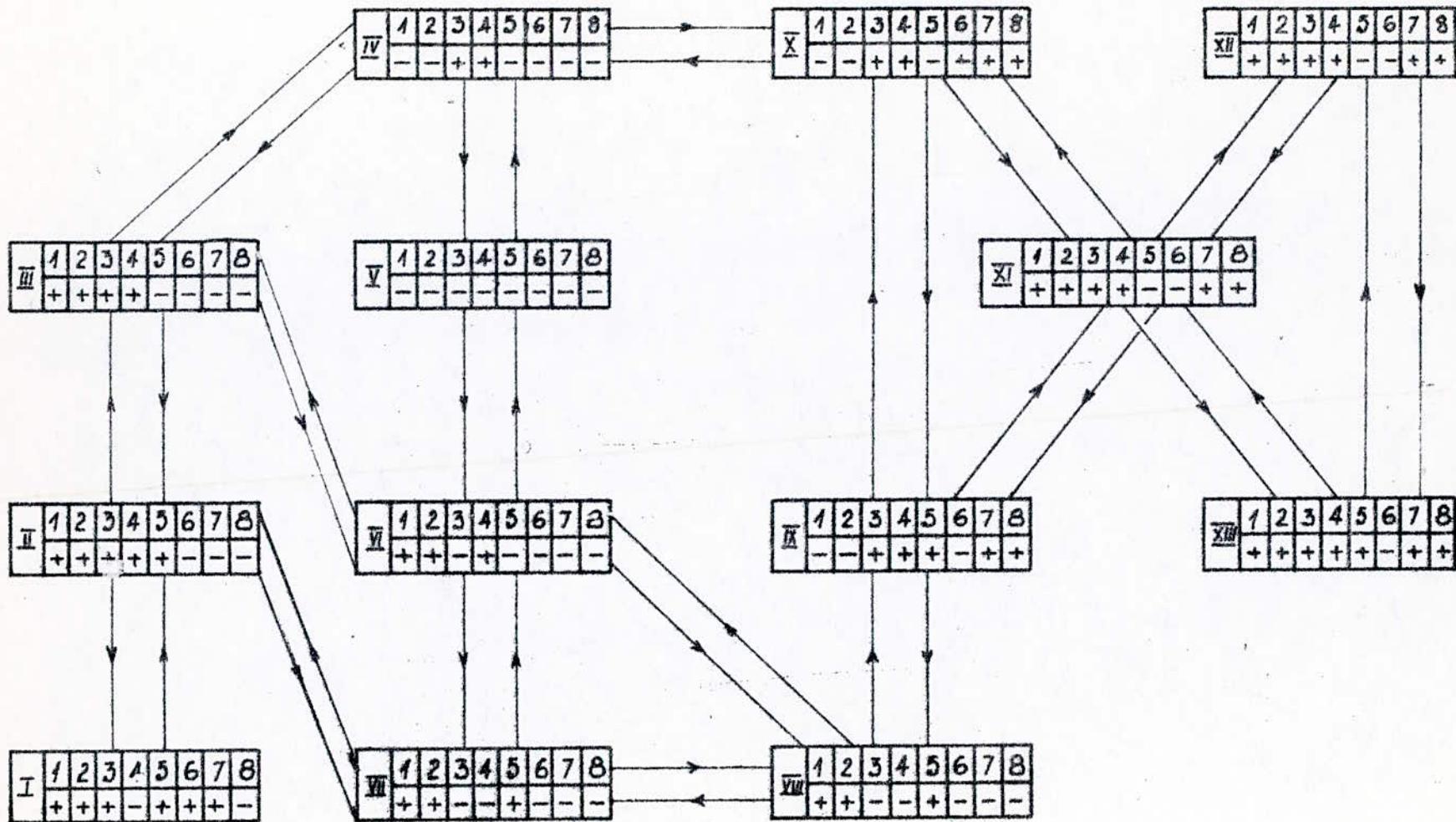


Figure 2.7 Passage d'une zone à une autre

est faible aux débit-volumes faibles (vitesse de rotation faible) , et aussi le rendement est bon .

2.3.1 Variation de la vitesse du moteur d'entraînement du ventilateur :

La machine entraînant le ventilateur est un moteur asynchrone à cage d'écureuil , de conception simple et robuste . Dans ce type de moteur , il était jusqu'à alors possible de faire varier la vitesse par des modifications de couplage au stator , mais cela ne permet pas d'obtenir des paliers fixes . Dans certaines configurations , il est possible d'insérer des coupleurs magnétiques à effet de champs , mais ceux-ci ont des plages de variation limitées et provoquent une forte dégradation de l'énergie consommée .

Il reste enfin une solution , certes plus élaborée , mais rendue possible grâce à l'amélioration de la technologie des composants électroniques de puissance : le convertisseur statique de fréquence . Le principe de ce type d'appareil consiste à se substituer a réseau triphasé 50 Hz pour alimenter un moteur asynchrone à fréquence variable , ce qui permet de moduler la vitesse à volonté .

- Coté technologique d'un convertisseur de fréquence .

La technologie la plus utilisée actuellement est celle du convertisseur autonome à boucle intermédiaire de courant continu . Un pont redresseur transforme le courant du réseau triphasé en un courant continu lissé par une inductance ; ce courant est lui-même , par l'intermédiaire d'un pont onduleur , réinjecté dans chaque phase du stator , à une fréquence variable .

Le convertisseur est dit autonome , car il doit pouvoir fonctionner sur une charge ne possédant pas de force électromotrice , ce qui est le cas des moteurs asynchrones , incapables de fournir l'énergie de commutation nécessaire au pont onduleur .

C'est en effet la source qui fournit la puissance réactive nécessaire à l'établissement du flux dans la machine .

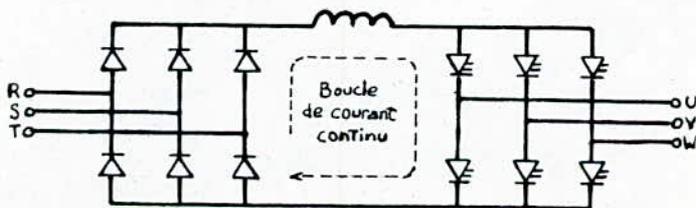


Figure 2.8

Sur le plan technologique , le pont redresseur est constitué par un pont de Graetz à 6 diodes ou 6 Thyristors selon le cas (voir Figure 2.8) . Le pont onduleur est également constitué par un pont de Graetz à 6 thyristors , comportant en outre un circuit , dit extinction , permettant de couper artificiellement la conduction des thyristors (d'où le caractère autonome de l'onduleur) .

- Couple et puissance du moteur lié avec le convertisseur .

Le convertisseur de fréquence permet , indépendamment du contrôle de la fréquence , la regulation des paramètres couple et puissance . Il permet , en effet un fonctionnement à couple nominal sur toute la plage de fréquence de 0 Hz à f nominale . La puissance sera alors directement proportionnelle à la fréquence (Figure 2.9) .

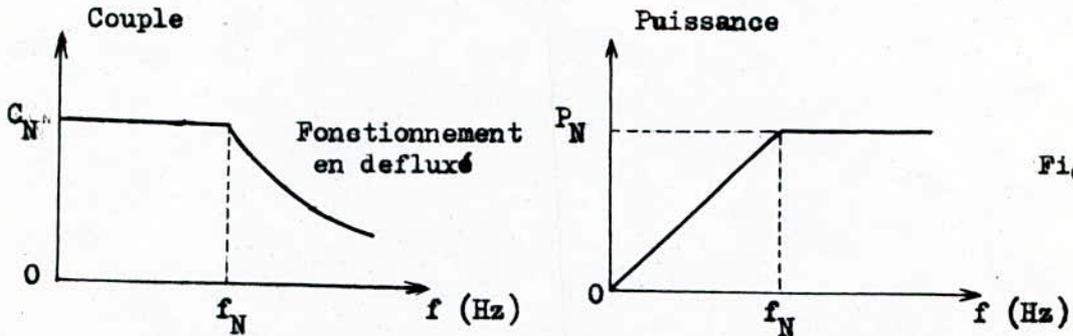


Figure 2.9

Il est alors nécessaire , dans ces conditions , de maintenir le flux magnétisant à sa valeur nominale afin d'éviter d'une part la saturation , et d'autre part le décrochage . Il est même possible de fonctionner en survitesse , mais à puissance constante ; le couple diminue car on réduit le flux , et le moteur travaille " en défluxé " .

2.3.2 Technologie optée pour l'association variateur / moteur asynchrone entraînant le ventilateur :

Il existe différentes techniques de conception d'un convertisseur de fréquence . L'une des plus évoluées et que nous avons choisie comme solution est la technique à boucle de tension intermédiaire constante .

2.3.2.1 Principe de la boucle intermédiaire du type " source de tension " :

Il consiste en un fonctionnement à flux magnétisant constant de façon à permettre au moteur de se retrouver dans des conditions analogues au point nominal , mais à une valeur quelconque de fréquence .

Pour rester à flux constant , il suffit de garder le rapport tension-fréquence constant .

En effet :

$$P \text{ élect. abs} = UI\sqrt{3} \cos\varphi = C2\pi f = KI\phi(2\pi f) \text{ avec } (C = KI\phi)$$

$$\text{d'où } \phi = \frac{3 U I \cos \varphi}{(2\pi f) K I} = K \frac{U}{f} \quad \text{avec } K = \frac{3 I \cos \varphi}{2\pi K I}$$

Le flux est maintenu constant, sauf aux faibles valeurs de la fréquence où il faut majorer la tension des chutes ohmiques. Ceci nous permet de balayer toute la plage de fréquence de 0 à f nominale, en créant un réseau à fréquence variable.

2.3.2.2 Technique à boucle de tension intermédiaire constante :

(Technique de la modulation de largeur d'impulsions P.W.M) " (Ref : 11) "

La conception de l'appareil est basée sur un redresseur à pont de Graetz à diodes constituant une source de tension continue de valeur fixe, filtrée par une inductance et un condensateur. Un pont onduleur " découpe " des créneaux de tension de largeur variable pour les redistribuer aux trois phases du moteur asynchrone (Figure 2.10).

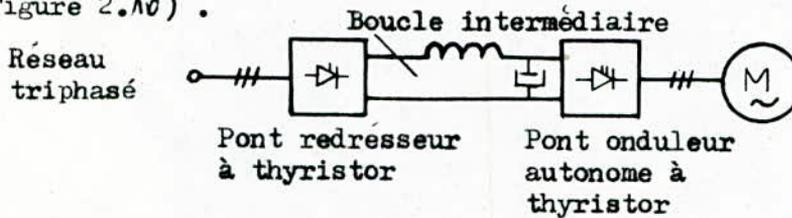


Figure 2.10

On obtient ainsi des créneaux alternativement positifs et négatifs, de largeur 120°, espacés par des intervalles de tension nulle de 60° (Figure 2.11).

La variation de fréquence est obtenue par modulation de la largeur de ces alternances. Parallèlement, la valeur moyenne de la tension est modulée grâce à des découpes réalisées sur alternances, ce qui permet de garder un rapport U/f constant.

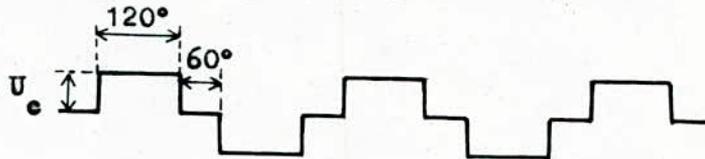


Figure 2.11 : Forme d'onde de la tension 380V/50 Hz

On réalise une modulation de largeur d'impulsions (Pulse Width modulation). La forme d'onde résultant du courant injecté au moteur dépend essentiellement de la façon dont sont placés ces créneaux de tension ; en effet, tout front impulsif de tension génère des harmoniques de courant dans les enroulements du stator,

qui ont pour effet d'engendrer des microcoupes pulsatoires venant s'ajouter au couple d'entraînement normal (Figure 2.12) .



Figure : 2.12

On peut réduire ces effets secondaires en faisant un découpage astucieux de la tension continue de base ; en effet aux faibles fréquences , les créneaux de tension réalisés sur chaque alternance sont distribués suivant une loi sinusoïdale , de façon à assurer une rotation parfaitement régulière . Lorsque la fréquence se situe dans la plage de 20 à 50 Hz , il n'est plus possible de réaliser autant de créneaux en raison des limites imposées par la vitesse de commutation des thyristors .

Toutefois , l'effet des harmoniques néfastes disparaît au fur et à mesure de l'accroissement de la fréquence fondamentale , ce qui permet , pour chaque palier de fréquence , de minimiser les taux d'ondulation résiduels et par voie de conséquence , les pertes calorifiques parasites .

AVANTAGES DE LA TECHNOLOGIE PWM :

Les avantages résident sur le fait que :

- Il n'est pas nécessaire de prévoir avec précision l'adaptation moteur-onduleur , ce qui permet de raccorder différents types de moteurs sur un même appareil .
- Il est possible de déconnecter en charge un moteur de la sortie onduleur pour le basculer sur le réseau 50 Hz , par exemple .
- Il est également possible de connecter et de déconnecter plusieurs moteurs en parallèle sur un même convertisseur , dans les limites de dimensionnement de celui-ci .

En définitive , le convertisseur à source de tension type PWM se comporte comme un véritable réseau à fréquence variable , ce qui justifie que nous ayons choisi cette technologie pour l'application au domaine de la climatisation .

2.3.3 Réglage de débit d'air en fonction du nombre de personnes à l'intérieur de la salle des conférences :

Pour cela la solution que nous avons opté est la suivante :

On met en place une boucle d'asservissement de débit d'air (Figure 2.13) . Celle-ci est constituée par un débitmètre localisé après le ventilateur , un régulateur , un convertisseur de fréquence et le moteur d'entraînement du ventilateur . Le calculateur commande le changement du consigne . Il calcule ce dernier en fonction du nombre de personnes qui occupent la salle . Celui-ci est mesuré par des compteurs réversibles placés au niveau des portes de la salle des conférences .

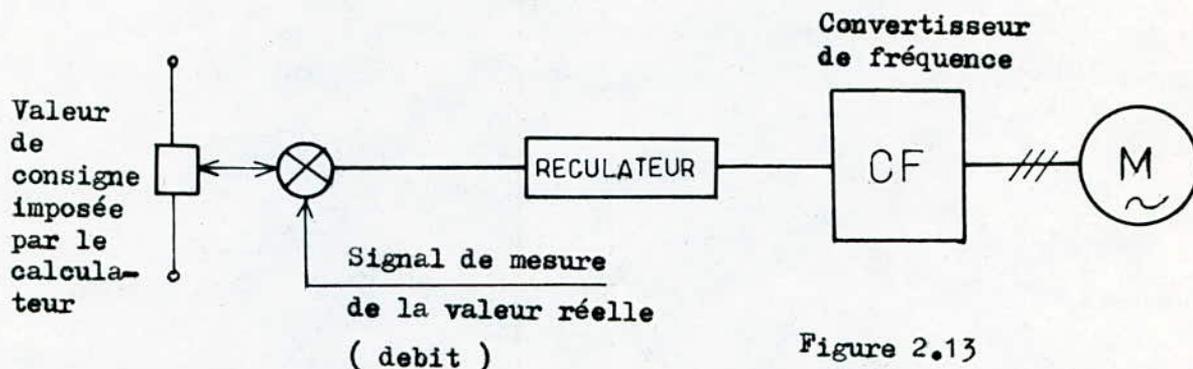


Figure 2.13

Principe de comptage du nombre de personnes occupant la salle de conférences .

Ce principe est montré sur la figure 2.14

Fonctionnement :

Au moment où on entre dans la salle , la porte s'ouvre par l'intermédiaire du dispositif (1) relié à un commutateur . Puis , on passe par un capteur photo-électrique ; celui-ci provoque une impulsion vers le compteur . Le nombre d'impulsions reçues par le compteur est enregistré et compté positif .

En ce qui concerne la sortie de la salle , le principe est le même que pour l'entrée ; mais le nombre d'impulsions est compté négatif . La différence entre le nombre d'impulsions compté positif et le nombre d'impulsions compté négatif donne le nombre de personnes à l'intérieur de la salle . Ce nombre est envoyé par le compteur vers le calculateur numérique . Ce dernier calcule le débit d'air correspondant et commande le changement du consigne du régulateur .

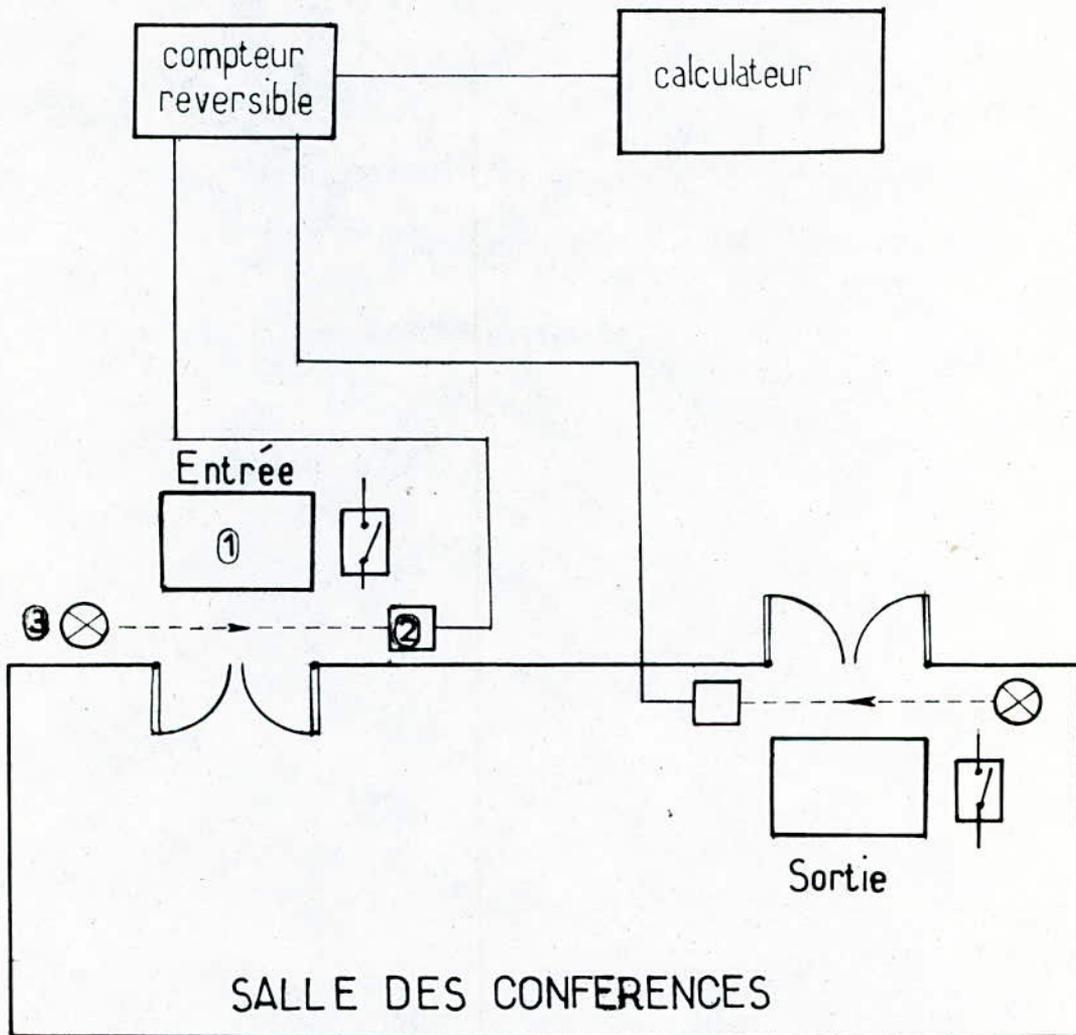


Figure 2.14 : Comptage du nombre de personnes au niveau de la salle des conférences .

3. PRESENTATION DE L'OBJET A ETUDIER

L'objet à étudier est une salle des conférences d'un hôtel . La figure 3.1 présente le schéma synoptique de l'installation de climatisation avec ses systèmes de régulation .

3.1 Description du système de régulation et de mesure existant :

- Contrôle de la température de l'air recyclé :

Le thermostat de gaine T mesure la température de l'air recyclé et envoie un signal au régulateur R qui compare cette valeur avec celle affichée à son point de consigne et commande directement la vanne d'eau chaude ou la vanne d'eau froide par l'intermédiaire d'un relais pour amener l'air d'apport à la température désirée .

- Contrôle de l'humidité de l'air recyclé :

L'hygrostat de gaine H mesure l'humidité relative de l'air recyclé . Le régulateur R reçoit le signal , compare cette valeur avec celle affichée à son point de consigne et commande par " tout ou rien " la vanne solénoïde de l'humidificateur à travers un pressostat qui n'est rien d'autre qu'un régulateur de pression qui en cas de nécessité amplifie le signal pneumatique émis par le régulateur pour positionner le contact de la vanne solénoïde agissant sur la rampe de pulvérisation .

Le relais sélecteur de minimum RL , dit à action direct transmet la plus basse des deux pressions pilotes à savoir la pression relative à l'humidité et la pression relative à la température pour commander la batterie froide .

3.2 Données techniques des éléments constituant la centrale de climatisation :

- Réchauffeur primaire .

+ Débit nominal de chaleur :

$$Q_n = 100000 \text{ Kcal/h}$$

+ Température de l'eau :

$$\text{à l'entrée : } \theta_{Pe} = 90^\circ\text{C}$$

$$\text{à la sortie : } \theta_{Ps} = 70^\circ\text{C}$$

+ Débit d'eau

$$Q_e = 3000 \text{ Kg/h}$$

+ Perte de charge au niveau de la vanne

$$\Delta P = 0,2 \text{ bar}$$

- Batterie froide .

+ Débit nominal du froid :

$$Q_n = 150000 \text{ Kcal/h}$$

+ Température de l'eau :

$$\text{à l'entrée : } \theta_{Fe} = 10^\circ\text{C}$$

$$\text{à la sortie : } \theta_{Fs} = 18^\circ\text{C}$$

+ Température de l'air :

$$\text{à l'entrée : } \theta_{ae} = 35^\circ\text{C}$$

$$\text{à la sortie : } \theta_{as} = 25^\circ\text{C}$$

+ Débit nominal d'eau :

$$Q_e = 18000 \text{ Kg/h}$$

+ Perte de charge au niveau de la vanne :

$$\Delta P = 0,2 \text{ bar}$$

- Rechauffeur secondaire .

+ Débit nominal de chaleur :

$$Q_n = 60000 \text{ Kcal/h}$$

+ Température de l'eau :

$$\text{à l'entrée : } \theta_{Se} = 90^\circ\text{C}$$

$$\text{à la sortie : } \theta_{Ss} = 70^\circ\text{C}$$

+ Débit de l'eau :

$$Q_e = 3000 \text{ Kg/h}$$

+ Température de l'air :

$$\text{à l'entrée : } \theta_{ae} = -5^\circ\text{C}$$

$$\text{à la sortie : } \theta_{as} = 35^\circ\text{C}$$

+ Perte de charge au niveau de la vanne :

$$\Delta P = 0,2 \text{ bar}$$

- Gaines .

+ Coefficient de transmission de chaleur (tôles en acier) :

$$\alpha_1 = 7 \text{ (Kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C) }^\circ\text{C} = 1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$$

+ Vitesse de l'air dans la gaine :

$$V_g = 3 \text{ m/s}$$

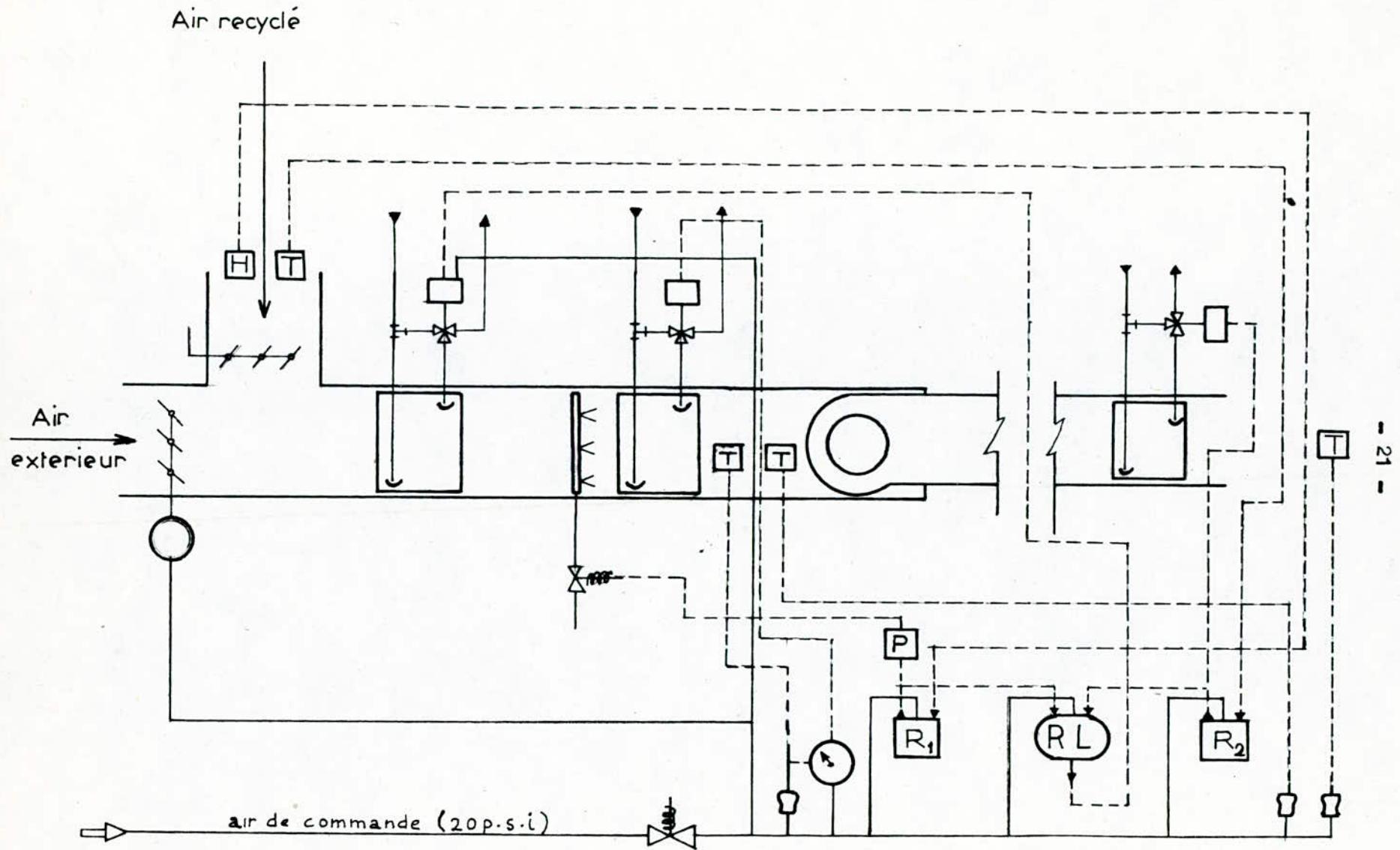


Figure 3.1 : Schéma synoptique de commande de l'installation existante

4. PROPRIETES DYNAMIQUES DES ELEMENTS DU SYSTEME

4.1 Methode théorique : (Ref : 2)

4.1.1 Dynamique de la température :

4.1.1.1 Réchauffeur d'air alimenté en eau chaude :

Comme on utilise souvent l'échangeur de chaleur alimenté en eau pour chauffer l'air, sa dynamique de température sera examinée de plus près dans ce qui suit. L'analyse théorique doit être conduite sur un modèle type, ce qui ne correspond certes pas aux conditions réelles, mais se justifie ici pour la clarté. A la place du tube ailette habituel, on prend pour base un simple tube cylindrique avec transfert de chaleur à deux dimensions (voir figure 4.1) ; 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 et débit secondaire. La base de chaque bilan est que la chaleur apportée est égale à la chaleur qui sort et la chaleur emmagasinée.

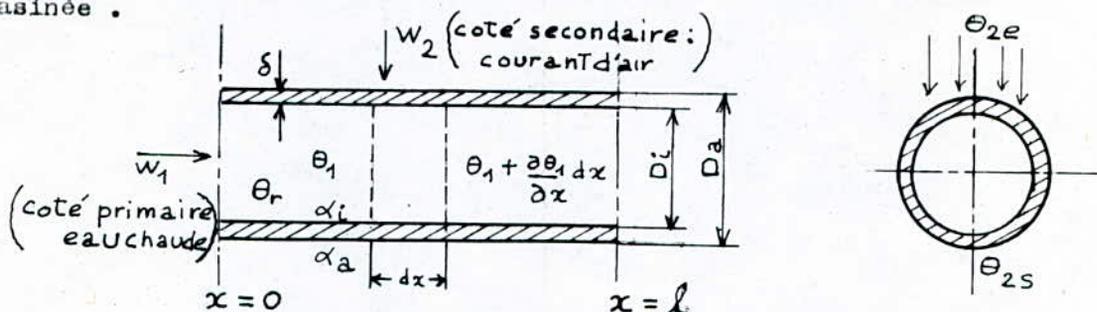


Figure 4.1 / Notations pour le bilan thermique d'un tube alimenté en eau chaude.

Le bilan calorifique pour le premier débit s'annonce :

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

Ce qui conduit à l'équation différentielle suivante :

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

Le bilan calorifique du tube s'écrit :

$$\pi D_i \alpha_i (\theta_1 - \theta_r) dx dt = \pi D_a \alpha_a (\theta_r - \theta_{2m}) dx dt + \rho_r c_r \pi D_m \delta \frac{\partial \theta_r}{\partial t} dx dt$$

On en tire, avec $\theta_{2m} = (\theta_{2e} + \theta_{2a})/2$ et avec D_m comme diamètre moyen du

, l'équation différentielle .

$$\frac{\partial \theta_r}{\partial t} + \frac{\alpha_a D_a}{\rho_r C_r D_m \delta} (\theta_r - \theta_{2m}) - \frac{\alpha_i D_i}{\rho_r C_r D_m \delta} (\theta_1 - \theta_r) = 0$$

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

$$\theta_{2a} = \theta_{2e} + \frac{\pi D_a \alpha_a}{\beta_2 W_2 C_{p2} R_a} (\theta_r - \theta_{2m})$$

R_a : c'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 :

$$\Delta\theta'_1 + \frac{\partial \Delta\theta_1}{\partial \varphi} + \beta_1 (\Delta\theta_1 - \Delta\theta_r) = 0 \quad ;$$

$$\Delta\theta'_r + \beta_2 (\Delta\theta_r - \Delta\theta_{2m}) - \beta_3 (\Delta\theta_1 - \Delta\theta_r) = 0 \quad ,$$

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

en posant : $\Delta\theta' = \frac{\partial \theta}{\partial \tau}$, $\tau = W_1 t / l$ et $\varphi = x/l$

Les coefficients s'obtiennent ainsi

$$\beta_1 = \frac{4l \alpha_i}{\rho_1 C_1 D_1 W_1} \quad , \quad \beta_2 = \frac{D_a l \alpha_a}{\rho_r C_r D_m \delta W_1} \quad ,$$

$$\beta_3 = \frac{D_i l}{\rho_r C_r D_m \delta W_1} \quad , \quad \beta_4 = \frac{\pi D_a \alpha_a}{\rho_2 C_{p2} R_a W_2} \quad ,$$

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

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

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

$$\frac{\Delta\theta_{2am}(p)}{\Delta\theta_1(p)} = \frac{2\beta_3\beta_4(1 - e^{-p}e^{-\beta_1\beta_3})/(p+a)}{(2+\beta_4)(p+\beta_1)(p+a) - \beta_1\beta_2}$$

Avec $p = j\omega$, elle se transforme en fonction de transfert. Cette équation est basée sur les hypothèses suivantes : matière homogène, coefficient de transfert de chaleur constant, aucune transmission de chaleur suivant l'axe, aucun mélange axial, écoulement sans frottement.

4.1.1.2 Gaine :

Comme pour l'établissement de l'équation différentielle résultante pour le rechauffeur d'air, on part ici du bilan thermique, Selon la figure 4.2 :

$$\dot{Q}_1 = \rho_L C_{pL} W \cdot S \cdot \theta dt$$

représente la chaleur amenée dans le courant d'air,

$$\dot{Q}_2 = \rho_L C_{pL} W \cdot S \left(\theta + \frac{\partial\theta}{\partial x} dx \right) dt$$

celle sortant du courant d'air,

$$\dot{Q}_3 = (\theta - \theta_w) U dx dt$$

celle cédée à la paroi et

$$\dot{Q}_4 = C_{pL} \cdot S \cdot \frac{\partial\theta}{\partial t} dx dt$$

la chaleur emmagasinée.

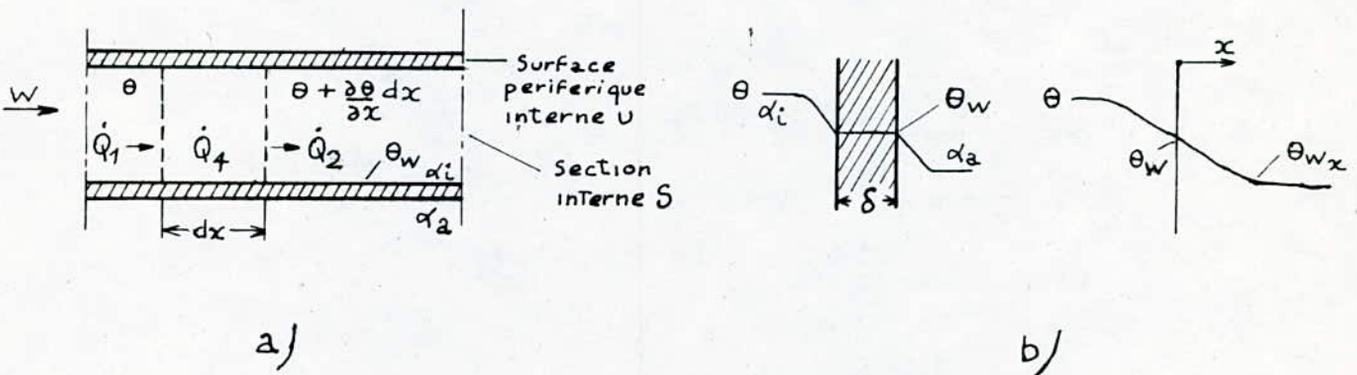


Figure 4.2 : Comportement de transfert de gaines d'air .

a) Notation pour l'établissement du bilan thermique

b) Courbes des températures dans la paroi mince et celle d'épaisseur infini

En supposant constante la température d'ambiance θ , on obtient selon Profos et Hemmi l'équation différentielle :

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

La température de paroi θ n'est pas une constante, mais elle est également une fonction du temps en dynamique. On parle du " couplage du mur " qui se calcule facilement pour les deux cas idéaux de la paroi mince et de la paroi d'épaisseur infinie.

La paroi mince (figure 4.2b) est caractérisée par le fait que la variation de la température y est constante et qu'elle est par la suite une fonction du temps et non du lieu. On obtient pour elle, avec $\theta_u = \text{cte}$, à partir du bilan calorifique ($\dot{Q}_{zu} = \dot{Q}_{ab} + \dot{Q}_{totp}$), avec de faibles variations, l'équation différentielle :

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

(l'indice w représente le mur). 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.

$$\frac{\Delta \theta_w}{\Delta \theta} = \frac{\alpha_i / (\alpha_i + \alpha_a)}{1 + [\rho_w C_w \delta / (\alpha_i + \alpha_a)] p} = F(p)_w \quad (3)$$

Avec la paroi d'épaisseur infinie, toute la chaleur apportée est emmagasinée. Pour calculer l'accouplement de la paroi, il faut résoudre l'équation de transmission de chaleur de Fourier. On obtient pour la fonction de transfert l'expression suivante.

$$\frac{\Delta \theta_w}{\Delta \theta} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{C_w \rho_w \lambda_w}{\alpha_i^2} p}} = F(p)_w \quad (4)$$

Bien que les deux comportements décrits représentent des cas limites, ils permettent d'obtenir en climatisation de bons résultats approchés. On donne dans les travaux cités les plages de validité.

On peut maintenant, à l'aide des équations (3) et (4), résoudre (1); car on connaît la relation entre la température de la gaine et la température superficielle de la paroi ($\theta = F(p)_w$). On obtient alors la fonction de transfert pour la gaine, avec la grandeur d'entrée θ_0 ($\theta = \theta_0$ pour $x = 0$) et la grandeur de sortie θ_L ($\theta = \theta_L$ pour $x = L$)

$$\frac{\Delta \theta_L}{\Delta \theta_0} = \exp(-pT_t) \exp - \frac{\alpha_i UL}{\rho_L C_{pL} SW} (1 - F(p)_w)$$

$$T_t : \text{ temps mort} = \frac{L}{W}$$

4. 1.1.3 Local

Pour simplifier, on fait le calcul avec une température du mur moyenne

θ_{wd} .

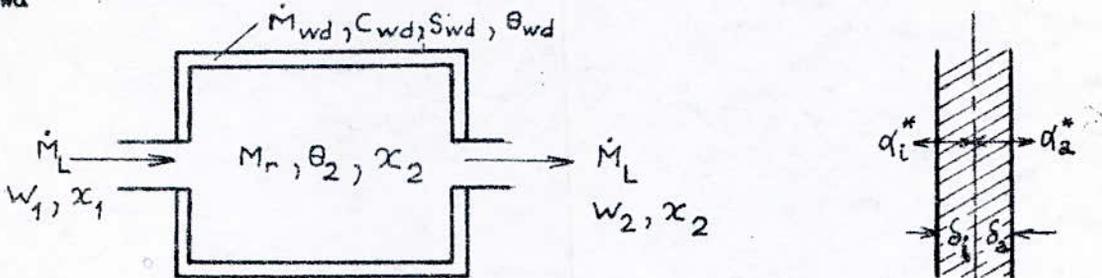


Figure 4.3 : Notations et schéma pour le comportement de transfert du local .

A partir du bilan thermique, on établit les équations différentielles .

$$M_r C_{pL} \Delta \theta'_2 = \dot{M}_L C_{pL} (\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2) - (\alpha_i^* S_{wd}) (\Delta \theta_2 - \Delta \theta_{wd}) \quad (1)'$$

$$M_{wd} C_{wd} \Delta \theta'_{wd} = \sum (\alpha_i^* S_{wd}) (\Delta \theta_2 - \Delta \theta_{wd}) - \sum (\alpha_a^* S_{wd}) \Delta \theta_{wd} \quad (2)'$$

En appliquant la transformée de Laplace pour l'équation (2)'

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

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

$$\theta_{wd} (1 + T_1 p) = \frac{\sum \alpha_i^* S_{wd} \Delta \theta_2}{(\alpha_i^* + \alpha_a^*) S_{wd}} \quad (3)'$$

$$\text{avec } T_1 = \frac{M_{wd} C_{wd} P}{\sum (\alpha_i^* + \alpha_a^*) S_{wd}}$$

En appliquant la transformée de Laplace pour l'équation (1)', on obtient

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

$$\Delta \theta_2 (\dot{M}_R C_{pL} p + \dot{M}_L C_{pL} + \sum \alpha_i S_{wd}) = \dot{M}_L C_{pL} \theta_1 + \sum \alpha_i S_{wd} \Delta \theta_{wd} \quad (4)'$$

de l'équation (3)', on tire $\Delta \theta_{wd}$ et on le pose dans l'équation (4)'. On aboutit à l'équation suivante :

$$\Delta \theta_2 (\dot{M}_R C_{pL} p + \dot{M}_L C_{pL} + \sum \alpha_i S_{wd}) = \dot{M}_L C_{pL} \Delta \theta_1 + (\sum \alpha_i S_{wd}) \frac{\sum \alpha_i S_{wd} \Delta \theta_2}{\sum (\alpha_i + \alpha_a) S_{wd} (1 + T_1 p)}$$

$$\frac{\Delta \theta_2}{\Delta \theta_1} = \frac{\dot{M}_L C_{pL} (1 + T_1 p)}{(1 + T_1 p) (\dot{M}_R C_{pL} p + \dot{M}_L C_{pL} + \sum \alpha_i S_{wd}) - \frac{[\sum (\alpha_i S_{wd})]^2}{(\alpha_i + \alpha_a) S_{wd}}}$$

En posant :

$$T_1 = \frac{M_{wd} C_{wd}}{\sum [S_{wd} (\alpha_i + \alpha_a)]}$$

$$T_2 = \frac{M_R C_{pL}}{b} \quad ; \quad K_p = \frac{a M_R C_{pL}}{b}$$

$$a = \frac{\dot{M}_L}{M_R} \quad ; \quad b = a M_R C_{pL} + \frac{\sum \alpha_i S_{wd} [1 - (\alpha_i S_{wd})]}{\sum (\alpha_i + \alpha_a) S_{wd}}$$

On aura

$$\frac{\Delta \theta_2}{\Delta \theta_1} = K_p \frac{1 + T_1 p}{T_1 T_2 p^2 + (T_2 + a T_1 T_2 + \sum S_{wd} T_1 / b) p + 1}$$

4.1.2 Dynamique de l'humidité :

4.1.2.1 Humidificateur avec eau en circulation :

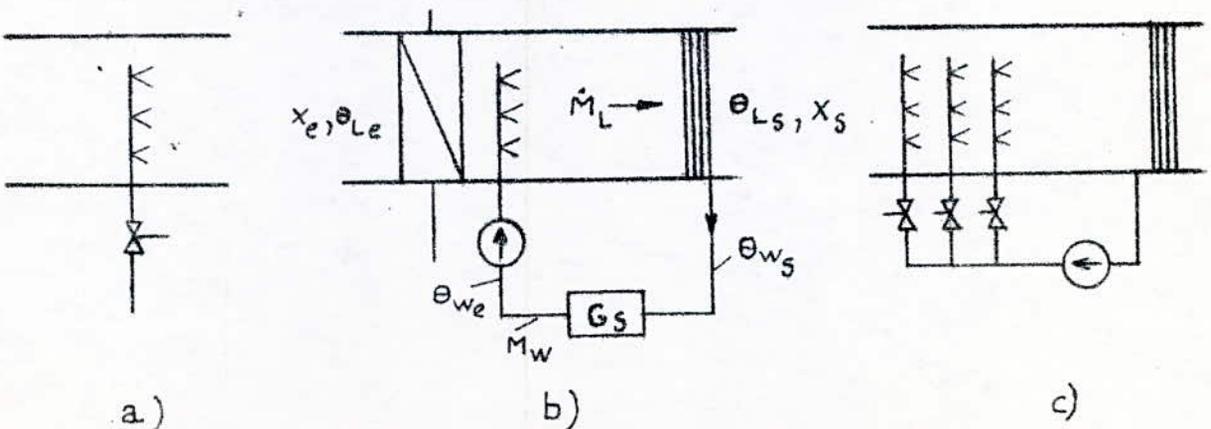


Figure 4.4 : Montage pour faire varier l'humidité de l'air

On peut considerer que la variation d'humidité par apport de vapeur (Figure 4.4a) et par pulverisation d'eau (Figure 4.4c) se produit sans retard ; elle ne nécessite donc aucun autre appareillage . Comme fréquemment dans la pratique l'humidificateur fonctionne avec un débit d'eau constant en circulation , et que la variation x est fournie par une variation de la température de l'air (par exemple par variation de la puissance calorifique du préchauffeur) , il sera donné des détails sur ce processus . Les principales équations du bilan sont établies avec les denominations de la figure 4.4b . 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

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

de plus l'équation

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

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 , S la surface extérieure de l'eau pulverisée et $x_{sm} = (x_{se} + x_{sa})/2$. La relation entre la matière transférée et l'humidité de l'air est donnée par l'équation : $\sigma S (\Delta x_{sm} - \Delta x_a / 2) = \dot{M}_L \Delta x_a$.

La dernière équation du bilan décrit le processus d'emmagasinage dans le recipient collectant l'eau : $\dot{M}_w C_w (\Delta\theta_{wa} - \Delta\theta_{we}) = M_{cw} \Delta\theta'_{we}$

θ_{we} étant la dérivée par rapport au temps . On obtient après élimination des grandeurs intermédiaires sans intérêt et emploi de la transformation de Laplace la réponse harmonique complexe :

$$\frac{\Delta x_a}{\Delta \theta_{Le}} = K \frac{1 + T_1 p}{1 + T_2 p}$$

La signification des grandeurs introduites ici est la suivante :

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

$$A = \frac{2\alpha S \dot{M}_L C_{pL}}{2\dot{M}_L C_{pL} + \alpha F} \quad , \quad B = \frac{M_s}{2\dot{M}_w} A \quad , \quad D = \frac{M_s e}{2\dot{M}_w}$$

$$C = e - \frac{\dot{M}_w C}{W} \frac{2\dot{M}_L C_{pL} + \alpha S}{d \alpha S}, \quad d = \frac{\Delta x_s}{\Delta \theta_w}$$

$$e = \left(\frac{\dot{M}_w C}{W} + \frac{\alpha F}{2} + \frac{dr \alpha F}{2C_{pL}} \right) \frac{2\dot{M}_L C_{pL} + \alpha F}{d \alpha F} - \frac{\alpha F}{2d} - \frac{r \alpha F}{2C_{pL}}$$

Tandis que les deux processus des figures 4.4a et c sont à faible retard, il se produit ici à cause du reservoir de collecte un retard important. Plus le quotient \dot{M}_w / \dot{M}_s est grand, plus l'état d'équilibre est rapidement atteint.

4.1.2.2 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 les calcule ainsi : $T_t = L/W$, avec L longueur de la gaine et W vitesse de l'air. selon la section I on obtient alors la reponse harmonique

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

avec x_L l'humidité à l'extrémité de la gaine. Comme par ailleurs il ne doit se produire aucune condensation, on a $K_p = 1$.

4.1.2.3 Local :

On parvient à une relation simple, si, comme pour la gaine, la capacité d'emmagasinage 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 :

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

On trouvera les dénominations Figure 4.3

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

$$\frac{\Delta x_2}{\Delta x_1} = \frac{K_p}{(1 + T_p p)}$$

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 $T = M_r / \dot{M}_L$; elle est donc inversement proportionnelle au renouvellement d'air.

4.2 Identification expérimentale de la dynamique de chaque élément du système de climatisation :

4.2.1 Salle des conférences :

- Dynamique de la température .

Nous utiliserons ici la méthode de BROIDA pour des raisons suivantes :

- Elle permet d'identifier le système à une fonction de premier ordre affectée d'un retard pur .
- Elle ne nécessite pas la recherche d'un point d'inflexion qui est souvent délicat et hasardeux .

Description de la méthode :

La courbe de 1^{er} ordre passe par deux points situés sur la courbe enregistrée ayant pour ordonnée 0,28 et 0,40, ces deux points déterminent deux temps t_1 et t_2 .

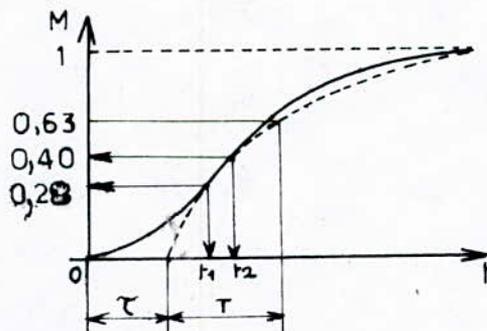


Figure 4.5 : Identification expérimentale de Broida .

On calcule alors facilement la constante du temps et le retard pur par les formules suivantes :

$$\begin{aligned} T &= 5,5 (t_2 - t_1) \\ \tau &= 2,8 t_1 - 1,8 t_2 \end{aligned}$$

La fonction de transfert s'écrit de la façon suivante :

$$H(p) = \frac{G_s e^{-\tau p}}{T p + 1}$$

APPLICATION :

La réponse indicielle obtenue lors de la mesure expérimentale est représentée par la Figure 4.6 .

En appliquant la méthode d'identification de Broida à cette courbe

$$T = 5,5(3,2 - 2,3)200 = 990 \text{ s}$$

$$\tau = (2,8,2,3 - 1,8,3,2)200 = 136 \text{ s}$$

$$G_s = \frac{\Delta \theta_i}{\Delta \psi} = 0,22^\circ\text{C}/\% \quad G_s : \text{gain statique}$$

θ_i : température ambiante dans la salle

ψ : degré d'ouverture de la vanne du réchauffeur secondaire

On a donc :

$$H_t(p) = \frac{0,22 e^{-136p}}{990p + 1}$$

- Dynamique de l'humidité .

Celle-ci est donnée comme la forme obtenue par la méthode théorique .

$$\frac{\Delta x_i}{\Delta x_s} = \frac{K_p}{(1 + Tp)} = H_h(p)$$

Faute du manque de mesure expérimentale , nous avons supposé que :

$$K_p = 1,4 \quad ; \quad T = (125\%) \cdot 990 = 1237 \text{ s}$$

Cette supposition est valable car en général la constante de temps de la fonction de transfert de l'humidité est plus grande que celle de la température .

On a donc :

$$H_h(p) = \frac{1,4}{1237p + 1}$$

4.2.2 Dynamique des autres éléments du système :

La connaissance de la dynamique de la salle nous ramène à connaître la dynamique des autres éléments, et cela à partir d'un catalogue établi par une équipe de recherche en Suisse

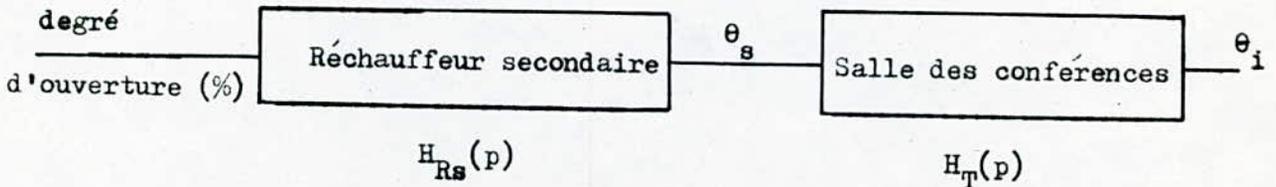
On peut alors établir le tableau des transmittances suivant :

Chambre de mélange I	$H_I(p) = \frac{0,05 e^{-4p}}{1 + 15p}$
Chambre de mélange II	$H_{II}(p) = \frac{0,1 e^{-4p}}{1 + 15p}$
Réchauffeur primaire	$H_{Rp}(p) = \frac{0,835 e^{-15p}}{1 + 29p}$
Réchauffeur secondaire	$H_{Rs}(p) = \frac{0,835 e^{-15p}}{1 + 29p}$
Laveur	$H_L(p) = \frac{0,65 e^{-15p}}{1 + 25p}$

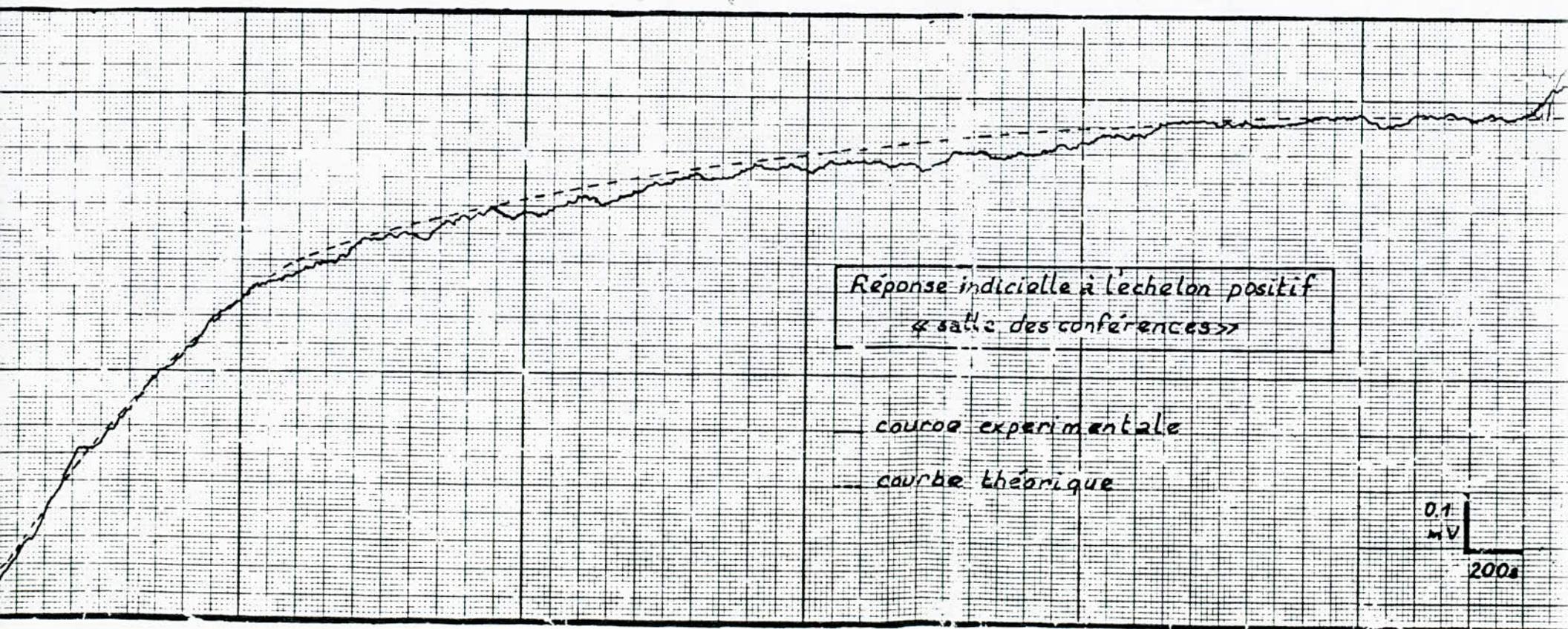
Tableau 4.1

Remarque :

Pour des raisons de calcul ultérieur, il est préférable de mettre la dynamique de la température de la salle sous la forme : $\theta_i(p) / \theta_s(p)$ [$^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$] en tenant compte du réchauffeur secondaire.



$$H_t(p) = H_{Rs}(p) \cdot H_T(p) \longrightarrow H_T(p) = H_t(p) / H_{Rs}(p)$$



Réponse indicielle à l'échelon positif
« salle des conférences »

— courbe expérimentale

- - - courbe théorique

0.1
mV
200μs

$$H_T(p) = \frac{0,26(1 + 29p) e^{-121p}}{990p + 1}$$

5. APPLICATION DE LA COMMANDE OPTIMALE

5.1 Modifications de l'installation technologique :

La figure 3.1 présente le schéma technologique de l'installation existante . A simple vue , on constate que le traitement d'air par la méthode de point de rosée est appliquée . Or , d'après l'analyse faite au chapitre 2 , celle-ci amène à la gaspillage d'énergie . Pour éviter cela , des modifications sont nécessaires :

- introduction d'un simple by-pass au niveau de l'humidificateur
- substitution de l'humidificateur et de la batterie froide par un Laveur
- remplacement du système de régulation par un autre adaptable à la commande optimale .

5.2 Solution proposée pour effectuer la commande optimale :

Comme nous avons vu au chapitre 2 , pour qu'on puisse minimiser au maximum l'énergie consommée , il faut qu'on traite l'air de façon différente en fonction de l'état de l'air extérieur . Pour effectuer cela , l'un des meilleurs solutions , c'est d'appliquer un système de régulation utilisant un calculateur numérique . Ce dernier , une fois qu'on lui donne des instructions bien établies à l'aide d'un programme , commande la centrale de climatisation en tenant compte du changement de l'état de l'air extérieur et de l'état de l'air intérieur .

La figure 5.1 montre le schéma globale de la commande optimale .

Description du fonctionnement du système de régulation .

Le calculateur agit directement sur les servomoteurs électropneumatique pas à pas lors des étapes de préparation à un régime de fonctionnement dans une des treize zones choisies en fonction de l'enthalpie de l'air extérieur . Pendant le fonctionnement normal à l'intérieur d'une zone , les régulateurs analogiques assurent la stabilisation des paramètres de l'air après les différents échangeurs , tandis que le calculateur commande leurs consignes en fonction de la variation de la température et de l'humidité ambiante de la salle des conférences par rapport à celles désirées .

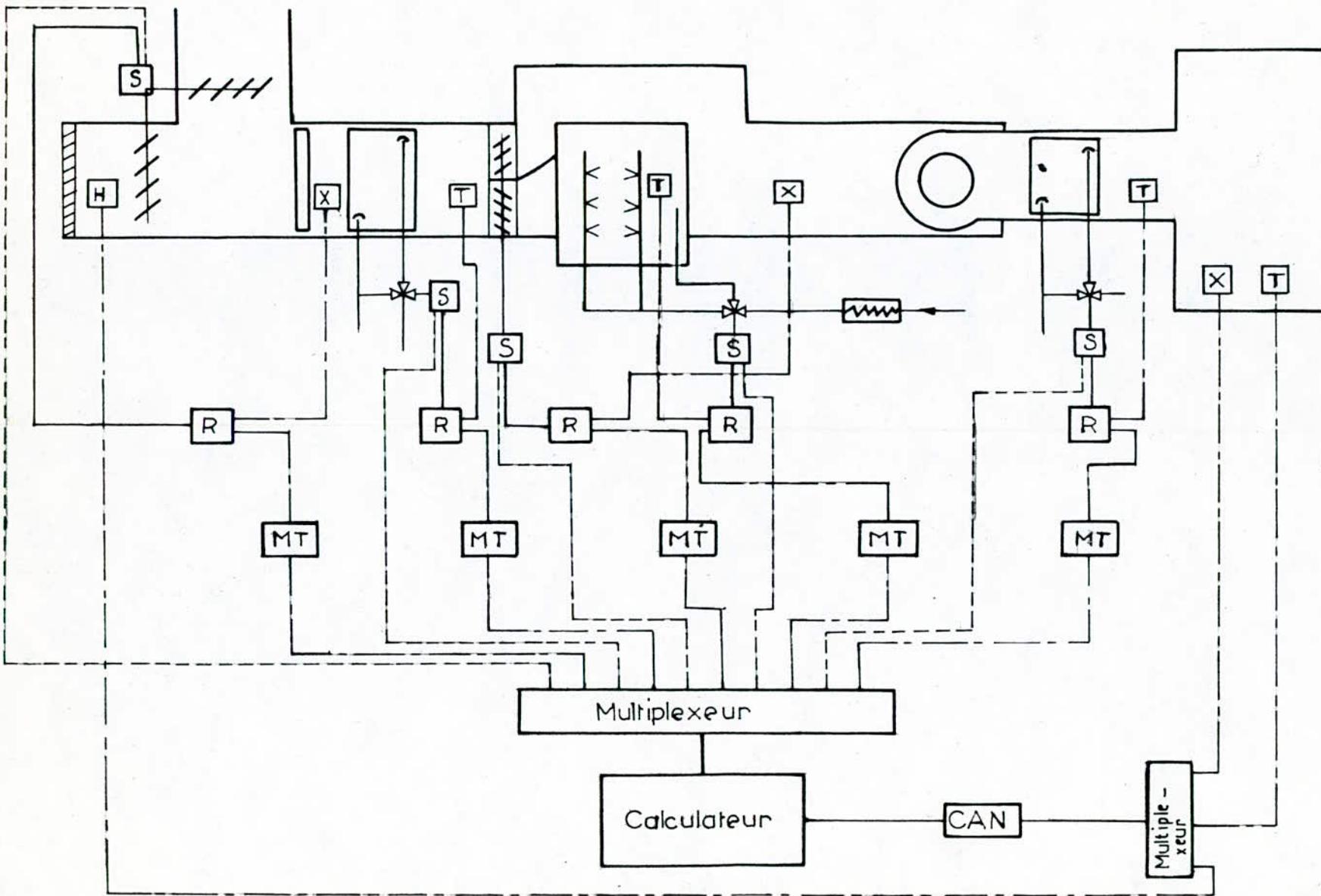


Figure 5.1 : Schéma globale de la commande en fonction de la minimisation d'énergie

5.3 Choix des éléments de commande et leur mise au point :

5.3.1 Capteurs de mesure :

5.3.1.1 Capteurs de température :

- Thermomètre à résistance (Figure 5.2)

Un thermomètre à résistance se compose de la résistance de mesure en metal constitué en nickel ou en platine et des éléments nécessaires au montage et au raccordement . La résistance de mesure varie avec la température suivant une loi connue et reproductible . Les variations de résistance sont transmises sous la forme de variation de tension par des lignes en cuivres vers un indicateur , un enregistreur ou un régulateur . La plage de variation est de (-60 à $+150^{\circ}\text{C}$) avec des résistances en nickel .

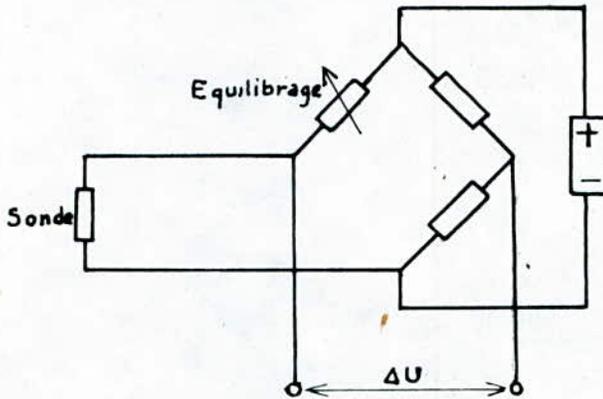


Figure 5.2

- Thermocouple (Figure 5.3)

Un thermocouple se compose d'un couple thermoélectrique et des éléments nécessaires au montage et au raccordement . La tension thermo-électrique , qui dépend de la différence de température entre le point de mesure et la soudeure froide est transmise vers un indicateur , un enregistreur ou un régulateur , soit directement ou par l'intermédiaire d'un transmetteur de mesure .

La plage de variation est de -100 à 1600°C

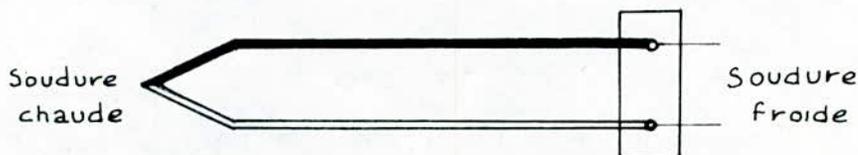


Figure 5.3

Choix des sondes de température pour chaque élément de l'installation .

- a) Sonde de température dans la salle .

La salle est un lieu où on veut obtenir une température ambiante voulue . Cette condition nous ramène à choisir une sonde de température d'ambiance type (D R T 30 L) . " (Ref : 9) "

Les caractéristiques techniques de la sonde sont :

- Plage de mesure	0 — 34°C
- Plage de réglage	13 — 34°C
- Température d'ambiance admissible	0 — 40°C
- Limite de détérioration à 60 % rH	- 30°C/+60°C
- Signal de sortie	Variation de tension environ 50 mV/°K

b) Sonde de température dans la gaine .

La plage de variation de la température de l'air au niveau du réchauffeur primaire et secondaire est connue (voir données techniques) . Cette plage de variation nous ramène à choisir une sonde de température du type T 30(s) . " (Ref : 9) "

Les caractéristiques de la sonde sont :

- Plage de mesure	0 — 30°C
- Plage de réglage	0 — 30°C
- Température d'ambiance admissible	0 — 40°C
- Limite de détérioration à 60 % rH	- 30°C/+ 60°C
- Signal de sortie	(voir figure 5.4)

5.3.1.2 Capteurs de l'humidité :

Les capteurs d'humidité utilisés doivent être de haute précision et avoir un temps de réponse très court . Pour satisfaire ces conditions , il existe actuellement des capteurs d'humidité au chlorure de lithium qui peuvent mesurer aussi bien l'humidité relative que l'humidité absolue .

Procédé de mesure .

La résistance utilisée (Figure 5.5) est située dans une fine cartouche métallique entourée d'un isolant . Par dessus est tirée une gaine de verre tissé , trempée dans une solution de chlorure de lithium . Par dessous sont installées deux électrodes en métal anticorrosion . Un tube de protection avec un tamis éloigne de la sonde les courant d'air perturbateurs . Aux électrodes est appliquée une tension alternative qui génère un courant à travers la solution de chlorure de lithium et la réchauffe . Ainsi de l'eau est évaporée de la solution . Dès que toute l'eau est vaporisée , la conductivité entre les électrodes

décroit fortement ainsi que le courant . La température baisse . Le chlorure de lithium hygroscopique peut reprendre de l'eau dans l'air , donc la conductivité récroit ainsi que le courant entre les électrodes . De cette manière , la température se régule pour atteindre un équilibre qui correspond à l'équilibre entre l'énergie électrique dépensée et la quantité de chaleur utilisée pour la vaporisation de l'eau (température de changement d'état de système) . Cet état d'équilibre ne dépend que de la tension devapeur de l'air environnant et est donc une mesure del'humidité absolue . La température de changement d'état du système est captée par la résistance de mesure et transmise en tant que grandeur électrique au régulateur .

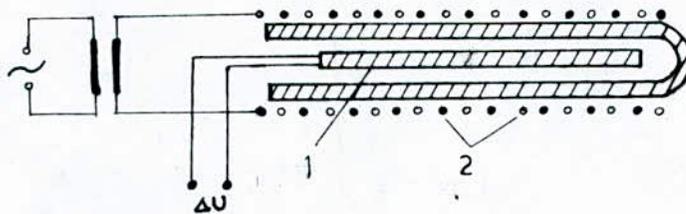


Figure 5.4 : Capteur de l'humidité en chlorure de lithium .

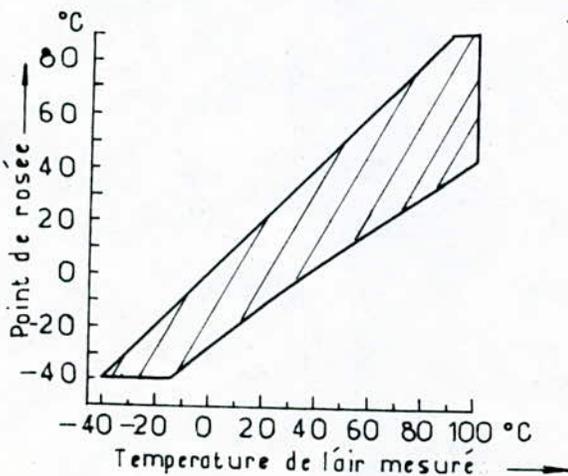


Figure 5.5 : Domaine de mesure de l'humidité absolue

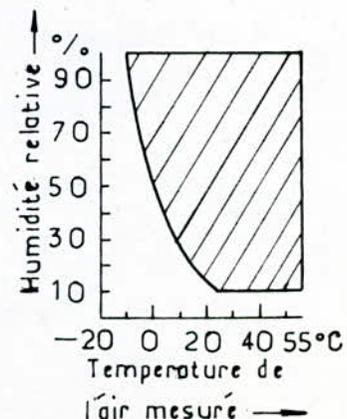


Figure 5.6 : Domaine de mesure de l'humidité relative

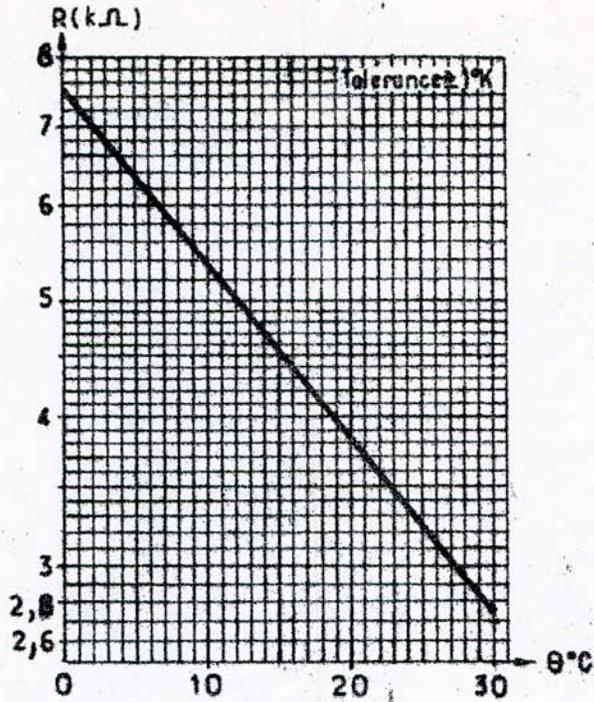


Figure 5.7 : Caractéristique de l'élément de mesure de température T 30 .

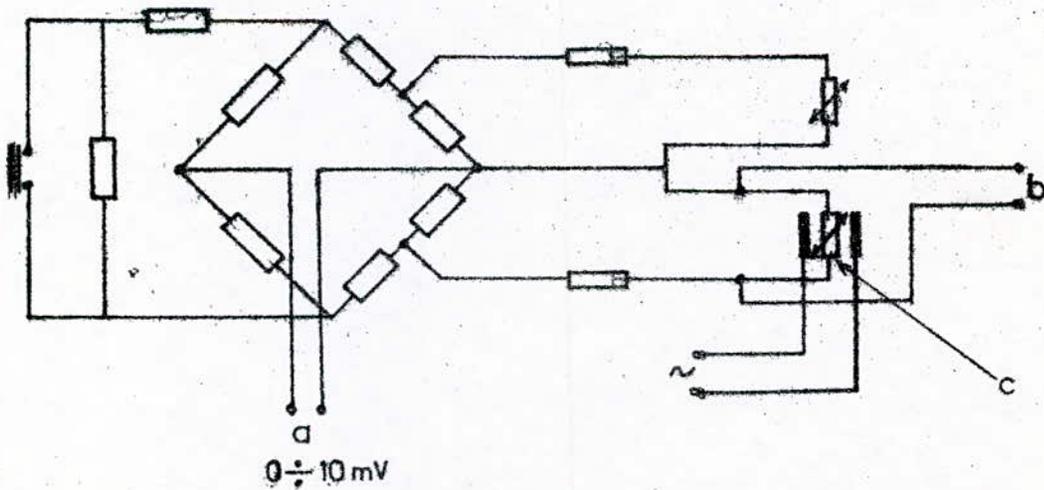


Figure 5.8 : Montage permettant d'avoir l'humidité relative et l'humidité absolue .

Choix des sondes de l'humidité.

Nous avons choisis des sondes à caractéristiques techniques semblable pour tous les éléments de l'installation nécessitant la mesure de l'humidité .

Les caractéristiques techniques sont :

Capteur d'humidité ambiante M55402	(Ref : 8)	Page 70
- Résistance de mesure incorporée		100 à 0°C
- Température ambiante admissible		- 40 à +70°C
- Humidité absolue admissible		- 40 à +70°C de point de rosée
- Vitesse d'air admissible		3 m/s
- Limites d'erreur de la mesure d'humidité absolue		± 1°C de point de rosée
- Ecart de fabrication des capteurs d'humidité entre eux		± 0,5°C de point de rosée

5.3.2 Vannes de contrôle

Les vannes de régulation seront sélectionnées avec précaution pour répondre aux caractéristiques du système qu'elles régulent . Pour bien choisir une vanne , il est important de tenir compte des paramètres suivants :

- Débit de l'installation : déterminé en litres ou m³/h ; il se calcule par la formule suivante :

$$(5.1) \quad Q \text{ (debit)} = \frac{\text{Puissance calorifique (Kcal/h) ,}}{\Delta\theta \cdot 1000} \text{ (m}^3\text{/h)}$$

$\Delta\theta$: étant la chute ou différence de température d'eau d'entrée et de sortie .

$$\Delta\theta = \theta_e - \theta_s$$

- Chute de pression (ou perte de charge) P_v :

La chute de pression est la perte de charge dans la vanne (pression amont absolue moins pression aval absolue) .

La perte de charge dans une vanne doit être supérieure , ou tout au moins égale à la chute de pression du circuit dans lequel le débit d'eau varie .

- Coefficient du débit d'une vanne (K_v)

C'est le débit normal en m³/h d'eau sous une pression de 1 bar .

La valeur du coefficient de débit

K_{vs} est définie par les normes comme étant le débit en m³/h d'eau sous une perte de charge de 1bar à travers une vanne en ouverture totale .

Dimensionnement des vannes de contrôle .

Pour ce faire , on utilisera les caracteristiques de fonctionnement des vannes de contrôle à trois voies , indiquées sur le tableau 5.1 et l'abaque du figure 5.9 . (Ref : 9)

Type	DN	K _{vs}	P _n	P _m	Resistance pour 0 _{amb} = 20°C		T _p	P _v max	
					T3P..	T3P.. G		(kP _a)	(bar)
	[mm]	(m ³ /h)	(W)	(W)	(Ω)	(Ω)	(min)	(kP _a)	(bar)
T3P15(G2)	15	3	10	5	50	4700	8...14	500	5
T3P20(G2)	20	5	10	5	50	4700	8...14	300	3
T3P25(G2)	25	8	10	5	50	4700	8...14	300	3
T3P32(G2)	32	12	10	5	50	4700	8...14	300	3
T3P40(G2)	40	20	10	5	50	4700	8...14	300	3
T3P50	50	30	18	10	24,5	-	19..20	200	2
T3P65	65	50	18	10	24,5	-	10..20	200	2

Tableau 5.1

Procedés de choix d'une vanne :

Pour choisir une vanne à chaque élément de l'installation , on doit calculer le debit nominal d'eau Q (m³/h) et aussi connaitre la chute de pression ΔP_v au niveau de la vanne . De la figure 5.9 , on determine le type de vanne correspondant au point d'intersecion de Q et P_v , puis en rapportant le type de vanne trouvée au tableau ci-dessus . On aura les caracteristiques techniques de la vanne .

APPLICATIONS.

a) Vanne de contrôle alimentant le réchauffeur primaire .

- Débit nominal de l'eau :

Du formule (5.1) on a

$$Q = \frac{100000}{20 \cdot 1000} = 5 \text{ m}^3/\text{h}$$

- Chute de pression : $\Delta P_v = 0,2 \text{ bar}$

Connaissant Q et ΔP_v et en suivant les procedés mentionnés ci-dessus , on obtient alors la vanne du type T3P32(G2) .

b) Vanne de contrôle alimentant le réchauffeur secondaire .

- Débit nominal de l'eau :

Du formule (5.1) on a

$$Q = \frac{60000}{20 \cdot 1000} = 3 \text{ m}^3/\text{h}$$

- La chute de pression : $\Delta P_v = 0,2 \text{ bar}$

Connaissant Q et P_v et en suivant les procedés mentionnés ci-dessus , on obtient alors la vanne du type T3P25(G2) .

c) Vanne de contrôle alimentant le refroidisseur .

- Débit nominal de l'eau :

- Du formule (5.1) on a

$$Q = \frac{150000}{20 \cdot 1000} = 7,5 \text{ m}^3/\text{h}$$

- La chute de pression : $\Delta P_v = 0,2 \text{ bar}$

De la même manière que précédemment , on aura alors la vanne du type T3P40(G2).

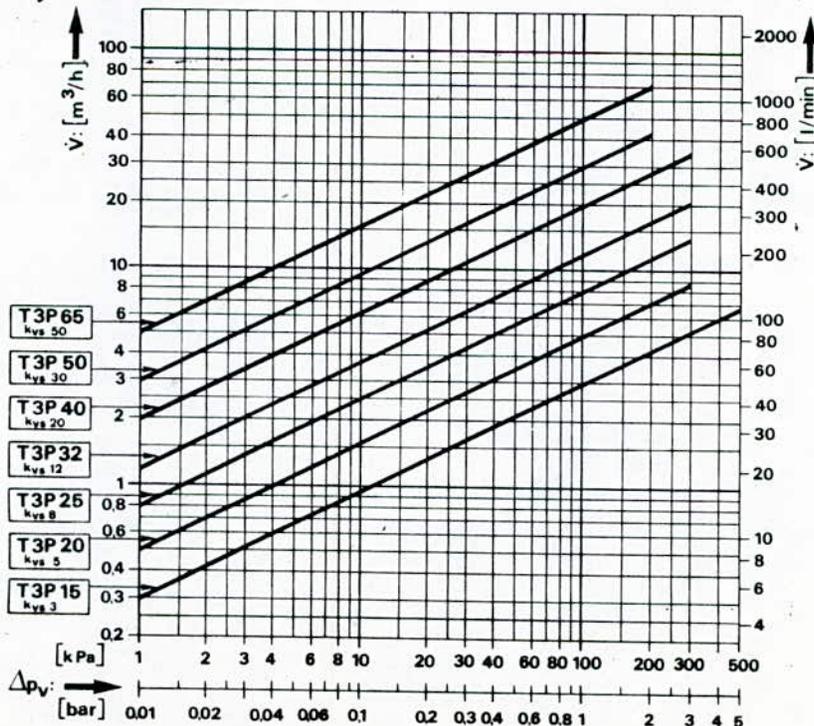


Figure 5.9

5.3.3 Servomoteurs :

Dans notre cas , on choisira des servomoteurs pas à pas , car ça s'adaptent bien au commande numerique et aussi au commande avec régulateur analogique pas à pas . .

Il existe différents type de servomoteurs pas à pas . Citons par exemple : les moteurs électriques pas à pas et les servomoteurs electropneumatiques pas à pas .

Ce qui nous interesse le plus c'est le second pour les raisons suivantes :

- ils peuvent être alimentés par des réseaux industriels d'air comprimé sans nécessité de la stabilisation de pression ainsi que deshuilage .
- le rapport de la masse m sur le couple $C : m(Kg)/C(N.m)$ est plus favorable que pour les servomoteurs purement électriques .
- le temps de déplacement T_m est variable de 1mm à 1h . Ce qui permet d'adapter mieux le système de commande à nos processus caracterisé par des propriétés dynamiques differentes .
- Son étage de commande n'est pas complexe . Un simple générateur d'impulsion suffit dans le cas de commande avec du regulateur classique .
- enfin , il n'est pas trop coûteux .

Caractéristiques techniques du servomoteur électropneumatique pas à pas .

- Couple C (Kgm) : 2 — 10
- T_m : temps nécessaire pour déplacer le servomoteur de la position correspondant à la fermeture jusqu'à l'ouverture complète . Il est réglable de manière continu par le choix de période d'impulsions .
- n : nombre de pas pour effectuer le changement de la position du servomoteur de 0 à 100 % .
- T_j : temps d'impulsion .

$$T_m = T_j \cdot n$$

Dans notre cas , $T_m = 100sec$ — $6000sec$

$$T_j = 1$$
 — $60sec$

$$n = 100$$

5.3.4 Régulateurs classiques :

5.3.4.1 Etudes théoriques :

Critères de choix .

Le choix d'un régulateur impose un ou plusieurs critères qui soit si possible , simple à utiliser et d'autre part , compatible avec la technologie

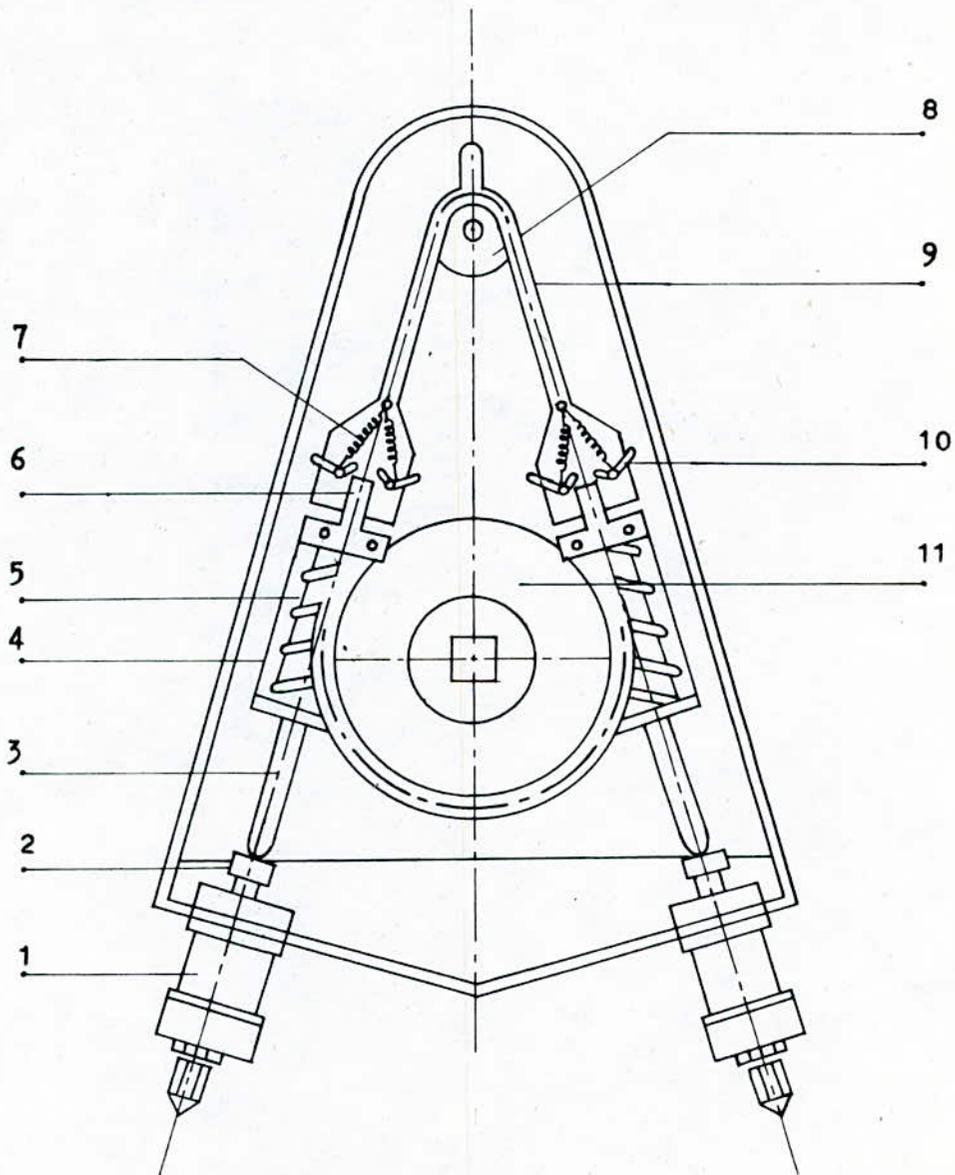


Figure 5.10 : Schéma d'un servomoteur pas à pas électropneumatique

analogique classique . Nous allons donc admettre deux critères de réglage que nous appellerons l'un idéal et l'autre parfait .

Critère idéal :

La régulation est dite idéale si :
$$G(p) = \frac{\lambda}{T_p} \cdot \frac{1}{H_R(p)} \quad (1)$$

D'après (1) $G(p) \cdot H_R(p) = \frac{\lambda}{T_p}$

donc on aura les schémas blocs équivalents suivants :

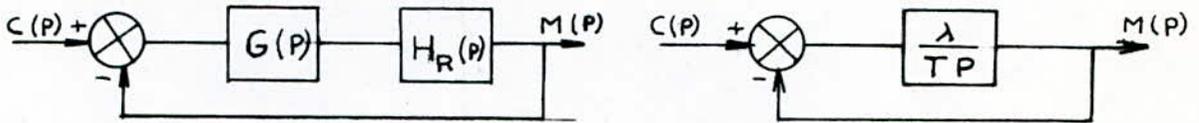


Figure 5.11

$$\text{Soit : } F^T = \frac{M(p)}{C(p)} = \frac{\frac{\lambda}{T_p}}{1 + \frac{\lambda}{T_p}} = \frac{1}{\frac{T_p}{\lambda} + 1}$$

Si $C(p) = u$, et $M(p) = u \cdot \frac{1}{\frac{T_p}{\lambda} + 1}$, soit : $L^{-1}M(p) = u(1 - e^{-\frac{\lambda}{T_p} t})$

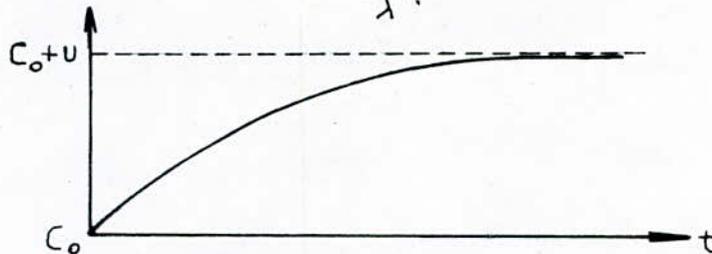


Figure 5.12 : Réponse à l'echelon u

Cette reponse est dite idéale .

On peut diminuer le regime transitoire en augmentant λ sans limite de stabilité . On dira que la stabilité est absolue et le système bouclé aperiodique (dénominateur de F^T à racines réelles négatives) . En resumé , on dira qu'une régulation est idéale si :

- la stabilité est absolue
- la fonction de transfert est aperiodique .

Critère parfait :

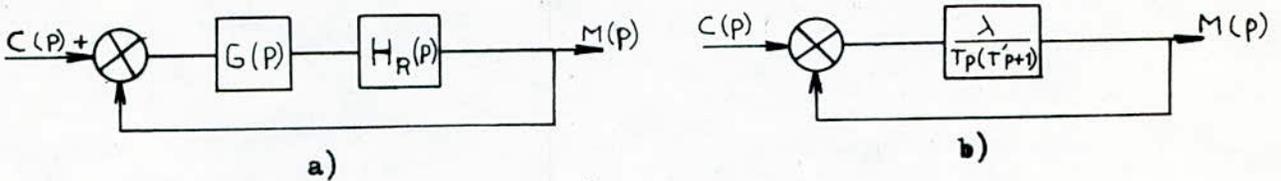
La régulation est dite parfaite si :
$$G(p) = \frac{\lambda}{T_p} \cdot \frac{1}{(T'_p + 1)} \cdot \frac{1}{H_R(p)} \quad (2)$$

D'après (2) , on peut écrire

$$G(p)H(p) = \frac{\lambda}{T_p} \cdot \frac{1}{(T'_p + 1)}$$

et les fonctions de transfert des schémas fonctionnels des figures sont identiques .

Figure 5.13



$$FT = \frac{M(p)}{C(p)} = \frac{\frac{\lambda}{T_p (T'_p + 1)}}{1 + \frac{\lambda}{T_p (T'_p + 1)}} = \frac{\lambda}{T' T_p + T_p + \lambda}$$

Donnons un échelon unité sur C(p) , soit C(p) = u

$$M(p) = u \cdot \frac{\lambda}{T' T_p + T_p + \lambda}$$

Deux types de réponse peuvent être créés (figure 5.13) suivant le signe du discriminant Δ du dénominateur . Quant à la stabilité , elle sera absolue puisque leur partie réelle α est négative ($\alpha = -\frac{1}{T'}$)

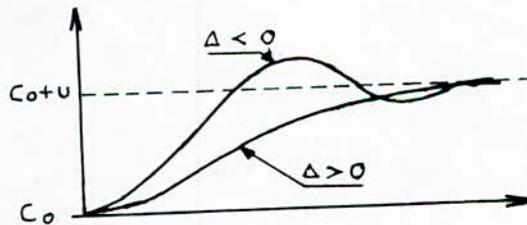


Figure 5.14

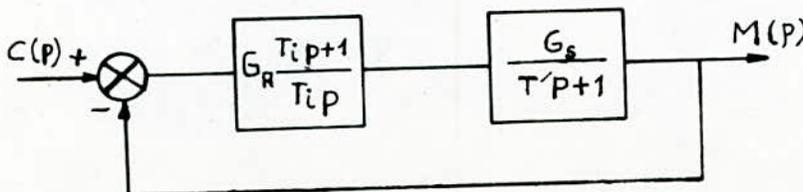
Premier type $\Delta > 0$

Soit $T'^2 - 4\lambda T' T > 0 \rightarrow$ Système aperiodique .

Deuxième type $\Delta < 0$

soit $T'^2 - 4\lambda T' T < 0 \rightarrow$ Système pseudo-periodique .

Régulation P I d' un système de premier ordre .



Ecrivons la fonction de transfert du système de la figure 5.14

$$\frac{M(p)}{C(p)} = \frac{\frac{G_B (T_i p + 1)}{T_i p (T' p + 1)}}{1 + \frac{G_B (T_i p + 1)}{T p (T' p + 1)}} \quad (1)'$$

Reduisons (1)' au même dénominateur :

$$\frac{M(p)}{C(p)} = \frac{G_B (T_i p + 1)}{T_i T' p + T_i (1 + G_B) p + G_B} \quad (2)'$$

Le dénominateur $D(p)$ est du second degré en p . Il y a donc deux réponses possibles suivant le signe du discriminant Δ avec $\Delta = T_i^2 (1 + G_B)^2 - 4 T T' G_B$

- Si $\Delta > 0$: réponse aperiodique .

- Si $\Delta < 0$: réponse pseudo-periodique puisque la partie réelle des racines est négative .

Soit aussi $T_i > 4 T' \frac{G_B}{(1 + G_B)^2} \longrightarrow$ réponse aperiodique

$T_i < 4 T' \frac{G_B}{(1 + G_B)^2} \longrightarrow$ réponse pseudo-periodique

Traçons le graphe de

$$T_i = 4 T' \frac{G_B}{(1 + G_B)^2}$$

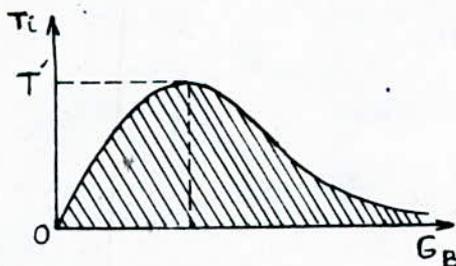


Figure 5.16

La zone hachurée correspond à $\Delta < 0$, soit un régime pseudo-periodique .

Nous constatons que la plus grande valeur de T_i donnant une solution aperiodique indépendante de G_B est T' . Remplaçons donc T_i par T' dans la fonction de transfert (1)' .

$$\frac{M(p)}{C(p)} = \frac{\frac{G_B}{T p}}{1 + \frac{G_B}{T' p}} = \frac{1}{\frac{T'}{G_B} p + 1}$$

La fonction de transfert de la régulation est du premier ordre et la stabilité est absolue (ne dépend pas de G_B).

La réponse à l'échelon unité est donné par la figure 4. . On remarquera que l'on retrouve le résultat du critère idéal .

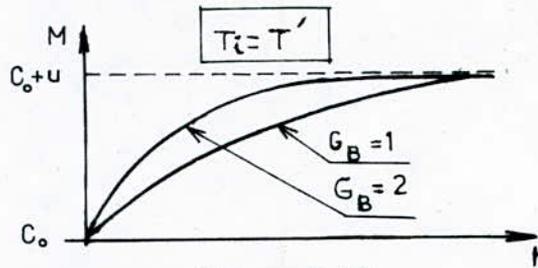


Figure 5.17

Régulation P I d'un système stable du premier ordre + retard pur .

- Schéma fonctionnel et équation générale.

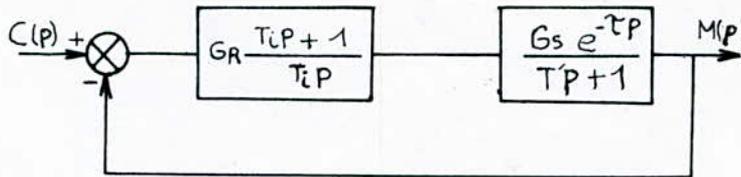


Fig 5.18

Nous avons démontré dans l'étude précédente , que nous avons intérêt à poser $T_i = T'$. Dans ces conditions , la fonction de transfert devient :

$$F T = \frac{\frac{G_B}{T' p} e^{-\tau p}}{1 + \frac{G_B e^{-\tau p}}{T' p}} \quad \text{avec } G_B = G_R G_S$$

- Etude de la stabilité .

Comme il est impossible de calculer les racines du dénominateur , nous allons appliquer le critère du revers (critère fréquentielle) pour déterminer la condition de stabilité de la régulation .

Soit $D(p) = 1 + Z(p)$ avec $Z(p) = \frac{G_B e^{-\tau p}}{T' p}$

Traçons le lieu de transfert de $Z(p)$.

$$Z(p) \rightarrow Z(j\omega) = \frac{G_B e^{-j\omega\tau}}{j\omega T'}$$

$$\text{Module } R = \frac{G_B}{w T'} ; \quad \text{Déphasage } \varphi = -w\tau - \frac{\pi}{2}$$

le lieu est représenté par la figure 5.18

Calculons la pulsation qui crée un déphasage de $-\pi$

$$-\pi = -w_0\tau - \frac{\pi}{2}$$

$$w_0\tau = \frac{\pi}{2}$$

$$\boxed{w_0 = \frac{\pi}{2\tau}} \quad (2)''$$

Calculons maintenant le module $R(w_0)$

$$R = \frac{G_B}{w T'} \quad , \text{ en remplaçant } w_0 \text{ par } (2)''$$

$$R = \frac{G_B}{\frac{\pi}{2} T'}$$

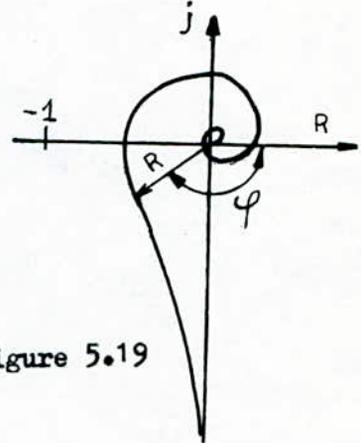


Figure 5.19

Si nous voulons assurer une marge de gain de 0,5, il faut que $R \leq \frac{1}{2}$

$$\text{d'où } \boxed{G_B \leq \frac{\pi}{4} \cdot \frac{T'}{\tau}} \quad (3)''$$

En pratique, les régulateurs sont souvent gradués en bande proportionnelle (B_p) ; sachant que $G_B = G_R \cdot G_s$ et $B_p = \frac{1}{G_R}$, la formule (3)'' se transforme en

$$B_p \geq \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\tau}{T'} \cdot G_s$$

$$\text{d'où } \boxed{B_p \geq \frac{4}{3} \cdot \frac{\tau}{T'} G_s} \quad (*)$$

$$\boxed{T_i \geq T'}$$

5.3.4.2 Applications :

Pour tous les éléments, on choisit des régulateurs P I (Proportionnelle-Intégrale). Ceux-ci sont largement suffisants puisque le processus est lent et ne présente pas des oscillations grande.

- Rechauffeur primaire et rechauffeur secondaire.

Ils ont la même fonction de transfert.

$$H_{Rp}(p) = H_{Rs}(p) = \frac{0,835 e^{-15p}}{1 + 29p}$$

D'après (*) :

$$B_p \geq \frac{4}{3} \cdot \frac{15}{29} \cdot 0,835 = 57 \%$$

$$T_i \geq 29 \text{sec}$$

- Laveur .

$$H(p) = \frac{0,65 e^{-15p}}{1 + 25p}$$

D'après (*) :

$$B_p \geq \frac{4}{3} \cdot \frac{15}{25} \cdot 0,65 = 52 \%$$

$$T_i \geq 25 \text{sec}$$

- Chambre de melange I

$$H_I(p) = \frac{0,05 e^{-4p}}{1 + 15p}$$

D'après (*) :

$$B_p \geq \frac{4}{3} \cdot \frac{4}{15} \cdot 0,05 = 0,02 = 2 \%$$

$$T_i \geq 15 \text{sec}$$

- Chambre de melange II

$$H(p) = \frac{0,1 e^{-4p}}{1 + 15p}$$

D'après (*) :

$$B_p \geq \frac{4}{3} \cdot \frac{4}{15} \cdot 0,1 = 3,5 \%$$

$$T_i \geq 15 \text{sec}$$

5.3.5 Calcul théorique des regulateurs numerique de temperature et de l'humidité :

5.3.5.1 Modelisation :

Notre but est aussi de faire la stabilisation de la temperature et de l'humidité dans la salle des conferences .

Nous pouvons modeliser la salle des conferences comme le shéma ci-dessous :

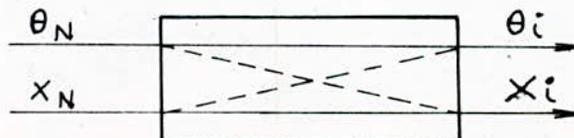


Figure 5.20

Variables d'entrée : θ_N : température de soufflage
 X_N : humidité de soufflage

Variables de sortie : θ_i : température ambiante de la salle
 X_i : humidité de la salle

A simple vue , on peut remarquer que le système est multivariable . Il y a une interaction entre la température et l'humidité , mais celle-ci n'est pas très importante . Nous pouvons alors simplifier l'étude en séparant la boucle de température et la boucle d'humidité .

5.3.5.2 Calcul du régulateur numérique de température :

Ce régulateur sert à stabiliser la température au niveau de la salle. (Nous ne considérons que la fonction de transfert de la salle des conférences car sa constante de temps est très grande par rapport aux autres éléments constituant le processus).

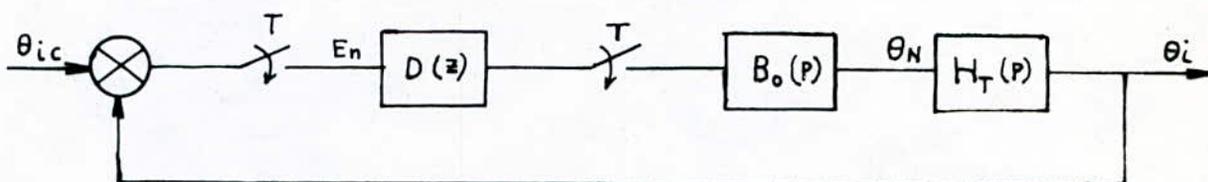


Figure 5.21 : Boucle de régulation numérique de la température .

θ_{ic} : consigne

θ_i : valeur mesurée de la température

$D(z)$: correcteur numérique de température

$H_T(p)$: fonction de transfert de la salle des conférences

$$H_T(p) = \frac{0,26(1 + 29p) e^{-121p}}{990p + 1}$$

$$G_T(p) = B_o(p) \cdot H_T(p) \quad \text{avec} \quad B_o(p) = \frac{1 - e^{-Tp}}{p}$$

$$G_T(p) = \left(\frac{1 - e^{-Tp}}{p} \right) \left(\frac{0,26 + 7,54p}{990p + 1} e^{-121p} \right)$$

Calcul de la transformée en z de $G_T(p)$:

$$G(z) = Z (H_T(p) \cdot B_o(p))$$

$$G(z) = Z \left(\frac{(1 - e^{-Tp})(0,26 + 7,54p)}{p(990p + 1)} e^{-121p} \right)$$

$$= (1 - z^{-1}) Z \left(\frac{(0,26 + 7,54p)e^{-121p}}{p(990p + 1)} \right)$$

$$= (1 - z^{-1}) z^{-m} F(z, \beta)$$

$$= (1 - z^{-1}) z^{-m} Z_Y(F(p)) \quad \text{avec } F(p) = \frac{0,26 + 7,54p}{p(1 + 990p)}$$

$$T_t = mT - \beta T \quad ; \quad T_t : \text{retard pur}$$

$$0 \leq \beta < 1$$

T : periode d'échantillonnage

m : nombre entier

On prend la periode d'échantillonnage $T = 480$ sec , car notre processus est lent et ne presente pas des oscillations à grande fréquence .

$$T_t = 121 \text{ sec} = (m - \beta) 480 .$$

Pour avoir un β qui appartient dans l'interval $[0, 1[$, on peut choisir $m = 1$

De celà , on trouve $\beta = 0,75$

$$\text{En decomposant } F(p) , \text{ on aura } F(p) = \frac{0,26}{p} - \frac{249,86}{1 + 990p}$$

$$F(p) = \frac{0,26}{p} - \frac{0,252}{p + 1,01 \cdot 10^{-3}}$$

De l'expression ci-dessus , on calcule $Z (F(p))$

$$Z (F(p)) = Z \left(\frac{0,26}{p} - \frac{0,252}{p + 1,01 \cdot 10^{-3}} \right)$$

$$= \frac{0,26z}{z-1} - \frac{0,252ze^{-1,0110^{-3}T}}{z - e^{-1,01 \cdot 10^{-3} \cdot T}}$$

$$= \frac{0,26z}{z-1} - \frac{0,17z}{z-0,61}$$

$$\text{d'où } G_T(z) = \left(\frac{z-1}{z} \right) z^{-1} \left(\frac{0,26z}{z-1} - \frac{0,17z}{z-0,61} \right)$$

$$G(z) = \frac{0,09z + 0,01}{z(z - 0,61)}$$

Calcul du correcteur D(z) :

La fonction de transfert en boucle fermée prend la forme suivante :

$$\frac{\theta_i(z)}{\theta_{ic}(z)} = \frac{D(z) \cdot G_T(z)}{1 + D(z) \cdot G_T(z)} \quad (**)$$

L'équation caractéristique du système bouclé s'écrit alors :

$$E C = 1 + D(z) \frac{0,09(z + 0,11)}{z(z - 0,61)}$$

On pose $D(z) = \frac{K_C z(z - 0,61)}{(z - 1)(z + 0,11)}$ (Ref : 7)

Page - IV.33 -

Ce qui est permis, puisque les pôles et les zéro de $G_T(z)$ sont tous stables, il vient $E C = z + (0,09K_C - 1)$.

On détermine le K_C nécessaire pour que le comportement du système bouclé de l'équation (**) soit voisin de celui du système ayant pour équation caractéristique : $E C$ désirée = $z - \alpha$ (méthode des pôles dominants)

On aura alors $K_C = \frac{1 - \alpha}{0,09}$

Stabilité

Nous utiliserons la méthode de lieu des racines, La méthode consiste à tracer sur le plan des z les racines de l'équation caractéristique en fonction de K_C , et de définir l'intervalle de K_C qui correspondre aux racines se trouvant à l'intérieur du cercle du centre 0 et de rayon $R = 1$.

L'équation caractéristique s'écrit de la forme suivante :

$$E C = 1 + \frac{0,09K_C}{z - 1} = z + (0,09K_C - 1)$$

Le lieu des racines est tracé comme ci-dessous :

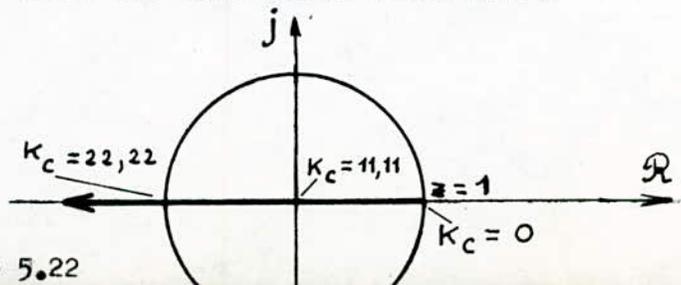


Figure 5.22

On aura stabilité pour $0 < K_C < 22,22$.

5.3.5.2 Calcul du régulateur numérique de l'humidité :

Comme pour le régulateur numérique de température , il sert à stabiliser l'humidité ambiante de la salle des conférences .

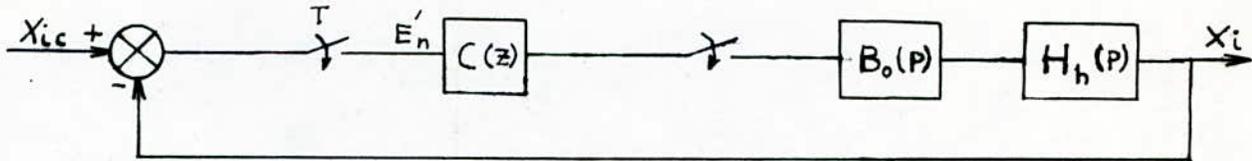


Figure 5.23 : Boucle de régulation numérique de l'humidité .

X_{ic} : Consigne

X_i : humidité mesurée

$C(z)$: correcteur de l'humidité

$H_h(z)$: fonction de transfert de la salle , $H_h(p) = \frac{1,4}{1237p + 1}$

$B_o(p) = \frac{1 - e^{-Tp}}{p}$ (bloquer d'ordre zéro)

Calcul de la transformée en z de $G_h(p)$:

$$G_h(z) = \overline{B_o H_h}(z)$$

$$G_h(z) = Z \left(\frac{(1 - e^{-Tp})1,4}{p(1 + 1237p)} \right) = \frac{z-1}{z} \cdot Z \left(\frac{1,4}{p(1 + 1237p)} \right)$$

En décomposant $F_h(p)$ en éléments simples , on aura

$$F_h(p) = \frac{1,4}{p} - \frac{1,4}{p + 0,81 \cdot 10^{-3}}$$

$$\begin{aligned} Z(F_h(p)) &= \frac{1,4z}{z-1} - \frac{1,4z}{z - e^{-0,81 \cdot 10^{-3} \cdot 480}} \\ &= \frac{1,4z}{z-1} - \frac{1,4z}{z-0,68} \end{aligned}$$

$$\text{d'où } G_h(z) = \frac{z-1}{z} \left(\frac{1,4z}{z-1} - \frac{1,4z}{z-0,68} \right)$$

$$G_h(z) = \frac{0,46}{z-0,68}$$

$T = 480 \text{ sec}$ (période d'échantillonnage)

Calcul du correcteur C(z) :

Pour l'humidité , nous avons choisi un correcteur P I . En general , il s'écrit sous la forme : $C(z) = K_1 + \frac{K_2 z}{z - 1}$

mais pour raisons de commodité , nous allons travailler avec l'expression équivalente : $C(z) = \frac{K'_C (z - A)}{z - 1}$

Ecrivons la transmittance globale du boucle d'humidité :

$$G(z) = \frac{K'_C \cdot \frac{(z - A)}{(z - 1)} \cdot \frac{0,46}{(z - 0,67)}}{1 + K'_C \frac{(z - A)}{(z - 1)} \cdot \frac{0,46}{(z - 0,67)}}$$

Le pôle 0,67 étant stable , on peut l'éliminer en faisant $A = 0,67$.

On obtient $\frac{X_i(z)}{X(z)} = \frac{0,46 K'_C}{z - (1 - 0,46 K'_C)}$ (***)

$$C(z) = \frac{K'_C (z - 0,67)}{z - 1}$$

Calcul de K'_C :

On détermine le K'_C nécessaire pour que le comportement du système bouclé de l'équation (***) soit voisin de celui du système ayant pour équation caractéristique : EC désirée = $z - \delta$ (méthode des pôles dominants)

d'où $K'_C = \frac{1 - \delta}{0,46}$ (Ref : 7)

Stabilité :

Nous allons étudier la stabilité avec la méthode du lieu des racines .

On a comme équation caractéristique : $EC = 1 + \frac{K'_C}{z - 1} = z - (1 - 0,46 K'_C)$

Le lieu des racines est présenté comme ci-dessous :

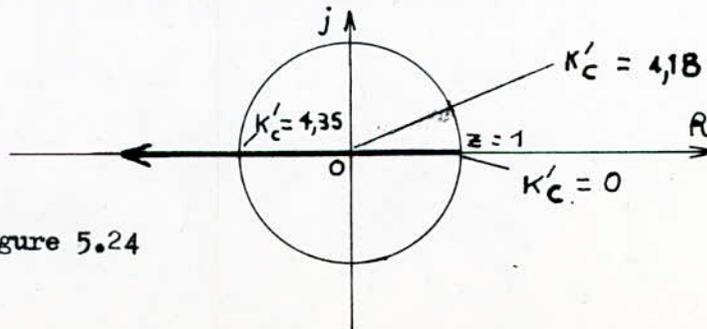


Figure 5.24

On aura stabilité pour $0 < K'_C < 4,35$

5.3.6 Couplage du servomoteur avec le régulateur analogique et les éléments de commande directe :

La figure 5.25 nous montre ce couplage .

Lors du passage d'une zone à une autre , le calculateur commande directement le servomoteur : il coupe d'abord l'alimentation du régulateur analogique par l'intermédiaire du relais K_1 . Puis ferme l'un des interrupteurs I_2 , I_3 à l'aide du relais K_2 ou K_3 selon que le programme veut une avance ou un recule du servomoteur . Ensuite , le relais K_4 ouvre périodiquement le contacteur I_4 en fonction des impulsions qu'il a reçu .

Pour s'assurer que le servomoteur a effectué exactement les pas qu'on lui a demandé , on prévoit un circuit de retour, constitué d'un capteur de position d'un compteur/decompteur , vers le calculateur .

Quand la zone de fonctionnement est atteinte , I_1 et I_4 sont fermés tandis que I_2 et I_3 ouverts . Le régulateur analogique actionne le servomoteur de manière pas à pas . Ceci étant effectué par l'intermédiaire de l'impulsateur J .

5.3.7 Mise au point du consigne d'un régulateur analogique par le calculateur :

Le principe d'affichage de consigne (Figure 5.26) est le suivant :

Le calculateur envoie la valeur de température désirée vers la boîte (1) , celle-ci est constituée d'une mémoire tampon et des résistances .

La mémoire tampon sert à mémoriser la consigne affichée par le calculateur et aussi de faire la combinaison en série des résistances correspondantes .

Le tableau de correspondance résistances/températures est présenté comme ci-dessous :

Résistances (Ω)	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
Températures ($^{\circ}\text{C}$)	1	2	4	8	16

Exemple :

On veut la consigne 20°C . Pour avoir ça , on doit donc mettre en série les résistances R_3 et R_5 . Il faut alors court-circuiter R_1 , R_2 et R_4

Remarque : La présence du mémoire tampon est aussi importante , car au moment où le calculateur tombe en panne , elle assure la maintenance de consigne du régulateur analogique . Par conséquent , il n'y a pas risque d'arrêt du régula-

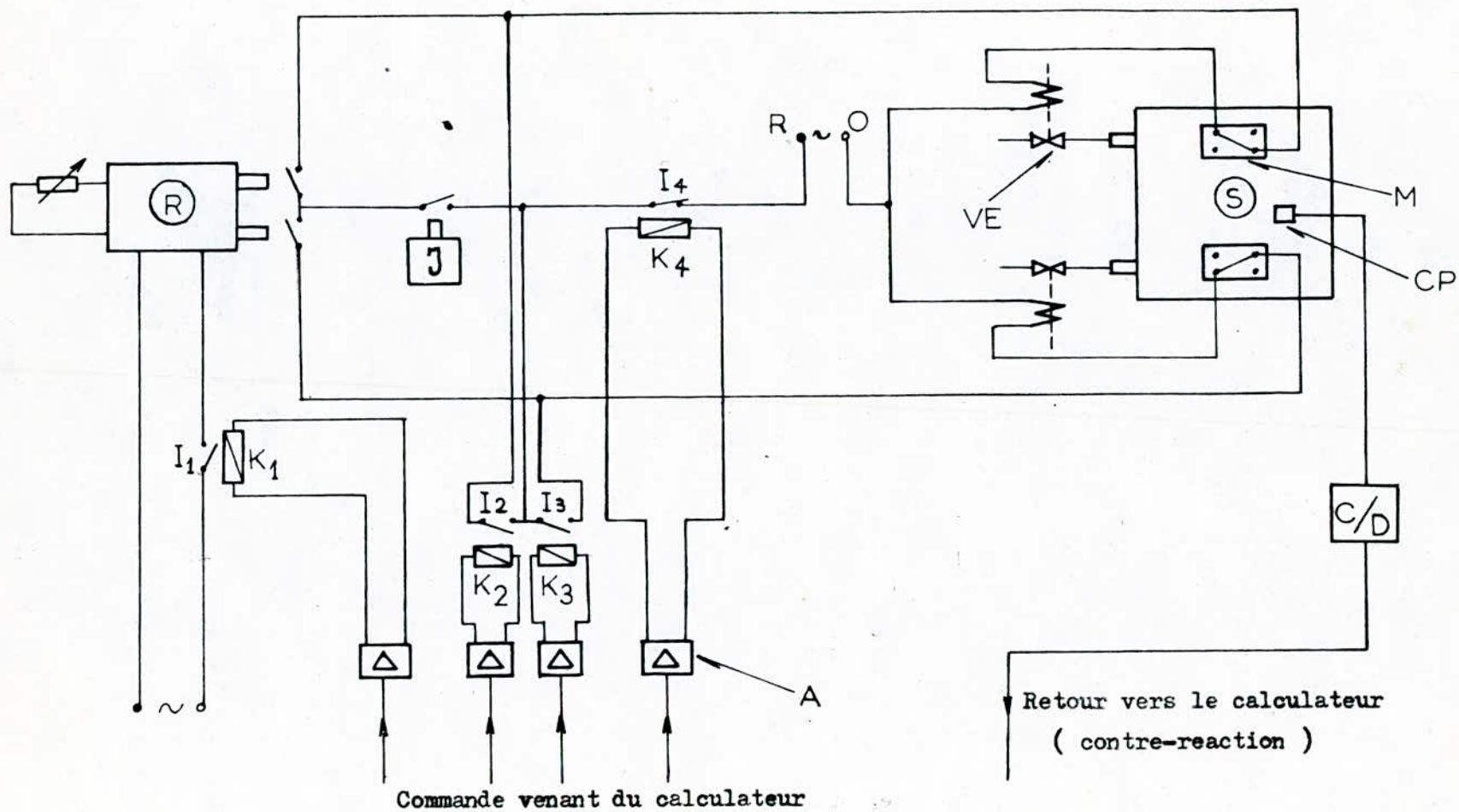


Figure 5.25 : Schéma du couplage du servomoteur avec le régulateur analogique et les éléments de commande directe .

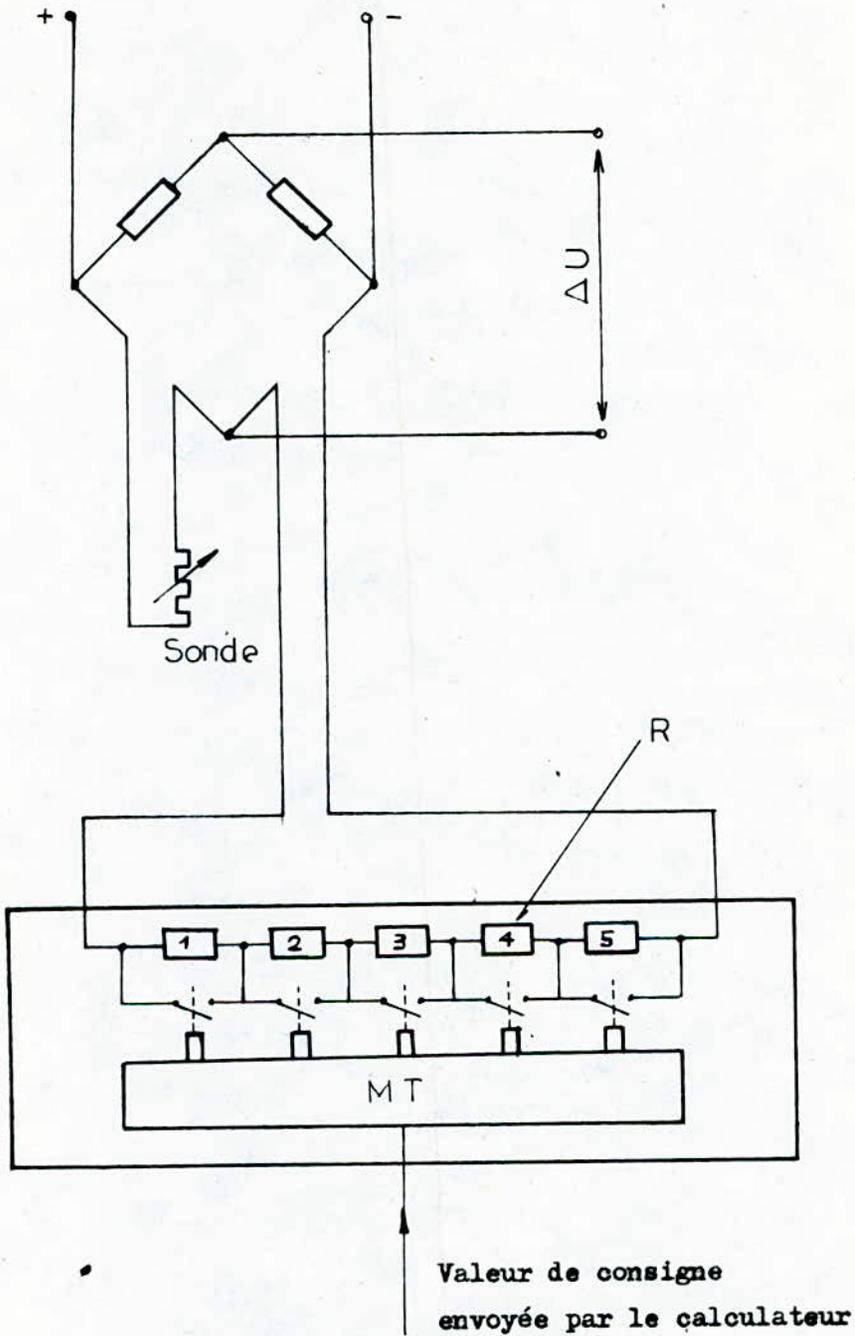


Figure 5.26 : Schéma de principe de mise au point de consigne par le calculateur .

tion des paramètres de l'air .

6. CALCULS DES CONSIGNES DES REGULATEURS CLASSIQUES POUR CHAQUE ZONE DE FONCTIONNEMENT

Pour effectuer ces calculs , nous allons suivre les conditions de traitement d'air définie pour chaque zone au chapitre 2 paragraphe 2.2.2 . Nous utiliserons aussi les formules de paramètres de l'air (Chapitre 1 , paragraphe 1.2.1).
NB : Pour les notations et les indices ; Voir " tableau des notations utilisées "

- Les grandeurs connus sont donnés à partir des mesures ou à partir du regulateur numérique .
- des grandeurs ont été fixés pour des raisons hygiéniques ou pour simplification des calculs .

Zone I :

Dans cette zone , on fixe le point M_1 en tenant compte des conditions d'hygiène imposées par les services sanitaires (pourcentage de U 90 % et pourcentage de Z 10 % du melange M_1) .

Les équations mises en jeu sont les suivantes :

$$\theta_{M_1} = \frac{\theta_z + 9\theta_u}{10} \quad ; \quad X_{M_1} = \frac{X_z + 9X_u}{10}$$

$$i_{M_1} = (0,24 + 0,477X_{M_1}) \theta_{M_1} + 594,7 X_{M_1}$$

$$i_R = (0,24 + 0,477 X_R) \theta_R + 594,7 X_R$$

$$\theta = 0,022 X^3 - 0,63 X^2 + 7,74 X - 20,27 \quad (\text{courbe de saturation approximée pour } X \text{ } 1,5 ; 15$$

$$i_{M_1} = i_R \quad ; \quad X_R = X_N \quad ; \quad X_{M_1} = X_{M_1}$$

Après avoir manipulé avec ces équations , nous obtenons les consignes ci-après :

$$\begin{aligned} \theta_{cM_1} &= \frac{i_R - 594,7 X_{M_1}}{0,24 + 0,477 X_{M_1}} \\ \theta_{cR} &= 0,02 X_N^3 - 0,63 X_N^2 + 7,74 X_N - 20,27 \\ \theta_{cM_3} &= \theta_N \end{aligned}$$

Grandeurs connues: θ_z , θ_u , X_N

Zone II :

Grandeurs connues : $\theta_u, X_N, \theta_z, \theta_N, X_z, X_u$

Grandeurs fixées : θ_{M_1}, X_{M_1}

Les équations mises en jeu sont les suivantes :

$$0_{M_1} = \frac{\theta_z + 9 \theta_u}{10} \quad ; \quad X_{M_1} = \frac{X_z + 9 X_u}{10}$$

$$\frac{i_{M_1} - i_{M_2}}{i_{M_1} - i_R} = \frac{X_{M_1} - X_{M_2}}{X_{M_1} - X_R}$$

$$\theta = 0,02 X^3 - 0,63 X^2 + 7,74 X - 20,27$$

$$i_{M_1} = 0,24 \theta_{M_1} + X_{M_1} (594,7 + 0,477 \theta_{M_1})$$

$$i_{M_2} = 0,24 \theta_{M_2} + X_{M_2} (594,7 + 0,477 \theta_{M_2})$$

$$i_R = 0,24 \theta_R + X_R (594,7 + 0,477 \theta_R)$$

$$i_{M_1} = i_R = i_{M_2} \quad ; \quad X_{M_2} = X_{M_3} = X_N$$

d'où :

$$i_{M_1} = 0,24 \theta_{M_1} + X_{M_1} (594,7 + 0,477 \theta_{M_1})$$

$$i_{M_1} = 0,24 \theta_{M_1} + X_N (594,7 + 0,477 \theta_{M_1})$$

$$i_{M_1} = 0,24 \theta_R + X_R (594,7 + 0,477 \theta_R)$$

Après avoir manipulé avec ces équations, nous obtenons les consignes ci-après :

θ_{cR} : deduite du système d'équations :

$$\begin{cases} i_M = 0,24 \theta_R + X_R (594,7 + 0,477 \theta_R) \\ \theta_R = 0,02 X_R^3 - 0,63 X_R^2 + 7,74 X_R - 20,27 \end{cases}$$

$X_{cM_2} = X_N \quad ; \quad \theta_{cM_3} = \theta_N$

Zone III :

Grandeurs connues : $\theta_z, X_z, \theta_u, X_u, \theta_N, X_N$

Les équations mises en jeu sont les suivantes :

$$\frac{i_u - i_{M_1}}{i_u - i_z} = \frac{X_u - X_{M_1}}{X_u - X_z}$$

$$i_N = i_{M_1} = 0,24 \theta_{M_1} + X_{M_1} (594,7 + 0,477 \theta_{M_1})$$

$$i_N = i_{M_2} = 0,24 \theta_N + X_N (594,7 + 0,477 \theta_N)$$

$$i_N = i_R = 0,24 \theta_R + X_R (594,7 + 0,477 \theta_R)$$

$$\theta = 0,02 X^3 - 0,63 X^2 + 7,74 X - 20,27$$

De ces équations, on obtient les consignes ci-après :

$$X_{cM_1} = X_u - \frac{(i_u - i_N)(X_u - X_z)}{(i_u - i_z)}$$

θ_{cR} = déduite du système d'équations

$$\begin{cases} i_{M_1} = 0,24 \theta_R + X_R (594,7 + 0,477 \theta_R) \\ \theta_R = 0,02 X_R^3 - 0,63 X_R^2 + 7,74 X_R - 20,27 \end{cases}$$

$$X_{cM_2} = X_N$$

Zone IV :

Grandeurs connues : $\theta_z = X_z = \theta_N = X_N$

Les équations mises en jeu sont les suivantes :

$$\frac{i_z - i_{M_1}}{i_z - i_R} = \frac{X_z - X_{M_1}}{X_z - X_R}$$

$$i_N = i_R = 0,24 \theta_R + X_R (594,7 + 0,477 \theta_R)$$

$$\theta = 0,02 X^3 - 0,63 X^2 + 7,74 X - 20,27$$

$$i_z = i_{M_1} = i_N = i_R$$

Consignes :

θ_{cR} : déduite du système d'équations

$$\begin{cases} i_{M_1} = 0,24 \theta_R + X_R (594,7 + 0,477 \theta_R) \\ \theta_R = 0,02 X_R^3 - 0,63 X_R^2 + 7,74 X_R - 20,27 \end{cases}$$

$$X_{cM_2} = X_N$$

Zone VI :

Grandeurs connues : $\theta_u, X_u, \theta_N, X_N, \theta_z, X_z$

Consignes :

$$X_{cm_1} = X_N$$

Zone VII :

Grandeurs connues : $\theta_u, X_u, \theta_N, X_N, \theta_z, X_z$

Consignes :

$$X_{cm_1} = X_N ; \theta_{cm_3} = \theta_N$$

Zone VIII :

Grandeurs connues : mêmes choses que pour la zone VII .

Consignes

$$X_{cm_1} = X_N ; \theta_{cm_3} = \theta_N$$

Zone IX :

Grandeurs connues : $\theta_z, X_z, \theta_N, X_N$

Grandeurs fixées : θ_R, X_R

Consignes :

$$\theta_{cR} ; X_{cm_2} = X_N ; \theta_{cm_3} = \theta_N$$

Zone X :

Grandeurs connues : $\theta_z, X_z, \theta_N, X_N$

Grandeurs fixées : θ_R, X_R

Consignes

$$\theta_{cR} ; X_{cm_2} = X_N$$

Zone XI :

Grandeurs connues : $\theta_u, X_u, \theta_z, X_z, \theta_N, X_N$

Grandeurs fixées : θ_R, X_R, i_R

Les équations mises en jeu sont les suivantes :

$$i_u = 0,24 \theta_u + X_u (594,7 + 0,477 \theta_u)$$

$$i_N = 0,24 \theta_N + X_N (594,7 + 0,477 \theta_N)$$

$$\frac{i_{M_1} - i_N}{i_{M_1} - i_R} = \frac{X_{M_1} - X_N}{X_{M_1} - X_R}$$

$$\frac{i_u - i_{M_1}}{i_u - i_z} = \frac{X_u - X_{M_1}}{X_u - X_z}$$

$$i_z = 0,24 \theta_z + X_z (594,7 + 0,477 \theta_z)$$

Consignes obtenues :

$$X_{cM_1} = \frac{X_u (i_u - i_z) (X_N - X_R) - (i_u (X_N - X_R) - i_R X_N + X_R i_N) (X_u - X_z)}{(i_N - i_R) (X_u - X_z) + (i_u - i_z) (X_N - X_R)}$$

$$\theta_{cR} ; X_{cM_2} = X_N$$

Zone XII :

Grandeurs connues : $\theta_z, X_z, \theta_u, X_u, \theta_N, X_N$

Grandeurs fixées : θ_R, X_R, i_R

Les équations mises en jeu sont les suivantes :

$$i_u = 0,24 \theta_u + X_u (594,7 + 0,477 \theta_u)$$

$$i_z = 0,24 \theta_z + X_z (594,7 + 0,477 \theta_z)$$

$$i_N = 0,24 \theta_N + X_N (594,7 + 0,477 \theta_N)$$

$$\frac{i_z - i_{M_1}}{i_z - i_u} = \frac{X_z - X_{M_1}}{X_z - X_u} ; \quad \frac{i_R - i_M}{i_R - i_{M_1}} = \frac{X_R - X_M}{X_R - X_{M_1}}$$

Consignes obtenues :

$$X_{cM_1} = \frac{(i_R - i_N) (X_z - X_u) X_R - ((i_z - i_u) X_z - i_z (X_z - X_u)) (X_R - X_N)}{(i_R - i_N) (X_z - X_u) - (i_z - i_u) (X_R - X_N)}$$

$$\theta_{cR} ; X_{cM_2} = X_N$$

Zone XIII :

Grandeurs connues : $\theta_u, X_u, \theta_N, X_N, \theta_z, X_z$

Grandeurs fixées : $\theta_R, X_R, i_R, \theta_{M_1}, X_{M_1}$

Les équations mises en jeu :

$$\theta_{M_1} = \frac{\theta_z + 9\theta_u}{10} ; \quad X = \frac{X_z + 9X_u}{10}$$

$$\frac{i_u - i_{M_1}}{i_u - i_z} = \frac{X_u - X_{M_1}}{X_u - X_z}$$

Consignes obtenues :

$$X_{cM_2} = X_N ; \quad \theta_{cM_3} = \theta_N ; \quad \theta_{cR}$$

7. ALGORITHMES DE COMMANDE ET ORGANIGRAMMES

7.1 Equations discrètes des regulateurs numeriques :

7.1.1 Regulateur numerique de temperature :

$$D(z) = \frac{\theta_N(z)}{E(z)} = \frac{K_C z (z - 0,61)}{(z - 1)(z + 0,11)}$$

de la même forme que :

$$D(z) = \frac{K_C z (z - \beta)}{(z - 1)(z - \alpha)}$$

L'écriture temporelle s'écrit de la manière suivante :

$$\theta_N(n) = (1 + \alpha) \theta_N(n-1) - \alpha \theta_N(n-2) + K_C E(n) - K_C \beta E(n-1) \quad (\text{Ref 47})$$

avec $E(n) = \theta_{ic}(n) - \theta_1(n)$

n : indique l'instant d'échantillonnage nT

Dans notre cas : $\beta = 0,61$; $\alpha = -0,11$

d'où

$$\theta_N(n) = 0,89 \theta_N(n-1) + 0,11 \theta_N(n-2) + K_C E(n) - 0,61 K_C E(n-1) \quad (7.1)$$

avec $E(n) = \theta_{ic}(n) - \theta_1(n)$

7.1.2 Regulateur numerique d'humidité :

$$C(z) = \frac{X_N(z)}{E(z)} = \frac{K (z - 0,67)}{z - 1}$$

il est de la même forme que : $C(z) = \frac{K_C (z - A)}{z - 1}$

L'écriture temporelle s'écrit donc de la manière suivante :

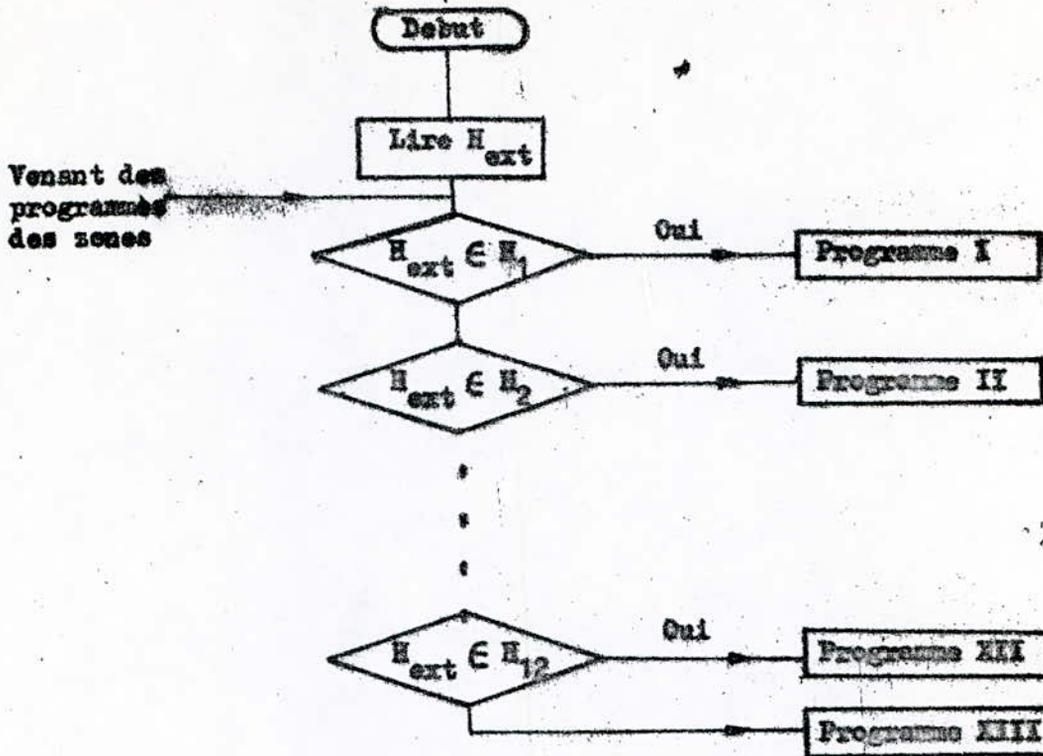
$$X_N(n) = X_N(n-1) + K_C E(n) - K_C A E(n-1)$$

Dans notre cas : $A = 0,67$. En remplaçant A par sa valeur , on aura :

$$X_N(n) = X_N(n-1) + K_C E(n) - 0,67 K_C E(n-1) \quad (7.2)$$

avec $E(n) = X_{ic}(n) - X_1(n)$

Les équations discrètes (7.1) et (7.2) , et les formules des consignes (chapitre 6) des regulateurs analogiques nous permettent de faire les organigrammes de commande .



Limitations des zones :

Zone I :

$$H_1 = \{ 1 / 1 \leq -2,4 \}$$

Zone II :

$$H_2 = \left\{ (1, X) / \begin{array}{l} -2,4 < 1 \leq 6,34 \\ X < 5,8 \end{array} \right\}$$

Zone III :

$$H_3 = \left\{ (1, X) / \begin{array}{l} 6,34 < 1 \leq 8,13 \\ X \leq 3,4 + 0,1 i \end{array} \right\}$$

Zone IV :

$$H_4 = \left\{ (1, \varphi, \theta) / \begin{array}{l} 8,13 < 1 \leq 10,76 \\ \theta > 21 \\ \varphi > 50 \end{array} \right\}$$

Zone V :

$$H_5 = \left\{ (0, \varphi, 1) / \begin{array}{l} 18 \leq \theta \leq 21 \\ 50 \leq \varphi \leq 60 \\ 8,13 < 1 \leq 10,76 \end{array} \right\}$$

Zone VI :

$$H_6 = \left\{ \begin{array}{l} (0, \varphi, i, X) / \\ \begin{array}{l} 12 < \theta < 18 \\ 60 < \varphi < 80 \\ 6,34 < i < 10,76 \\ 4,53 + 0,28 i < X \leq 4,14 + 0,47 i \end{array} \end{array} \right\}$$

Zone VII :

$$H_7 = \left\{ \begin{array}{l} (0, \varphi, i, X) / \\ \begin{array}{l} \theta \leq 12 \\ \varphi \leq 80 \\ 4,78 \leq i \leq 8 \quad ; \quad 5,8 < X \leq 8 \end{array} \end{array} \right\}$$

Zone VIII :

$$H_8 = \left\{ \begin{array}{l} (i, X) / \\ \begin{array}{l} 6,34 \leq i < 10,76 \\ X < 4,14 + 0,47 i \\ 8 < X \leq 9,5 \end{array} \end{array} \right\}$$

Zone IX :

$$H_9 = \left\{ \begin{array}{l} (i, X) / \\ \begin{array}{l} 8,97 \leq i \leq 12,56 \\ X < 4,14 + 0,47 i \\ 8 < X \leq 9,5 \end{array} \end{array} \right\}$$

Zone X :

$$H_{10} = \left\{ \begin{array}{l} (i, X) / \\ \begin{array}{l} 10,76 < i \leq 18,66 \\ X \leq 4,14 + 0,47 i \end{array} \end{array} \right\}$$

Zone XI :

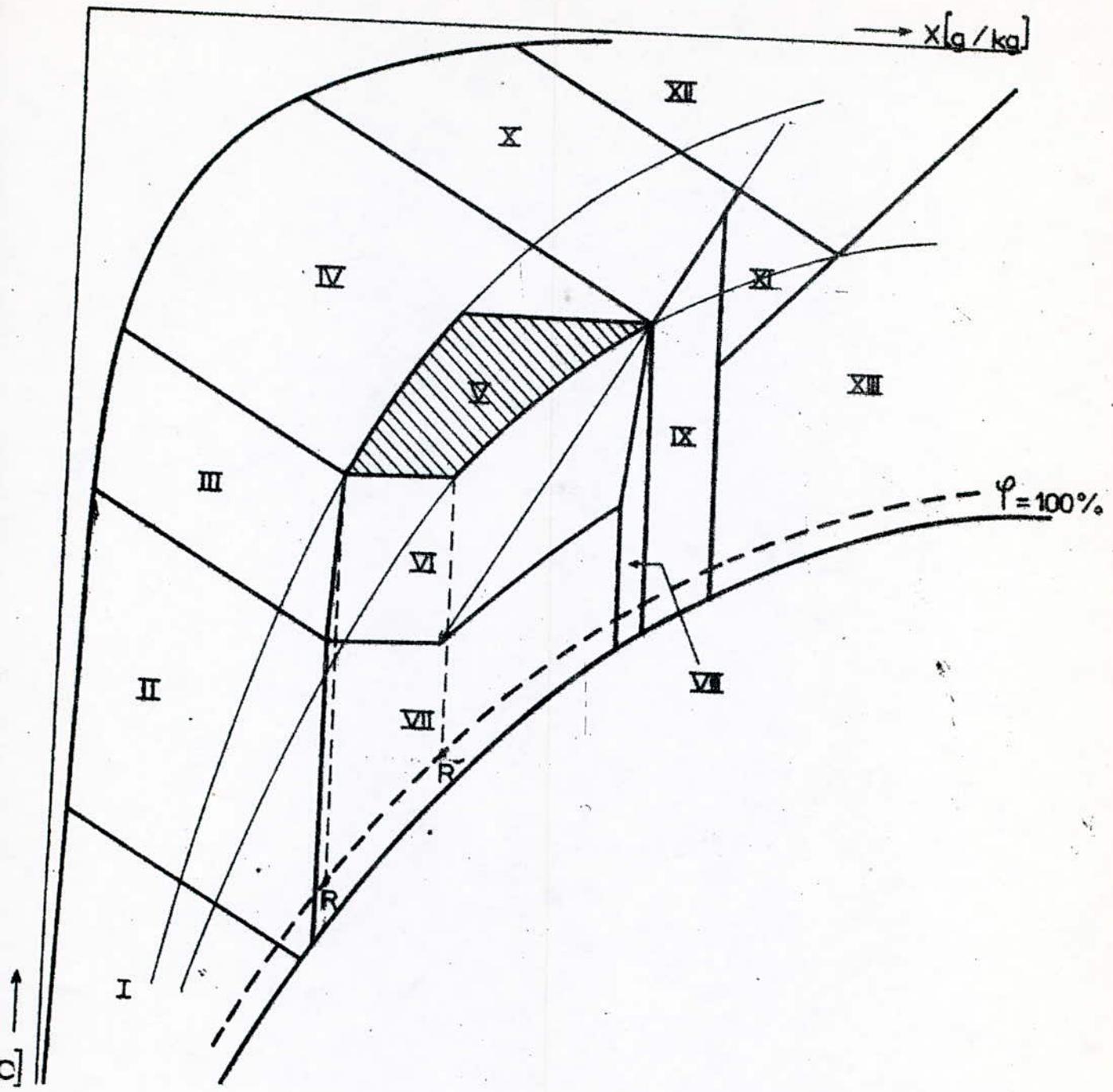
$$H_{11} = \left\{ \begin{array}{l} (i, X) / \\ \begin{array}{l} 10,76 < i < 18,66 \\ X > 10,7 \\ 4,14 + 0,47 i < X \leq 4,39 + 0,59 i \end{array} \end{array} \right\}$$

Zone XII :

$$H_{12} = \left\{ \begin{array}{l} (i, X) / \\ \begin{array}{l} i > 18,66 \\ X \leq 4,39 + 0,59 i \end{array} \end{array} \right\}$$

Zone XIII :

$$H = \left\{ \begin{array}{l} (i, X) / \\ \begin{array}{l} i > 18,66 \\ X > 4,39 + 0,59 i \\ X > 10,7 \end{array} \end{array} \right\}$$



Limitation des Zones sur le diagramme de Mollier

7.4 Organigramme de fonctionnement du système pour chaque zone :

Cet organigramme est composé de deux parties :

- Une partie qui prépare le système au fonctionnement à la zone considérée .
- une partie qui concerne la regulation .

Les équations principales de regulation sont :

$$E(n) = \theta_{ic}(n) - \theta_i(n)$$

$$\theta_N(n) = 0,89 \theta_N(n-1) + 0,11 \theta_N(n-2) + K_C E(n) - 0,61 K_C E(n-1)$$

$$E(n) = X_{ic}(n) - X_i(n)$$

$$X_N(n) = X_N(n-1) + K'_C E(n) - 0,67 K'_C E(n-1)$$

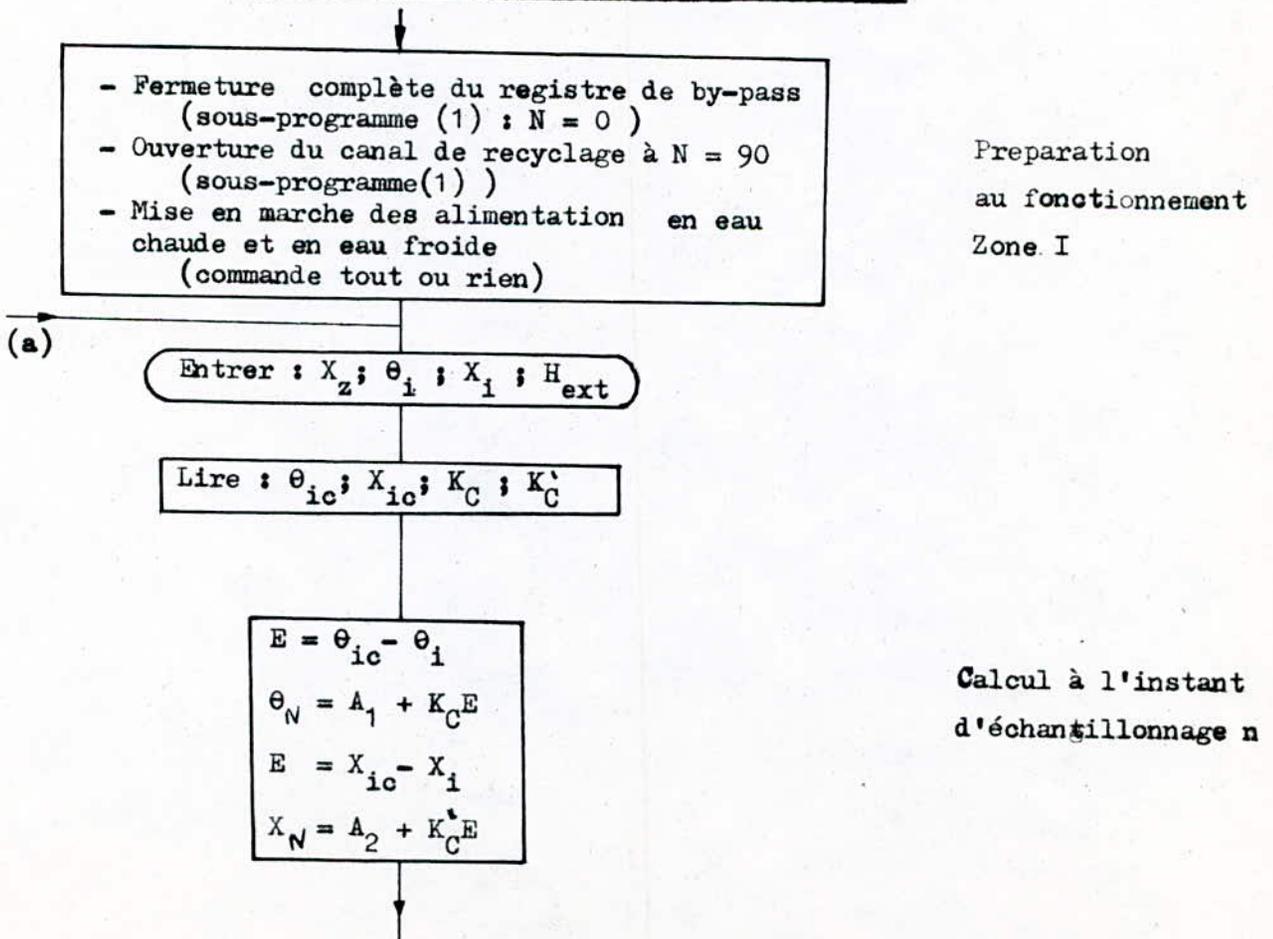
Pour raison de commodité et pour reduire au minimum le temps de calcul ,

posons :

$$A_1 = 0,89 \theta_N(n-1) + 0,11 \theta_N(n-2) - 0,61 K_C E(n-1)$$

$$A_2 = X_N(n-1) - 0,67 K'_C E(n-1)$$

Organigramme de fonctionnement " Zone I "



$$\theta_{cR} = 0,02 X_N^3 - 0,63 X_N^2 + 7,74 X_N - 20,27$$

$$i_R = (0,24 + 0,477 X_N) \theta_{cR} + X \cdot 594,7$$

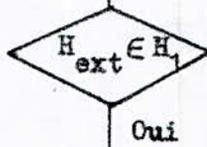
$$X_{M_1} = \frac{X_z + 9 X_1}{10}$$

$$\theta_{cM_1} = \frac{i_R - 594,7 X_{M_1}}{0,24 + 0,477 X_{M_1}}$$

$$\theta_{cM_3} = \theta_N$$

Calcul à l'instant
d'échantillonnage n
(suite)

Sortir : θ_{cM_1} ; θ_{cR} ; θ_{cM_3}



Programme de
changement de
zone

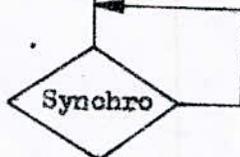
$$A_1 = 0,89 \theta_N - 0,61 K_C E + 0,11 E_1$$

$$A_2 = X_N - 0,67 K_C E$$

Préparation
calcul à n + 1

$$E_1 = E$$

Vieillessement
de θ_{Nn}



Attente

vers (a)

Organigramme de fonctionnement " Zone II "

- Fermeture complète de la vanne alimentant le
 rechauffeur primaire
 (sous-programme (1) ; N = 0)
- Mise en marche des alimentations en eau chaude
 et en eau froide .
 (commande tout ou rien)
- Ouverture du canal de recyclage à N = 90
 (sous-programme (1))

Entrer: θ_i ; X_i ; θ_z ; X_z ; H_{ext}

Lire : θ_{ic} ; X_{ic} ; K_C ; K_C

$$E = \theta_{ic} - \theta_i$$

$$\theta_N = A_1 + K_C E$$

$$E = X_{ic} - X_i$$

$$X_N = A_2 + K_C E$$

$$X_{M_1} = \frac{X_z + 9 X_i}{10}$$

$$\theta_{M_1} = \frac{\theta_z + 9 \theta_i}{10}$$

$$i_{M_1} = 0,24 \theta_{M_1} + X_{M_1} (594,7 + 0,477 \theta_{M_1})$$

θ : deduite du système d'équations

$$i_{M_1} = 0,24 \theta_R + X_R (594,7 + 0,477 \theta_R)$$

$$\theta_R = 0,02 X_R^3 + 0,63 X_R^2 + 7,74 X_R - 20,27$$

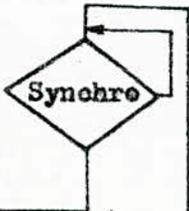
$$X_{cm_2} = X_N$$

$$\theta_{cm_3} = \theta_N$$

Sertir : θ_{cR} ; X_{cm_2} ; θ_{cm_3}

Non
Oui

Programme de
changement de zone



$$A_1 = 0,89 \theta_N - 0,61 K_C E + 0,11 E_1$$

$$A_2 = X_N - 0,67 K_C E$$

$E_1 = E$

Organigramme de fonctionnement " Zone III "

- Ouverture du canal du 1^{er} recyclage à N = 90
(sous-programme (1))
- Mise en marche de l'alimentation en eau froide
(commande tout ou rien)
- Fermeture complète de la vanne de rech 2
(sous-programme (1) : N = 0)

Entrer : θ_z ; X_z ; X_i ; θ_i ; H_{ext}

Lire : θ_{ic} ; X_{ic} ; K_C ; K_C

$$E = \theta_{ic} - \theta_i$$

$$\theta_N = A_1 - K_C E$$

$$E = X_{ic} - X_i$$

$$X_N = A_2 + K_C E$$

$$i_u = 0,24 \theta_i + X_i (594,7 + 0,477 \theta_i)$$

$$i_z = 0,24 \theta_z + X_z (594,7 + 0,477 \theta_z)$$

$$i_{M_1} = 0,24 \theta_N + X_N (594,7 + 0,477 \theta_N)$$

$$X_{cM_1} = \frac{(i_u - i_N)(X_i - X_z)}{(i_u - i_z)} + X_i$$

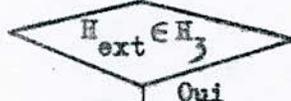
θ_{cR} : deduite du système d'équations

$$i_{M_1} = 0,24 \theta_R + X_R (594,7 + 0,477 \theta_R)$$

$$\theta_R = 0,02 X^3 - 0,63 X^2 + 7,74 X - 20,27$$

$$X_{cM_2} = X_N$$

Sortir : X_{cM_1} ; θ_{cR} ; X_{cM_2}



Programme de changement de zone

$$A_1 = 0,89 \theta_N - 0,61 K_C E + 0,11 E_1$$

$$A_2 = X_N - 0,67 K_C E$$

$$E_1 = E$$



Organigramme de fonctionnement " Zone IV "

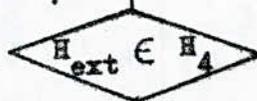
- Fermeture complète de la vanne du rech 2 (sous-programme (1))
- Mise en marche de l'alimentation en eau froide (commande par tout ourien)
- Fermeture complète du registre de l'air recyclé (sous-programme (1))

Entrer : θ_i ; X_i ; H_{ext}

Lire : θ_{ic} ; X_{ic} ; K_C ; K'_C

$$\begin{aligned} E &= \theta_{ic} - \theta_i \\ \theta_N &= A_1 + K_C E \\ E &= X_{ic} - X_i \\ X_N &= A_2 + K_C E \\ i_{M_1} &= 0,24 \theta_N + X_N (594,7 + 0,477 \theta_N) \\ \theta_{cR} &: \text{de suite du système d'équations} \\ i_{M_1} &= 0,24 \theta_R + X_R (594,7 + 0,477 \theta_R) \\ \theta_R &= 0,02 X_R^3 - 0,63 X_R^2 + 7,74 X_R - 20,27 \\ X_{cM_2} &= X_N \end{aligned}$$

Sortir : θ_{cR} ; X_{cM_2}



Non

Programme de changement de zone

Oui

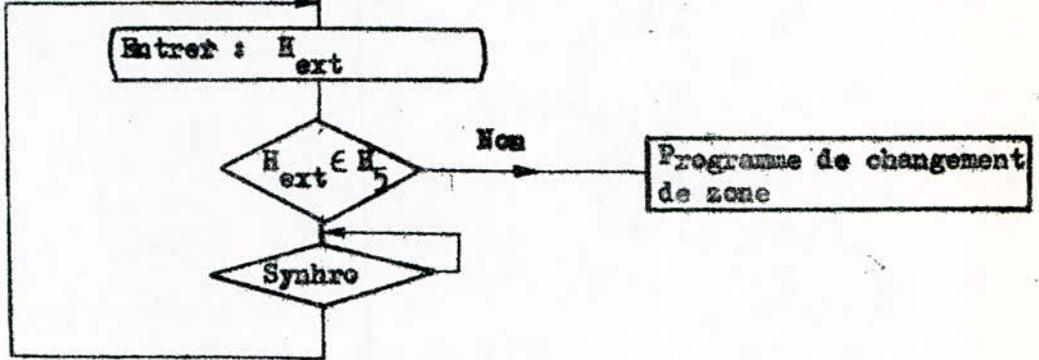
$$\begin{aligned} A_1 &= 0,89 \theta_N - 0,61 K_C E + 0,11 E_1 \\ A_2 &= X_N - 0,67 K_C E \end{aligned}$$

$$E_1 = E$$

Synchro

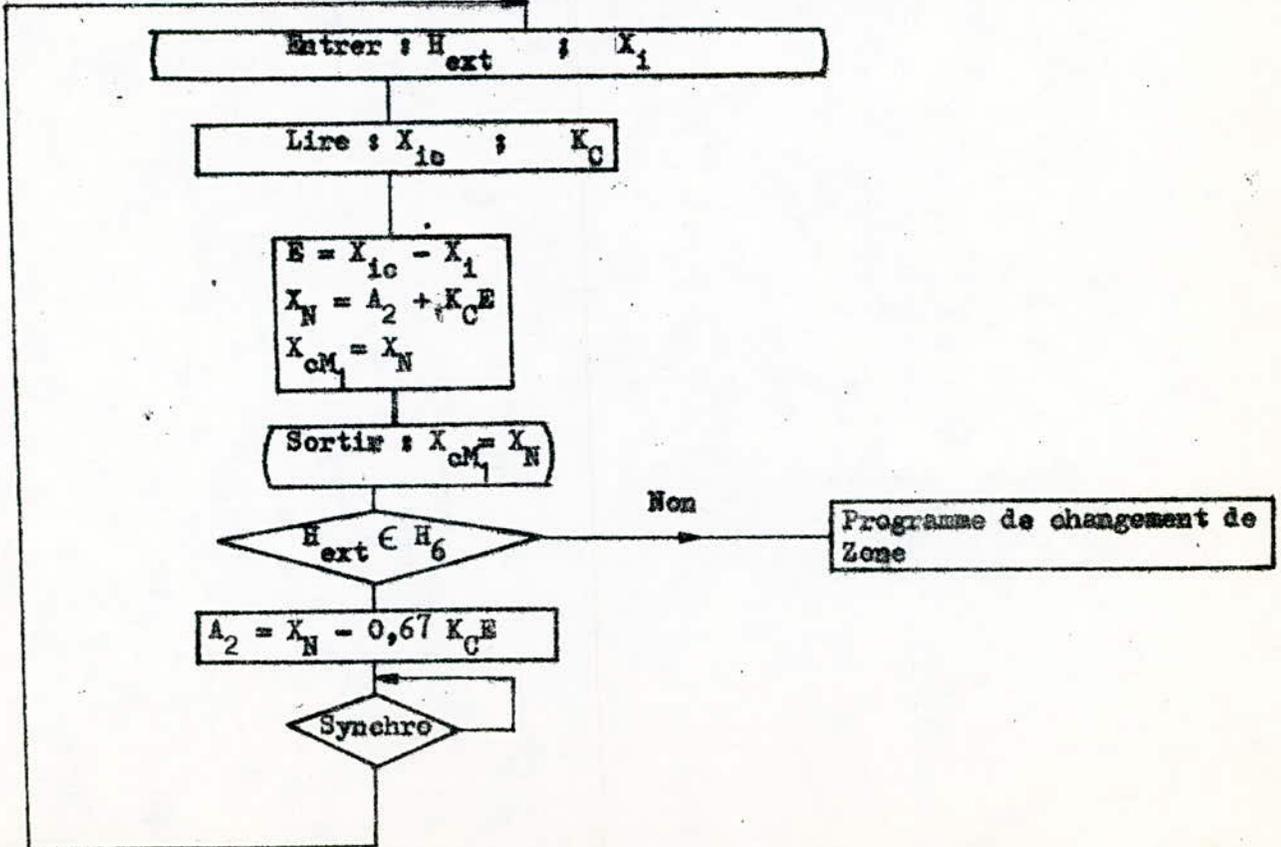
Organigramme de fonctionnement " Zone V "

- Fermeture complète des registres de l'air recyclé (sous-programme (1) : N=0)
- Arrêt du laveur (commande tout ou rien)
- Coupure des alimentations en eau chaude et en eau froide . (commande tout ou rien)

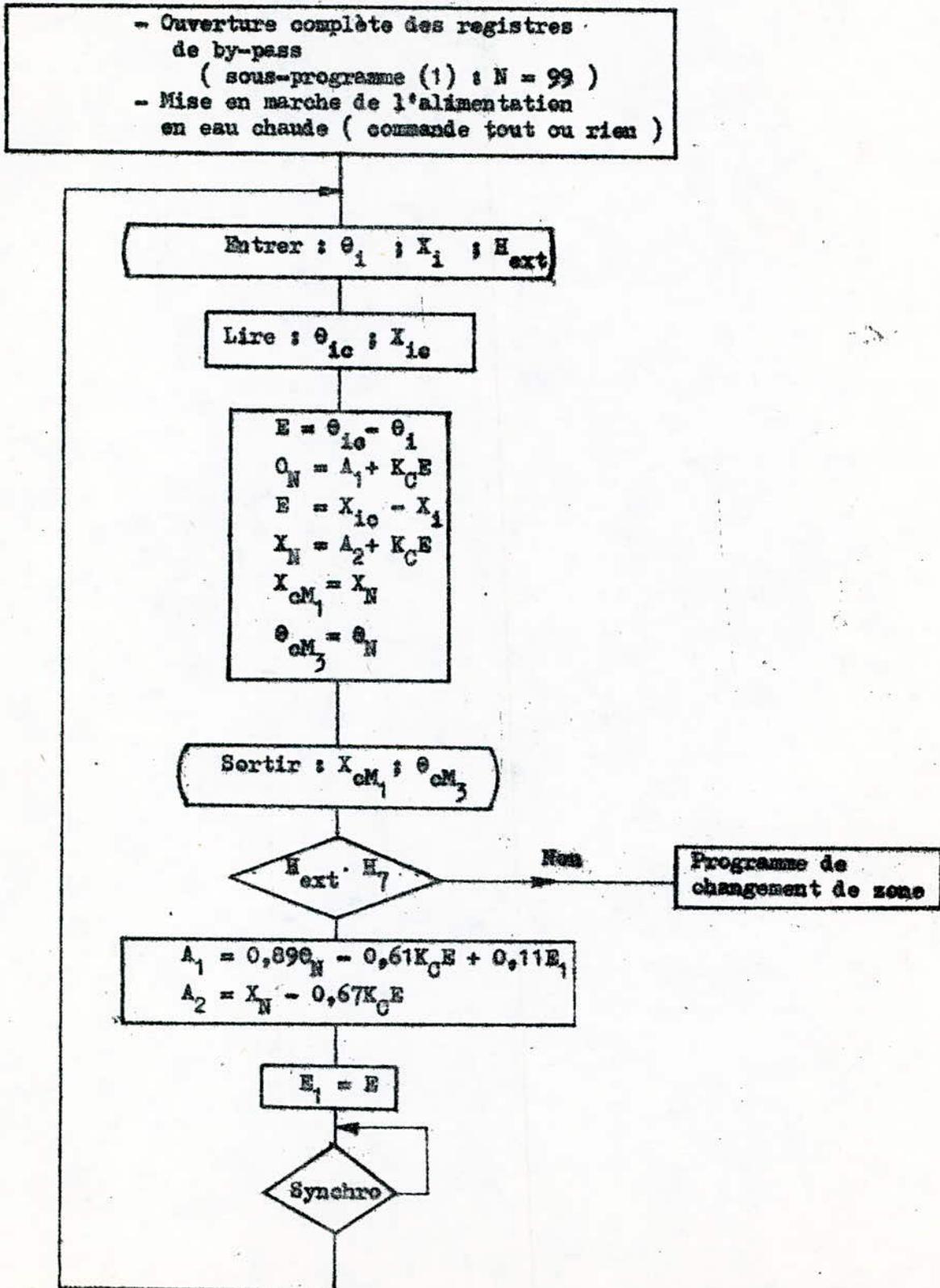


Organigramme de fonctionnement " Zone VI "

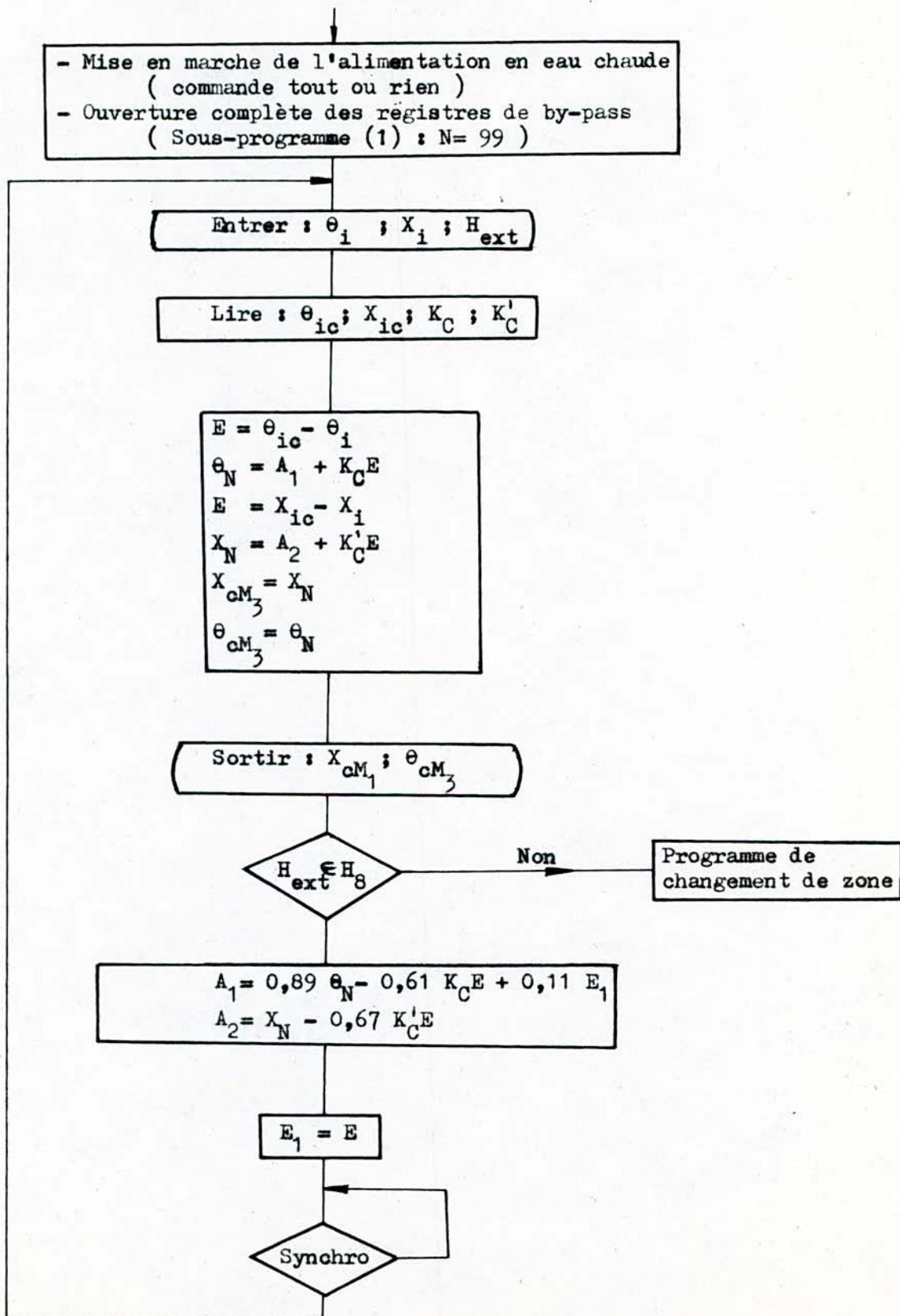
- Fermeture complète de la vanne du rech 2 (sous-programme (1) : N = 0)
- Ouverture complète des registres du by-pass (sous-programme (1) : N = 99)
- Arrêt des alimentations en eau chaude et froide (commande tout ou rien)



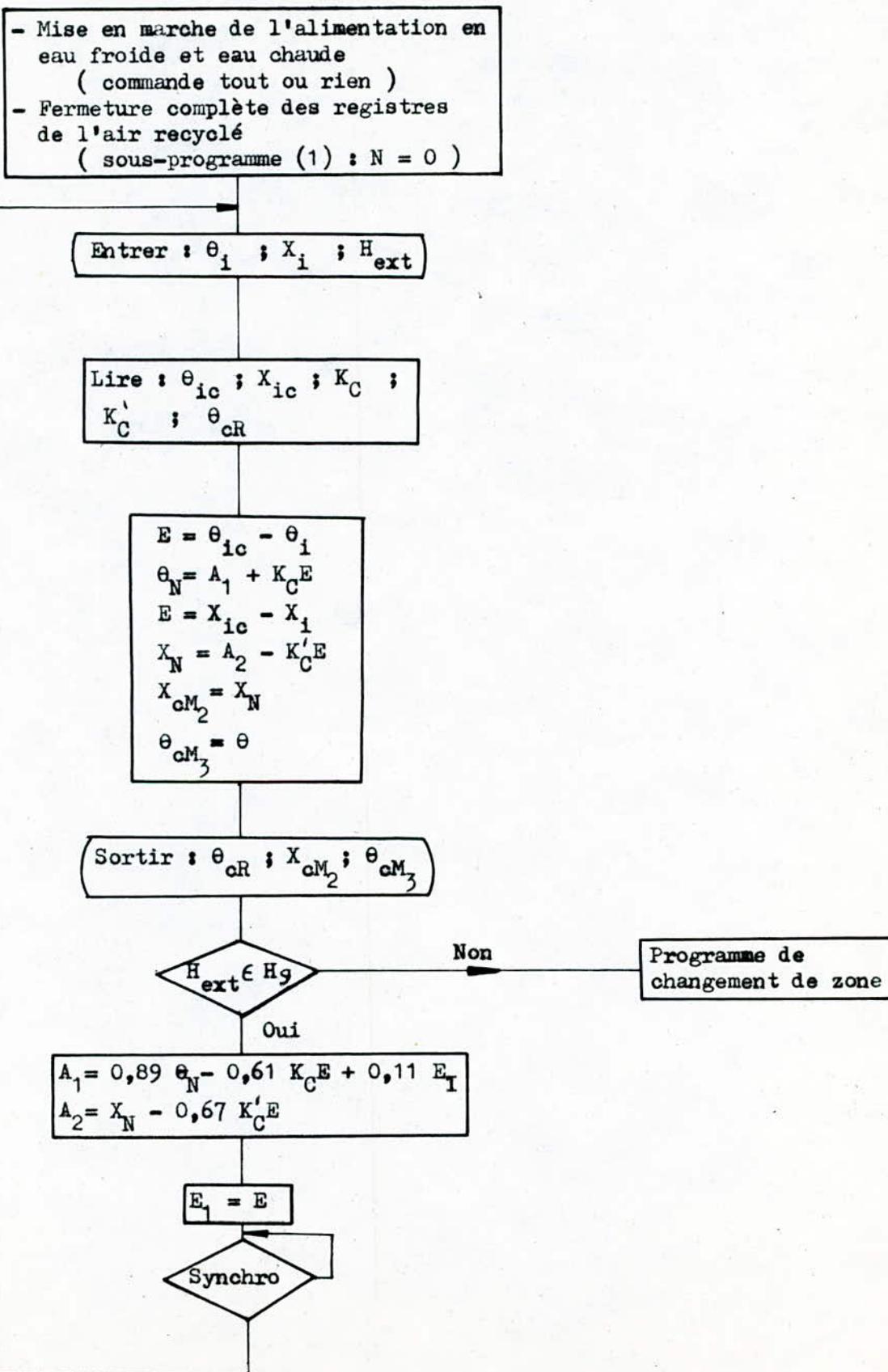
Organigramme de fonctionnement " Zone VII "



Organigramme de fonctionnement " Zone VIII "

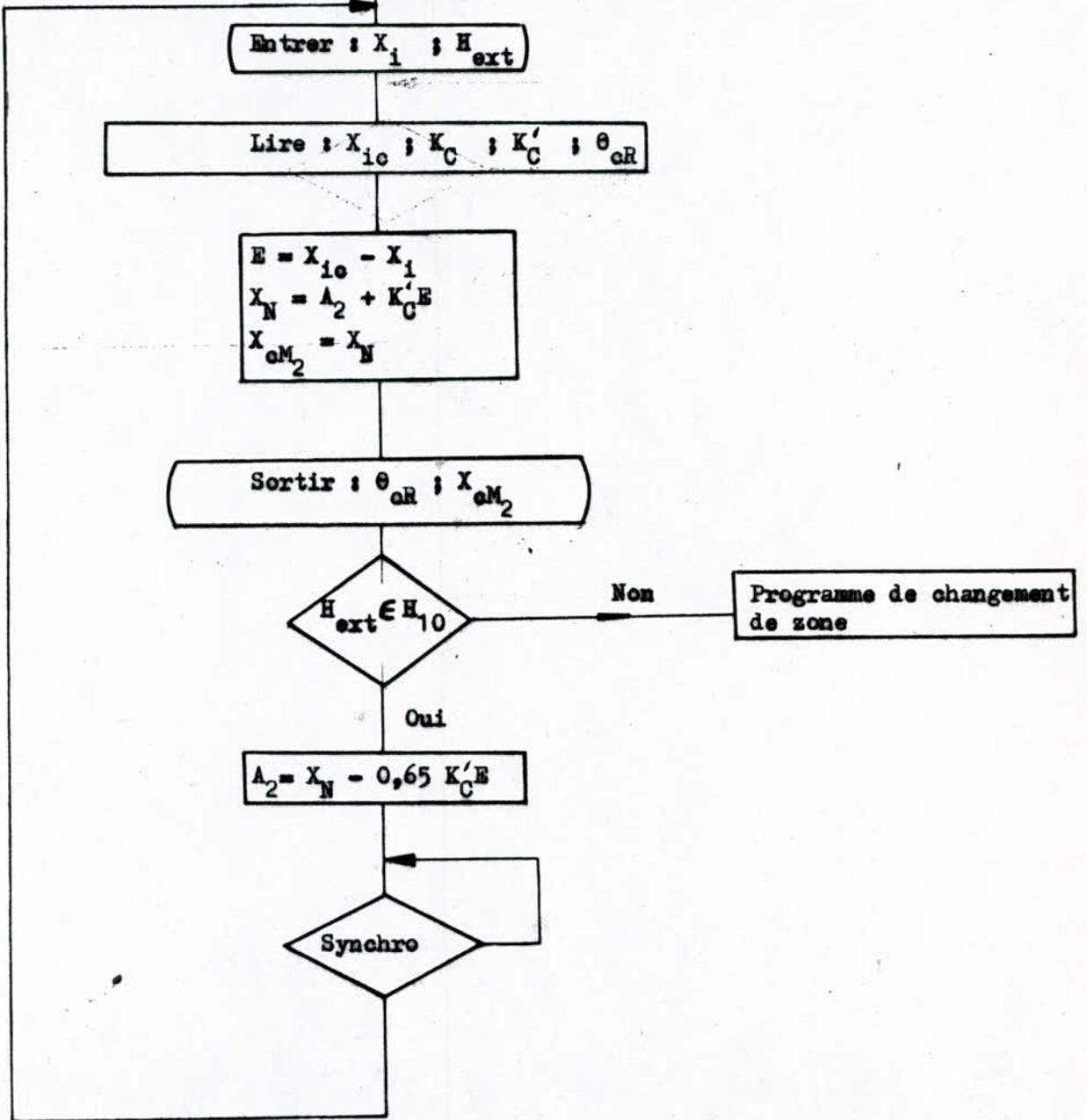


Organigramme de fonctionnement " Zone IX "



Organigramme de fonctionnement " Zone X "

- Fermeture complète des registres de l'air recyclé (sous-programme (1) : N = 0)
- Mise en marche de l'alimentation en eau froide (commande tout ou rien)
- Fermeture complète de la vanne du rechauffeur 2 (sous-programme (1) : N = 0)



Organigramme de fonctionnement " Zone XI "

- Fermeture complète de la vanne du rech 2
(sous-programme (1) : N = 0)

Entrer : θ_i ; X_i ; θ_z ; X_z ; H_{ext}

Lire : X_{ic} ; θ_{ic} ; K_C ; K'_C ; θ_{cR} ; X_R ; i_R

$$\begin{aligned} E &= \theta_{ic} - \theta_i \\ \theta_N &= A_1 + K_C \\ E &= X_{ic} - X_i \\ X_N &= A_2 + K'_C E \\ i_u &= 0,24 \theta_i + X_i (594,7 + 0,477 \theta_i) \\ i_z &= 0,24 \theta_z + X_z (594,7 + 0,477 \theta_z) \\ X_{cM_1} &= \frac{X_u (i_u - i_z) (X_N - X_R) - (i_u (X_N - X_R) - i_R X_N + X_R i_N) (X_u - X_z)}{(i_N - i_R) (X_u - X_z) + (i_u - i_z) (X_N - X_R)} \\ X_{cM_2} &= X_N \end{aligned}$$

Sortir : X_{cM_1} ; θ_{cR} ; X_{cM_2}

$H_{ext} \in H_{I1}$

Non Programme de changement de zone

Oui

$$\begin{aligned} A_1 &= 0,89 \theta_N - 0,61 K_C E + 0,11 E_1 \\ A_2 &= X_N - 0,67 K'_C E \end{aligned}$$

$E_I = E$

Synchro

Organigramme de fonctionnement " Zone XII "

- Fermeture complète du réchauffeur secondaire
(sous-programme (1) : N=0)

Entrer : θ_i ; X_i ; X_z ; θ_z ; H_{ext}

Lire : X_{ic} ; θ_{ic} ; X_R ; i_R ; θ_R
 K_C ; K'_C

$$\begin{aligned}
 E &= \theta_{ic} - \theta_i \\
 \theta_N &= A_1 + K_C E \\
 E &= X_{ic} - X_i \\
 X_N &= A_2 + K'_C E \\
 i_N &= 0,24\theta_N + X_N (594,7 + 0,477\theta_N) \\
 i_z &= 0,24\theta_z + X_z (594,7 + 0,477\theta_z) \\
 i_u &= 0,24\theta_i + X_i (594,7 + 0,477\theta_i) \\
 X_{cM_1} &= \frac{ (i_R - i_N) (X_z - X_u) X_R - ((i_z - i_u) X_z - i_z (X_z - X_u)) (X_R - X_N)}{ (i_R - i_N) (X_z - X_u) - (i_z - i_u) (X_R - X_N)} \\
 X_{cM_2} &= X_N
 \end{aligned}$$

Sortir : X_{cM_1} ; θ_{cR} ; X_{cM_2}

$H_{ext} \in H_{12}$

Non

Programme de changement
de zone

$$\begin{aligned}
 A_1 &= 0,89\theta_N - 0,61K_C E + 0,11E_1 \\
 A_2 &= X_N - 0,67K'_C E
 \end{aligned}$$

$$E_1 = E$$

Synchro

CONCLUSION

Dans cette mémoire, nous avons décrit de manière simplifiée des différents régimes de fonctionnement du système de climatisation selon l'enthalpie de l'air extérieur . Cela nous a permis d'élaborer un nouveau système de commande utilisant un calculateur numérique . Ce dernier nous a offert la possibilité de conduire plusieurs boucles de régulation à partir des algorithmes bien déterminés . Ces algorithmes ont été établis en suivant les états de l'air extérieur et intérieur et en se basant surtout sur l'économie d'énergie .

Le calculateur numérique est donc un moyen efficace en régulation d'un système de climatisation , car il rend le système capable de s'adapter aux différentes conditions climatiques .

Notre étude ne s'est bornée seulement à la théorie , mais nous avons mis en évidence par collaboration avec nos collègues électroniciens la réalisation d'une maquette de servomoteur commandé par calculateur numérique . Cela nous a permis de voir et de vérifier la possibilité de commande mentionnée dans notre projet .

Enfin , à notre avis , une étude approfondie de ce sujet avec réalisation pratique doit être poursuivie dans un proche avenir .

BIBLIOGRAPHIE

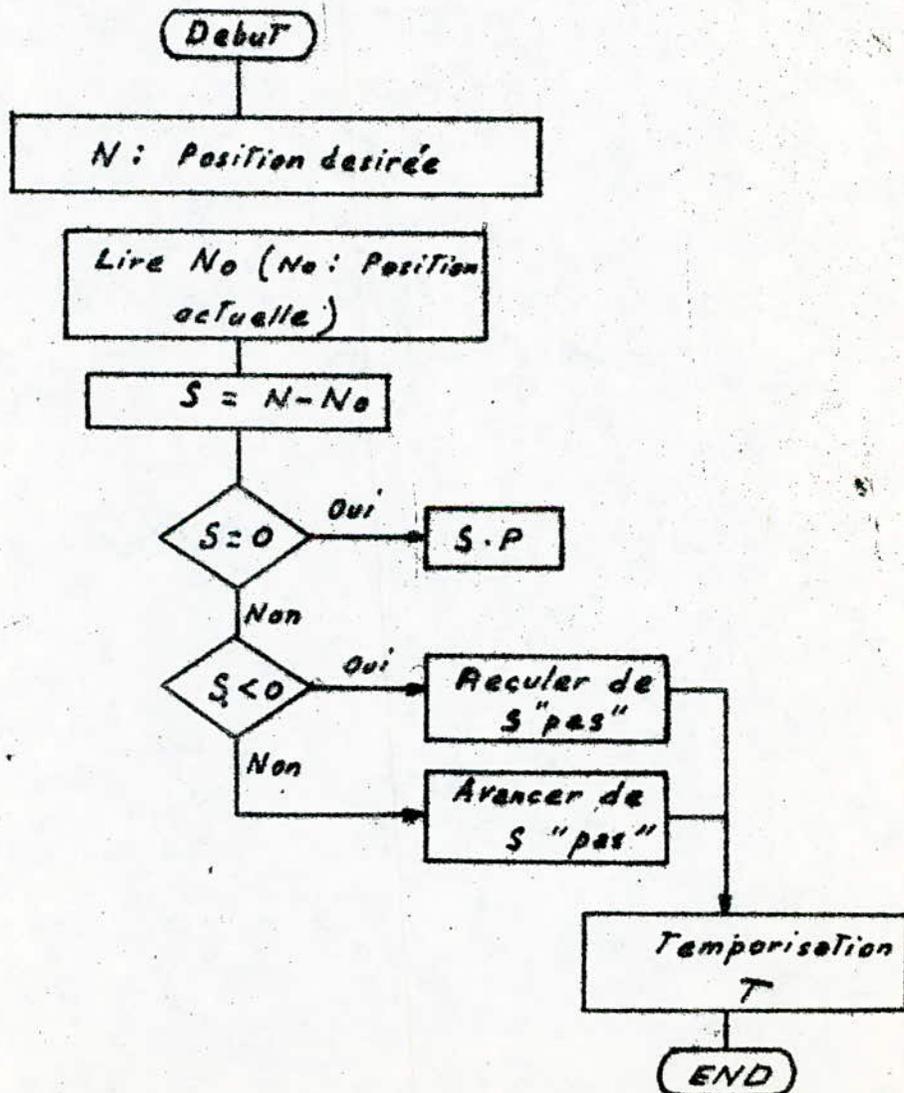
- (1) G. ANDREIEFF DE NOTBECK
" Manuel de conditionnement d'air " Tome II
1978
- (2) H. RIETSCHEL , W RAISS
" Traité de chauffage et de climatisation " Tome II
Dunod - Paris - 1974
- (3) ROGER W. HAINES
" Techniques de régulation en genie climatique "
Chauffage , Ventilation , Conditionnement d'air
Pyc Edition - Paris - 1981
- (4) DANIEL DINDELEUX
" Technique de la régulation industrielle "
Eyrolles - Paris - 1981
- (5) INSTYTUT TECHNIKI CIEPLINEJ
" Brochure de recherche "
- (6) Y. SEVELY
" Systèmes et asservissements linéaires échantillonnés "
Dunod - Paris - 1969
- (7) AUGUSTO H. BRUCIAPAGLIA
"Commande par modulation de durée . Application à un procédé
thermique "
(Thèse pour obtenir le titre de docteur ingénieur , spécialité
automatique)
Soutenance du 14 Fevrier 1979
- (8) Catalogue SIEMENS
" Appareils d'analyse industriels et appareils de mesure de tempera-
ture "
MP 11 , parties 1 à 3 1978
- (9) Catalogue : STIFA CONTROL SYSTEM
" Manuel de service " (1980)
- (10) Catalogue : HONEYWELL
" Regulation de chaffage "
- (11) D. WÜRSTLIN
" Regulacja urzadzen ogrzewczych wentylacyjnych i klimatyzacyjnych "
Arkady 1978

ANNEXE

Sous-programme de positionnement
des vannes ou des registres en
langage assembleur

Microprocesseur : 6800 de MOTOROLA

Organigramme :



Jeu d'instructions du μP 6800
du MOTOROLA

LDA A [N]
STA A (adresse)
LDA B [No]
STAB (adressé)
SBA $\rightarrow [(N - N_0) \rightarrow A]$
BEQ SP
TST B
BPL ST1
NEGB
JSR CALL IMP₁
ST₁ JSR CALL IMP₂
JSR TEMPO
SWI

Sous-programme CALL IMP₁ pour le recule

Sous-programme CALL IMP₂ pour l'avance

Tempo : Sous-programme de Temporisation.