

## ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : **Electrotechnique**

### PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Etude Théorique et Expérimentale  
des propriétés dynamiques  
d'une serre*

Proposé par :  
Mr Z. BARSKI  
Docteur es-sciences

Etudié par :  
MAMMOU N.  
BENREBHA A.

Dirigé par :  
Mr Z. BARSKI



PROMOTION : **Juin 1984**



## DEDICACES

Nous dedions ce modeste travail.

- à nos parents.
- à nos frères et sœurs.
- à nos familles.
- à tous nos amis (es).

A. BENREBHA

N. MAMMOU.

## REMERCIEMENTS.

Nous tenons à remercier notre promoteur M<sup>r</sup> Z. BARSKI  
Docteur - es - sciences , de nous avoir proposé ce sujet et nous  
avoir dirigé durant notre travail .

Nos remerciements vont aussi à M<sup>r</sup> BOUDIAF . M. , Directeur  
adjoint du CRAU , de nous avoir aidé , ainsi qu'à  
M<sup>r</sup> BENSADA . D. Agent technique à l'I.D.C.M.

Que tous nos professeurs et assistants trouvent ici  
l'expression de notre gratitude pour l'enseignement qu'ils nous  
ont dispensé durant toute notre formation .

Mr MAMMOU Nasr-Eddine

BENREBHA Ali

Dirigé par Mr Z. BARSKI Docteur es-Sciences.

RESUME:

L'objet de ce memoire est l'étude théorique et expérimentale des propriétés dynamiques d'une serre .

L'étude théorique a été basée sur un processus thermique en analysant la température et l'humidité . Par contre la partie expérimentale consiste à enregistrer les propriétés dynamiques en utilisant le dispositif de chauffage et dereffroidissement existant dans la serre. Nous avons établi quelques méthodes d'analyse des propriétés dynamiques d'un système, ainsi qu'un calcul et un choix des régulateurs .

SUMMARY:

The object of this memory is the theoretical and practical study of dynamic properties of the green house . The theoretical study has been over a thermal process on studying temperature and dampness. On the other hand, the practical study consisted of monitoring the dynamic properties using the heating and cooling device inside the green house . We have stated some analistic methodes of dynamic properties for any system as well as a rectoning and a choise of regulators.

المختصر: ان موضوع هذه الرسالة هي دراسه نظريه وتجريبيه للخوار الحركيه لفتحه . دراسه نظريه فتكز على التغيرات الحرريه وذل لكبتنا على درجه الحراره والرطوبهء بينه الجانب التجريبي من هذه الدراسه يتضمن تسجيل الخوار الديناميكيه باستعمال الصيه التسخين والتبريد الموجوده في الفتحة . كما وضعنا عدد من الطرق الكفيله بتحليل هذه الخوار لدى نظامء كما ادرجتا حسابا وكيفيه اختيار لمعدلات .

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE	0	INTRODUCTION	-	
	I	Notion sur le transfert de masse et de chaleur.		1
		1 - Transfert thermique		3
		2 - Transfert de masse		3
	II	Généralités sur les serres .		5
		1- Définition d'une serre		8
		2- Importance des serres en Algerie		8
		3- Climat de serre		8
		4- L'effet de serre		10
		5- Stockage de la chaleur		11
		6- Conclusion		12
	III-	Analyse Theorique des propriétés dynamiques d'un processus Thermique .		14
		1- Dynamique de la température		14
		2- " de l'humidité		20
		3- Representation par les variables d'état.		24
		4- Reponses indicielle et ecart permanent		26
	IV -	Differentes methodes d'analyse des paramètres dynamiques d'un processus.		29
		1- Méthode de simulation		
		2- Methodes non parametriques		
		3- " de Sudwick - Michalski		
		4- " de Naslin		
		5- " de Broida		
		6- " de Strejc - Améliorée		
	V	Analyse Experimentale des propriétés dynamiques d'une serre.		43
		1- Presentation de la serre d'essai		43.
		2- Enregistrement de la température et de l'humidité.		51
		3- Identification du système		55
		4- Interpretations et recommandations		55
	VI-	Eléments de la régulation - calcul et choix		58
		- Capteurs		
		- regulateurs		
		- servomoteurs		
		- vannes de controle		
	VII-	Systèmes de régulation -		76.
		1- Système de regulation avec controle de climatisation .		
		2- Système de regulation de la temperature par mélange d'eau chaude et d'eau froide .		
		3- Système de regulation du flux de rayonnement solaire .		
		4- Système de mesure .		
		- Conclusion - Generale -		88-

## . INTRODUCTION.

Les problèmes de la régulation optimale n'ont cessé de faire l'objet de plusieurs recherches, mais, avant d'aborder ces problèmes il faut connaître, et avec le maximum de précision le comportement du système considéré en régime dynamique ou variable.

Les systèmes industriels sont en général de nature dynamiques et ne peuvent être régulés ou commandés sans une connaissance préalable de leurs paramètres dynamiques aux différents points qui leurs constituent.

Le travail que nous présentons se compose, comme suit :

Dans le premier chapitre, nous avons donné quelques définitions et lois de base sur le transfert de chaleur (température) et sur le transfert de masse (humidité).

Au deuxième chapitre, nous avons illustré quelques généralités sur les serres à savoir : Définition, leur développement, le climat et l'effet de serre.

Le troisième chapitre a été consacré à l'analyse théorique des propriétés dynamiques (température, humidité) d'un processus thermique. En fait nous avons analysé les réponses indicelles du système à partir d'une étude purement théorique.

Le chapitre quatre fait l'objet des différentes méthodes utilisées pour trouver les paramètres dynamiques d'un système, à partir des réponses indicelles enregistrées.

Vu l'importance des éléments réglants dans une chaîne de

mesure, le chapitre six donne quelques illustrations, des éléments de réglage. Nous avons aussi établi un calcul et un choix des régulateurs.

Le chapitre cinq a fait l'objet de l'analyse expérimentale des paramètres dynamique (température, humidité) d'une serre en verre.

Au septième chapitre, nous présentons quelques systèmes de régulation pouvant être adaptés aux conditions des serres.

Enfin, nous terminons ce modeste travail par une conclusion générale à ce mémoire présenté.



# CHAPITRE I : NOTIONS SUR LE TRANSFERT DE MASSE ET DE CHALEUR

## INTRODUCTION :

Toute action qui consiste à produire, à transporter ou à faire un mélange de produits de chaleurs différentes peut être appelée transfert thermique ou massique.

## 1 TRANSFERT THERMIQUE :

Lorsqu'on parle de transfert thermique de chaleur, on parle de différence de températures entre corps, ce transfert peut s'effectuer sous trois formes différentes.

1.1 transfert de chaleur par conduction : le flux de chaleur  $\phi d$  qui traverse une paroi séparant deux milieux à des températures différentes, caractérise la conductibilité  $\lambda$  de cette paroi  $\phi d = \frac{\lambda S}{d} (\theta_i - \theta_e)$ .

1.2 transfert de chaleur par convection : rappelons que les phénomènes de convection interviennent dans la transmission de chaleur chaque fois qu'un fluide se déplace par rapport à des éléments fixes (tubes, parois, gaines, ...); on distingue deux formes de convection : la convection libre ou naturelle où les mouvements du fluide sont dus aux variations de son poids spécifique résultant des échanges de chaleur entre fluide et parois et aux différences de températures. La convection forcée où les mouvements du fluide sont provoqués par une action mécanique extérieure (pompe, ventilateur, etc...). Pour ce type de convection, le plus important à considérer est celui de fluide

le en circulation dans une canalisation.

L'équation régissant le transfert de chaleur par convection peut être obtenue en prenant en considération les divers facteurs qui interviennent dans ce phénomène de transfert de chaleur. Les considérations empiriques ont conduit certains chercheurs à énoncer les lois purement expérimentales tels que : REYNOLDS ( $Re = \frac{\rho v d}{\mu}$ ), NUSSELT ( $Nu = \frac{h \cdot d}{\lambda}$ ); PRANDTL ( $Pr = \frac{\eta c}{\lambda}$ ); STANTON ( $St = \frac{h}{\rho \cdot v \cdot c}$ ). Ainsi on peut noter la loi de NEWTON donnée par :  $q = h \cdot A \cdot (T_f - T_a)$

3 transfert de chaleur par rayonnement: le rayonnement est un mode de transfert de chaleur par émission et par absorption des radiations. Il peut avoir lieu à distance, sans que le milieu intermédiaire participe nécessairement à ce transfert. En fait, il existe plusieurs types de rayonnement (hertziens, lumineux, thermiques, ...).

La transmission de chaleur par rayonnement depuis un corps noir, peut être déterminée en accord avec la loi de STEFFAN-BOLTZMANN :  $q = \sigma \cdot T^4$ ; lorsqu'un rayonnement tombe sur un corps noir, il est partiellement absorbé, réfléchi, et transmis comme l'indique la figure I.1. La relation entre l'énergie absorbée, réfléchie et transmise s'écrit  $\alpha + \beta + \tau = 1$ . dans laquelle  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\tau$  sont respectivement les facteurs d'absorption, réflexion, transmission. La majorité des matériaux solides utilisés dans la pratique absorbent pratiquement tout le rayonnement sur une couche de surface très fine. Les corps qui ne transmettent pas le rayonnement sont appelés corps opaques et pour ceux-ci l'équation ci-dessus se réduit à :  $\alpha + \beta = 1$  ( $\tau = 0$ ).

Enfin signalons que dans tout corps ~~moir~~, il y a accumulation de la chaleur selon la loi  $q = \int c_v \frac{d\theta}{dt}$

## 2 TRANSFERT DE MASSE (HUMIDITE) :

Introduction: Le réglage de la teneur de l'air en vapeur d'eau doit, suivant les cas, consister en une humidification de l'air ou une déshumidification selon la température de l'air sec ou humide. La déshumidification peut être obtenue par des procédés physiques: refroidissement de l'air pour condenser l'excès sur une paroi froide puis réchauffage à la température d'utilisation. L'humidification peut être obtenue par injection de vapeur par contact direct avec un appareil humidificateur (laveur).

— humidité absolue: c'est le poids de vapeur d'eau contenu dans un kilogramme d'air sec.

— humidité relative ou degrés hygrométrique: pour toute température, il existe une valeur maximale de cette humidité qui correspond à la saturation de l'air. À cette même température, l'air contient seulement une fraction de la vapeur d'eau qu'il pourrait contenir; cette fraction est exprimée le plus souvent en % et est appelée humidité relative.

— Point de rosée: lorsqu'on refroidit à pression constante un mélange d'air et de vapeur d'eau, la vapeur passe de l'état surchauffé à l'état saturé, puis la condensation apparaît. La température correspondant au début de cette condensation est dite "température de rosée" ou "point de rosée".

Remarque: au point de rosée, la vapeur d'eau contenue dans

l'air est saturée, on dit alors que le degré hygrométrique est de 100%.

- température sèche: c'est la température ordinaire que nous appellerons température de bulbe sec ou simplement température sèche.

- température humide: c'est la température qu'aura l'air non saturé après sa saturation par contact d'un bulbe humide.

Remarque: à une température donnée est lié une certaine plage d'humidité, c'est à dire la pression de vapeur ne peut dépasser une valeur limite dite "pression de saturation".

Nous avons jugé bon de donner le tableau I.2 indiquant les pressions de saturation aux différentes températures ou, inversement, les températures de rosée correspondant aux différentes pressions.

Différents symboles utilisés:

$\theta$ : température en  $^{\circ}\text{C}$

$Q$ : quantité de chaleur en cal

$\phi$ : flux de chaleur en cal/s

$\lambda$ : conductivité thermique

$v, \rho, \eta$ : vitesse (m/s); masse volumique ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) et viscosité dynamique du fluide. ( $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ )

$K$ : constante de Boltzmann

$A$ : surface du corps recevant la chaleur

$e$ : épaisseur de la paroi

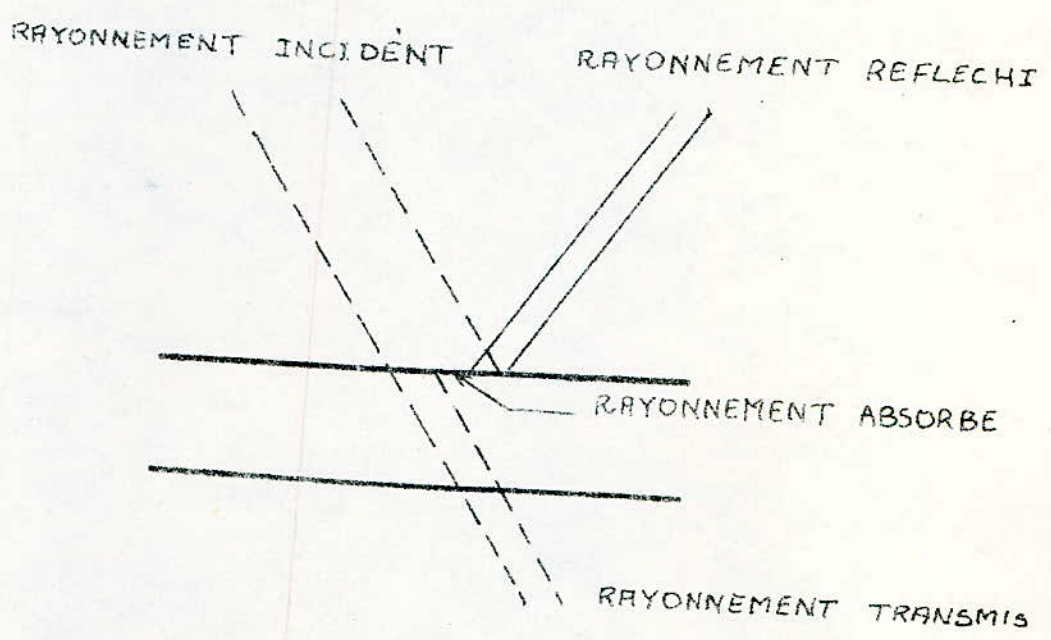


FIG : I.1

T °C	-10	-5	0	2	4	6	8	10	12	14	16
P mm Hg	2,1	3,1	4,6	5,3	6,1	7	8	9,8	10,5	11,9	13,6
T °C	18	20	24	28	35	40	60	70	80	90	100
P mm Hg	15,4	17,4	22,2	28,1	41,8	59,9	148,8	233,5	355	525	760

TABEAU : I.1

## CHAPITRE II GENERALITES SUR LES SERRES

### 1. DEFINITION D'UNE SERRE.

Une serre est une enceinte permettant d'obtenir, pour la production végétale, des conditions d'environnement meilleures que celles existantes naturellement. La serre n'élimine pas l'influence du climat naturel, elle tire profit des éléments favorables.

Du point de vue physique, une serre peut-être considérée comme un volume d'air limité par les parois verticales, le toit et le sol.

### 2. IMPORTANCE DES SERRES EN ALGERIE

Compte tenu de l'évolution de la population, des rations de consommation et des rendements, la superficie à équiper en serres pour la satisfaction des besoins nationaux a été évaluée en 1984 à 2000 ha et en 1990 à 6000 ha. Le développement des cultures sous-abris-serres est devenue une nécessité pour notre pays au moment où la consommation de légumes frais doit être satisfaite en quantité, en qualité et pendant toute l'année. Il s'agit donc de bien profiter de la clémence de notre climat hivernal et avoir une volonté ferme de réussir un programme de développement, afin d'assurer avant tout l'approvisionnement de légumes de qualité à la population nationale pendant les moments les plus difficiles de l'année. La figure II.1 représente le plan de développement des serres en Algérie.

### 3. LE CLIMAT DE SERRE

A l'intérieur d'une serre, le climat n'est plus "naturel" et on peut dire qu'il est dérivé de celui existant à l'extérieur

car l'enceinte perturbe les échanges d'énergie et de matière. Les facteurs de l'environnement considérés ci-dessous sont l'éclaircement, la température, l'humidité, la teneur en gaz carbonique et la turbulence. Ils ne sont pas indépendants, ce qui rend leur étude assez délicate. L'ordre adopté ici nous paraît logique, car la lumière et la température sont les facteurs primordiaux

a) l'éclaircement :

Grâce à la nature des parois de la serre, les cultures bénéficient de la lumière solaire; en outre il est possible de pratiquer un éclairage artificiel.

Les éléments translucides et l'orientation des parois de l'abri jouent un rôle très important dans l'utilisation de l'énergie lumineuse.

Le rayonnement solaire comprend des radiations à actions photosynthétiques et calorifiques ainsi que d'autres radiations de plus grandes longueurs d'onde qui n'ont, en ce qui concerne la serre, qu'un effet calorifique.

b) la température :

Une enceinte telle qu'une serre échange de la chaleur avec le milieu extérieur de trois façons :

- par rayonnement.
- par convection.
- par conduction.

c) l'humidité :

Si la température augmente, la capacité d'absorption de l'air

croît et, par conséquent, si l'on ne rajoute pas de vapeur d'eau, le degrés hygrométrique diminue et inversement.

C'est pourquoi dans les serres, selon les saisons, l'humidité relative devient grande ou petite. En hiver, l'air humide a une faible humidité, compte tenu de sa basse température, même si son degrés hygrométrique est élevé, une fois réchauffé il est donc très sec et les évaporations des végétaux sont minimales en comparaison des rentrées d'air, ainsi en saison froide, la serre a un état hygrométrique très bas. Par contre, au printemps la situation s'inverse, donc dans les deux cas il faut intervenir pour avoir le degrés hygrométriques demandé par les plantes.

#### 4 L'EFFET DE SERRE

La modification du bilan thermique d'une serre par rapport à l'extérieur est due à l'effet d'écran tout autant que l'on a appelé l'effet de serre. L'effet de serre se manifeste essentiellement par une élévation de température, sa détermination peut être ramenée à la mesure de la différence de température (entre la température atteinte à l'intérieur de la serre et la température extérieure) multipliée par le nombre d'heures  $h$  pendant lesquelles cette différence subsiste.

En principe, les degrés heures journaliers sont obtenus en plottant sur les enregistrements des thermographes, la surface entre la courbe de la température intérieure et la température extérieure.

L'effet de serre exprime en gros le solde positif de deux échanges



thermiques simultanément et de sens contraires, dont une serre est l'objet pendant la journée: un échange positif en faveur de la serre, par rayonnement principalement, et un échange vers l'extérieur, négatif, de la serre, dû surtout à la convection.

## 5. STOCKAGE DE LA CHALEUR.

Le stockage de la chaleur se fait à l'aide des masses thermiques, ces masses thermiques sont essentielles aux serres solaires passives, jouent le rôle de la régulation de la température. Elles évitent que la température ne monte trop vite au moindre coup de soleil. Elles accumulent l'énergie et la restituent lentement la nuit.

Dans une serre solaire passive, les masses thermiques aident à augmenter ce que les spécialistes appellent l'inertie thermique de la serre. Cependant ces masses thermiques ont deux inconvénients:

- elles réclament de l'espace.
- elles coûtent de l'argent.

Mais on peut minimiser ces inconvénients :

a/ en isolant convenablement les fondations, le sol de la serre joue le rôle de stockage thermique.

b/ la recherche est désormais bien avancée sur les matériaux de stockage.

c/ dans les grandes serres, on peut adopter un système indirect de stockage de chaleur latente.

Dans ce système, la chaleur s'accumule dans la journée sous forme d'air chaud en haut de la serre et est récupérée et stockée dans le lit de gravier disposé sous l'espace de culture.

La nuit on ouvre la trappe et la chaleur stockée serre de chauffage de la serre. Ce système est simple et efficace. Fig II.2.

## 6 CONCLUSION:

La serre est un local particulièrement sensible aux variations du climat extérieur; ses parois sont minces et transparentes, et la présence des perturbations externes modifie très vite les conditions d'équilibre. Il faut donc une régulation et une installation de chauffage assurant une réponse rapide à ces changements de régimes; mais il faut éviter aussi une trop grande sensibilité qui conduira à une instabilité qui peut dégrader rapidement les matériels d'appareillage.

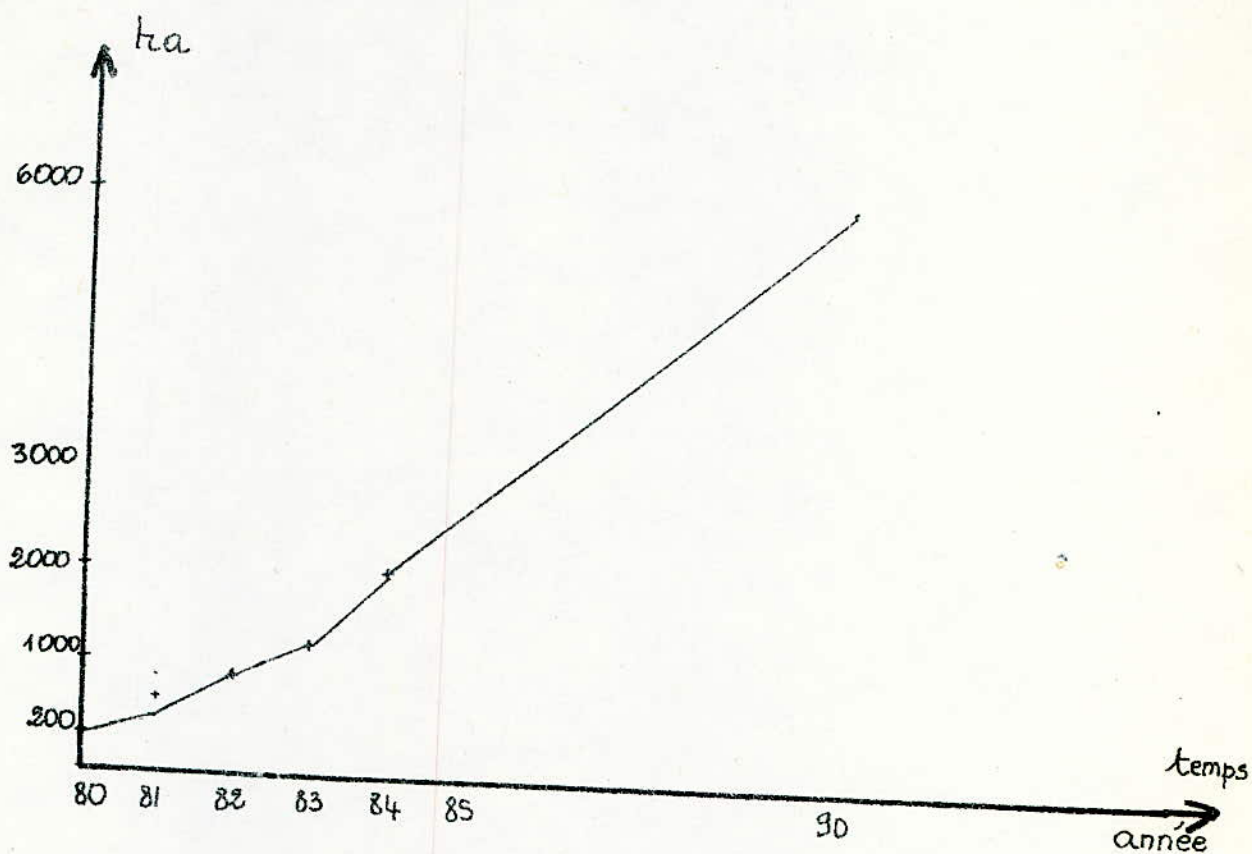


FIG II.1 PLAN DE DEVELOPPEMENTS DES SERRES

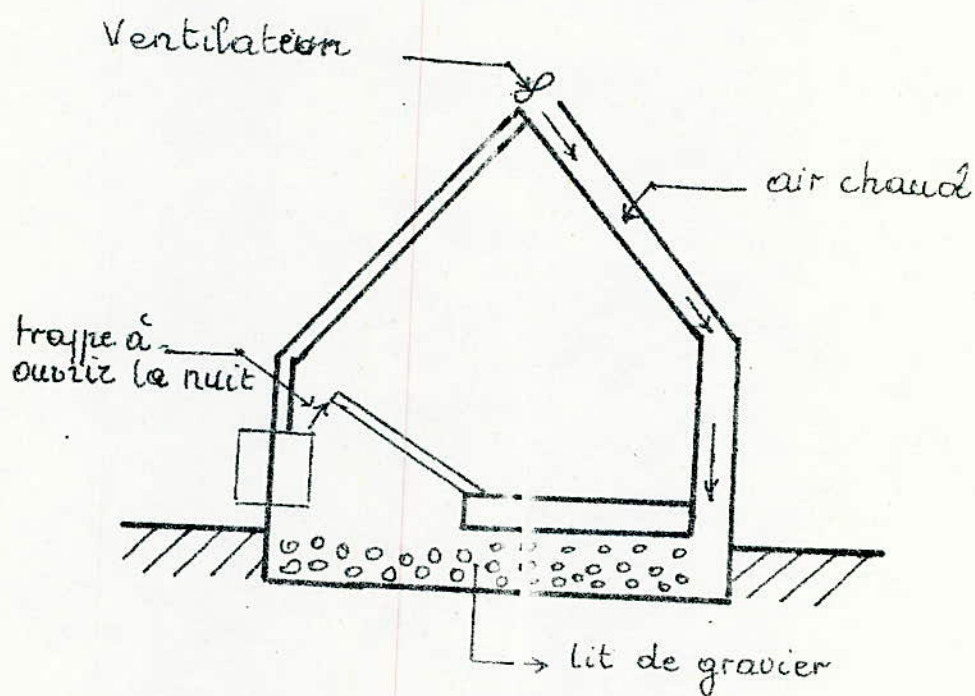


FIG II.2 SCHEMAS DE PRINCIPE DE STOCKAGE DE L'ENERGIE

14

14

## CHAPITRE III ANALYSE THEORIQUE DES PROPRIETES DYNAMIQUES D'UN PROCESSUS THERMIQUE

### INTRODUCTION :

Le fonctionnement d'une chaîne de régulation ne doit pas être considéré du point de vue statique uniquement, mais on doit tenir compte aussi des modifications des différentes grandeurs dans le temps, c'est à dire l'aspect dynamique des phénomènes. Lorsque la chaîne est parfaitement connue, il est possible de déterminer théoriquement la caractéristique dynamique de la chaîne par la résolution des équations différentielles régissant le système.

### 1. DYNAMIQUE DE LA TEMPERATURE :

#### 1.1 La gaine :

L'analyse théorique doit être conduite sur un modèle type, ce qui <sup>ne</sup> correspond certes aux conditions réelles, mais qui se justifie ici par le calcul et pour la clarté on considère un morceau de gaine de section interne  $s$  et de section interne périphérique  $U$  avec un transfert de chaleur à deux dimensions. FIG III.1 La dépendance radiale reste négligeable. Les équations différentielles décrivant le système s'obtiennent à partir du bilan thermique.

— Spécification des différents coefficients qui interviennent dans les équations.

$\rho_f$  : masse volumique du fluide

$\rho_p$  : masse volumique de la paroi

$w$  : vitesse d'écoulement du fluide

$\theta_1$  : température du fluide à l'entrée

$\theta_r$  : température de la paroi

$\theta_u$  : température d'ambiance

$C_{pf}$  : chaleur massique du fluide

$C_p$  : capacité calorifique de la paroi.

$\alpha_i, \alpha_e$  : coefficients d'échange thermique (intérieur, extérieur)

La quantité de chaleur amenée par le fluide pendant  $dt$  est:

$$\dot{Q}_1 = \rho_f \cdot C_{pf} \cdot w \cdot s \cdot \theta_1 \cdot dt$$

La quantité de chaleur sortante au point  $x + dx$  est:

$$\dot{Q}_2 = \rho_f \cdot C_{pf} \cdot w \cdot s \cdot \left( \theta_1 + \frac{\partial \theta}{\partial x} dx \right) dt$$

La quantité de chaleur cédée à la paroi pendant  $dt$  est:

$$\dot{Q}_3 = \alpha_i \cdot (\theta_1 - \theta_r) \cdot u \cdot dx \cdot dt$$

La chaleur emmagasinée dans l'élément  $dx$  pendant  $dt$  est:

$$\dot{Q}_4 = \rho_f \cdot C_{pf} \cdot s \cdot \left( \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) \cdot dx \cdot dt$$

En supposant que notre ~~paroi~~ gaine a une paroi d'épaisseur  $e$ , alors le principe de conservation d'énergie s'applique aisément.

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_4$$

Après simplification au titre de cette égalité, l'équation devient:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + w \frac{\partial \theta}{\partial x} + \alpha_i \frac{u \cdot (\theta - \theta_r)}{\rho_f C_{pf} s} = 0 \quad (1)$$

En réalité, la température  $\theta_r$  de la paroi n'est pas constante et est également une fonction du temps en dynamique. La paroi mince est caractérisée par le fait que la variation de la température  $y$  est constante et qu'elle est par suite fonc-

tion du temps et non du lieu. On obtient pour elle, avec la température d'ambiance  $\theta_0$  constante, à partir du bilan calorifique, l'équation différentielle suivante :

$$\rho_p \cdot c_p \cdot \delta \cdot \Delta \theta_r + \Delta \theta_r (\alpha_i + \alpha_e) = \alpha_i \Delta \theta_1 \quad (2)$$

Cette équation représente une fonction de transfert du 1<sup>er</sup> ordre :

$$\frac{\Delta \theta_r}{\Delta \theta} = \frac{K_p}{1 + T \cdot P} = F(P) \quad (3)$$

avec  $T = \rho_p \cdot c_p \cdot \delta / (\alpha_i + \alpha_e)$  et  $K_p = \frac{\alpha_i}{\alpha_i + \alpha_e}$   
T : constante de temps ;  $K_p$  : coefficient de transfert

On peut maintenant à l'aide des relations (2) et (3) résoudre l'équation (1) car on connaît la relation entre la température de la gaine et la température superficielle de la paroi.

On obtient alors la fonction de transfert de la gaine :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + w \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\alpha_i U}{\rho_p \cdot c_p \cdot \delta} [1 - F(P)] \theta = 0$$

D'où en régime harmonique :

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} + P \frac{\theta}{w} + \frac{\alpha_i U}{\rho_p \cdot c_p \cdot \delta \cdot w} [1 - F(P)] \theta = 0$$

$$K \theta(P) + \frac{\partial \theta(P)}{\partial x} = 0 \quad (4) \quad \text{avec } K = \frac{P}{w} + \frac{\alpha_i U [1 - F(P)]}{\rho_p \cdot c_p \cdot \delta \cdot w}$$

La solution de cette équation est :

$$\theta = A e^{-Kx}$$

Les conditions aux limites nous permettent de déterminer les constantes

$$\theta = \theta_0 \quad \text{pour } x = 0 \quad \Rightarrow \quad A = \theta_0 = \theta_1$$

$$\theta = \theta_L \quad \text{pour } x = L \quad \Rightarrow \quad \theta_L = \theta_1 e^{-KL}$$

$$\text{Soit } F_2(P) = \frac{\theta_L}{\theta_1}(P) = e^{-KL}$$

En posant  $T_g = \frac{L}{w}$  retard introduit par la gaine.

$$F_L = \frac{\Delta \theta_2}{\Delta \theta_1} = K_p \frac{1 + T_1 \cdot P}{T_1 T_2 P^2 + \left[ T_2 + T_1 T_2 a + \frac{\sum \alpha_i b_i P}{b} \right] P + 1}$$

$$F_L(P) = \frac{\Delta \theta_2}{\Delta \theta_1} = \frac{K(1 + T_1 \cdot P)}{(P + \alpha)(P + \beta)}$$

3. Capteurs de température :

ressort des mesures que les temps sont très courts. En conséquence il est nécessaire que la constante de temps du capteur de température soit du même ordre ou si possible plus petite. La loi d'échauffement d'un capteur dont la température  $\theta$  varie avec le temps au cours de sa mise en équilibre thermique. (temps au bout duquel l'inclinaison est stable) dans un milieu à la température  $\theta_1$ , est donnée par la loi de Newton simplifiée :

$$\phi = K S (\theta_1 - \theta). \quad (1)$$

$\phi$  : flux de chaleur se propageant du milieu vers le capteur  
 $S$  : surface du capteur.

$h$  : coefficient moyen de transfert de chaleur.

La quantité de chaleur transférée au capteur pendant  $dt$  est :

$$q = \phi dt = m c d\theta. \quad (2)$$

$m$  : masse du capteur

$c$  : chaleur massique du capteur.

Des équations (1) et (2) on tire :

$$\theta_1 - \theta = \frac{m \cdot c}{K \cdot S} \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

En passant à la transformation de Laplace on aura la fonction de transfert du capteur :

$$\theta_1 - \theta = T_c \cdot p \cdot \theta(p) \Rightarrow F_c(p) = \frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_1} = \frac{1}{1 + T_c p}$$

avec  $T_c = \frac{mc}{k \cdot S}$  constante du temps du capteur.

#### 1.4 Organe de réglage :

Les mêmes réflexions concernant le capteur de température sont aussi valables pour l'organe de réglage. Pour obtenir une régulation optimale, le temps d'action de la vanne doit être un peu plus court que le temps mort et le temps de réponse de la boucle de réglage; en effet un temps d'action rapide de l'organe de réglage est un avantage apporté à la régulation et dans ce cas une nécessité.

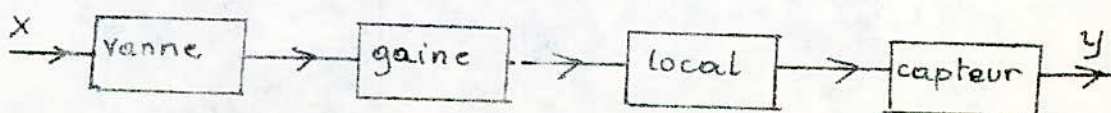
Dans le cas contraire on ne serait pas la boucle de réglage qui serait réglée, mais la position de la vanne, et les perturbations rapides ne pourraient être réglées que très lentement.

#### 1.5 Régulateur :

Le rôle du régulateur est de maintenir constante la température de l'air et de corriger les perturbations très rapides et sans grand écart entre la valeur effective et la valeur demandée. Compte tenu du degré de difficulté de la boucle, l'étude et le choix du régulateur feront l'objet du chapitre V et donc ne sera pas considéré dans l'étude de la fonction de transfert globale du processus considéré.

- Fonction de transfert globale du processus :

Schema bloc du processus :





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

$$\frac{y}{x} = \prod_i F_i = K_{ob} \frac{e^{-T_0 P}}{(1+T_1 P)(1+T_2 P)}$$

$K_{ob}$  : gain statique

$T_0$  : temps mort

$T_1, T_2$  : constantes de temps.

## 2. DYNAMIQUE DE L'HUMIDITE :

### 2.1 la gaine :

La gaine en tant qu'élément de transfert pour l'humidité, elle se comporte comme un temps mort. Elle n'emmagasine pas l'humidité, de sorte qu'en raison de la vitesse forcément limitée de l'air, il se produit seulement un temps mort. On le calcule ainsi :  $T_g = \frac{L}{w}$  avec  $L$  : longueur de la gaine et  $w$  : vitesse de l'air, on obtient alors la fonction de transfert suivante :

$$\frac{\Delta H_2}{\Delta H_1} = K_g e^{-T_g P}$$

### 2.2 le local :

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

$$\dot{Q}_2 \Delta H_2 + \dot{Q}_1 \Delta H_2 = \dot{Q}_1 \Delta H_1$$

$\Delta H_2$  (%) : humidité relative de l'air à la sortie du local.

$\Delta H_1$  (%) : humidité relative de l'air à l'entrée du local.

$\tau_2$  : masse de la quantité d'air contenue dans le local.

$\dot{Q}_1$  : Debit masse à l'entrée et à la sortie du local.

En résolvant cette équation différentielle dans le cas d'une excitation périodique, on obtient la fonction de transfert suivante.

$$\frac{\Delta H_2}{\Delta H_1} = \frac{K_P}{1 + \tau_L P}$$

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

$$\frac{\Delta H_2}{\Delta H_1} = \frac{1}{1 + \tau_L P} \quad \text{avec } \tau_L = Q_2 / \dot{Q}_1$$

$\tau_L$  : constante de temps inversement proportionnelle au renouvellement d'air.

### 2.3 l'humidificateur : FIG III.3

On peut considérer que la variation d'humidité par apport de vapeur et par pulvérisation d'eau, se produit sans retard. Elle ne nécessite donc aucun appareillage.

Comme fréquemment l'humidificateur fonctionne avec un débit d'eau constant en circulation, et que la variation  $\Delta H$  est fournie en fonction de la variation de température, la relation entre la variation de température du courant d'air et la puissance calorifique transportée est exprimée par

$$\alpha \cdot S \cdot (\Delta \theta_{Lm} + \Delta \theta_{n,m}) = \dot{Q}_1 C_F (\Delta \theta_{L1} - \Delta \theta_{L2})$$

$$\text{- avec : } \Delta \theta_{Lm} = (\Delta \theta_{L1} + \Delta \theta_{L2}) / 2$$

$$\Delta \theta_{n,m} = (\Delta \theta_{m,1} + \Delta \theta_{m,2}) / 2$$

De plus l'équation :

$$\dot{Q}_m C_m (\Delta \theta_{m1} - \Delta \theta_{m2}) + \tau_L \cdot \sigma \cdot S \left( \Delta H_{2m} - \frac{\Delta H_1}{2} \right) = \alpha S (\Delta \theta_{Lm} - \Delta \theta_{mm})$$

- avec :  $\sigma$  : coefficient de transfert de matière.  
 $r$  : coefficient de vaporisation d'eau.

L'équation ci-dessus exprime la chaleur apportée par le courant d'air  $\dot{Q}_1$  qui doit couvrir la chaleur nécessaire pour la variation de la température et pour la vaporisation de l'eau.

$S$  : surface extérieure

$$\Delta H_{2m} = (\Delta H_{L1} + \Delta H_L) / 2$$

La relation entre la matière transférée et l'humidité de l'air est donnée par :

$$0.5 (\Delta H_{2m} - \frac{\Delta H_i}{2}) = \dot{Q}_1 \Delta H_i$$

La dernière équation du bilan décrit le processus d'emmaillonnage dans le récipient collectant l'eau.

$$\dot{Q}_m \cdot C_m (\Delta \theta_{mi} - \Delta \theta_{m1}) = \dot{Q} C_m \frac{d\theta_{m1}}{dt}$$

On obtient après élimination des grandeurs intermédiaires sans intérêt, et en appliquant la transformation de Laplace, la fonction de transfert complexe :

$$\frac{\Delta H_2}{\Delta H_1} = K \frac{1 + T_1 P}{1 + T_2 P}$$

Il se produit un retard important à cause du réservoir de collecte. Plus  $T_1$  est petit, plus l'état d'équilibre est rapidement atteint.

Connaissant les fonctions de transfert de la gaine, du local et de l'humidificateur, on peut ainsi calculer la fonction de transfert global en boucle ouverte du processus

$$H(P) = \frac{\Delta H_2}{\Delta H} \cdot \frac{\Delta H_2}{\Delta H_1} \cdot \frac{\Delta H_2}{\Delta \theta_{L1}}$$

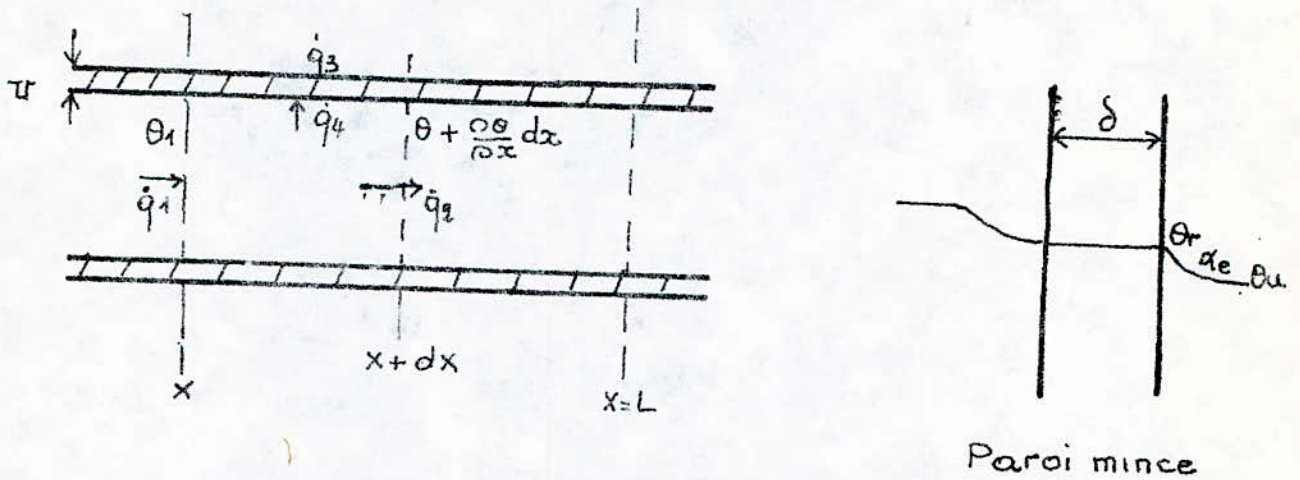


FIG III.1 SCHEMA D'UNE GAINE (SECTION)

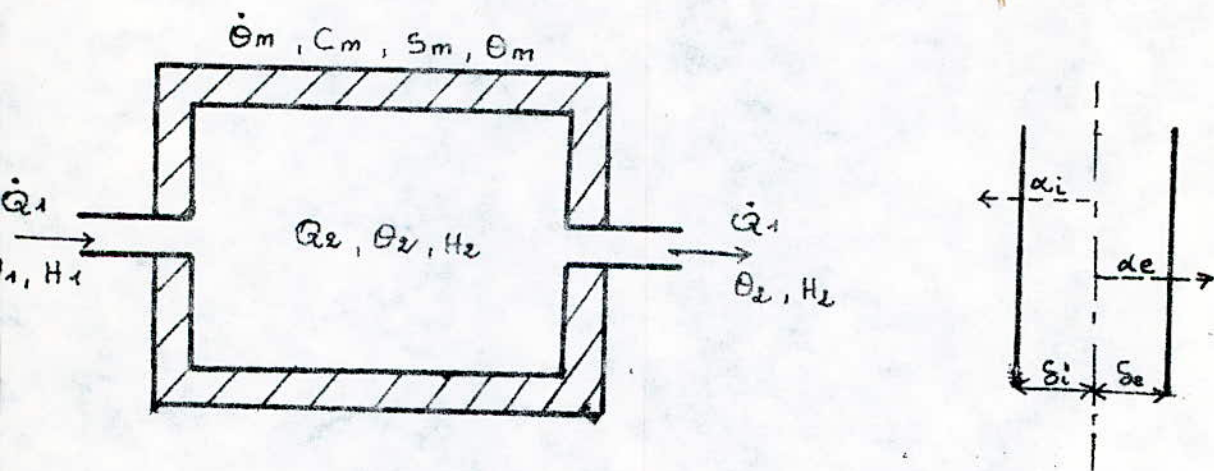


FIG III.2 SCHEMA DU LOCAL

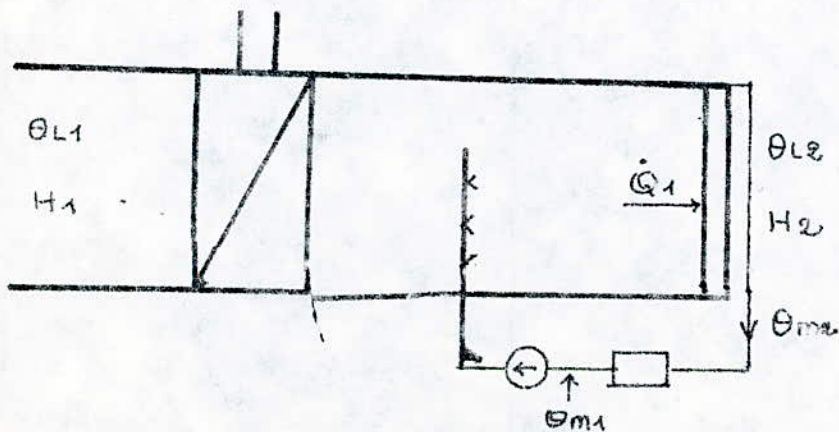


FIG III.3 SCHEMA DE L'HUMIDIFICATEUR

$$H(P) = e^{-TgP} \frac{1}{1+T_1P} \cdot K \cdot \frac{1+T_2P}{1+T_2P}$$

$$H(P) = K_{ob} \cdot \frac{e^{-TgP}}{1+T_1P}$$

$K_{ob}$  : gain statique

$Tg$  : temps mort

$T_1$  : constante de temps.

### 3. REPRESENTATION PAR LES VARIABLES D'ETAT :

3.1 température :

La fonction de transfert du processus théorique est :

$$\frac{y}{u} = F(P) = \frac{K}{(1+T_1P)(1+T_2P)}$$

$$\frac{y}{u} \cdot \frac{X_1(P)}{X_1(P)} = \frac{K}{(1+T_1P)(1+T_2P)}$$

$$y = K X_1(P) \quad \text{et} \quad u = (1+T_1P)(1+T_2P) X_1(P).$$

$$y = K X_1(P) \quad ; \quad u = X_1(P) + (T_1+T_2)\dot{X}_1(P) + T_1T_2\ddot{X}_1(P)$$

en posant :

$$X_1 = x_1 \quad ; \quad X_2 = \dot{x}_1 \quad ; \quad \dot{X}_2 = \ddot{x}_1$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_1T_2} & -\frac{T_1+T_2}{T_1T_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{T_1T_2} \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} K & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Notre système est décrit par :

$$\dot{X} = \underline{A} X + \underline{B} U$$

$$y = \underline{C} X$$

$\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$  matrices

en posant :

$$\alpha = -\frac{1}{T_1T_2} \quad \text{et} \quad \beta = -\frac{T_1+T_2}{T_1T_2}$$

les matrices  $A, B, C$  sont données alors par :

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \alpha & \beta \end{bmatrix}; \quad \underline{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha \end{bmatrix}; \quad \underline{C} = [k, 0]$$

Étudions la contrôlabilité et l'observabilité de notre système décrit par les équations ci-dessus.

On dit que le système est contrôlable si quel que soit l'état initial  $x_0$ , il peut être considéré, à un état final  $x_f$  en un temps fini en lui appliquant une entrée de contrôle ou bien il faut que le déterminant de la matrice

$$[A / AB / A^2B / \dots / A^{n-1}B] \text{ soit non nul.}$$

dans notre cas :

$$\det [A / AB] = \det \begin{bmatrix} 0 & \alpha \\ \alpha & \alpha\beta \end{bmatrix} = -\alpha^2 = -\frac{1}{(T_1 T_2)^2} \neq 0$$

donc notre système est contrôlable.

Un système est dit observable si, à chaque état  $x_0$  peut être déterminé, à partir, des mesures de la sortie  $y(t)$  sur un intervalle de temps  $t$  fini; il faut que le déterminant de la matrice

$$C^T / A^T C^T / A^{T^2} C^T / \dots / A^{T^{n-1}} C^T \text{ soit non nul}$$

dans notre cas :

$$C^T = \begin{bmatrix} 0 \\ k \end{bmatrix} \quad A^T = \begin{bmatrix} 0 & \alpha \\ 1 & \beta \end{bmatrix}$$

$$\det [C^T / A^T C^T] = \det \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} = -k^2 \neq 0$$

donc notre système est observable.

## 4 REPONSES INDICIELLE ET ECART PERMANENT

4.1 la température :

$$F(P) = \frac{K_{ob} e^{-T_0 P}}{(1+T_1 P)(1+T_2 P)}$$

La réponse indicielle à un échelon est :

$$F(P) = \frac{1}{P} \cdot \frac{K_{ob}}{(1+T_1 P)(1+T_2 P)}$$

En appliquant la transformée de Laplace on aura :

$$f(t) = K_{ob} \left[ 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-t/T_1} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-t/T_2} \right]$$

Si  $t \rightarrow \infty$   $f(t) \rightarrow K_{ob}$  $K_{ob}$  : gain statique $T_1, T_2$  : constantes de temps du système.Si on admet que  $T_1 \ll T_2$  on aura

$$f(t) = K_{ob} \left( 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-t/T_1} \right) \text{ d'où le graphe FIG III 4a.}$$

Pour les constantes de temps, on considère  $\Delta$  l'écart entre le régime permanent et la réponse soit :

$$\Delta = K_{ob} - K_{ob} \left( 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-t/T_1} \right) = \frac{K_{ob} T_1}{T_1 - T_2} e^{-t/T_1}$$

$$\text{Log } \Delta = \text{Log} \left( \frac{K_{ob} T_1}{T_1 - T_2} \right) - \frac{t}{T_1} = A - B.t \text{ d'où le graphe FIG III 4b}$$

4.2 l'humidité :

$$H(P) = \frac{K_{ob} e^{-T_0 P}}{1 + T.P}$$

La réponse indicielle à un échelon est :

$$h(P) = \frac{1}{P} \cdot \frac{K_{ob}}{1 + T.P}$$

En appliquant la transformée de Laplace on aura

$$h(t) = K_{ob} (1 - e^{-t/T}) \text{ d'où le graphe FIG III 5a}$$

L'écart  $\Delta$  entre le régime permanent et la réponse est :

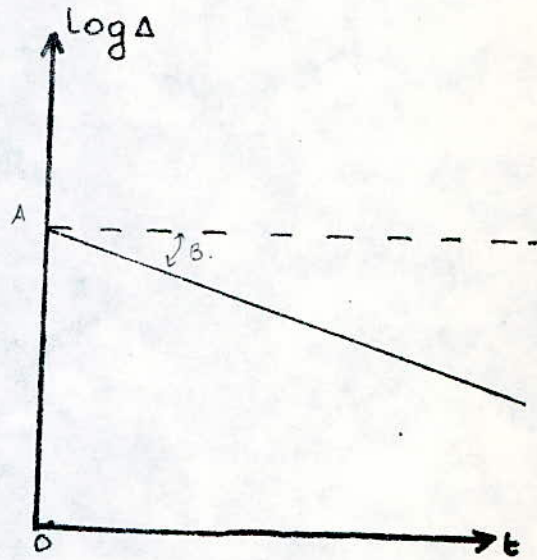
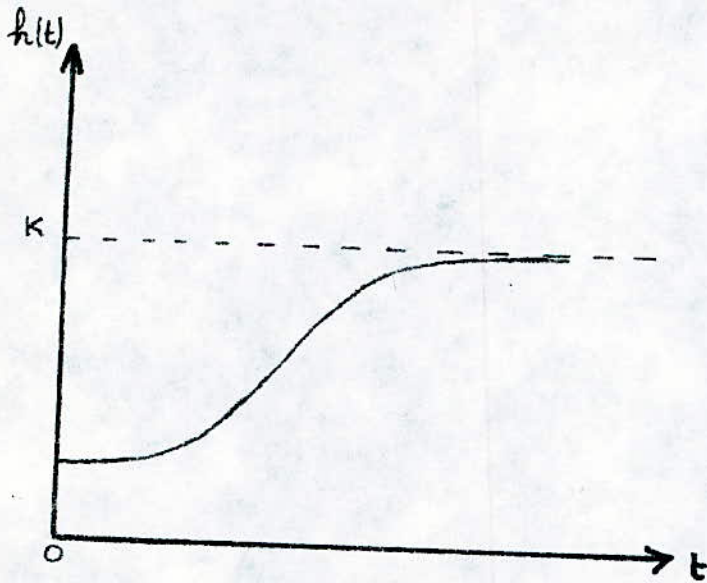
$$\Delta = K_{ob} - K_{ob}(1 - e^{-t/\tau}) = K_{ob}e^{-t/\tau}$$

$$\text{Log } \Delta = \text{Log } K_{ob} - \frac{t}{\tau} = C + D t \text{ d'où le graphe FIE 15.1}$$

Remarque :

Les deux fonctions de transfert de la température et de l'humidité admettent un retard  $T_0$  et  $T_g$  ; les tracés ont été faits pour  $f(t-T_0)$  et  $h(t-T_g)$ . Pour avoir la représentation exacte des fonctions, il suffit de faire une translation sur l'axe des temps.

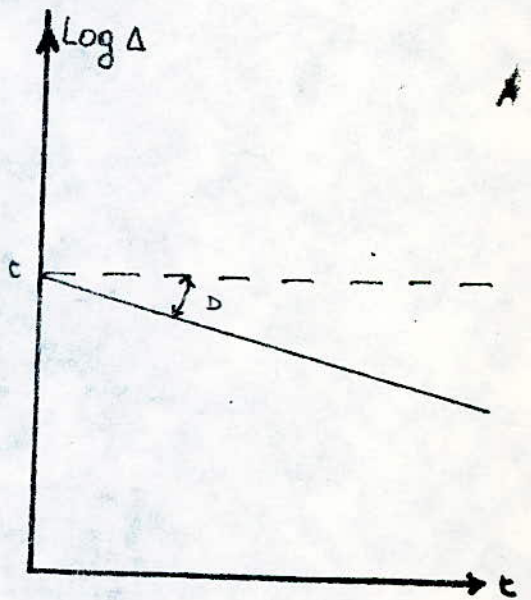
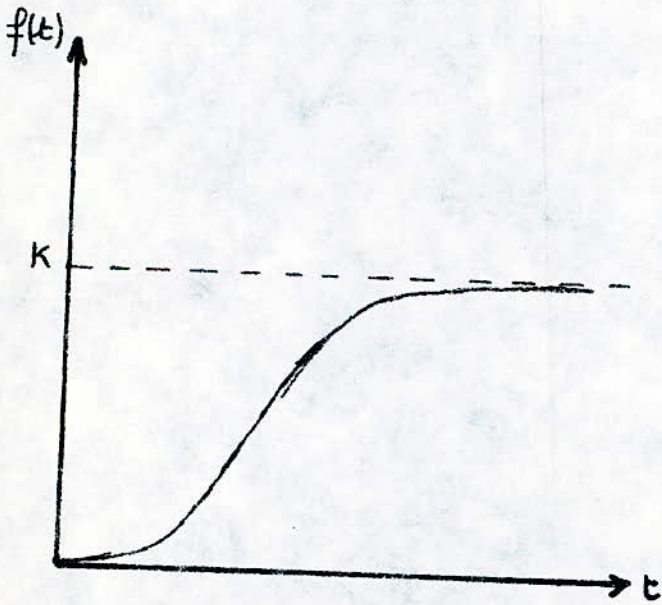




(a)

(b)

FIG III.4



(a)

(b)

FIG III.5

## CHAPITRE VI DIFFERENTES METHODES D'ANALYSE DES PARAMETRES DYNAMIQUES.

### INTRODUCTION :

L'identification d'un système ou l'analyse de ses paramètres dynamiques peut se définir comme la recherche d'un modèle mathématique qui représente avec une précision suffisante son comportement dynamique, compte tenu de son état et des actions qui le sollicitent. Le degré de précision nécessaire pour le modèle dépend du type et des spécifications de la régulation qu'on veut appliquer au système.

Le travail de l'analyse est décomposé en établissant une distinction entre modèle statique et modèle dynamique.

Le modèle dynamique met en jeu des équations différentielles ou aux dérivées partielles, souvent très difficiles à établir.

Le modèle statique se limite à définir le comportement du système lorsque celui-ci est en régime stable.

La forme de la fonction de transfert est choisie selon la forme de la courbe enregistrée. Pour trouver numériquement les paramètres dynamiques qui caractérisent cette fonction il existe plusieurs méthodes. Ces méthodes permettent d'avoir une expression qui décrit le processus. La précision dépend de la méthode et de la forme choisies.

Nous trouvons comme méthodes d'analyse des paramètres dynamiques :

— méthodes de simulation

- méthodes non paramétriques
- méthodes paramétriques
- méthodes itératives.
- méthodes statistiques.

Une fois la structure du modèle est choisie, il faut déterminer les valeurs de ses paramètres qui sont liés aux retards, gains statiques, constante de temps, zéros du système...

Cette analyse se base sur les réponses indicelles d'un processus physique, enregistrées à l'aide d'une table traçante.

#### 1. METHODE DE SIMULATION :

La simulation est l'utilisation d'éléments physiques qui répondent aux mêmes lois que le système étudié.

Comme méthodes de simulation, nous trouvons la simulation analogique ou indirecte et la simulation directe.

##### 1.1 simulation directe :

Cette méthode consiste à mettre l'objet (système) en parallèle avec des circuits électroniques qui représentent une certaine forme de transmittance, et dont les paramètres dynamiques sont réglables. Voir Fig III.1

On injecte le même signal sur les deux entrées (échelon). À l'aide d'un comparateur, on compare les deux sorties  $y_0$  et  $y_m$ . Ensuite le réglage des paramètres dynamiques du modèle permet de réduire le plus que possible l'erreur  $e = y_0 - y_m$  existant entre les deux sorties. Une fois cette erreur devient négligeable on dira que l'objet est simulé si un modèle mathématique

représenté par une transmittance.

Il existe une autre méthode qui a le même principe que la précédente, seulement le réglage des paramètres dynamiques du modèle se fait automatiquement jusqu'à l'obtention d'une différence  $e = y_0 - y_m$  nulle. Fig. II.3.

1.2 : simulation analogique :

Elle consiste à remplacer l'étude d'un phénomène physique par une autre étude qui est plus commode, rapide et précise.

— Avantages des calculateurs analogiques :

a/ fonctionnement continu : les variations utilisées sont des fonctions continues dans le temps.

b/ fonctionnement parallèle : toutes les opérations sont effectuées simultanément.

— Inconvénient :

La précision est limitée par la qualité des éléments du calculateur.

## 2 METHODES NON PARAMETRIQUES :

Ces méthodes permettent de déterminer la réponse impulsionnelle  $h(t)$  en utilisant le théorème de convolution ou les fonctions

de corrélation telle que :  $y(t) = \int_0^{\infty} h(u) u(t-\tau) d\tau$

avec  $u(t-\tau) = 0$  pour  $t < 0$

Mais ces méthodes nécessitent l'utilisation des signaux d'entrée un peu particuliers comme le bruit pseudo-aléatoire.

Bien sûr, il faut dire que ces signaux ne sont pas toujours

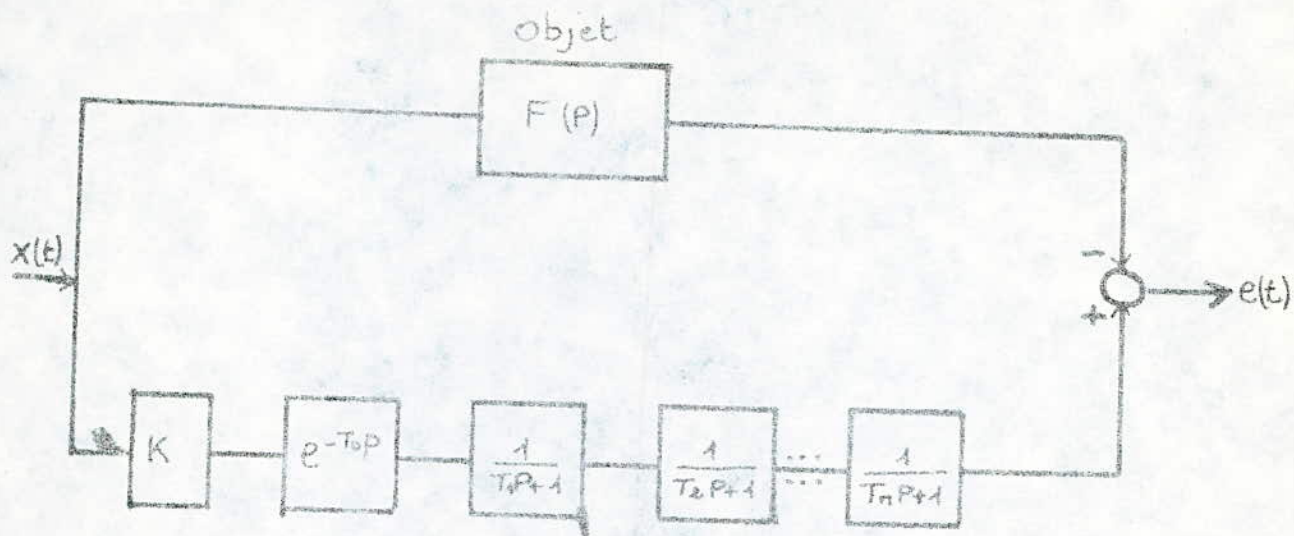


FIG IV.1

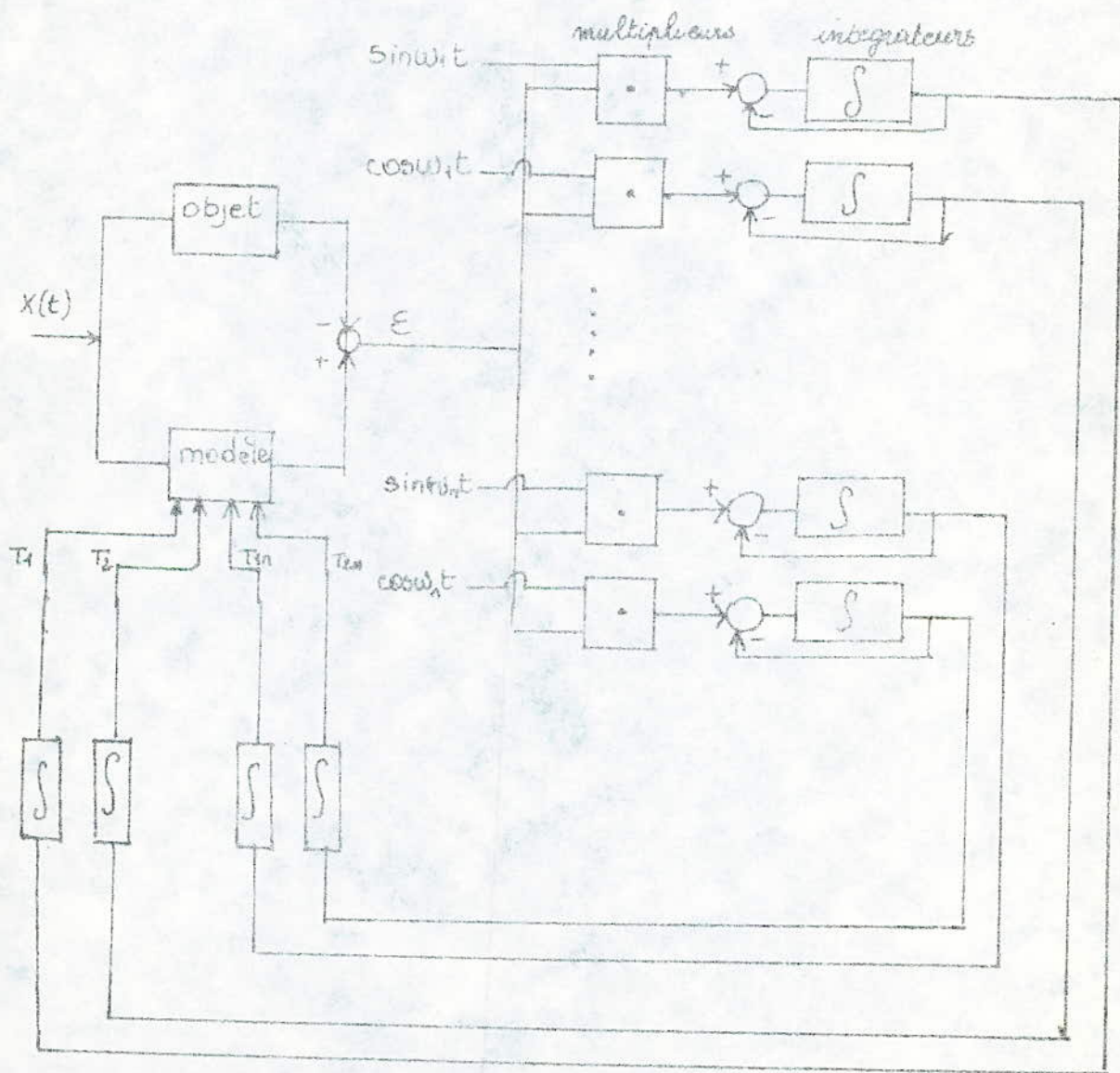


FIG IV.2

applicables à un système réel, car ce dernier, par sa constitution, n'est pas apte à se sensibiliser par n'importe quelle forme du signal.

### 3. METHODES PARAMETRIQUES :

Elles consistent à déterminer les paramètres du système dont le modèle est sous une forme paramétrique, par exemple :

$$F(P) = \frac{K e^{-zP}}{(1 + T_P)^n} \quad \text{ou} \quad F(P) = \frac{\sum a_i P^i}{\sum b_j P^j}$$

on peut trouver en particulier deux formes de fonctions déduites de la 2<sup>ème</sup> forme indiquée ci-dessus, et qui sont les plus utilisées.

Ces deux formes sont les fonctions de transfert du premier et du deuxième ordre :

$$F_1(P) = \frac{K e^{-zP}}{1 + T_P} \quad \text{et} \quad F_2(P) = \frac{K e^{-zP}}{(1 + T_1 P)(1 + T_2 P)}$$

#### 3.1 méthode de Ludwick - Michalski :

Cette méthode consiste à tracer la tangente au point d'inflexion de la courbe de la réponse indicielle enregistrée.

Le graphe IV.3 permet de connaître  $\tau_A$  et  $\tau_B$  ; on pose :  $T_1 = \alpha_1 \tau_A$  ,  $T_2 = \alpha_2 \tau_B$  ou  $\alpha_1, \alpha_2$  sont des paramètres qu'on déterminera par le monogramme donné par la figure IV.4 ; on calcule le rapport  $\tau_B / \tau_A$  (qui est toujours inférieur à un) ; on porte cette valeur sur les deux axes du monogramme, on trace la droite joignant ces deux points. Cette droite coupe la courbe en deux points A et B donnant

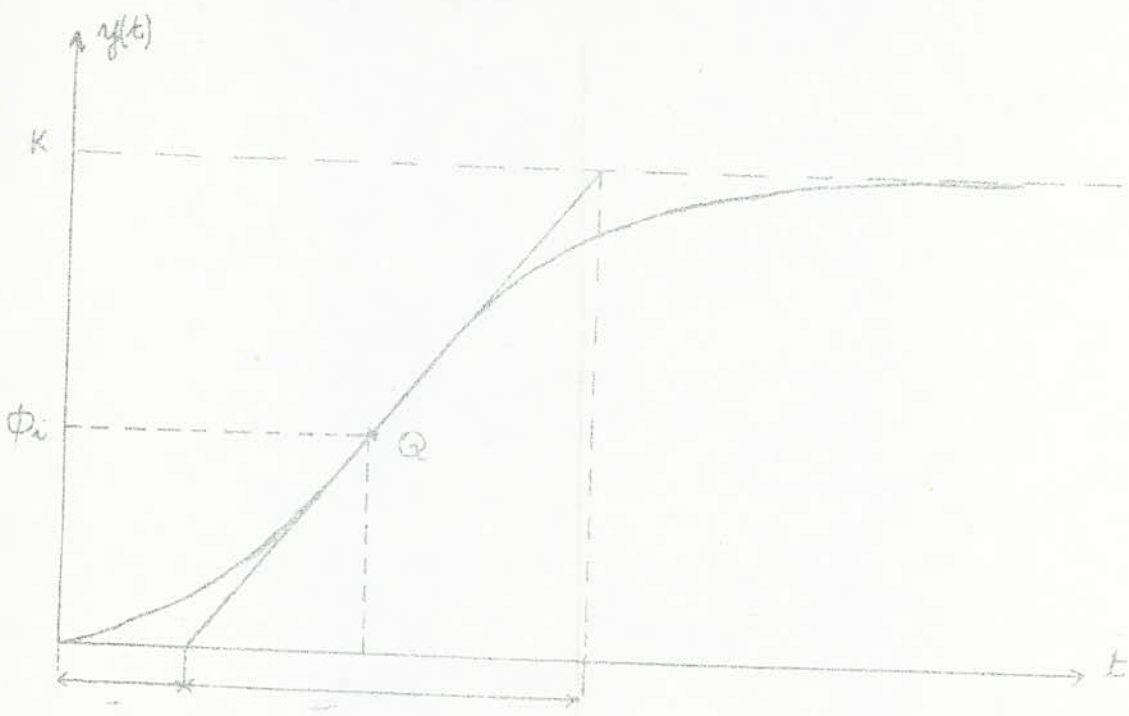


FIG IV.3

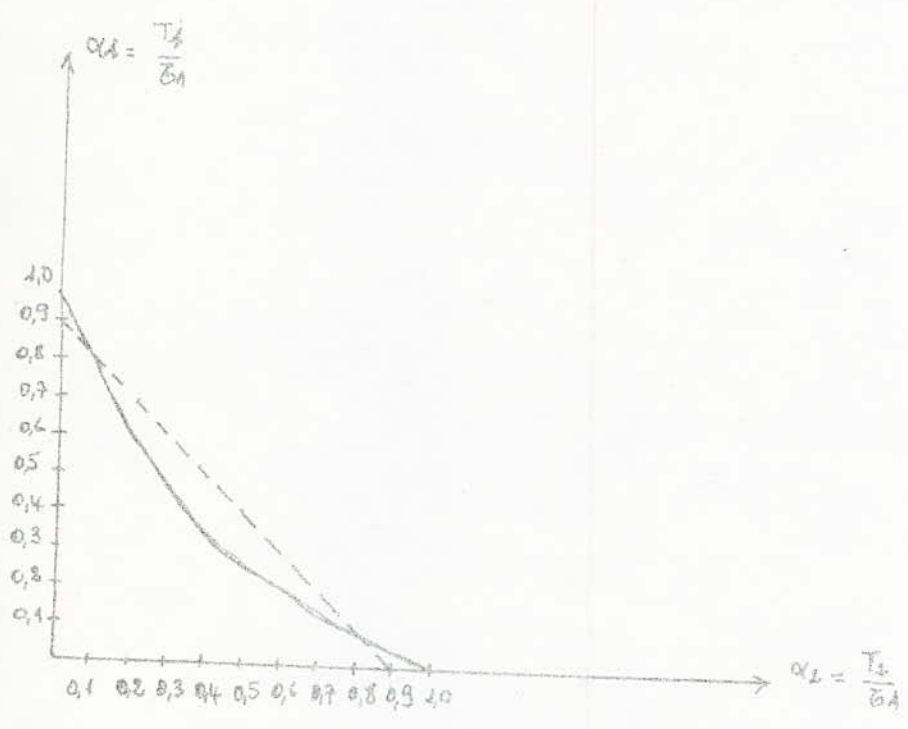


FIG IV.4

les résultats symétriques, les coordonnées de ces deux points sont les valeurs  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$ .

Introduction d'un temps mort ou retard: une fonction de transfert peut contenir un terme qui exprime le temps mort ou retard, alors qu'elle est représentée par une expression de la forme suivante.  $F(P) = F_1(P) e^{-\tau P}$ , avec  $F_1(P)$ , 1<sup>er</sup> ou 2<sup>me</sup> ordre

exemple: 
$$F(P) = \frac{K e^{-\tau P}}{(1 + T_1 P)(1 + T_2 P)}$$

Une telle forme explique le retard entre l'excitation et le commencement de l'évolution de la sortie. Le retard permet d'une part de rendre compte de la présence d'un retard de parcours dans le processus considéré, et d'autre part de compenser l'erreur résiduelle entre la réponse indiciaire du processus et celle de la forme du modèle (fonction de transfert).

La constante qui représente le retard peut être lue directement sur le graphe, ou si  $\tau \ll T$  (constante de temps), on peut écrire:

$$e^{-\tau P} \approx \frac{1}{1 + \tau P^n} \quad \text{avec} \quad n = \frac{\tau}{T}$$

### 3.2 méthode de Naslin:

La réponse indiciaire est schématisée par la figure IV.5. dont la valeur finale est prise égale à 100. Soient les deux points A et B d'ordonnées 5 et 95;  $t_1$  et  $t_2$  désignent respectivement l'instant de A et l'intervalle de temps séparant A et B. Soient d'autre part les points C et D situés aux  $2/10$  et  $4/10$  de l'intervalle A, B et soient  $h_1$  et  $h_2$  leurs ordonnées. Les abscisses de ces points ont été choisies pour obtenir une bonne sensibilité. Les réponses ont été normalisées en donnant à  $t_2$  la valeur 10. D'au



Le point  $t_0$  est la valeur de  $t_1$  pour ces réponses normalisées  
Le tableau IV.5 donne les valeurs de  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $t_0$  et de la constante de temps  $T_n$  en fonction de  $n$ .

Pour cette méthode on procède de la manière suivante :

- d'après les valeurs de  $k_1$  et  $k_2$  lues sur les réponses indicelles données, on détermine par interpolation linéaire les exposants correspondants  $n_1$  et  $n_2$ . On prend pour  $n$  la valeur moyenne arithmétique. On détermine alors par interpolation linéaire les valeurs  $T_n$  et  $t_0$  associés à  $n$ . La constante de temps  $T$  et le retard  $\tau$  seront donnés par :

$$T = T_n - \frac{t_2}{10} \quad \text{et} \quad \tau = t_1 - \frac{t_0 t_2}{10}$$

d'où 
$$F(p) = \frac{K e^{-t/\tau}}{(1 + TP)^n}$$

### 3.3 méthode de Broida :

La méthode de Broida consiste à identifier une fonction du  $n^{\text{ième}}$  ordre à une fonction du 1<sup>er</sup> ordre affectée d'un retard pur. FIG IV.6. La courbe du 1<sup>er</sup> ordre passe par deux points situés sur la courbe enregistrée ayant pour ordonnées  $k_1$  et  $k_2$ . On calcule alors facilement les constantes de temps et le retard pur par les formules suivantes :

$$T = 5,5 (t_2 - t_1) \quad \text{et} \quad \tau = 2,8 t_1 - 1,8 t_2.$$

la fonction de transfert : 
$$F(p) = \frac{K e^{-t/\tau}}{(1 + TP)^n}$$

Le gain statique  $K$  est la différence entre l'amplitude de finale et initiale lues sur les enregistrements sur l'amplitude de l'échelon qui a été appliqué.

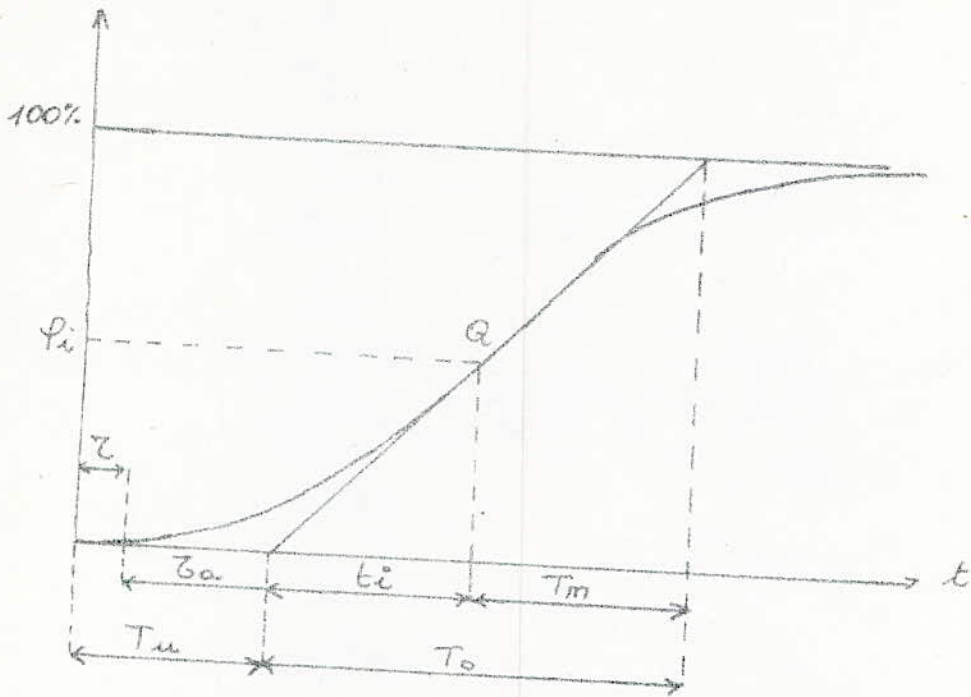


FIG. IV.5

$n$	$h_1$	$h_e$	$t_0$	$T_m$
2	34,81	62,29	1,04	2,28
3	29,90	57,90	1,67	1,83
4	27,34	55,08	2,29	1,57
5	25,69	53,15	2,88	1,39
6	24,57	51,71	3,43	1,27
7	23,73	50,59	3,95	1,17
8	23,09	49,69	4,45	1,09
9	22,57	48,94	4,92	1,03
10	22,13	48,34	5,37	0,97
11	21,85	47,80	5,80	0,93
12	21,48	47,31	6,22	0,89

tableau IV.5 de Naslen

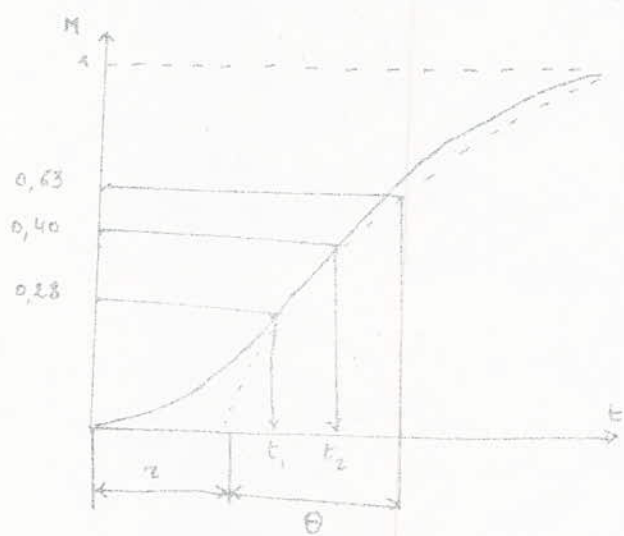


FIG IV.6

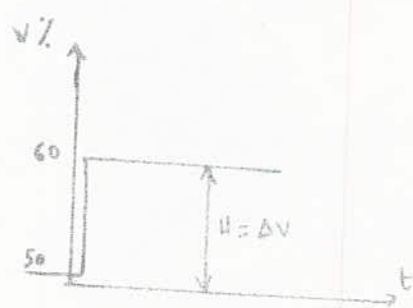


FIG IV.7 (a)

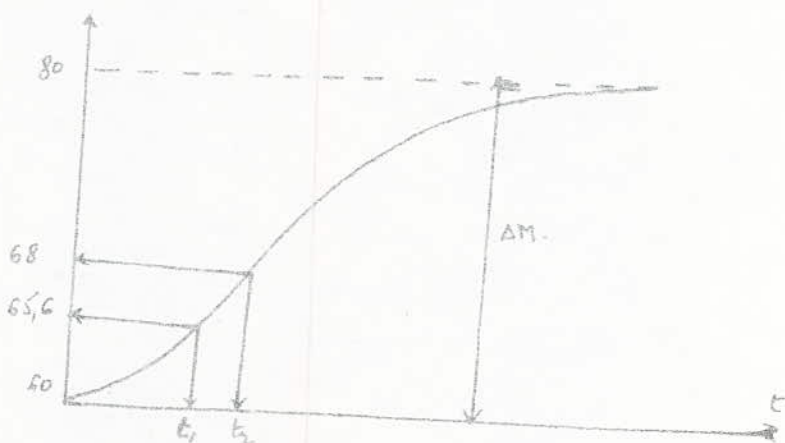


FIG IV.7 (b)

### 3.4 méthode de Strejc améliorée :

Un inconvénient de la méthode de Strejc classique réside dans le fait que, lorsque le rapport des paramètres de forme de la courbe ne correspond pas à une valeur entière de  $n$  qui est le cas général on prend la valeur immédiatement inférieure et on rend compte de la simplification en introduisant un temps mort artificiel  $t'$ ; il en résulte que même si la courbe ne présente pas de temps mort réel, l'expression obtenue est toujours de la forme :  $F(p) = \frac{K e^{-t'p}}{(1 + TP)^n}$

Le calcul de la structure du régulateur et celui de ces réglages peuvent être affectés par cette approximation. On évite cet inconvénient en introduisant la notion de dérivée fractionnaire. En effet, le nomogramme permet de trouver une valeur fractionnaire de  $n$ .

- mode d'emploi du nomogramme :

L'enregistrement montrant la réponse indicielle du système est gradué en prenant pour origine des temps, l'instant où l'échelon a été appliqué, on trace un trait vertical à l'instant qui correspond au début d'évolution de la courbe. Entre l'origine des temps et ce trait, on mesure le temps mort éventuel; on trace la droite tangente à la courbe au point d'inflexion  $Q$  et on note les valeurs de  $T_u$  et  $T_a$ ;  $T_u$  est mesuré à partir de l'instant où la variable commence à évoluer, on calcule le rapport  $T_u / T_a$ .

- l'échelle située à gauche du nomogramme donne directement la valeur de  $n$  en face de celle du rapport  $T_u / T_a$ .

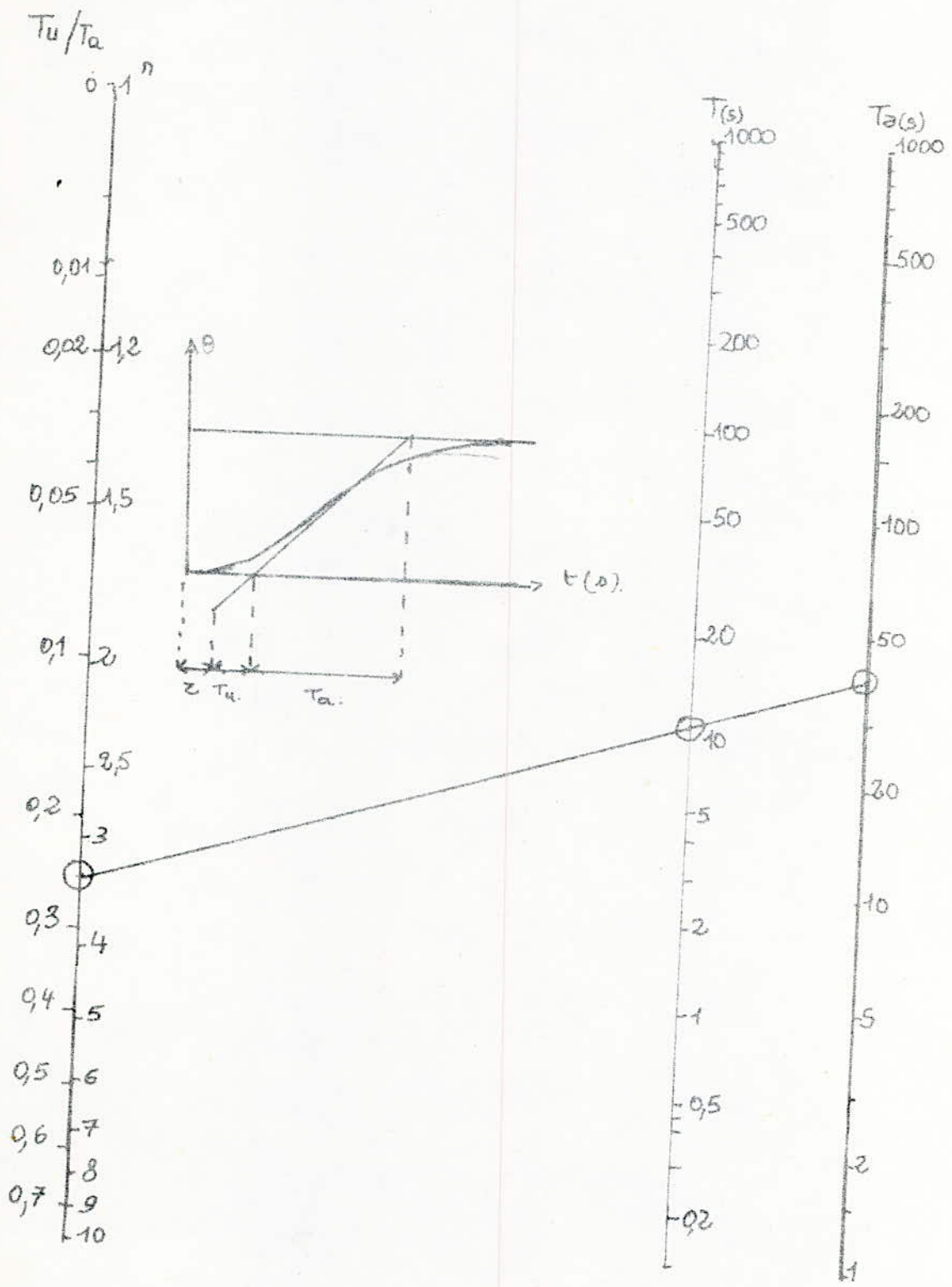


FIG IV . 8 NOMOGRAMME DES TRANSMITTANCES

La méthode exponentielle est donc une méthode qui permet de trouver un modèle mathématique approximatif du premier ordre.

3.5 méthode exponentielle du second ordre :

Cette méthode identifie le système à un modèle du second ordre

$$F(P) = \frac{K}{(1+T_1P)(1+T_2P)}$$

La réponse est  $y(t) = K \left( 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-t/T_1} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-t/T_2} \right)$   
on a vu dans le chapitre III que :

$\text{Log } \Delta = f(t) = A - Bt$ ,  $f(t)$  est une fonction linéaire qui a pour pente  $-B = \frac{1}{T_1}$  et pour ordonnée à l'origine  $A = \text{Log } \frac{KT_1}{T_1 - T_2}$  ;  $\Delta$  étant l'écart  $\Delta = K - y(t)$ .

- application de la méthode : procédé :

On trace l'écart  $\Delta = K - y(t)$ .

On trace la courbe  $\text{Log } \Delta = f(t)$ .

on détermine la pente  $-\frac{1}{T_1}$

on détermine l'ordonnée à l'origine  $\text{Log } \frac{KT_1}{T_1 - T_2}$

$K$  et  $T_1$  étant connus on peut déterminer  $T_2$

## CHAPITRE V ANALYSE EXPERIMENTALE DES PROPRIETES DYNAMIQUES

Avant d'exposer nos mesures faites et nos résultats obtenus nous avons jugé utile de décrire la serre d'essai de l'I.D.M. (Institut de développement des cultures maraîchères) de Staoueli, où nous avons pu effectuer les essais concernant l'enregistrement de la température et de l'humidité en agissant sur le chauffage et le refroidissement de la serre.

### 1. PRESENTATION DE LA SERRE :

#### 1.1. dimensions :

Les dimensions des serres peuvent varier d'une serre à une autre selon les besoins.

La figure V.1 représente la serre d'essai n° 3 de l'I.D.M.

- longueur 21 m
- largeur 9 m
- hauteur des pieds 2,4 m
- hauteur du sommet 4,5 m
- pente des versants  $45^\circ$
- surface cultivable  $180 \text{ m}^2$
- Volume de la serre  $660 \text{ m}^3$
- surface des parois  $360 \text{ m}^2$

#### 1.2 description et fonctionnement :

La serre présentée ci-dessus est une serre verrière, à armatures métalliques en tubes galvanisés.

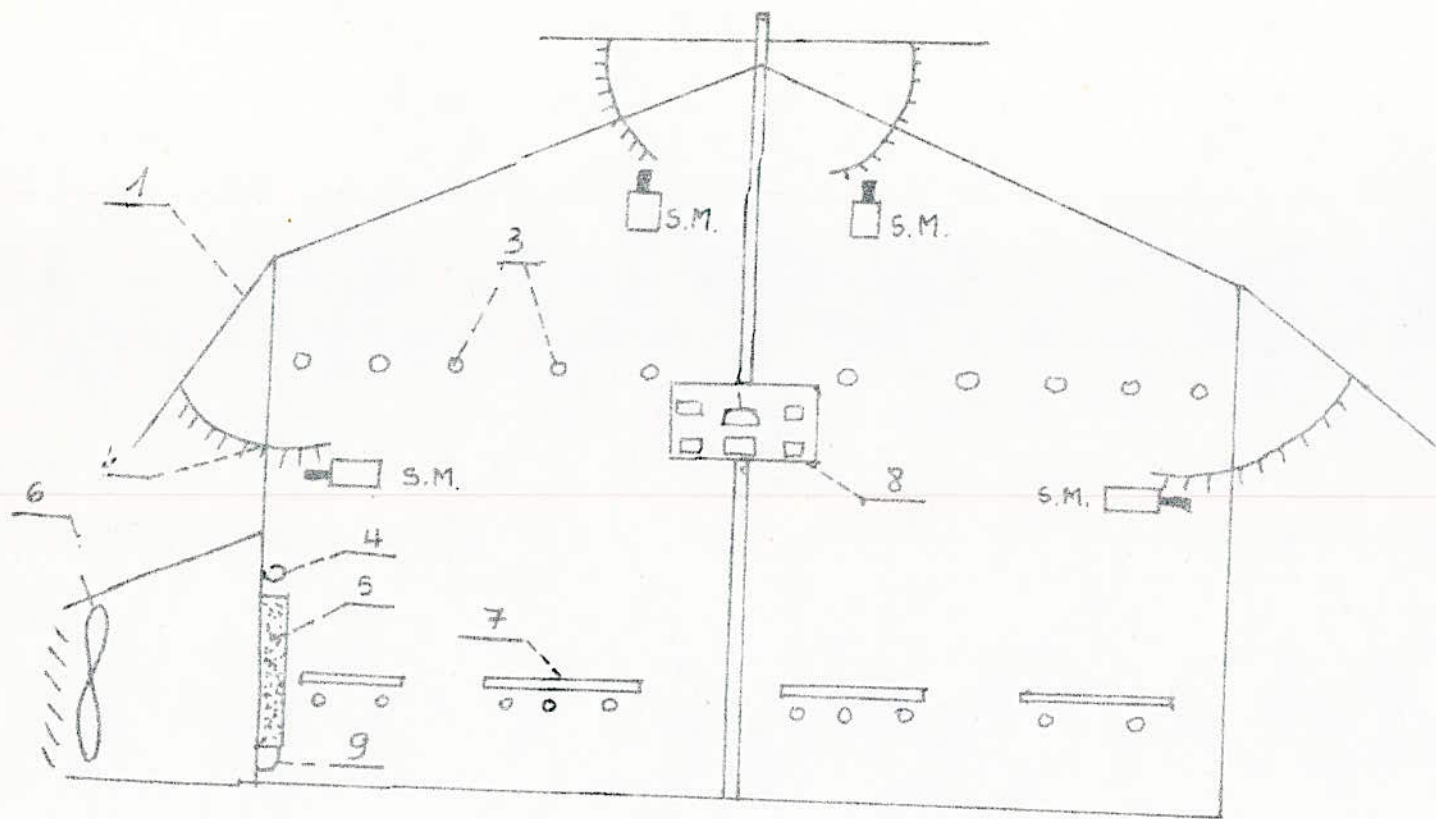


FIG. VI.

- 1: chassis - 2: cremailles - 3: conduite d'eau (pour l'humidification). -  
 4: panneau humidificateur - 6: ventilateur - 7: Tablette -  
 8: tableau pour capteurs - 9: bacs de decantation. -



Son verre est martelé de 4 à 6 mm d'épaisseur, son étanchéité et sa tenue sont assurées par un joint polystyr.

L'aération de la serre se fait par clapets et ventilateurs; une couverture continue sur chaque versant le long de la serre, l'ouverture et la fermeture des clapets sont commandées par deux moto-reducteurs asservis par thermostat.

Pour le chauffage de la serre, une canalisation est montée avec des tubes en fer recouverts d'une peinture anti-corrosive.

Le chauffage est assuré par aérothermes et par les rechauffeurs primaire et secondaire de la chambre de climatisation au cas où l'énergie solaire ne suffit pas. L'eau chaude pulsée à 100°C assure le chauffage commandé par thermostat, une pompe assure la circulation de l'eau à travers la canalisation ainsi qu'une autre assure le recyclage.

La régulation de la température est assurée par un T.A control progressive comprenant: des potentiomètres de consigne, des sondes d'ambiances ainsi qu'un moteur avec régulateur incorporé. Le moteur est un régulateur électronique à fonction proportionnelle et intégrale. La stabilité du système est obtenue par un potentiomètre de réponse à action proportionnelle, et par l'asservissement thermique à action intégrale; ces deux actions peuvent être réglées séparément selon l'inertie de l'installation et aussi suivant la stabilité de la boucle de régulation.

Le refroidissement de la serre est assuré par le système cooling; son principe repose sur le fait que l'évaporation produit du froid,

ainsi la température de tout air sec diminue proportionnellement au poids d'eau absorbée par cet air.

Sept ventilateurs soufflent dans des caissons situés à l'extérieur de la serre, l'air est obligé de passer à travers des panneaux de humidificateurs. L'air traverse la serre avec une faible vitesse afin de ne provoquer aucune agitation importante, au niveau des plantes, et sort ensuite par les ouvertures calibrées sur la face droite de la serre.

L'arrosage : la serre est équipée par un système d'arrosage automatique par aspersion, utilisant des rampes d'arrosage en tubes P.V.C. rigides suspendus sous fermes par des crochets support en fil galvanisé.

En cas de panne d'un des éléments de régulation, ou les températures seront trop basses ou trop haute, un système d'alarme commandé par thermostat déclenche un avertisseur sonore.

La source d'énergie : Les serres de l'I.D.C.M sont alimentées directement par le réseau électrique de la SONELGAE par l'intermédiaire d'un post-transformateur. Un groupe électrogène de 40 kVA avec démarrage automatique en cas de panne du réseau électrique.

Description du programmeur d'arrosage R.A. 102 FIG V.2

- 1 - fusible principal
- 2 - lampe témoin du secteur
- 3 - lampe témoin "START" allumée pendant la programmation
- 4 - lampe témoin "AUTO-START"
- 5 - lampe témoin, s'allume lors du passage d'une vanne d'une autre

description du programmeur d'arrosage automatique R.A. 102

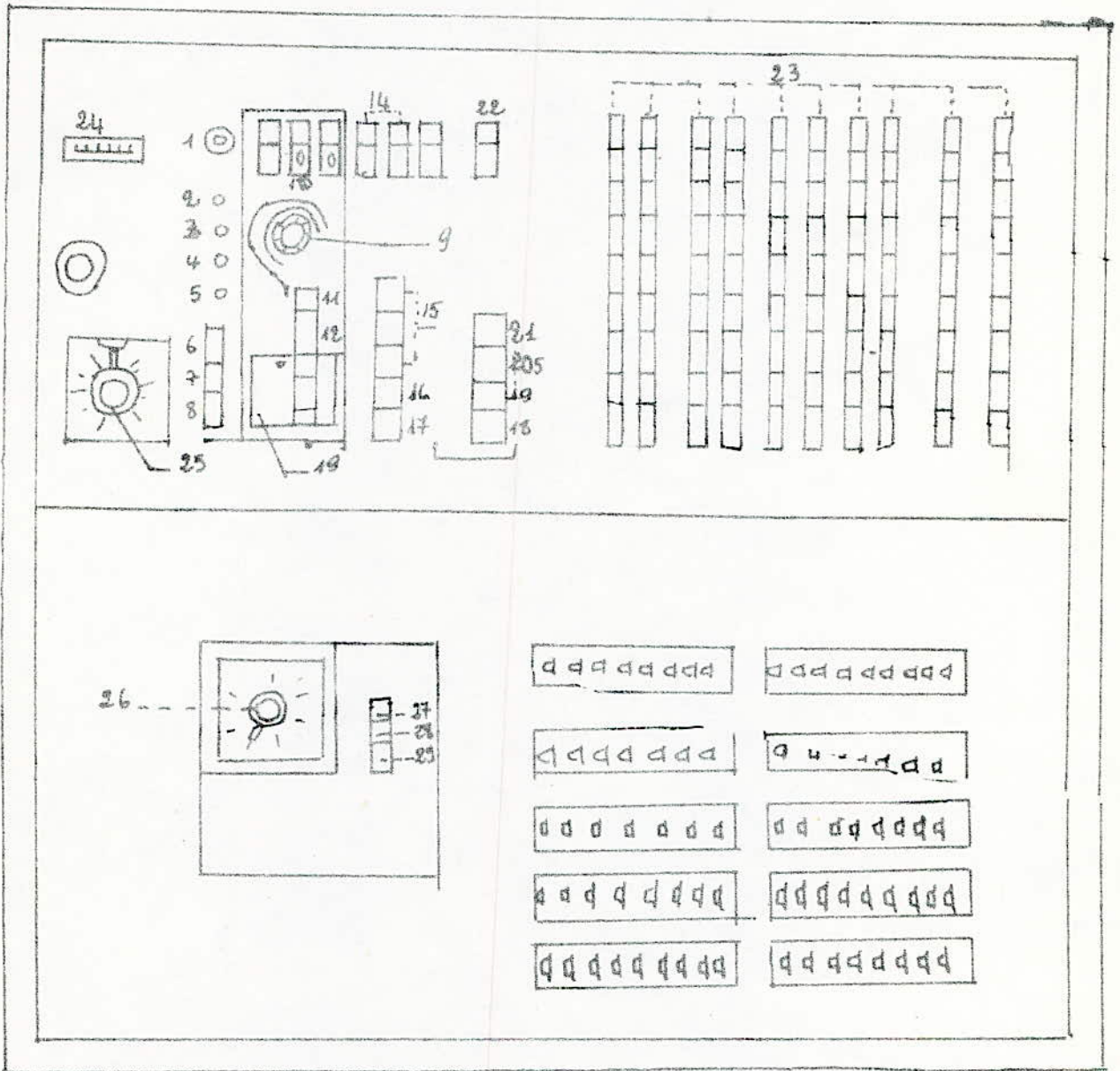


FIG V.2.

- 6- commutateur principal "NET" secteur.
- 7- touche "START" pour un démarrage instantané
- 8- touche "AUTO-START"
- 9- dispositif avec bouton de réglage du temps d'arrosage
- 10- compteur d'impulsion : indique le temps d'arrosage écoulé en l.
- 11- touche "SEC"
- 12- touche "MIN"
- 13- dispositif de dosage d'engrais.
- 14- compteur d'impulsion pour ordre de programmation.
- 15- touche "A" "B" "C" "D" "E" pour le fonctionnement des vannes
- 16- touche poussoir pour l'interrupteur et le réglage manuel
- 17- touche "L"
- 18- touche "M"
- 19- touche "N"
- 20- touche "O"
- 21- touche "P"
- 22- compteur d'impulsion indique le nombre de répétitions
- 23- touche pour le branchement des vannes.
- 24- instruments de contrôle du circuit de vannes.
- 25- pré-réglage VI ou VI
- 26- pré-réglage VS24 avec les touches "R"27 "S"28 et "T"29

Description du tableau de commande :

La figure I 3 représente l'armoire de la commande électrique : elle renferme les contacteurs, disjoncteurs, interrupteurs ainsi que les voyants lumineux de signalisation.

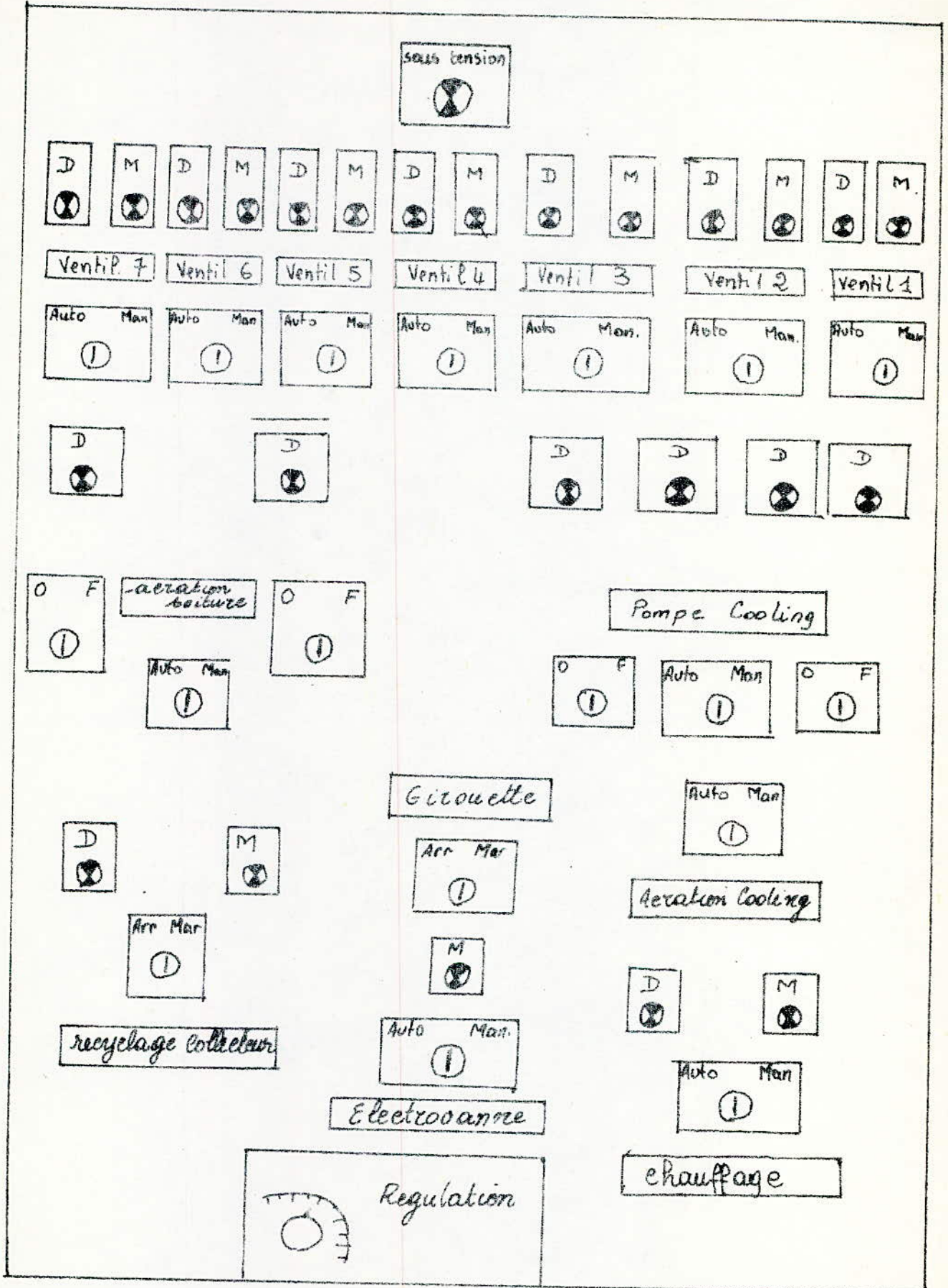


FIG V. tableau de commande.

Les éléments réglants:

— pompe de chauffage WILLO P40-2

$\Delta$  220 v,  $\Lambda$  380 v, 10 A, 50 Hz, 1-3 N

75 w, 10  $\mu$ F, 240 V.D.B :  $\frac{10x}{0,55x}$

— pompe de recyclage WILLO D.30

$\Delta$  220 v ;  $\Lambda$  380 v, 0,40 A ; 50 Hz

20 w ; 5  $\mu$ F, 240 V.D.B ;  $\frac{0,47x}{0,284x}$  ; 1400 tr min<sup>-1</sup>

— moteur T.A. control :

asservissement thermique 1-5 ; calibrage  $\pm 7^\circ\text{C}$

bande proportionnelle 0 à 12 $^\circ\text{C}$ , pointe de consigne -10 à 50 $^\circ\text{C}$

alimentation électrique 24 v ; puissance 12,5 VA.

température max 40 $^\circ\text{C}$  ; température min 0 $^\circ\text{C}$

— moteurs pour les volets (au nombre de 4).

type R1dx - MVT 63 A4

Rap 1/52 ; Ch : 0,2 ;  $\Lambda$  380 v ; A = 0,56,  $\cos\varphi = 0,16$  ; 50 Hz

260 tr min<sup>-1</sup>.

— moteurs pour les ventilateurs.

moteur asynchrones ; type LEROY SOMMER Ls 80L2

$P_n = 0,55$  Kw ;  $\Lambda$  380 v ; 1,6 A ;  $\Delta$  220 v ; 2,8 A ;

$\cos\varphi = 0,76$  ;  $N = 930$  tr.min<sup>-1</sup> ; 50 Hz ;  $\theta = 40^\circ\text{C}$

— vannes :

1 vanne d'arrêt sous chaque tablette.

1 vanne à 3 voies motorisée, T.A control sur le départ du circuit de chauffage.

1 vanne manuelle d'isolement au départ du circuit de chauffage.

1 vanne d'arrêt par mappe de tubes sous formes.

2 électrovannes dans le circuit d'arrosage.

1 électrovanne au départ du réseau d'alimentation en eau des panneaux humidificateurs.

1 vanne manuelle au départ du circuit de vapeur.

## 2 DISPOSITIF DE MESURE

Le dispositif de mesure comprend : voir FIG V.4.

— une table traçante à deux entrées  $V_1$  et  $V_2$ .

— deux ponts de mesure alimentés par pile type 6F.22 9v

— deux capteurs de température à résistance Nickel :  $\alpha = 63.10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

— deux amplificateurs de tension (µA 741) avec gain variable utilisés pour amplifier la tension aux bornes des ponts lors du déséquilibre.

— une alimentation stabilisée 18v avec pont diviseur pour l'alimentation des amplificateurs opérationnels (µA 741).

## 3 MODE DE MESURE ET ESSAIS :

Pour l'enregistrement de la réponse indicielle, on soumet le système à un échelon d'excitation matérialisé par l'ouverture de la vanne de chauffage ou par l'enclenchement du système Cooling.

Remarque : la serre où nous avons pu effectuer nos essais contenait des plantes ; la présence de ces dernières nous a obligé de travailler dans des plages de température et d'humidité réduites. 20°C à 30°C pour la température, 40% à 60% pour l'humidité

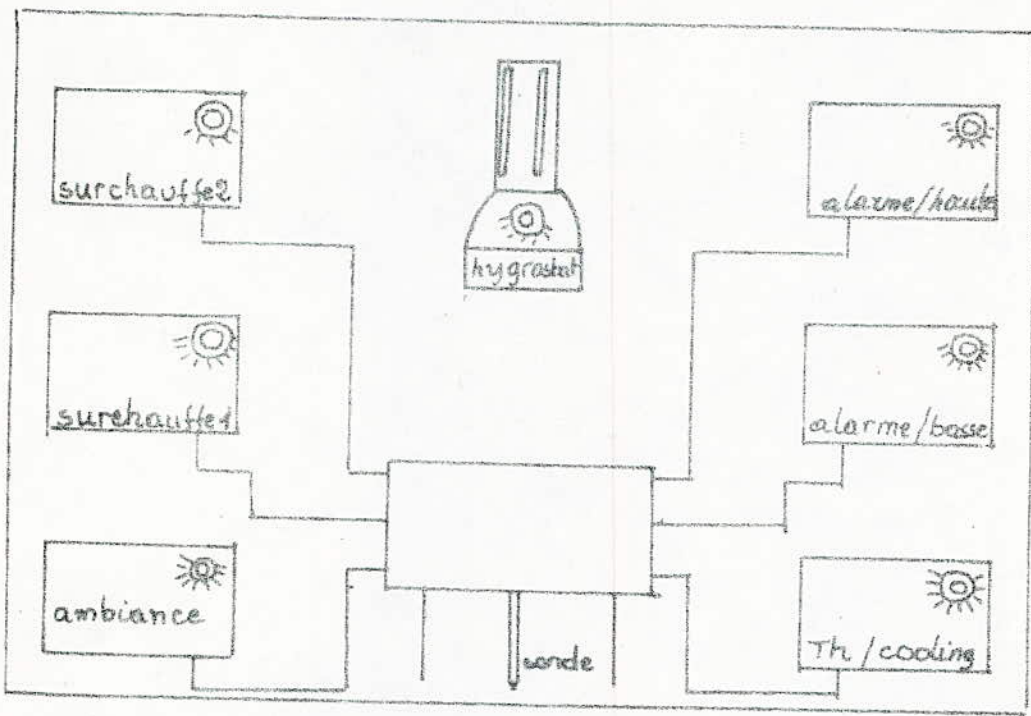


FIG V.5

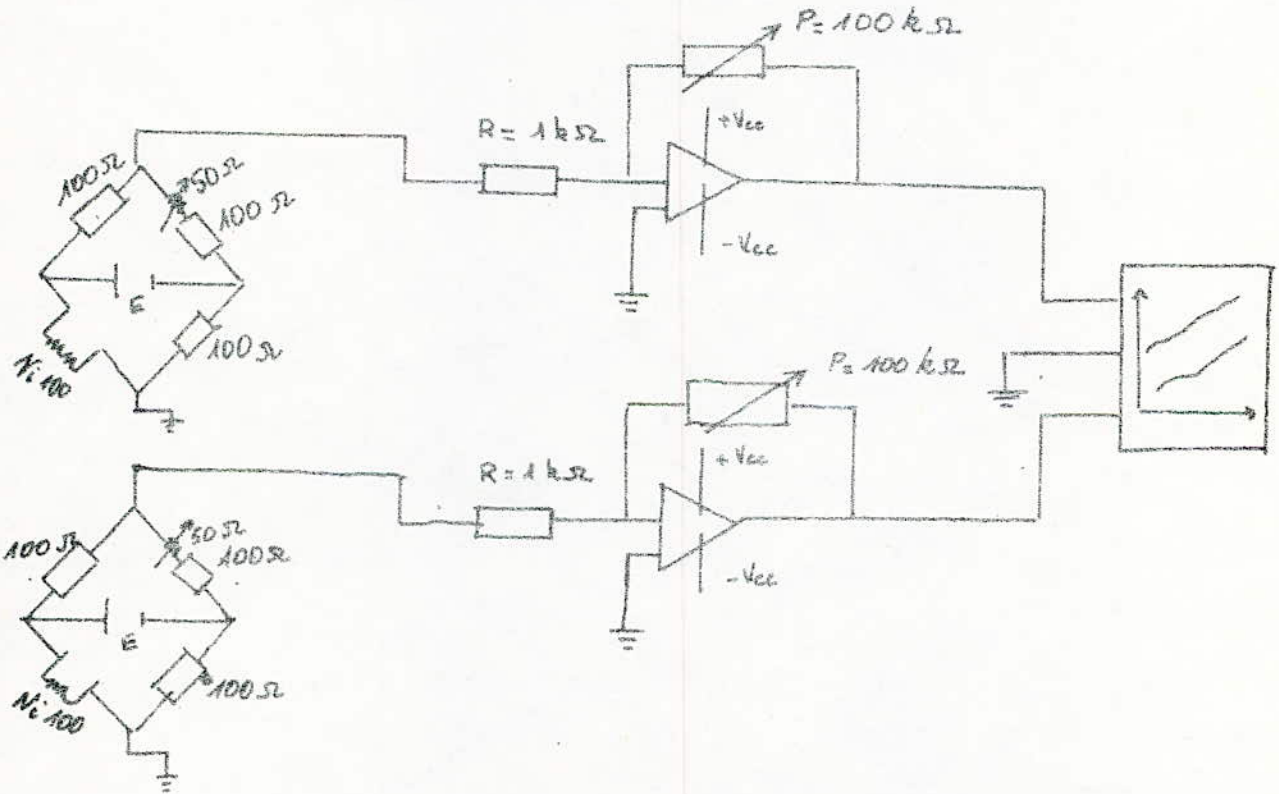


FIG. V.4



Comme le jour où on a travaillé était ensoleillé avec la température extérieure de  $25^{\circ}\text{C}$ , on était contraints de choisir un degré d'ouverture de 50% pour la vanne d'eau chaude et un degré d'ouverture de 100% pour la vanne d'eau froide de l'humidificateur.

Pour l'enregistrement des courbes, et pour avoir une variation de température ou d'humidité relative dans une plage bien distincte, on a choisi un gain approprié des amplificateurs de tension  $V$  du pont de mesure lors du déséquilibre.

— enregistrement de la température :

nous disposons de deux capteurs, donc on a la possibilité d'enregistrer deux variations de température en deux lieux différents lors du chauffage ou le refroidissement de la serre.

— enregistrement de l'humidité :

pour déterminer l'humidité relative, on utilise la méthode de psychrométrie. Les deux capteurs sont placés en un même lieu, l'un donnant la température sèche, l'autre donnant la température humide car ce dernier a son réservoir humide à l'aide d'un tissu en coton imbibé d'eau. À l'aide du diagramme psychrométrique (voir annexe) on détermine  $H_r$  en % en ayant la température humide  $\theta_h$  et la température sèche  $\theta_s$ .

Avant chaque essai on a pris les conditions extérieures climatiques, ainsi que les températures et l'humidité relative ini-

tiales et finales.

Pour une meilleure présentation on résumera les relevés et les résultats obtenus respectivement dans les tableaux I.1 et I.2 (voir annexe); les courbes enregistrées se trouvent également en annexe.

— Remarques :

toutes courbes et les essais sont numérotés comme suit :

— chauffage de la serre :

essai I.a.1 courbe I.a.1

essai I.a.2 courbe I.a.2

— refroidissement de la serre

essai I.b.1 courbe I.b.1

essai I.b.2 courbe I.b.2

— humidification de la serre :

essai II.a. courbe II.a

— déshumidification de la serre

essai II.b. courbe II.b.

2. A partir des courbes II.a et II.b et du diagramme psychrométrique on dressera le tableau I.3, qui nous donnera les variations de l'humidité relative Hr en fonction du temps : - courbe II.a lors de l'humidification de la serre et la courbe II.b lors de la déshumidification.

3. pour tous les essais, on a donné à la table traçante une vitesse d'enregistrement de 20 s/cm et une sensibilité de 0,4 mV/cm.

— choix des méthodes d'identification :

Nous avons jugé utile d'analyser les courbes enregistrées par trois méthodes d'identification, notre choix a été fait comme suit :

a/ la méthode exponentielle du premier ordre qui consiste à identifier les transmittances à une fonction du 1<sup>er</sup> ordre

b/ la méthode de Broida identifie les transmittances d'ordre quelconque en une fonction du 1<sup>er</sup> ordre, nous permet de comparer les résultats avec ceux obtenus par la méthode exponentielle.

c/ la méthode de Strejc Améliorée qui est la plus exacte à condition que le point d'inflexion est facilement repérable nous permet de faire le choix et le calcul des régulateurs.

#### 4 INTERPRETATIONS DES RESULTATS :

a/ Sur les courbes enregistrées pour la température, on constate que la variation de lieux des deux capteurs entraîne une variation de la température qui peut être prise en considération pour certaines végétations (de l'ordre de 2°C, 3°C), donc les propriétés dynamiques diffèrent d'un point à un autre dans une serre, on explique cet écart de température par :

— les dimensions de la serre qui sont grandes.

— la répartition non uniforme de la végétation existante.

— les fuites éventuelles dues à l'ouverture de la porte (très fréquente), des parois, la toiture, ...

b/ Les temps morts dus au chauffage sont inférieurs à ceux

dûs au refroidissement de la serre, les explications primordiales sont les suivantes :

— les conditions climatiques extérieures du jour où on a fait les essais étaient les suivantes: température  $25^{\circ}\text{C}$ , vent moyen. Ces conditions ont un effet favorisant pour le chauffage et au contraire défavorisant pour le refroidissement.

— après avoir arrêté le chauffage, la tuyauterie encore chaude rayonne toujours après un certain temps de l'énergie, ce qui explique le retard observé lors de l'enclenchement du système Coding

c/ Pour l'enregistrement des courbes donnant l'humidité on a placé les deux capteurs là où la température est à peu près quasi-continue (au milieu de la serre et à mi-hauteur).

c/ Sur le tableau des résultats I.2 on remarque les transmittances pour la méthode exponentielle et la méthode de Broida sont voisines en fonction du lieu du capteur, on peut donc identifier la transmittance de la température à une fonction du 1<sup>er</sup> ordre. La méthode de Strejc permet d'identifier une transmittance à une fonction d'un certain ordre.

##### 5. Recommandations :

Vu que la température varie d'un lieu à un autre de la serre une nécessité de placer plusieurs capteurs de température en plusieurs lieux avec un régulateur avec sommation des impulsions pour donner une valeur moyenne de température à peu près constante dans tout le volume de la serre.

On peut utiliser pour le chauffage de la serre un aérothermes,

qui a des avantages sur le système de chauffage existant dans la serre avec les tuyaux.

— la répartition de la température est plus uniforme

— l'aérotherme compense 200 à 300 m de tuyauterie

## CHAPITRE VI ANALYSE ET CHOIX DES ELEMENTS DE COMMANDE ET DE MESURE

Certaines transformations physiques ou chimiques, pour lesquelles son apport de chaleur est nécessaire, demandent des températures plus ou moins précises, le rendement de certaines installations est fortement amélioré, lorsque la température est réglée à une valeur convenable, tel est le cas des serres.

L'hygrométrie dans l'air est un facteur très influent sur le confort humain, de même pour la végétation qui exige une humidité bien précise surtout pour la phase de développement

### 1 CAPTEURS DE TEMPERATURE :

1.1 les thermomètres à mercure en verre : sont les plus utilisés et sont les plus simples. La gamme de température d'utilisation s'étend de  $-39^{\circ}\text{C}$  à  $+500^{\circ}\text{C}$ , ils sont les plus utilisés.

1.2 : les thermomètres à lame bimétallique ou bilames : sont très simples et largement utilisés en industrie, la gamme d'utilisation s'étend de  $-37^{\circ}\text{C}$  à  $+560^{\circ}\text{C}$ .

1.3 : les thermomètres à résistance : ils se composent d'une résistance de mesure qui varie avec la température suivant une loi connue, la mesure de sa résistance nous donne la température, cette résistance est introduite dans un pont de mesure (voir FIG VI.1.). à l'équilibre  $V=0$ , si le pont

si le pont est déséquilibré une tension  $V$  apparaîtra entre A et B due à une variation de température au niveau de la sonde  $R_4$ , les sondes  $R_4$  utilisées sont faites soit par le Nickel, soit le platine soit le cuivre, la résistance  $R$  variable sert à équilibrer le pont. La variation de la résistance est détectée par un montage pontentiométrique soit par un montage en pont de Weaston. La précision est bonne et elle est de  $1/100$  de degrés.

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

1.5 Le thermocouple : se compose de deux fils métalliques non semblables soudés ensemble à une extrémité, quand la température de soudure varie, il se produit une différence de potentiel électrique aux extrémités libres du fil (effet Thomson et effet Peltier), le thermocouple est donc un élément « électrique ». Les cinq thermocouples les plus utilisés dans l'industrie sont ceux du tableau VII

## 2 CAPTEURS D'HUMIDITE

2.1 le psychromètre : il utilise deux thermomètres, l'un exposé à l'atmosphère sèche, l'autre ayant son réservoir constamment humidifié, à l'aide d'un tissu imbibé d'eau sous l'effet de l'évaporation, la formule de Spring nous donnera l'humidité

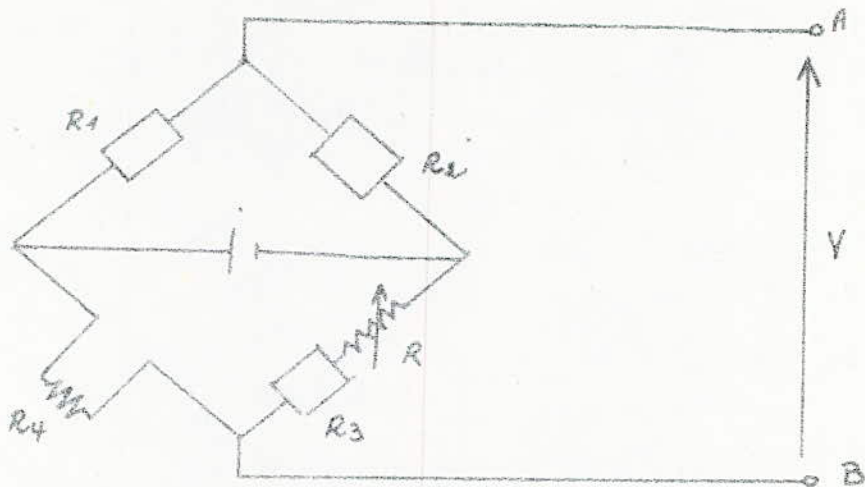


FIG VI.1

thermocouples	gamme d'utilisation °C	mV par °C
Cu / constantin	-180 à +310	0,0594
Fe / constantin	-18 à +700	0,0630
Chrome / Alumel	+310 à +980	0,0387
Pt 10% / Rh / Pt	+700 à +1600	0,0117
Pt 13% / Rh / Pt	+700 à +1600	0,0136

TABLEAU VI.1

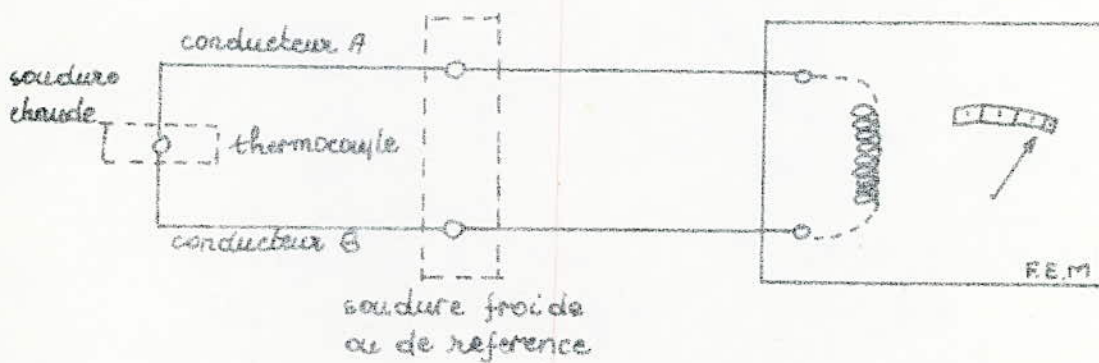


FIG VI.2



humidité relative :  $H_r = \frac{E}{E_h} = 1 - \frac{0,5(\theta_s - \theta_h)}{E_h} \cdot \frac{P_b}{760}$

$E$  : tension de vapeur [mm de Hg]

$E_h$  : tension de saturation de la vapeur correspondant à  $\theta_h$

$\theta_s, \theta_h$  : température sèche et température humide.

Remarque : si  $\theta_s = \theta_h$  on aura  $H_r = 100\%$ . L'air est saturé on peut aussi déterminer  $H_r$  en utilisant le diagramme psychrométrique.

2.2 Tygromètre : son principe de fonctionnement est basé sur l'évaporation de l'eau contenue dans la solution de liell et la récupération de l'eau dans l'air jusqu'à l'équilibre. Cet état d'équilibre ne dépend que de la tension de vapeur de l'air environnant, ce qui donne une mesure de l'humidité absolue, l'inconvénient de ce tygromètre est le temps de mesure qui est excessivement long.

2.3 Hygrostats : utilisent comme élément sensible, des cheveux, des synthétiques, des fibres végétales (coton), des rubans plastiques (Nylon). Ils sont à transmission mécanique.

2.4 Hygromètres électronique : sont basés sur la variation de la capacité d'un condensateur en fonction de la quantité d'eau absorbée. Comme exemple nous donnons l'hygromètre électronique "hygrocor" mis au point récemment par le L.E.T.I mesurant l'humidité relative de 5% à 98% de façon instantanée avec une réponse d'une seconde et une reproductibilité de 1%.

### 3 REGULATEURS :

Réguler un paramètre consiste à maintenir à une valeur déterminée ce paramètre; on mesure la valeur existante (mesure), on la compare à la valeur prescrite (consigne) et en utilisant cette différence de ces deux valeurs pour actionner un dispositif qui tend à annuler cette différence. On distingue trois types de régulateurs.

- régulateur continu
- régulateur discontinu
- régulateur quasi-continu.

#### 3.1 régulateur continu :

Un système de régulation est continu si le traitement des signaux se fait d'une manière continue dans le temps, c'est à dire toutes les grandeurs qui le caractérisent sont de nature continue.

#### 3.2 régulateur discontinu :

Le réglage se fait par impulsions déclenchées quand le signal de mesure dépasse la consigne et par impulsions arrêtées quand le signal devient inférieur à la consigne.

#### 3.3 régulateur quasi-continu :

C'est un régulateur dont la caractéristique résultante peut être assimilée à l'un des mode de régulation P, PI, PD, PID mais dont les signaux instantanés sont des séries d'impulsions.

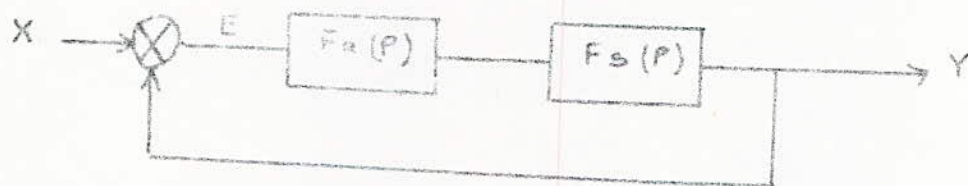
Ce type de régulateur est simple et peut être appliqué aux objets et processus difficiles à régler avec  $T_0/T$  grand

3.4 critère d'une régulation :

Lors de l'étude d'une chaîne de régulation on se retrouve toujours face à des contradictions difficile à éviter simultanément, l'idéal pour un régulateur serait d'assurer :

- une bonne stabilité
- un bon amortissement
- un temps de réponse court.
- une bonne précision.

3.5 analyse fonctionnelle d'un système en boucle fermée:



$F_R(P)$ ,  $F_S(P)$  : fonction de transfert du régulateur et du système

$X$ ,  $Y$  : grandeurs d'entrée et de sortie.

$E$  : erreur.

En boucle fermée la transmittance est :  $F(P) = \frac{F_R(P) \cdot F_S(P)}{1 + F_R(P) \cdot F_S(P)}$

L'erreur  $E(P) = X(P) - Y(P) = X(P) [1 - F(P)]$

3.6 caractéristique des différents types de régulateurs:

a) régulateur à action proportionnelle : P

La fonction de transfert en boucle fermée pour la réponse

indicielle (échelon) du système est :  $F(P) = \frac{F_R(P) \cdot F_S(P)}{1 + F_R(P) \cdot F_S(P)}$

La fonction de transfert du régulateur P est :  $F_R(P) = K_P$

alors l'écart  $E(P) = \frac{1}{P} \frac{1}{1 + K_P F_S(P)}$

l'écart permanent  $E_0 = \lim_{P \rightarrow 0} P E(P) = \frac{1}{1 + K_P K_0}$

avec  $K_0$  gain statique de  $F_S(P)$ .

b/ régulateur à action intégrale : I

$$F_R(P) = \frac{K_i}{T_i \cdot P} \quad ; \quad F(P) = \frac{K_i F_S(P)}{T_i \cdot P + K_i F_S(P)}$$

$$E(P) = \frac{T_i}{T_i \cdot P + K_i F_S(P)} \quad ; \quad E_0 = 0$$

Le régulateur intégral annule l'écart permanent.

c/ régulateur à actions intégrale et proportionnelle : PI

$$F_R(P) = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot P} \right) \quad ; \quad F(P) = \frac{K_{Pi} (1 + T_i \cdot P) F_S(P)}{T_i \cdot P + (T_i \cdot P + K_{Pi}) F_S(P)}$$

$$E(P) = \frac{T_i \cdot P}{T_i \cdot P + K_{Pi} (1 + T_i \cdot P) F_S(P)} \quad ; \quad E_0 = 0$$

c/ régulateur à actions proportionnelle et dérivée : PD.

$$F_R(P) = K_{Pd} (1 + T_d \cdot P) \quad ; \quad F(P) = \frac{K_{Pd} (1 + T_d \cdot P) F_S(P)}{1 + K_{Pd} (1 + T_d \cdot P) F_S(P)}$$

$$E(P) = \frac{1}{P} \frac{1}{1 + K_{Pd} (1 + T_d \cdot P) F_S(P)} \quad ; \quad E_0 = 0$$

d/ régulateur à actions proportionnelle intégrale et dérivée PID:

$$F_R(P) = K_{Pid} \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot P} + T_d \cdot P \right) \quad ; \quad F(P) = \frac{K_{Pid} \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot P} + T_d \cdot P \right) F_S(P)}{1 + K_{Pid} \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot P} + T_d \cdot P \right) F_S(P)}$$

$$E(P) = \frac{1}{P} \frac{1}{1 + K_{Pid} \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot P} + T_d \cdot P \right) F_S(P)} \quad ; \quad E_0 = 0$$

3.7 calcul et mise au point des régulateurs de température et d'humidité :

a/ température :

on utilise les caractéristiques pour le choix et le calcul des régulateurs.

Le choix de  $K_0$  est important, avec  $K_0$  grand on a un régime transitoire qui est grand, et avec  $K_0$  petit on aura instabilité. On a choisi pour nos essais les données pour le calcul du régulateur de sorte que le système soit considéré dans les conditions les plus défavorables c'est à dire  $\frac{T_0}{T}$  le plus petit possible dans nos essais.

on prend :  $T_0 = 30$  s ;  $T = 160$  s ;  $K_{ob} = 0,07$

$\frac{T_0}{T} = 0,19$  ; en utilisant la caractéristique du régulateur

P FIG VI. on aura  $1,5 \leq K_0 \leq 9$ , or  $K_p = \frac{K_0}{K_{ob}}$

d'où la bande proportionnelle du régulateur  $21,4 \leq K_p \leq 128,6$  Le coefficient d'amplification doit être compris entre 21,4 et 128,6 pour que le système soit stable.

En laissant une marge de sécurité de 10% pour la stabilité on aura  $K'_0 = K_0(1 - 10\%) = 9 \times 0,9 = 8,1$ .

L'écart permanent :  $E_0 = \frac{1}{1 + 8,1} = 0,109$

L'écart admissible  $E_{adm} = \frac{\Delta \theta}{\theta_{max}} = \frac{2}{60} = 0,033$

on constate que  $E_0 > E_{adm}$  donc le choix du régulateur P ne convient pas.

régulateur PI :

$T_0 = 30$  s ;  $T = 160$  s ;  $K_{ob} = 0,07$  ;  $\frac{T_0}{T} = 0,19$

D'après la caractéristique du régulateur PI FIG VI. on a :

$5 \leq K_0 \leq 10$ , par extrapolation linéaire on tire :  $K_0 = 8,5$

$K_0 = K_{pi} \cdot K_{ob}$  d'où  $K_{pi} = \frac{K_0}{K_{ob}} = 121,4$ .

Le système est stable pour  $\frac{T_i}{T_0} \leq 3$  d'après le graphe de stabilité

$T_i \leq 3 \cdot T_0 = 3 \cdot 30 = 90$  ;  $\frac{T_i}{T} \leq \frac{90}{160} = 0,56$

b) régulateur d'humidité :

régulateur P :

$$K_{ob} = 0,4 \quad ; \quad T_o = 60 \text{ s} \quad ; \quad T = 40 \text{ s} \quad ; \quad \frac{T_o}{T} = 1,5$$

$$\frac{T_o}{T} = 1,5, \text{ donc } 0,06 \leq K_o \leq 1,6, \text{ donc } 0,15 \leq K_p \leq 3,75$$

la bande proportionnelle du régulateur P :  $0,15 \leq K_p \leq 3,75$

on prendra :  $K'_o = K_o (1 - 10\%) = 1,6 \times 0,9 = 1,44$ .

$$E_o = \frac{1}{1 + K'_o} = \frac{1}{1 + 1,44} = 0,41 \quad , \quad E_{adm} = 0,033$$

$E_o > E_{adm}$ , le régulateur P ne convient pas.

régulateur P.I :

$$K_{ob} = 0,4 \quad ; \quad T_o = 60 \text{ s} \quad ; \quad T = 40 \text{ s} \quad ; \quad \frac{T_o}{T} = 1,5$$

D'après la caractéristique du régulateur P.I on a :

$1 \leq K_o \leq 2$  par extrapolation linéaire on tire  $K_o = 1,95$

$$\text{d'où } K_{pi} = \frac{K_o}{K_{ob}} = \frac{1,95}{0,4} = 4,9$$

D'après le graphe de stabilité il faut que  $\frac{T_i}{T_o} \leq 3$

$$T_i \leq 3 \cdot T_o \quad \text{donc} \quad \frac{T_i}{T} < \frac{3 \cdot 60}{40} = 4,5$$

$\frac{T_A}{T_0}$  ↑

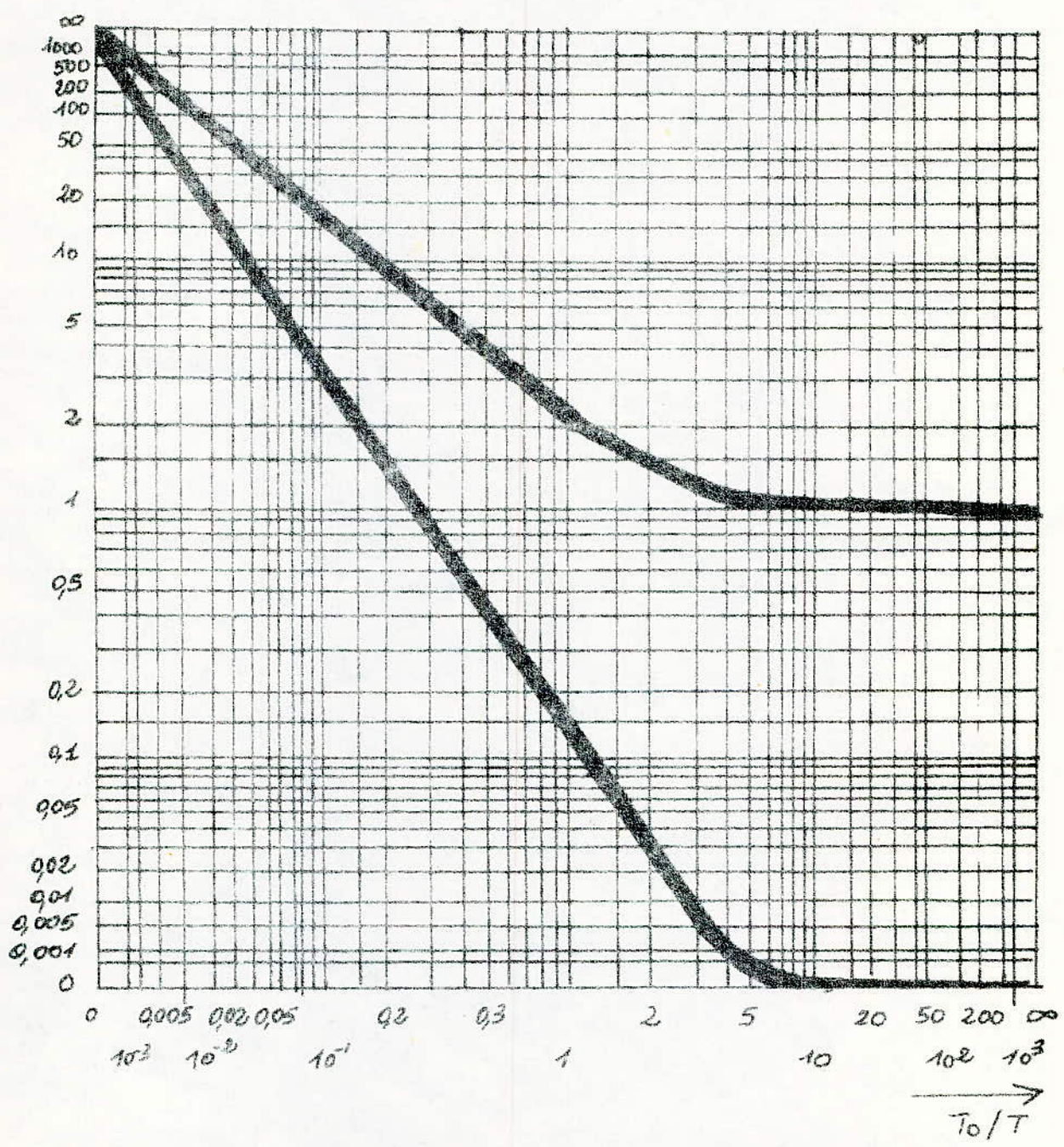


FIG. VI 4 CARACTERISTIQUE DU REGULATEUR P

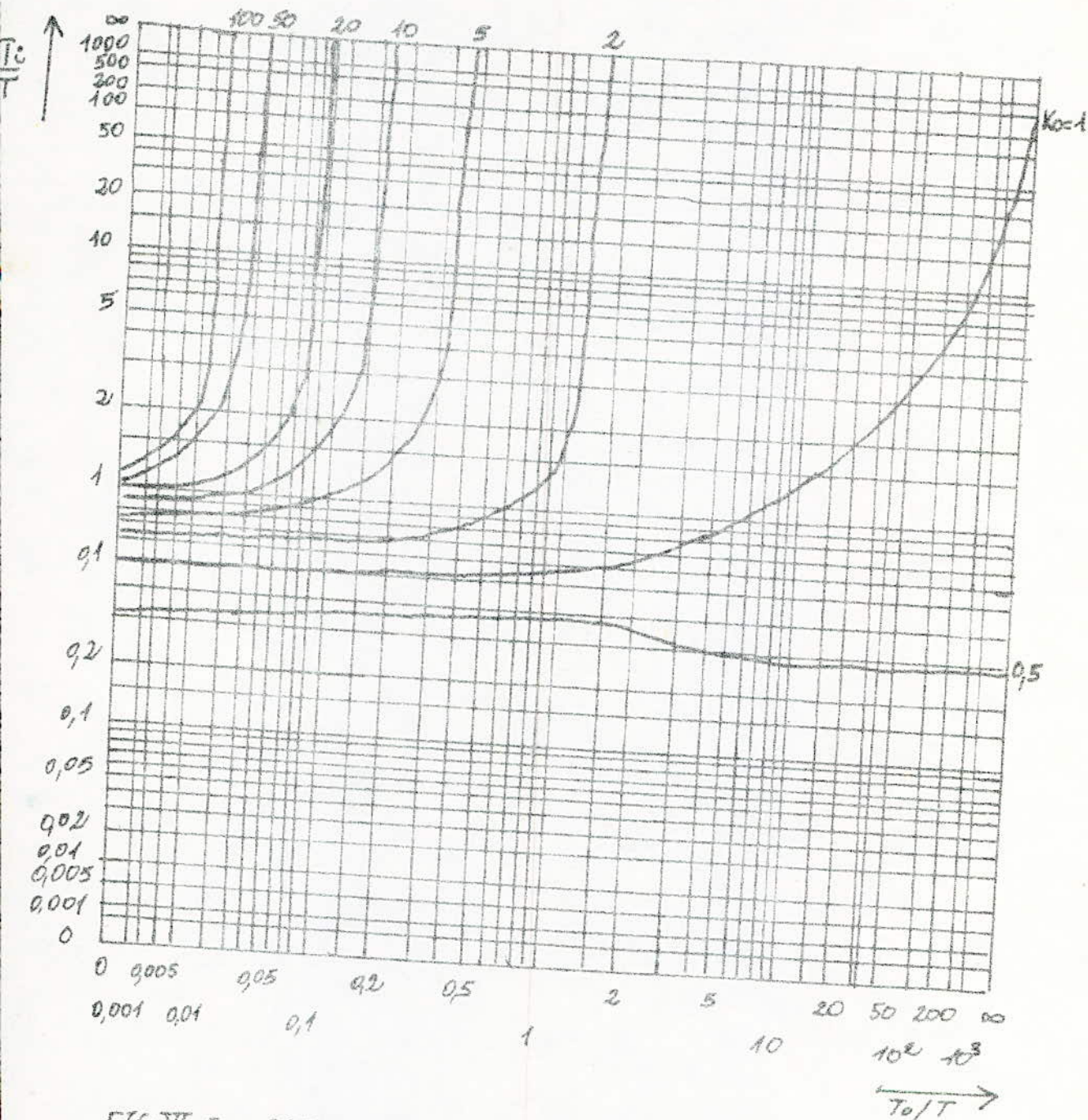


FIG VI.5 CARACTERISTIQUE DU REGULATEUR PI



4 vannes de réglage :

On utilise dans les systèmes de climatisation généralement des servovannes (servomoteurs + vannes) pour le réglage du débit du fluide caloporteur. Elles doivent changer la puissance calorifique d'une façon proportionnelle à la course. Les vannes se classent selon le nombre de voies qu'elles comportent une, deux, trois ou parfois quatre.

4.1 caractéristique des vannes de contrôle :

a/ vanne à caractéristique linéaire : FIG III.

$$\frac{K_v}{K_{vs}} = a + b \frac{H}{H_{100}} \quad \text{où :}$$

- $H$  : ouverture de la vanne.
- $H_{100}$  : ouverture maximum de la vanne
- $K_v$  : la valeur du débit d'eau qui traverse la vanne pour une perte de charge de  $1 \text{ kgf/m}^2$  et pour une course donnée.
- $K_{vs}$  : la valeur de  $K_v$  pour une pleine ouverture ( $H = H_{100}$ )

Soit  $G$  le débit qui traverse une vanne avec une perte de charge  $\Delta P$ .

$$G = K_v \sqrt{\frac{1000 \Delta P}{\rho}}$$

$G$  exprimé en  $\text{m}^3/\text{h}$

$\Delta P$  exprimée en  $\text{kgf/cm}^2$ .

b/ vanne à caractéristique logarithmique : FIG IV

$$\frac{K_v}{K_{vs}} = a \exp\left(b \frac{H}{H_{100}}\right)$$

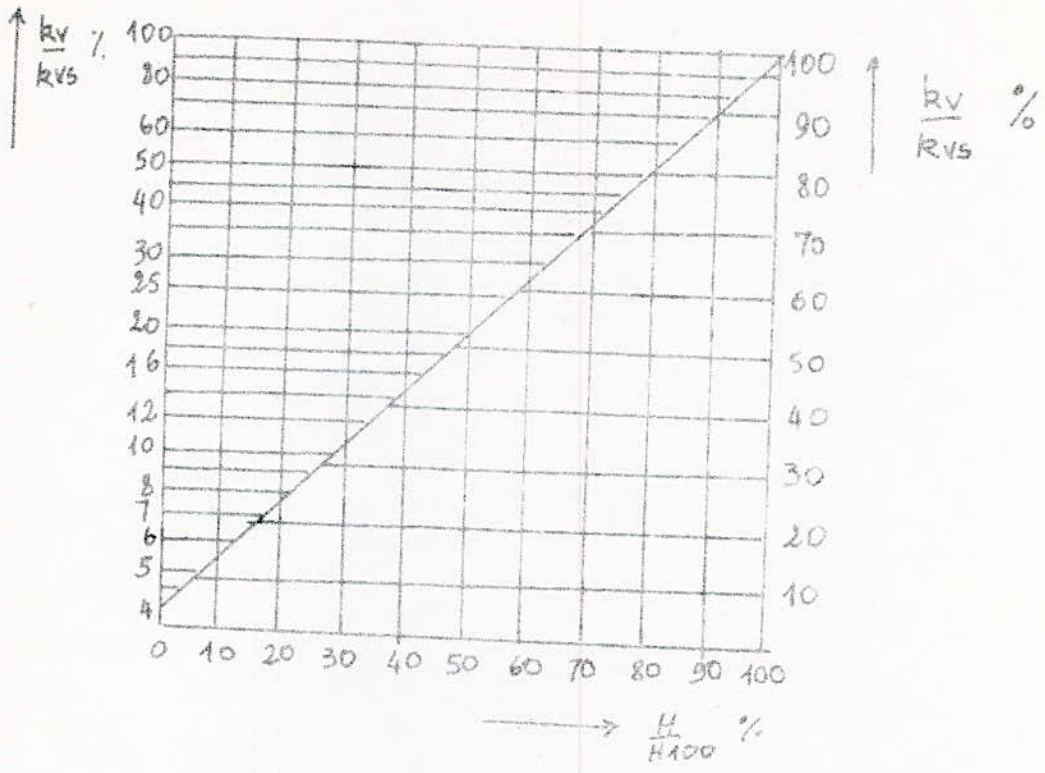


FIG VI.6 Caracteristiques des vannes de regulation

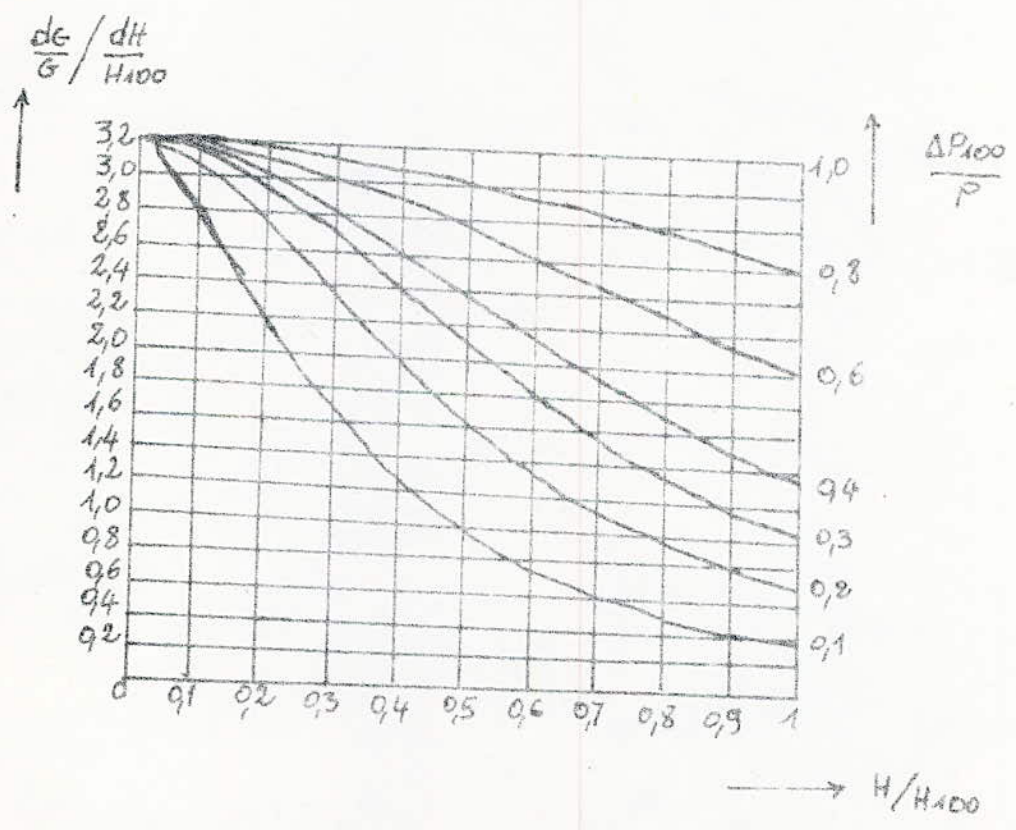


FIG VII.7 Caracteristique de fonctionnement pour vanne logarithmique et objet logarithmique

Remarque: la vanne de contrôle se trouve dans les installations juxtaposée avec des éléments résistants, alors la caractéristique réelle est déformée

4.2 choix de la vanne de contrôle :

Le choix de la vanne de contrôle est très important dans une régulation car la stabilité du système peut dépendre de ce choix.

Pour bien choisir une vanne il faut savoir si l'objet est linéaire ou logarithmique. Dans notre cas on considère l'objet logarithmique.

critère de stabilité: une vanne est stable si  $\frac{K_{ob\ max} \cdot z}{K_{ob\ min}} = 3$   
c'est à dire pour un objet logarithmique et une vanne logarithmique  $\frac{\Delta P_{100}}{\rho} = 0,3 \div 1$

4.3 mode de calcul :

$\Delta P_{min}$  ;  $\Delta P_{max}$  ;  $G_{min}$  ;  $G_{max}$  étant connus.

a/ on détermine les valeurs de  $K_{vmin}$  et  $K_{vmax}$

— par la formule :  $K_v = G \sqrt{\frac{1}{\Delta P_{100}}} [m^3/h]$

$\Delta P_{100}$  : chute de pression dans la vanne pour un débit max

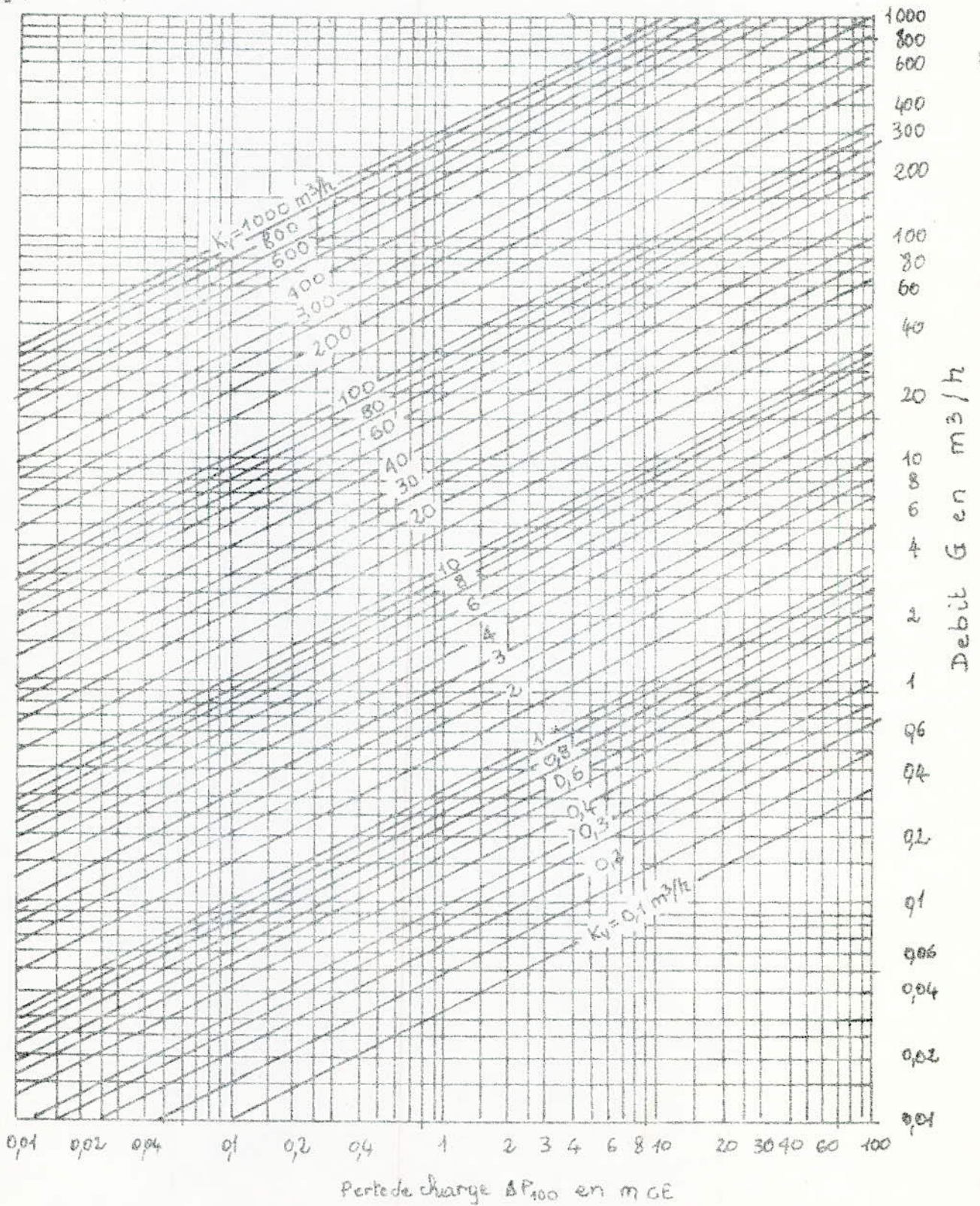
Remarque : cette formule n'est valable que pour l'eau.

— ou bien par le diagramme de détermination de  $K_v$  pour l'eau en ayant  $\Delta P_{100}$  en mCE ( $1\ kgf/cm^2 \rightarrow 10\ mCE$ ) FIVEVI.

b/ on détermine les dimensions de la vanne  $\frac{K_{vmax}}{K_{vs}} \approx 0,7$

$K_{vs}$  : valeur provenant du catalogue du fournisseur pour d'éventuels augmentations du débit.

Diagramme pour la détermination du coefficient de vanne  $K_V$  ( $m^3/h$ ) pour l'eau



$\frac{K_{vmin}}{K_{vr}} > 1,1 K_{vr}$  ;  $K_{vr}$  : débit normalisé le plus petit pour lequel la caractéristique de la vanne reste la même que la caractéristique théorique

c/ on détermine  $\frac{H_{min}}{H_{100}}$  et  $\frac{H_{max}}{H_{100}}$  à partir des caractéristique

d/ on détermine  $P = P_1 - P_2 = \Delta P_{min} + \frac{\Delta P_{min} - \Delta P_{max}}{G_{max}^2 - G_{min}^2} G_{max}^2$

e/ on détermine  $\frac{G_{max}}{G_{100}} = \sqrt{1 + \frac{\Delta P_{max}}{P} \left[ \left( \frac{K_{vmax}}{K_{v5}} \right)^2 - 1 \right]}$

f/ on détermine  $\frac{\Delta P_{100}}{P} = \frac{\Delta P_{max}}{P} \left[ \frac{K_{vmax}}{K_{v5}} \right]^2 \left[ \frac{G_{100}}{G_{max}} \right]^2$

Remarque : connaissant  $K_{v5}$  on peut déterminer le diamètre et les dimensions de la vanne à partir d'abaques tableaux et règle fournis par les constructeurs.

## 5 SERVOMOTEURS :

Le signal émis par le régulateur a pour but de commander l'exécution des ordres par l'intermédiaire d'un servomoteur agissant sur l'organe de réglage. Suivant le type du régulateur choisi l'organe le signal de commande est hydraulique, pneumatique et électrique

### 5.1 servomoteurs hydrauliques :

Ils se compose d'un cylindre dans lequel se déplace un piston. D'une des faces du piston reçoit la pression modulées issue du régulateur et le piston se déplace jusqu'à ce que un équilibre s'établisse entre la pression exercée sur les deux faces du piston ; ce qui entraîne une ouverture de la vanne. La faible

inertie des parties mobiles lui permet des performances recherchées pour de nombreuses applications.

### 5.2 servomoteurs pneumatiques :

Ils sont composés d'une membrane souple qui, en se déformant, agit sous l'action de la pression d'air envoyée par le régulateur, sur le piston écrasant un ressort antagoniste; la pression exercée sur la membrane par l'air est équilibrée par l'effort développé par l'écrasement du ressort.

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

### 5.3 servomoteurs électriques :

Ceux sont des petits moteurs électriques à deux sens de marche, agissant sur l'organe de réglage par l'intermédiaire d'un réducteur à engrenages. Un relais d'asservissement permet de positionner le moteur avec précision.

### 5.4 servomoteurs pas à pas :

Ces servomoteurs tournent d'un pas à chaque impulsion reçue. La somme des impulsions donne l'angle de rotation total, alors que la fréquence de répétition des impulsions détermine la vitesse du servomoteur.

La fonction de transfert du servomoteur électropneumatique est caractérisé par le temps  $T_m$  mis par le servomoteur

75  
pour effectuer un déplacement complet. Le temps est défini par la relation suivante:  $T_m = n T$

$n$  : nombre d'impulsions reçues

$T$  : période correspondant à chaque impulsion.

Remarque: un pas donne une ouverture ou une fermeture de la vanne de 1%.

Au point de vue précision elle est largement suffisante car les organes de réglage sont caractérisés par l'hystérésis mécanique qui possède une précision supérieure à 1%.

## CHAPITRE VII SYSTEMES DE REGULATION :

### 1. SYSTEME DE REGULATION AVEC CENTRALE DE CLIMATISATION :

1.1 : la centrale de climatisation comprend généralement :

FIG VII. 1.

- a/ chambre de mélange : dans laquelle l'air chaud et l'air froid sont mélangés dans des proportions désirées grâce aux clapets.
- b/ filtre à poussière : à travers lequel passe le mélange d'air pour être épuré.
- c/ réchauffeur primaire : à travers lequel l'air est rapproché de son point de rosée lors de son humidification et son refroidissement.
- d/ laveur (humidificateur) : il ajuste le degré hygrométrique de l'air à la valeur de consigne après son humidification par le système Cooling. Cette humidification se fait par aspersion ou par injection d'eau.
- e/ refroidisseur : il sert au refroidissement de l'air et son assèchement. Pour assécher l'air il suffit de le refroidir jusqu'à la température correspondant à la teneur en eau pour l'air saturé.
- f/ réchauffeur secondaire : quand le réchauffeur primaire ne suffit pas pour amener la température de l'air à la valeur voulue, on utilise le réchauffeur secondaire.



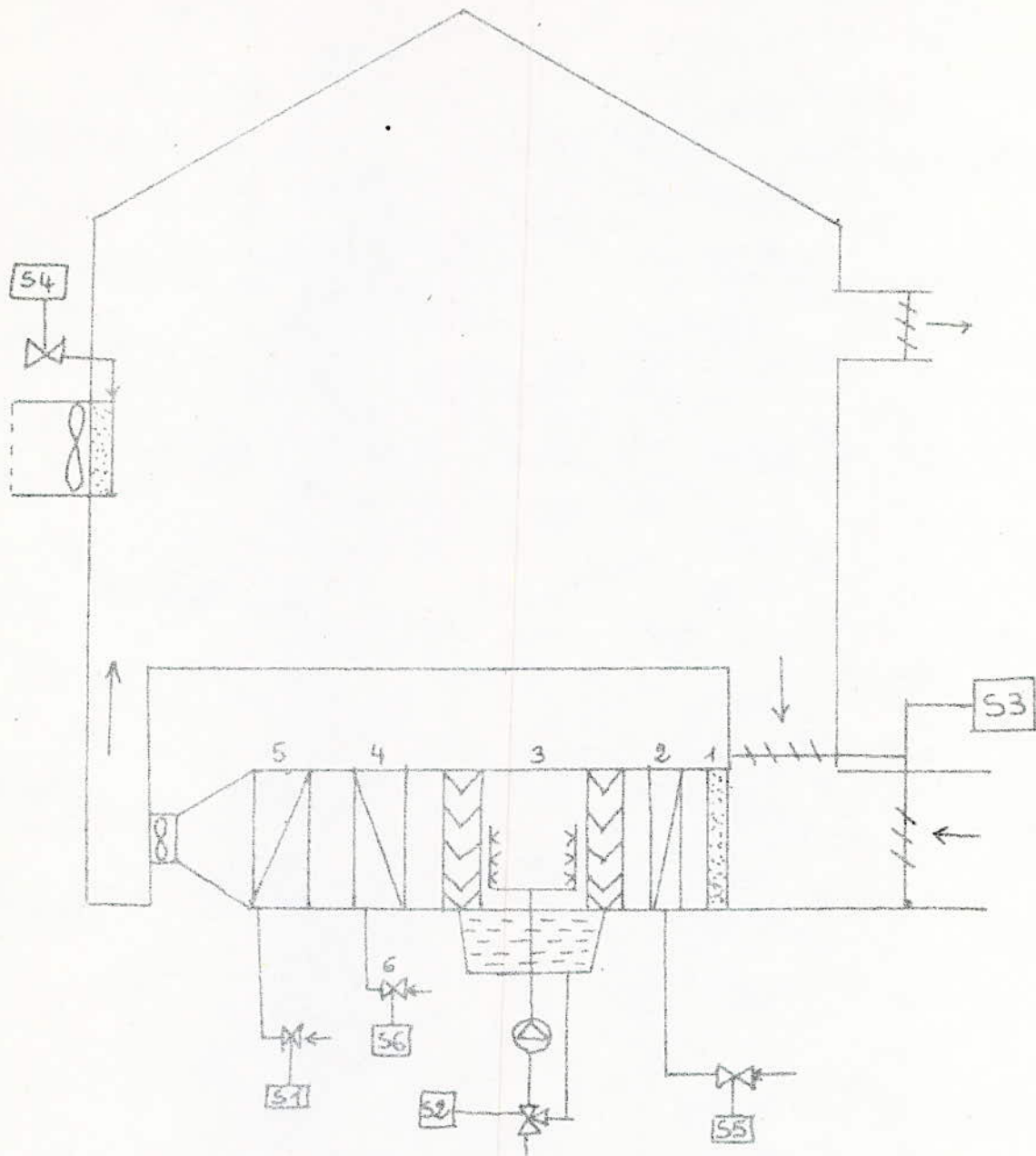


Fig VIII.1 Centrale de climatisation

- 1 : filtre à poussière
- 2 : rechauffeur primaire
- 3 : laeur
- 4 : refroidisseur
- 5 : rechauffeur secondaire
- 6 : vanne de rechauffement

g/ ventilateur : il envoie l'air traité dans la centrale de climatisation vers l'intérieur de la serre.

Remarque : la centrale de climatisation est généralement située à l'extérieur de la serre.

### 1.2 RÉGULATION :

Ce système de régulation avec centrale de climatisation comporte quatre circuits de commande pour la température et deux circuits de commande pour l'humidité qui sont :

a/ circuit de commande de la température de l'air après le réchauffeur primaire.

b/ circuit de commande de la température de rosée.

c/ circuit de commande de la température à la sortie de la centrale de climatisation.

d/ circuit de commande de correction de la température avec la sommation des impulsions.

e/ circuit de commande de l'humidité de l'air à la sortie de la centrale de climatisation.

f/ circuit de commande de la correction de l'humidité.

## 2 : SYSTEME DE REGULATION DE LA TEMPERATURE PAR MELANGE D'EAU CHAUDE ET D'EAU FROIDE.

Ce système schématisé par la figure VII.2 est constitué d'une chaudière pour l'alimentation en eau chaude, une batterie d'eau glacée, un servomoteur électrique ou électropneumatique, un régulateur électronique, et un nombre de capteurs de tem-

température selon la surface de la serre.

fonctionnement de ce système :

L'organe de détection de la température est une sonde thermistance provoquant par l'intermédiaire d'un régulateur électronique la rotation d'un micro-moteur réducteur dont la variation angulaire par rapport à un réglage donné proportionnelle à la variation de température contrôlée (température ambiante de la serre). Le principe de cette régulation est basé sur le pont de Wheatstone, deux branches du pont étant dans la sonde, les deux autres dans l'organe terminal.

Généralement dans ce type de régulation, on élimine l'écart permanent par l'utilisation de régulateur P.I.

Un avantage de ce système est qu'il permet un fonctionnement combiné chauffage - ventilation - refroidissement qui autorise pour les serres un maximum d'économie d'exploitation. Le chauffage est progressif par vanne à trois voies, il y a alors un renouvellement d'air minimum. Après la fermeture de la vanne de chauffage, un volet motorisé sur l'air neuf s'ouvre progressivement ce qui évite l'utilisation du circuit frigorifique, puis la température de l'air extérieur augmente, le volet d'air neuf revient à la position minimum et simultanément le froid est mis en fonctionnement par vanne à trois voies motorisée sur une batterie d'eau glacée. Et cause de cela les deux servomoteurs (S1) et (S2) doivent être connectés en série et les impulsions de commande passant par les commutateurs de fin de course du servomoteur (S2) avant d'arriver au servomoteur (S3).

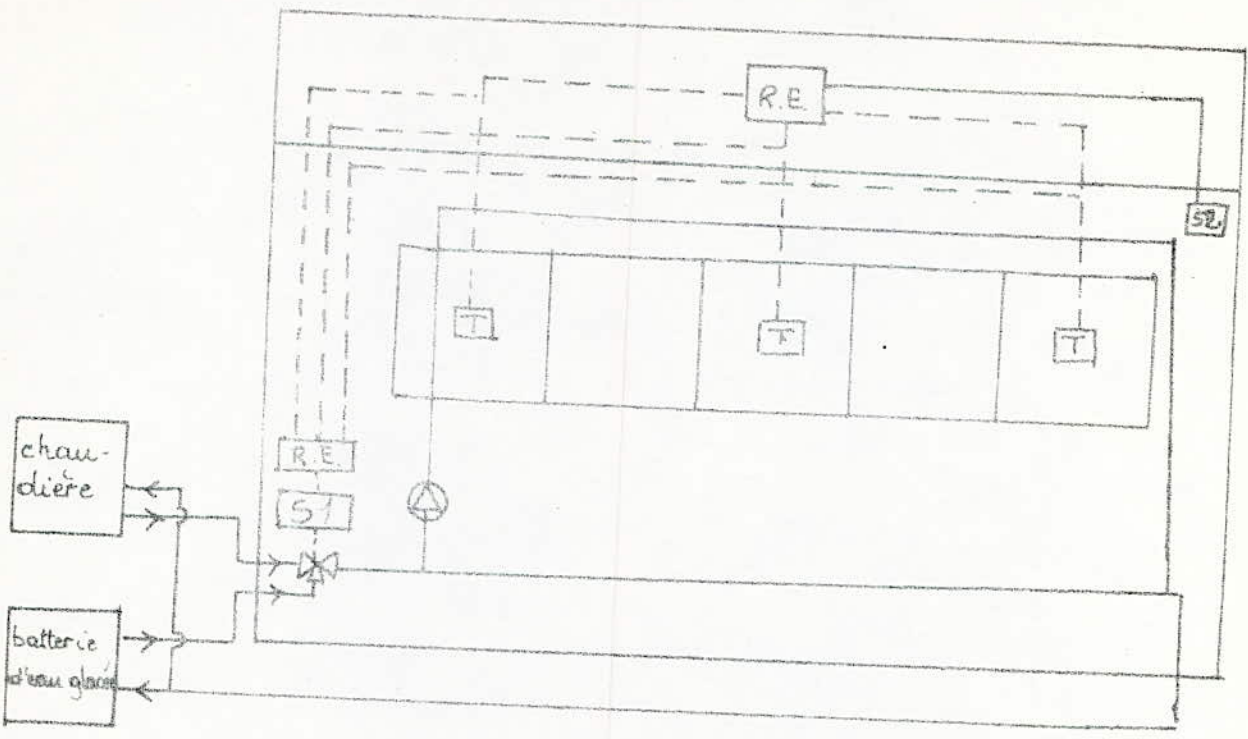


FIG VII. 2 schéma technologique du système de régulation par mélange d'eau chaude et d'eau froide

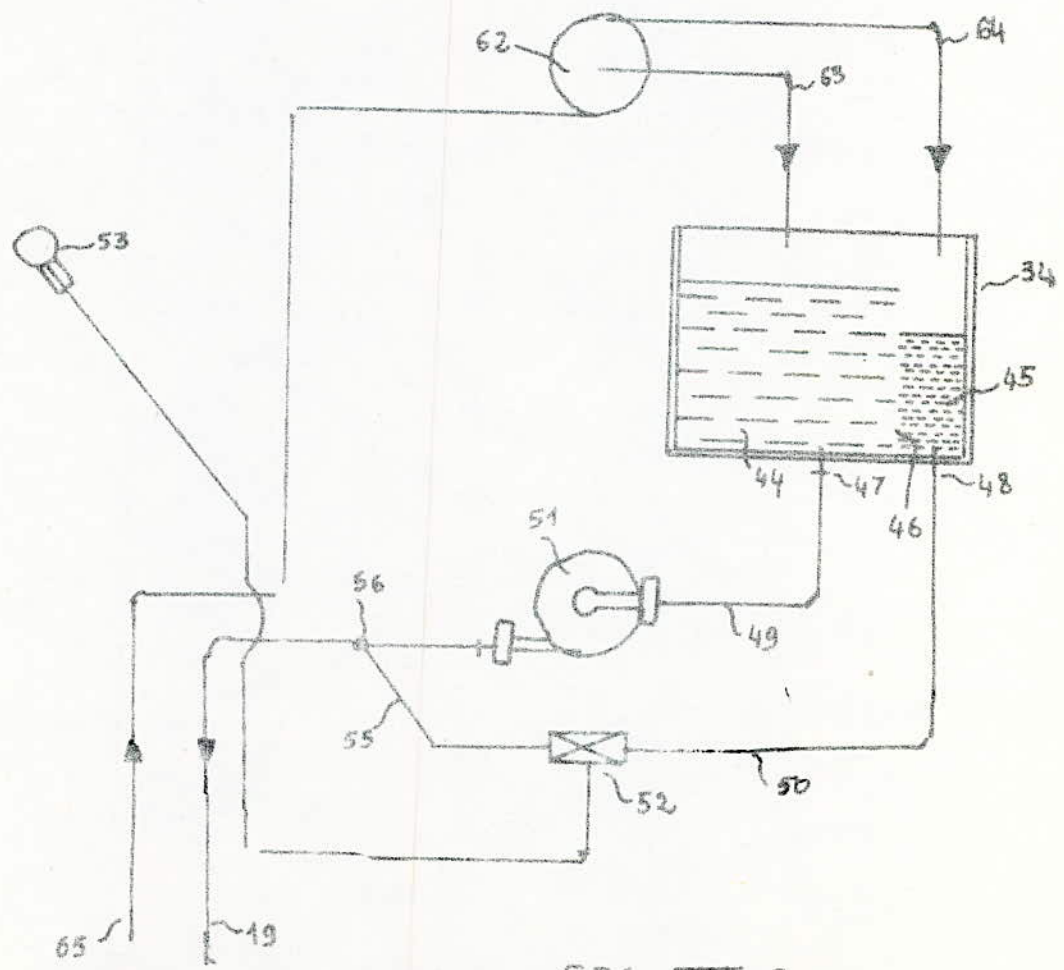


FIG VII. 3

### 3. SYSTEME DE REGULATION DU FLUX DE RAYONNEMENT :

L'idée de base de ce dispositif est d'obtenir un réglage des variations du flux photonique, par conséquent de la densité de la lumière admise dans la serre d'une façon simple et efficace avec un prix de revient relativement bas.

Le dispositif de régulation dont la description va suivre permet de mesurer et d'analyser de façon permanente, les paramètres climatiques suivants : température, hygrométrie et luminosité, de comparer ces variables à des valeurs de consigne requises et de les maintenir constants à l'intérieur de la serre.

Ce dispositif repose sur le fait qu'il régule le flux de rayonnement solaire d'une part et qu'il utilise l'énergie solaire captée pour le chauffage de la serre.

— description :

Pendant les périodes d'ensoleillement, on fait circuler dans les absorbeurs transparents, sous la couverture de la serre un fluide caloporteur (liquide transparent "eau" chargée d'un agent opacifiant et transparent aux ultra-violets et absorbe le spectre visible). En agissant sur la quantité d'agent opacifiant introduite dans le liquide, on règle le pouvoir absorbant de celui-ci en fonction de l'intensité du flux lumineux et de la température à l'intérieur de la serre. Le dispositif comporte :

1. des capteurs solaires placés sous la couverture transparente, qui comporte deux plaques transparentes délimitant entre

elle un espace dans lequel circule le liquide caloporteur.  
 2. des moyens pour faire varier la concentration du liquide opacifiant en fonction de l'intensité du flux lumineux<sup>so</sup> de la température de la serre.

L'énergie récupérée est stockée, utilisée pendant la nuit ou les jours froids pour chauffer la serre.

— fonctionnement :

Pendant les heures d'ensoleillement on fait circuler le liquide caloporteur dans le circuit primaire 8, 11 a, 11 b, 6a, 6b, 4, 7. Les panneaux 4 font fonction de capteurs solaires et l'énergie captée et transférée dans l'échangeur 12 à un réservoir de stockage de calories. L'eau chaude stockée dans le réservoir pour alimenter les serothermes et les réchauffeurs primaire et secondaire de la chambre de climatisation.

Le dispositif de régulation permettant la modulation du flux de rayonnement solaire et de l'énergie captée se compose de deux réservoirs, le premier sert à entreposer un fluide transparent en particulier l'eau, le second est rempli d'un produit opacifiant.

Il est possible de prévoir un réservoir à deux compartiments à condition de disposer d'un séparateur 46 approprié me permettant aucun mélange entre les deux produits. Les 2 réservoirs possèdent une sortie chacun pour le produit désigné par respectivement 47 et 48.

Le liquide transparent quitte la sortie 47, acheminé par la

conduite 49 vers une pompe 51. Le produit opacifiant est dirigé, à partir de la sortie 48 par l'intermédiaire d'une conduite 50 vers un dispositif de dosage ou doseur 52 réglant la quantité désirée en fonction des besoins comme déterminés par une cellule photoémissive photorésistante 53 située à l'extérieur du dispositif.

Après le dosage convenable, le produit opacifiant, par l'intermédiaire de la conduite 55 rejoint le fluide transparent à la jonction 56 et la suspension formée à concentration déterminées est dirigée par la conduite 19 en direction du capteur solaire 4.

Le liquide caloporteur peut alors se déplacer sur le pourtour du capteur solaire (4) où il y a un effet de modulation du rayonnement, absorbe une certaine quantité de chaleur et pénètre ensuite dans le circuit 12 duquel il peut transférer l'énergie absorbée à l'eau, contenu dans le réservoir de stockage de calories.

La figure VII.4 représente le schéma technologique de la serre à commande automatique. Sur le coffret de régulation 37 sont connectés trois thermostats externes 38, un capteur photoélectrique de flux lumineux 39, 6 capteurs de température 40, 6 capteurs d'humidité 42 et un capteur de flux lumineux placés à l'intérieur de la serre, un thermostat destiné à l'affichage et à la comparaison des températures captées et de consigne.

Le coffret de régulation pilote automatiquement les pompes

ainsi que les servomoteurs actionnant les vannes.

La régulation se fait, pour la température par comparaison différentielle de la température extérieure mesurée par les sondes 38 avec la température intérieure mesurée par les sondes 40.

Pour l'intensité de la luminosité, la régulation peut être obtenue par comparaison du flux lumineux extérieure mesuré par la sonde 39 soit à la valeur mesurée dans l'enceinte par la sonde 41 soit à un seuil affiché.

De préférence, on sépare le liquide transparent et l'agent opacifiant après qu'ils soient dans les tubes (ou lames) et on recycle l'un et l'autre de ces produits dans des proportions correspondants au pouvoir absorbant ou réfléchissant désiré par le fluide lors de son passage dans les tubes transparents.

La figure VII.3. est un schéma synoptique du dispositif de régulation du flux de rayonnement solaire.

Le liquide caloporteur, débarrassé de l'énergie qu'il a absorbée, retourne alors au moyen de la conduite 65 en direction d'un séparateur 62 constitué par un simple dispositif de filtration. Ce dispositif de filtration permet de séparer aisément l'émulsion fluide transparent - agent opacifiant et chaque constituant élémentaire est reintroduit par les conduites respectives 63 et 64 dans les réservoirs correspondants 1 et 2 de l'ensemble 34.

Il convient de remarquer que le dispositif pour la mise en



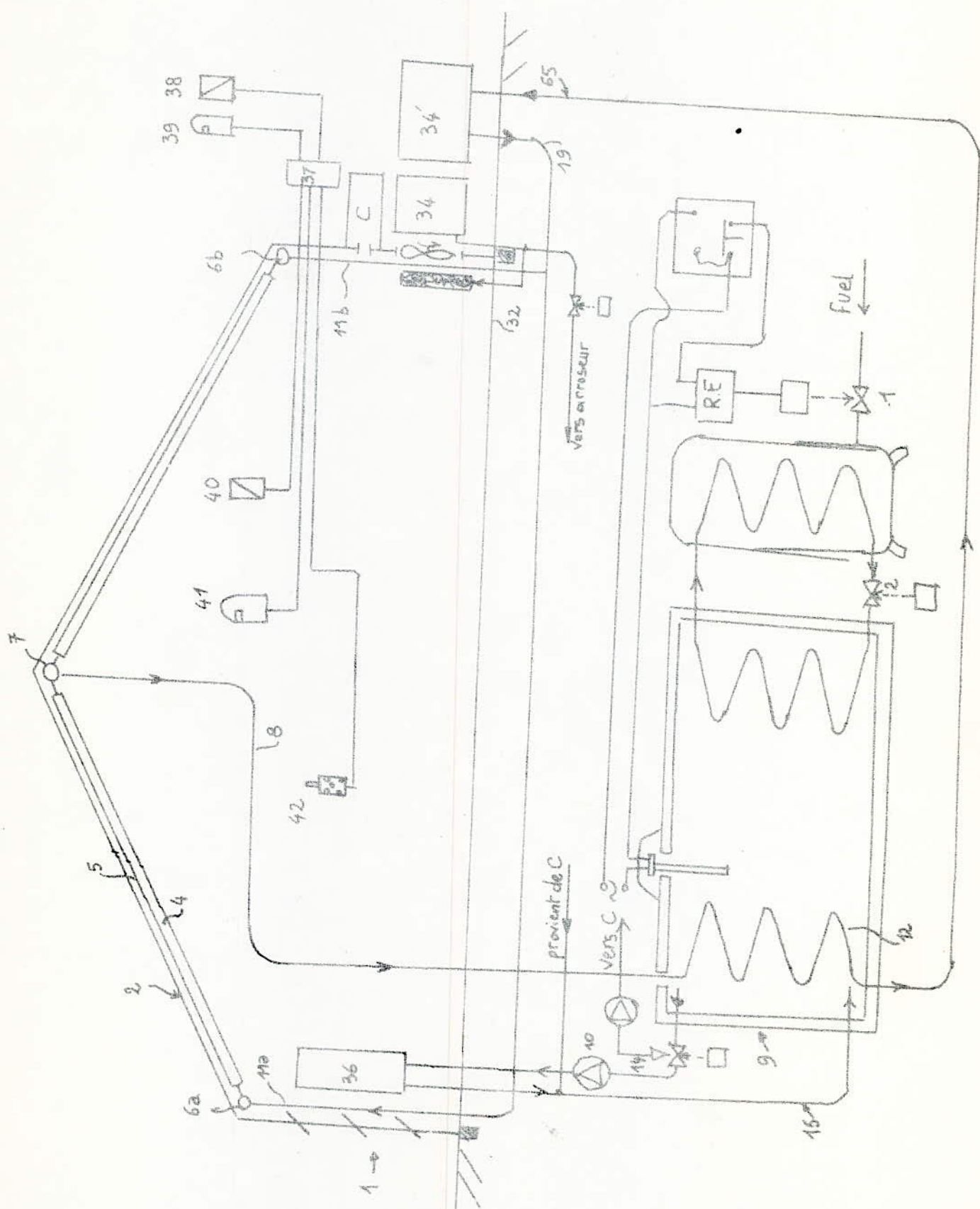


FIG VII.4.

œuvre de ce procédé fonctionne, en circuit fermé autonome, et que son fonctionnement est basé sur les informations recueillies par la cellule photoresistance 53

Cette cellule 53 présente comme caractéristique d'être pourvue d'une phase de réglage permettant de déterminer la fonction du doseur 52 dont le rôle est d'admettre dans le circuit du fluide caloporteur, une quantité variable d'agent opacifiant nonmissible. Ainsi, l'augmentation de l'intensité lumineuse modifie la fonction ou la position du doseur qui admet un débit d'agent opacifiant plus important.

Le capteur solaire 4 est réalisé, de préférence, à partir des profilés qui sont transparents et parfaitement perméables aux rayonnements solaires et qui permettent une bonne circulation du liquide caloporteur chargé ou non du produit opacifiant.

Le liquide peut ainsi circuler entre deux surfaces transparentes parallèles constituant un tube aplati.

reservoir de stockage d'énergie calorifique :

Ce réservoir utilise pour le chauffage de l'eau nécessaire pour la régulation de la température à l'intérieur de la serre, une chaudière à fuel lorsque l'énergie solaire fait défaut ou est insuffisante pour satisfaire les besoins en eau chaude.

#### 4. SYSTEME DE MESURE :

Pour assurer une bonne régulation de la température et de l'humidité, il est nécessaire de mesurer ces deux paramètres aux endroits appropriés de la serre et de la chambre de climatisation.

a/ mesure de la température :

T<sub>1</sub> : mesure locale de la température extérieure

T<sub>2</sub> : mesure à distance et sans enregistrement de la température avant le réchauffeur secondaire.

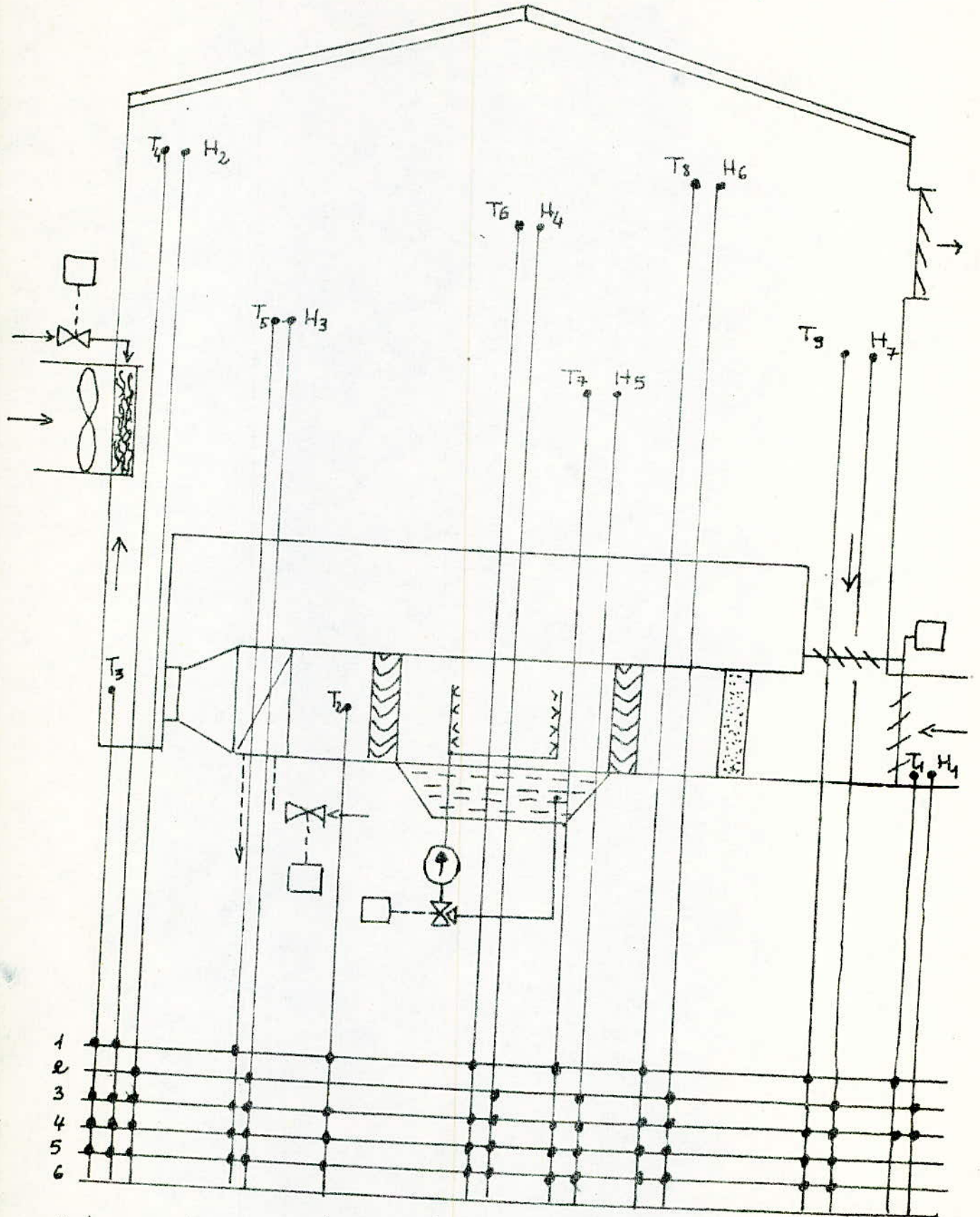
T<sub>3</sub> : mesure locale, à distance et sans enregistrement de la température à la sortie de la chambre de climatisation.

T<sub>4</sub> : mesure locale, à distance et sans enregistrement de la température en différents points de la serre.

b/ mesure de l'humidité :

H<sub>1</sub> : mesure locale de l'humidité de l'air extérieur

H<sub>2</sub> à H<sub>7</sub> : mesure locale, à distance et sans enregistrement de l'humidité en différents points de la serre.



1 temperature - 2 humidité - 3 mesure locale - 4 mesure à distance

5 mesure sans enregistrement - 6 mesure avec enregistrement

FIG VII.5 schéma bloc du système de mesure

## CONCLUSION GÉNÉRALE.

Le but de ce projet est en fait : à partir d'une connaissance parfaite des paramètres dynamiques d'un processus (serre), il faudra apporter un système de régulation optimal des paramètres de ce processus considéré. Mais pour pouvoir aboutir à une régulation efficace, il suffit d'analyser pour tous les paramètres du processus et en différents points du système, et cela pendant une période bien déterminée (jour et nuit ; hiver et été) car le système étudié (serre) dépend énormément des conditions climatiques extérieures ( $t^{\circ}$ , humidité, vent, Rayonnement solaire, ... etc).

Vu les moyens que nous disposons (temps, bibliographie...), nous avons été limité par l'étude de la température et de l'humidité de la serre. Mais il serait été plus intéressant de procéder à une simulation de la serre qui donnera sûrement des résultats plus meilleurs.

En fait, ce présent travail, nous a offert l'occasion de prendre contact avec le milieu industriel, et nous a permis d'utiliser nos connaissances dans la pratique.



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

=====

- " L'eclaircement naturel des serres " NISSEN GEMBOUX, DUENLOT " 1969
- " Technique de la regulation industrielle " DANIEL- DINDELUX .
- " Chauffage et climatisation " S.BELAKHOWSKI ( Paris 1969/74)
- " Transfert de chaleur " Edi 81 A . BOUVENOT .
- " La dynamique des processus industrielles ". D.P CAMPBELL 61
- " Regulation automatique industrielles. D.P ECKMAN Paris 63
- " Techniques Agricoles , des serres" par JEAN MARIE Le Moine de Forces 74
- " Rapport sur le developpement des serres en Algerie I.D.C.M 80
- " PROJET DE FIN D'ETUDES DE L'E.N.P.A

REVUES ET CATALOGUES :

- DOCUMENTS PROVISOIRE N° 2 Methode de STREJC ameliorée

- " Determination des transmitances par l'analyse indicielle "
- SIEMENS .
- HONEWEYL .

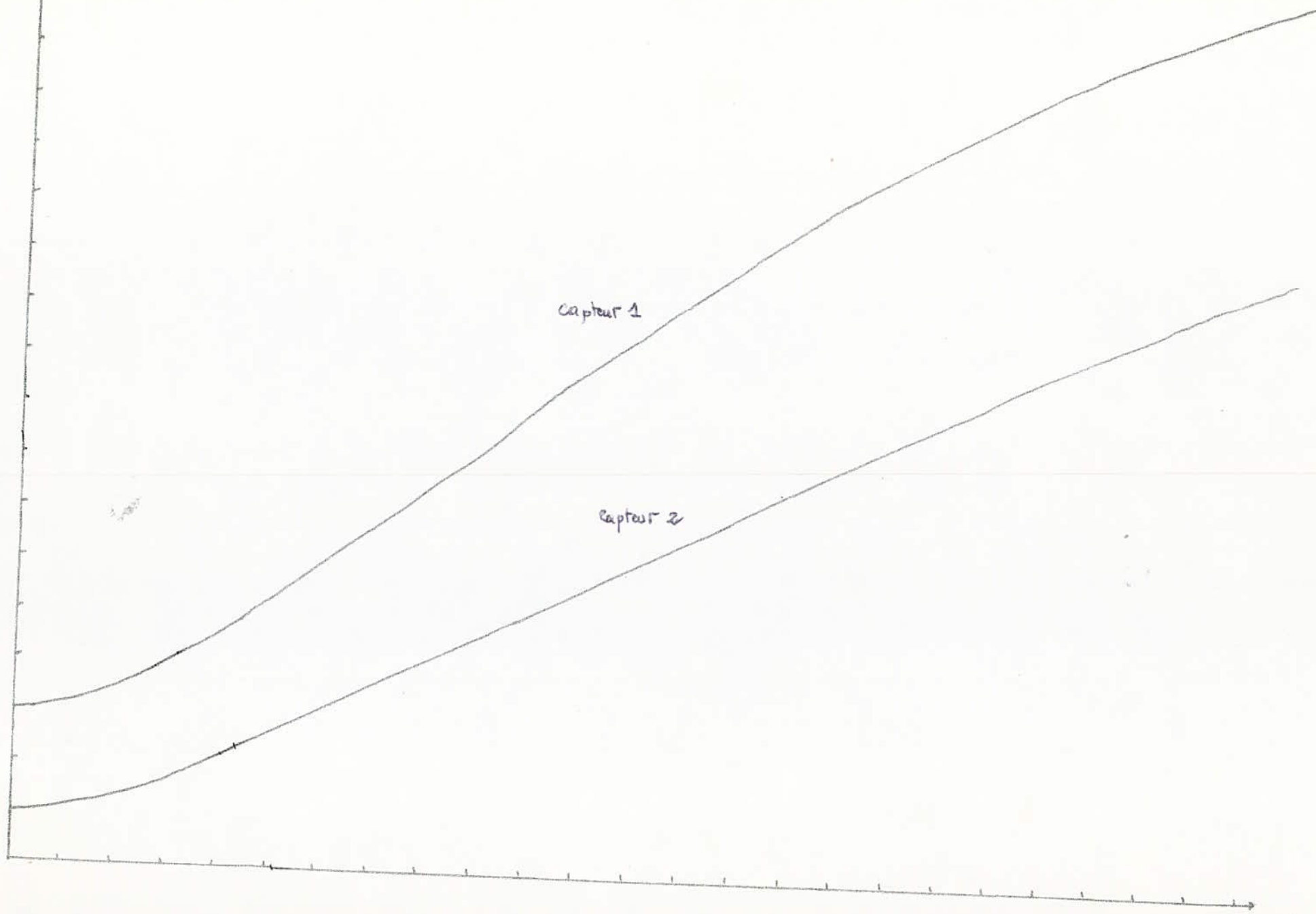
---

**ANNEXE**

$\theta^{\circ}\text{C}$

chauffage 1

Essai Ia.1



Capteur 1

Capteur 2

$t [s]$



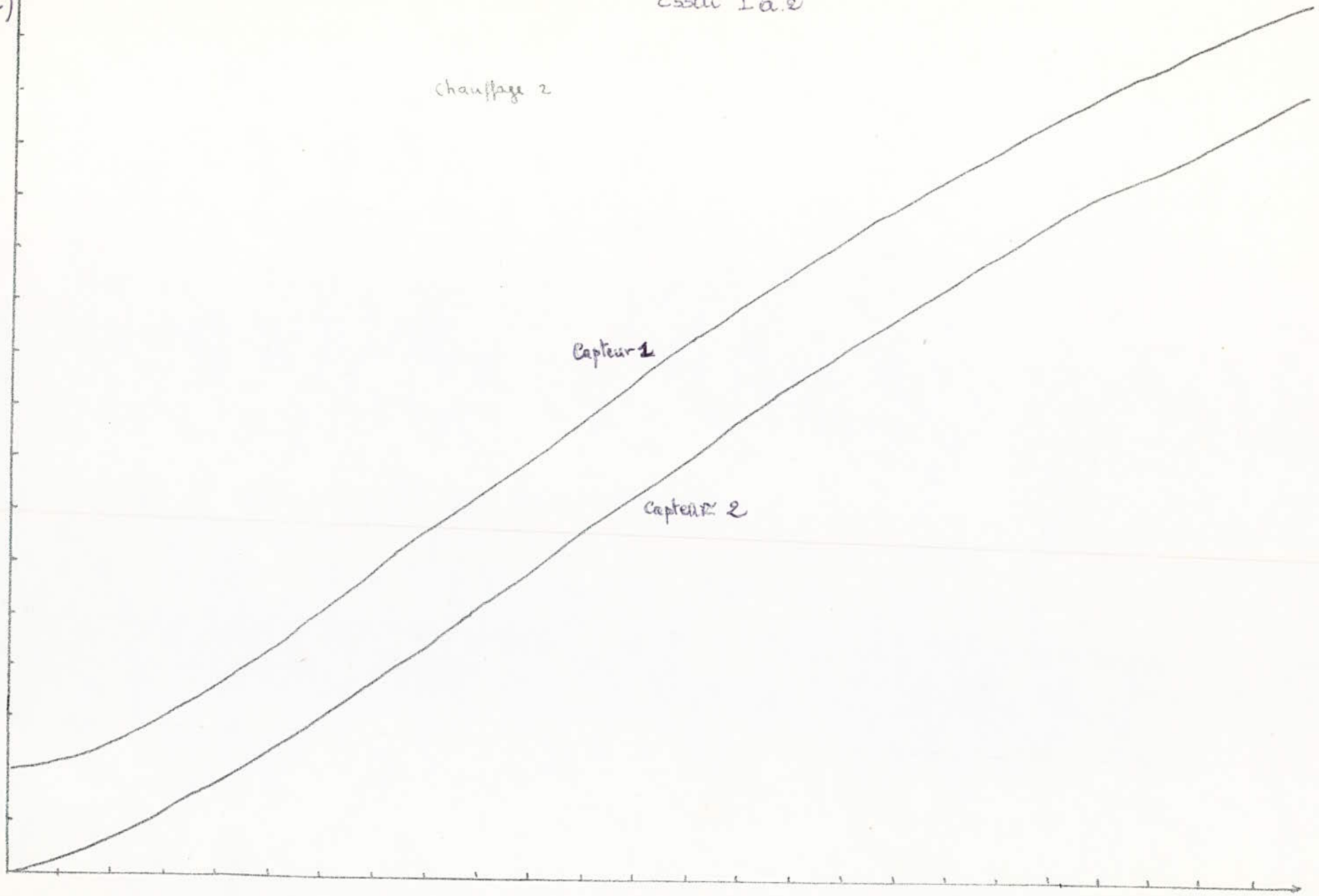
$\theta(^{\circ}\text{C})$

chauffage 2

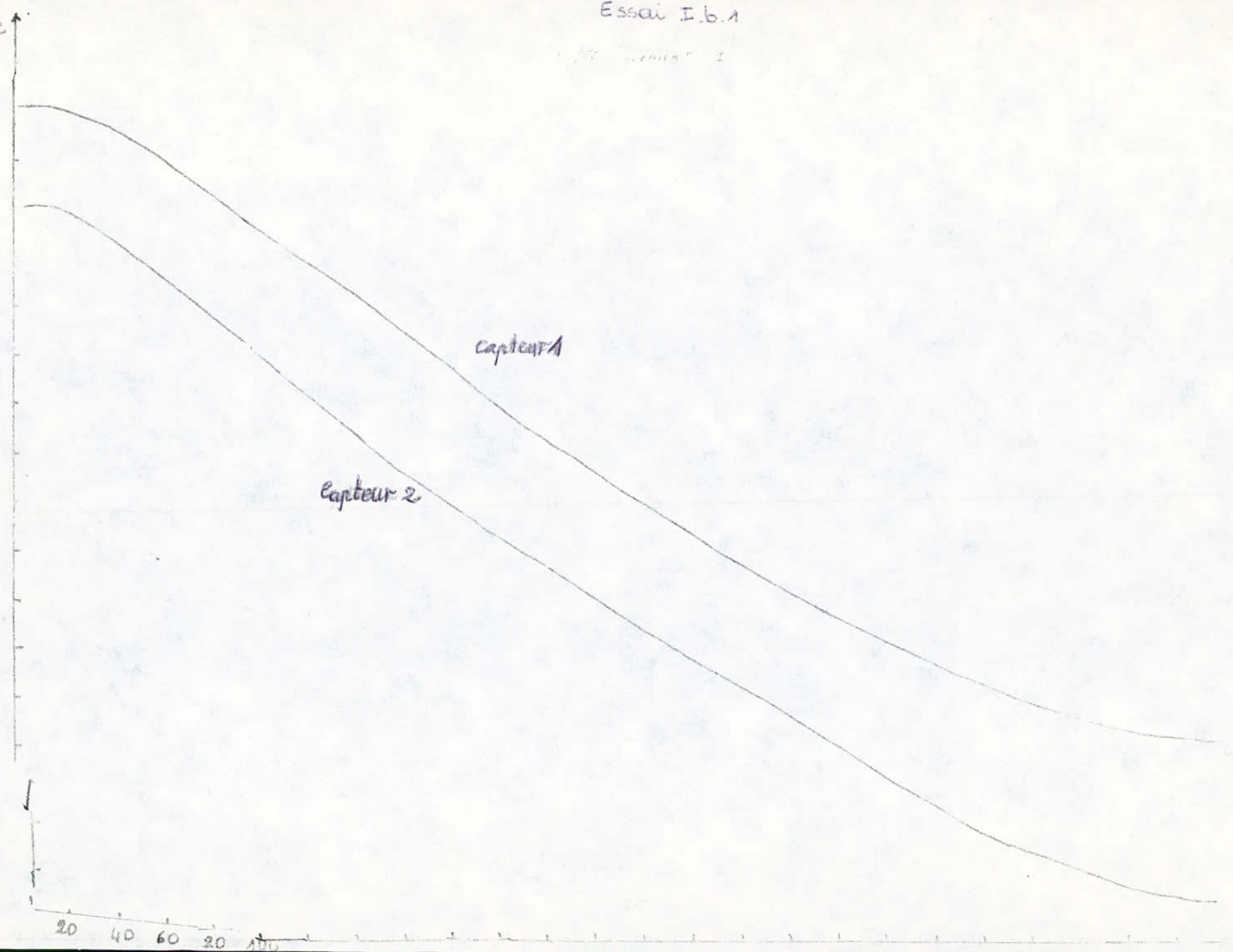
Capteur 1

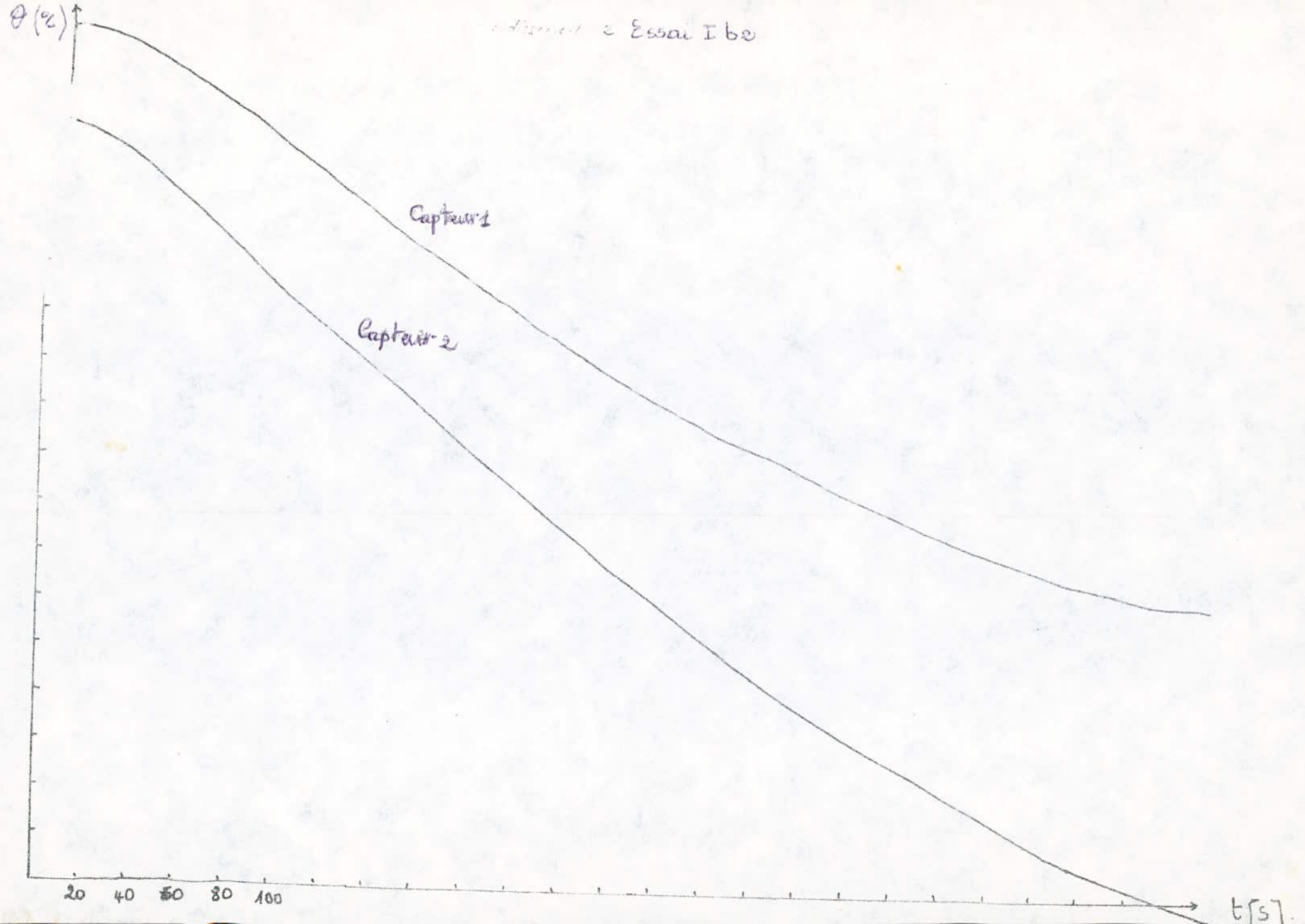
Capteur 2

$t[\text{s}]$



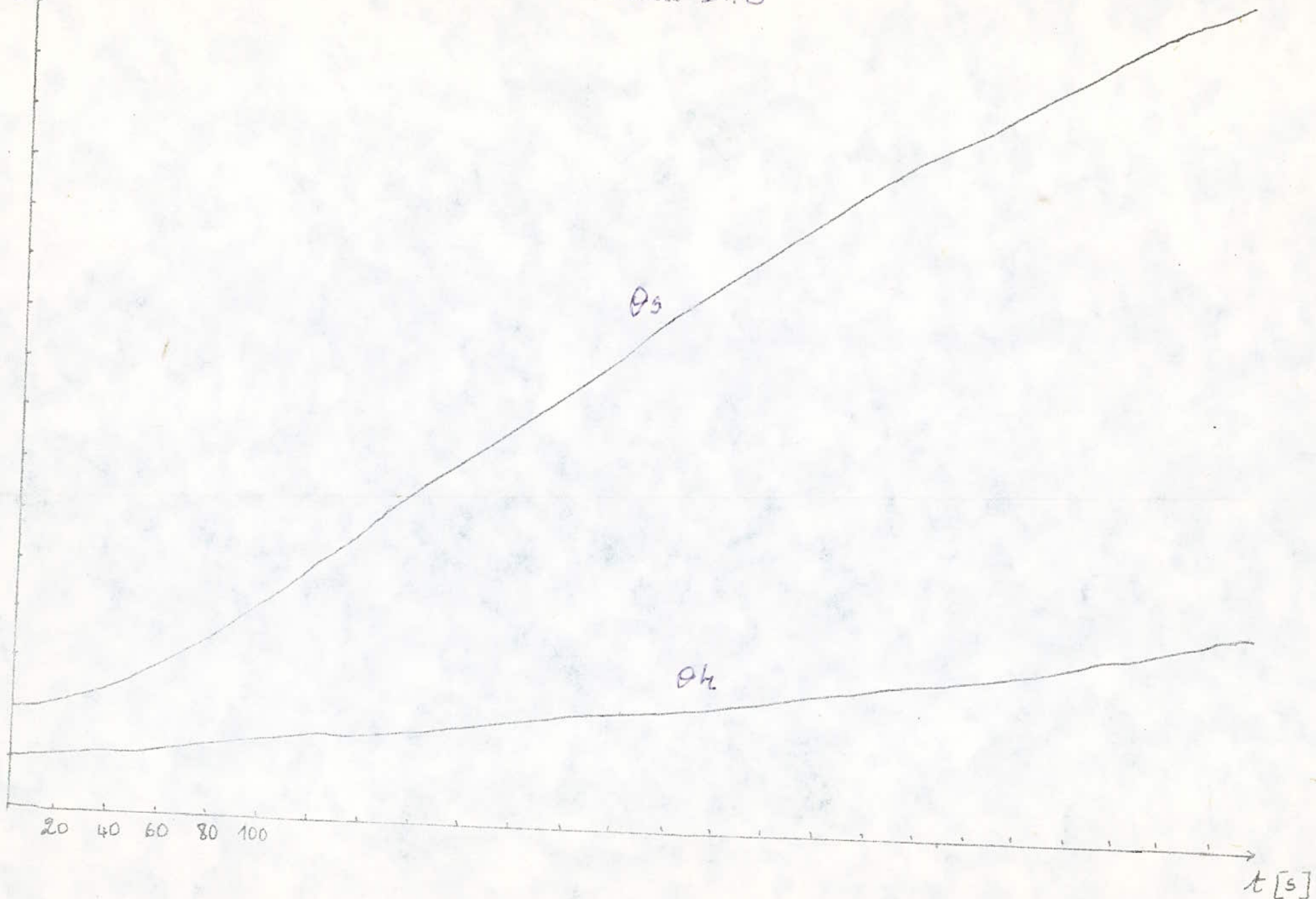
$\theta_e$





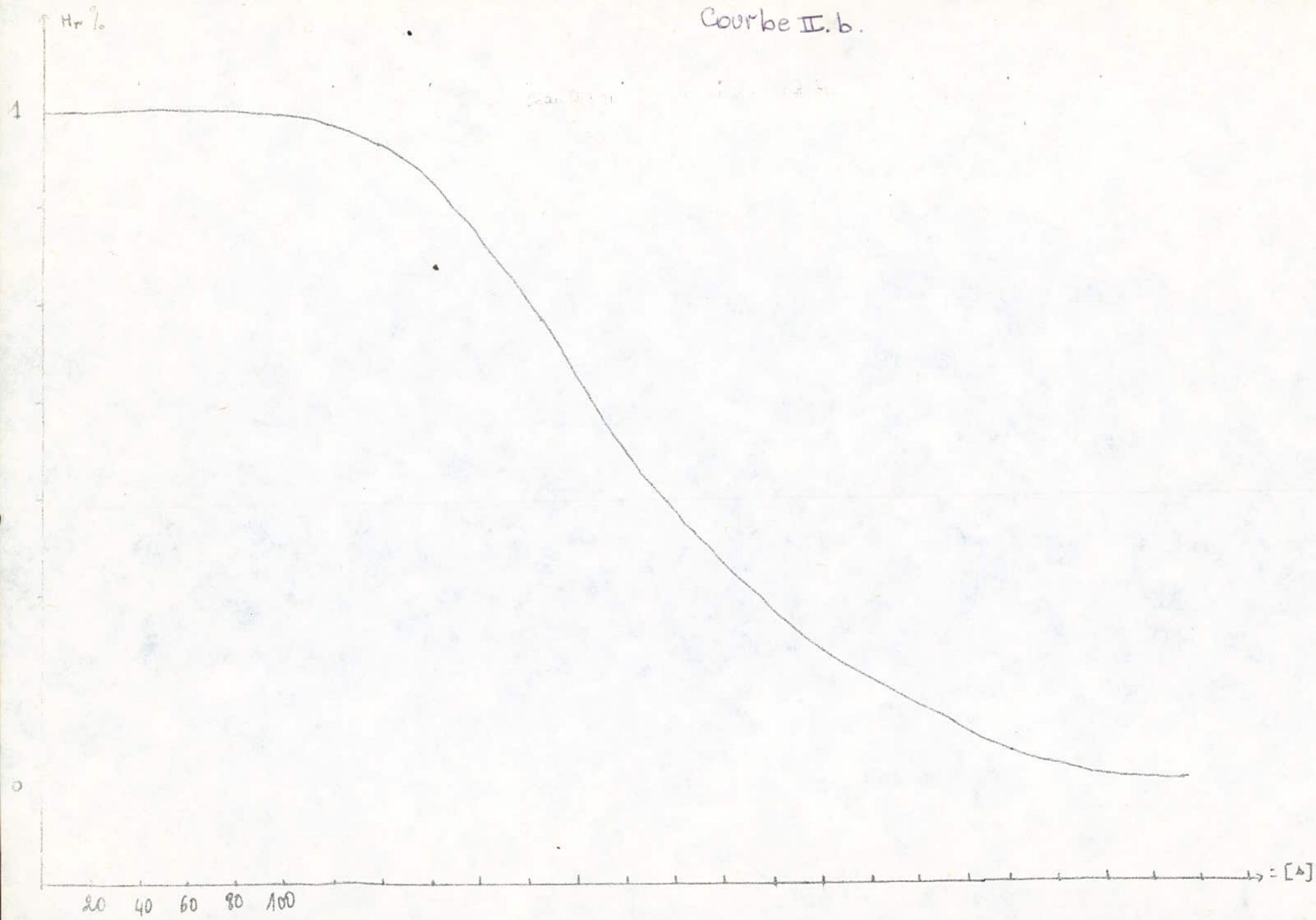
$\theta^{\circ}$

Essai II.6



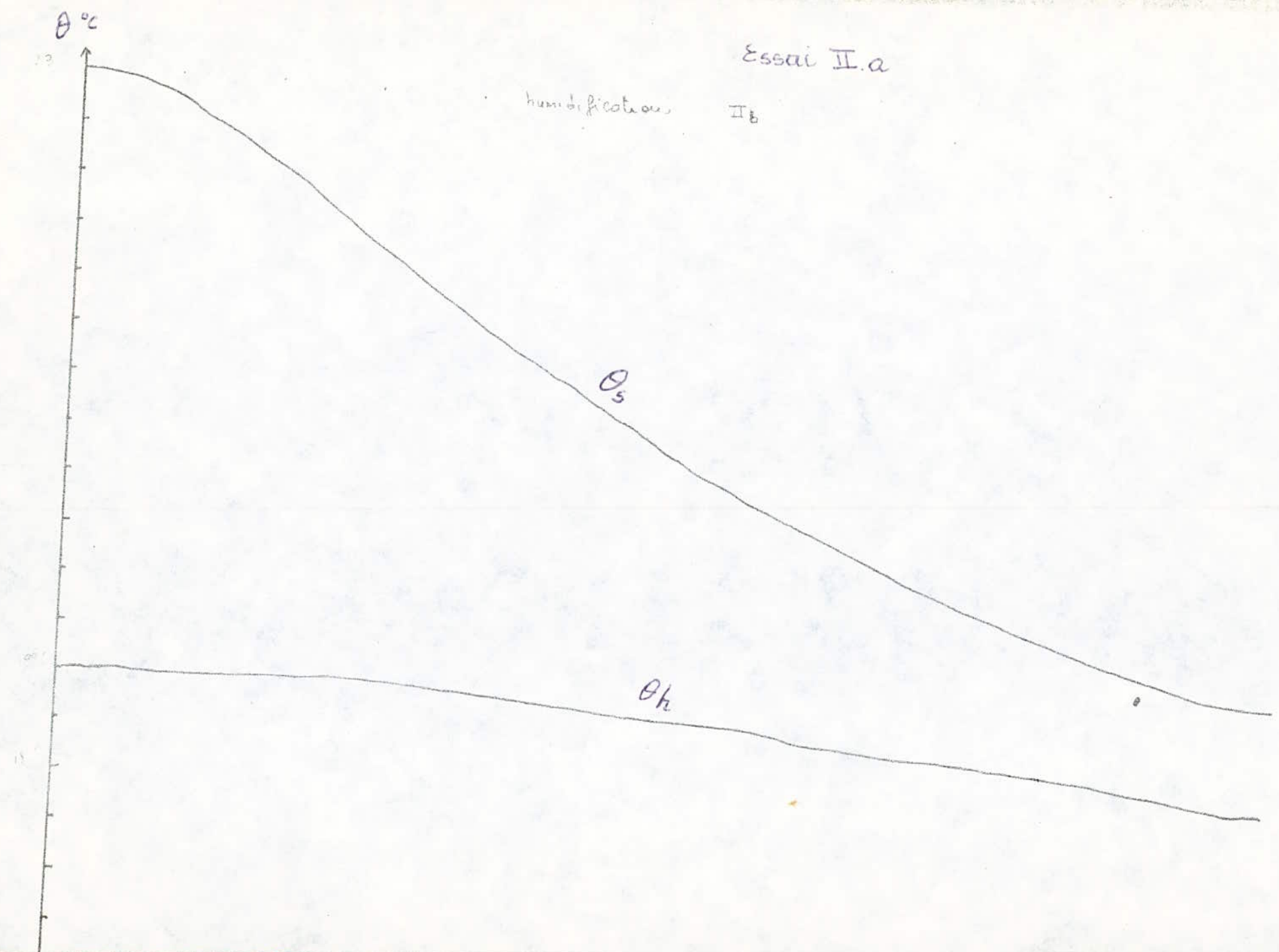
Essai II

Courbe II. b.

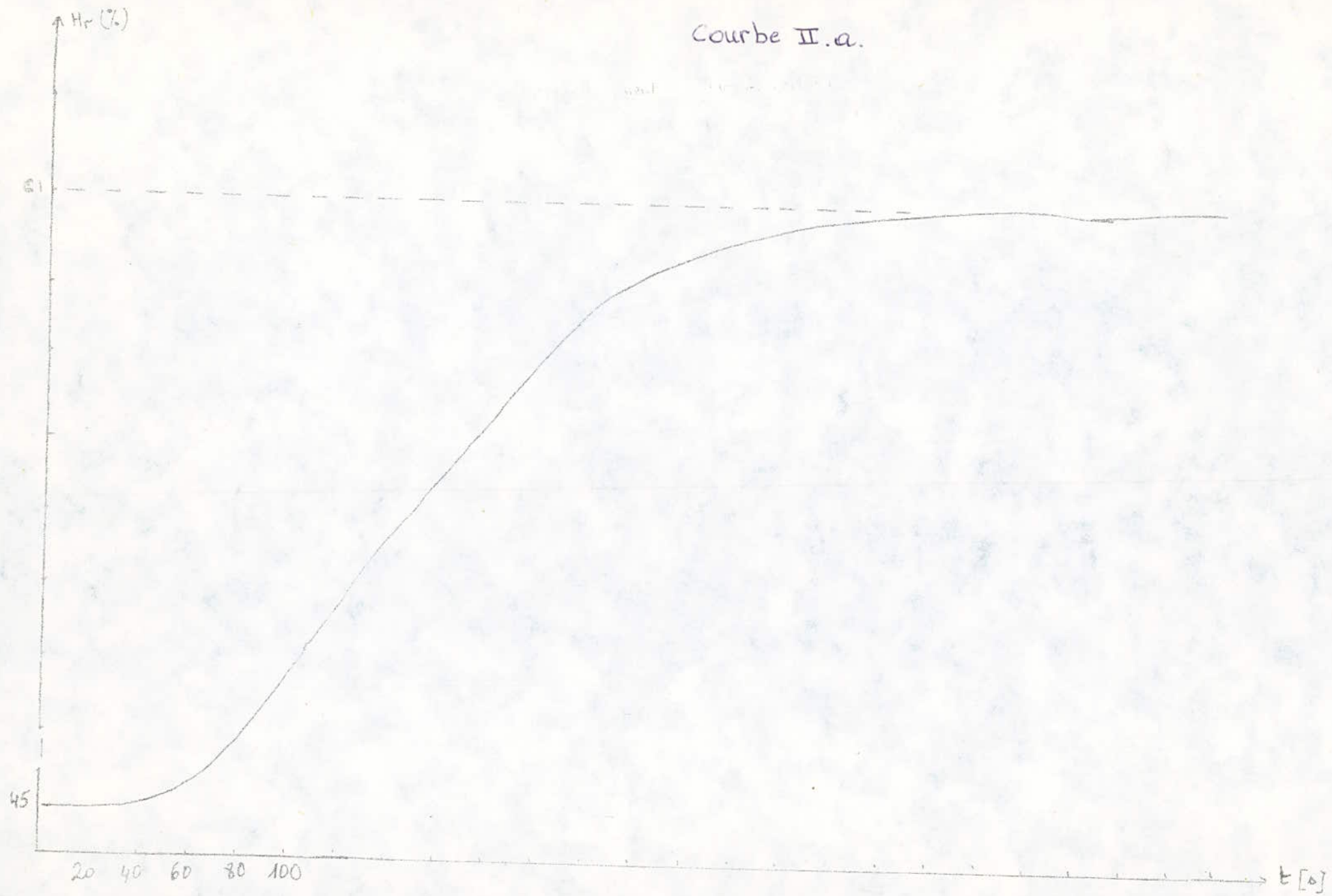


Essai II.a

humidification II<sub>b</sub>



Courbe II.a.



Essais n°		Date	$\theta_{p.}^{\circ C}$	$\theta_{o.}^{\circ C}$	$\theta_{ext.}^{\circ C}$	Hex %	position des capteurs (L, l, h) m.	$\theta_{oh.}^{\circ C}$	$\theta_{ph.}^{\circ C}$	Ho %	Hf %
I a 1	capt 1	19/5/84	28,5	23	25	50	milieu 10; 4,5; 1,5				
	capt 2	"	27	22,5	"	"	près de la porte 2; 4; 1,5				
I a 2	capt 1	"	28	22	"	"	milieu 10; 4,5; 1,5				
	capt 2	"	30	23,5	"	"	au fond 20; 4; 1,5				
I b 1	capt 1	"	23	28	"	"	milieu 10; 4,5; 1,5				
	capt 2	"	22	27,5	"	"	près de la porte 2; 4; 1,5				
I b 2	capt 1	"	22	28,5	"	"	milieu 10; 4,5; 1,5				
	capt 2	"	23	30,5	"	"	au fond 2; 4; 1,5				
II a	Capt 1,2 même position	21/5/84	24,5	29,0	20	52	milieu 10; 4,5; 1,5	20,0	18,4	45	60,2
II b	Capt 1,2 même position	"	29,5	24	20	52	milieu 10; 4,5; 1,5	18,7	20,5	61	40,5

tableau II 1



tableau V.2

Cohortes 25-25	BROIDA				STEJC AMELIOREE							EXPONENTIELLE		
	K	T(s)	Z(s)	F(p)	K	T <sub>0</sub> (s)	T <sub>a</sub> (s)	T <sub>0</sub> T <sub>a</sub>	n	T(s)	F(p)	K	T	F(p)
Ia.1.1	0,11	275	30	$\frac{0,11 e^{-30p}}{1+275p}$	0,11	50	360	0,13	2,3	120	$\frac{0,11}{(1+120p)^{2,3}}$	0,11	240	$\frac{0,11}{1+240p}$
Ia.1.2	0,09	275	70	$\frac{0,09 e^{-70p}}{1+275p}$	0,09	40	340	0,11	2,1	115	$\frac{0,09}{(1+115p)^{2,1}}$	0,09	300	$\frac{0,09}{1+300p}$
Ia.2.1	0,12	350	40	$\frac{0,12 e^{-40p}}{1+350p}$	0,12	50	350	0,14	2,32	110	$\frac{0,12}{(1+110p)^{2,32}}$	0,12	290	$\frac{0,12}{1+290p}$
Ia.2.2	0,13	275	50	$\frac{0,13 e^{-50p}}{1+275p}$	0,13	60	380	0,15	2,4	120	$\frac{0,13}{(1+120p)^{2,4}}$	0,13	320	$\frac{0,13}{1+320p}$
Ib.1.1	0,065	220	58	$\frac{0,065 e^{-58p}}{1+220p}$	0,065	40	340	0,11	2,1	115	$\frac{0,065}{(1+115p)^{2,1}}$	0,065	260	$\frac{0,065}{1+260p}$
Ib.1.2	0,055	220	48	$\frac{0,055 e^{-48p}}{1+220p}$	0,065	40	360	0,083	1,8	140	$\frac{0,065}{(1+140p)^{1,8}}$	0,055	260	$\frac{0,055}{1+260p}$
Ib.2.1	0,065	280	38	$\frac{0,065 e^{-38p}}{1+280p}$	0,07	40	360	0,11	2	120	$\frac{0,07}{(1+120p)^2}$	0,065	360	$\frac{0,065}{1+360p}$
Ib.2.2	0,07	165	120	$\frac{0,07 e^{-120p}}{1+165p}$	0,07	30	400	0,08	1,75	160	$\frac{0,07}{(1+160p)^{1,75}}$	0,07	310	$\frac{0,07}{1+310p}$
IIa	0,4	120	74	$\frac{0,4 e^{-74p}}{1+120p}$	0,4	60	180	0,3	3,8	40	$\frac{0,4}{(1+40p)^{3,8}}$	0,4	170	$\frac{0,4}{1+170p}$
IIb	0,15	110	160	$\frac{0,15 e^{-160p}}{1+110p}$	0,15	150	180	0,83	9	20	$\frac{0,15}{1+20p^9}$	0,15	270	$\frac{0,15}{1+270p}$

deshumidification

$\theta_{h^{\circ}C}$	18,7	18,6	18,8	18,9	19,1	19,4	19,7	19,9	20,2	20,4	20,6
$\theta_{s^{\circ}C}$	24	24,2	24,6	25,3	26,4	26,9	27,6	28,3	28,8	29,4	29,5
Hr%	61	61	60,2	58,8	54,2	50,5	46,9	44,5	42,6	41	40,5

humidification

$\theta_{h^{\circ}C}$	20	20	20	19,8	19,7	19,4	19,1	18,8	18,6	18,5	18,4
$\theta_{s^{\circ}C}$	29	28,8	28,4	27,8	27,2	26,7	26,2	25,6	25,2	24,8	24,5
Hr%	45	45	46,7	50	52,6	55,6	58	59	59,7	60	60,2

tableau V 3.

# Diagramme Psychrométrique

