

وزارة التعليم و البحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

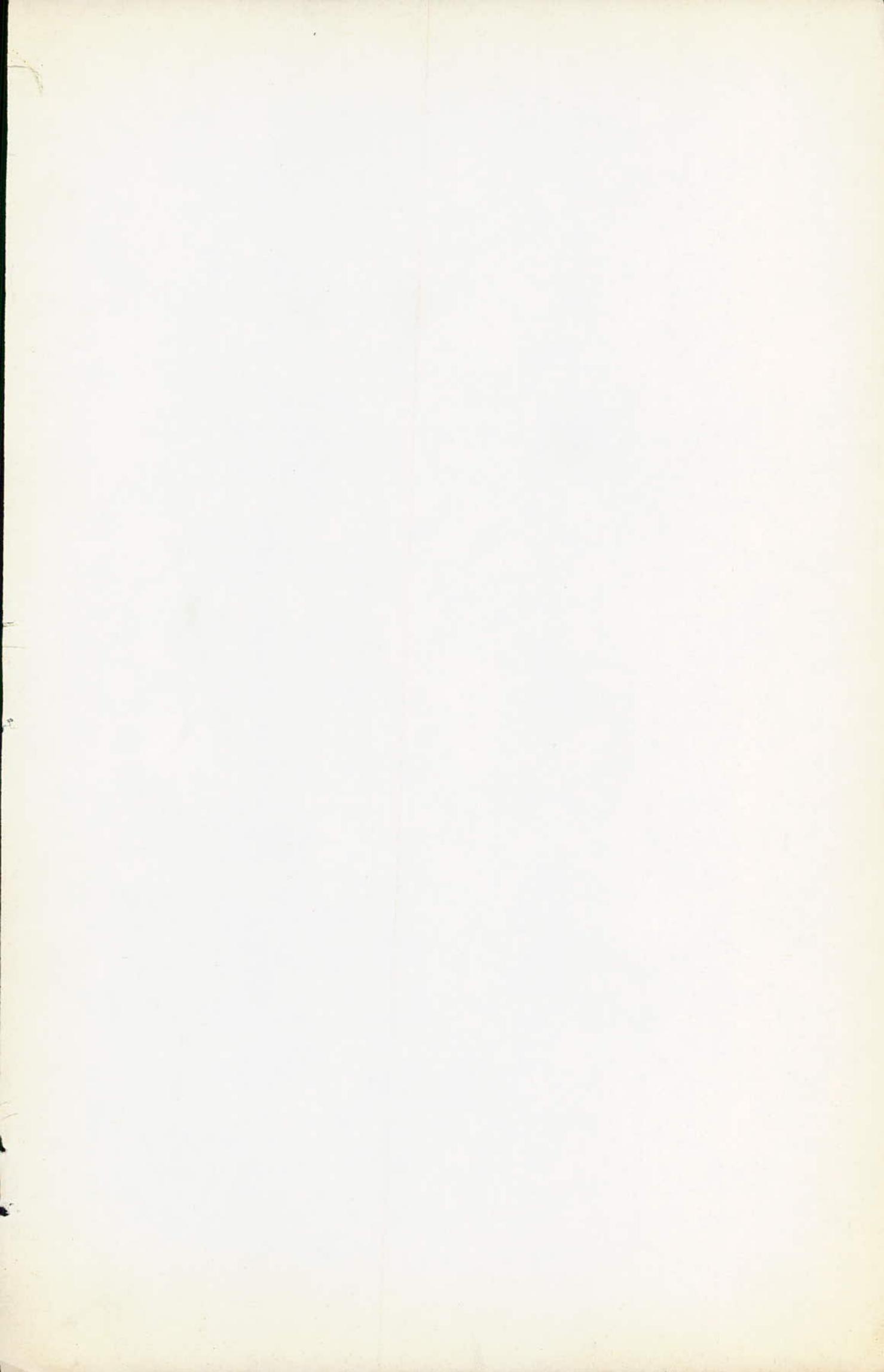
S U J E T

CONTRIBUTION A LA MISE
AU POIN D'UN LABORATOIRE
D'AUTOMATIQUE

Proposé par : Z. BARSKI Etudié par : MOUDJAHED Bakir Dirigé par :

Docteur ès Sciences

PROMOTION : Janvier 1986



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

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

JE TIENS A EXPRIMER TOUTE MA GRATITUDE A MON
PROMOTEUR MONSIEUR Z. BARSKI POUR M'AVOIR AIDE ET CORRIGE
DANS L'ELABORATION DE CE PROJET DE FIN D'ETUDES.

JE REMERCIE EGALEMENT MONSIEUR WERNER POUR SA COOPERATION
SINCERE A LA REALISATION DE CE TRAVAIL.

TABLE DES MATIERES.



INTRODUCTION Page 1

PREMIERE PARTIE

- MISE AU POINT ET DEMARRAGE DES POSTES DU DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE -

CHAPITRE I.

Poste d'Analyse des Propriétés Statiques et Dynamiques d'un Processus Thermique.

1. Introduction	Page	3
2. Méthodes d'Analyse des paramètres Dynamiques d'un Processus	"	3
2.1. Méthode de Simulation	"	3
2.2. Méthode non Paramétrique	"	4
2.3. Méthode Paramétrique	"	4
2.4. Analyse Fréquentielle	"	5
3. Etude Expérimentale	"	6
3.1. Présentation du Modèle	"	6
3.2. Méthode de Mesure	"	7
3.3. Résultats et Interprétations	"	7

CHAPITRE II.

Poste d'Etude du Système de la Poursuite Automatique du Soleil

1. Introduction	Page	23
2. Description et Fonctionnement du Dispositif	"	23
2.1. Système de Traction	"	23
2.2. Circuit de Commande	"	25
3. Travaux Pratiques	"	26
3.1. But du TP	"	26
3.2. Schéma Bloc du Système de Commande	"	26
3.3. Manipulations et Mesures	"	26
3.4. Méthodes d'Analyse des Systèmes non linéaires	"	27
3.5. Application de la Méthode de la Fonction Descriptive pour l'Analyse de notre Système	"	28

DEUXIEME PARTIE

- PRESENTATION DE QUELQUES POSTES EXISTANTS A L'E.N.P. -

CHAPITRE I.

Systeme de Régulation Automatique de la Température d'Eau dans un Réservoir.

1. Introduction	Page	35
2. Description du Systeme de la Commande	"	35
3. Travaux Pratiques	"	36
3.1. But du TP	"	36
3.2. Méthode de Mesure	"	36
3.3. Compte-Rendu du TP	"	37

CHAPITRE II.

Simulateur Pneumatique d'Asservissements.

1. Introduction	Page	41
2. Caractéristiques	"	41
3. Description de l'Appareil	"	41
4. TP. I - Resistance Pneumatique et Régulateur	"	42
5. TP. II - Etude de la Réponse en Fréquence d'un Ensemble de trois Cellules	"	45

CHAPITRE III.

Systeme de Régulation Automatique de la Pression d'Air dans la Buse de LAVAL

1. Introduction	Page	51
2. But du TP.	"	51
3. Description et Fonctionnement du Systeme	"	51
4. Manipulations et Mesures	"	52
5. Compte-Rendu du TP.	"	53

TROISIEME PARTIE

- PROJET DE REALISATION D'UN LABORATOIRE A LONG TERME -

1. Introduction	Page	57
2. Local	"	57
3. Liste <i>des manipulations</i>	"	58
4. Liste du Matériel Pédagogique	"	58
5. Organisation Pédagogique	"	61
<u>CONCLUSIONS</u>	Page	62
<u>ANNEXE.</u> Présentation de Quelques Postes Entrant dans le Cadre de l'Equi- pement du Laboratoire à Long Terme	Page	63
<u>BIBLIOGRAPHIE.</u>	Page	70

INTRODUCTION

Le but de ce projet de fin d'études est la réalisation d'un Laboratoire d'Automatique à Caractère Pédagogique.

Ce travail se subdivisera en trois parties essentielles :

- Dans la première partie, nous nous sommes fixés comme tâche, la mise au point de manipulations déjà existantes, nécessitant certaines adaptations voir même répartitions.

Il s'agit du "Système de la Poursuite Automatique du Soleil" et du "Poste d'Analyse des Propriétés Statiques et Dynamiques d'un Processus Thermique".

- Dans la seconde partie, nous présentons succinctement certains postes existants et opératoires au sein de l'E.N.P.

Nous présentons en particulier dans cette partie, le "Système de la Régulation de la Température d'Eau dans un Réservoir", le "Système de la Régulation de la Pression d'Air dans la Buse de LAVAL" et le "Simulateur Pneumatique d'Asservissement."

- Enfin, dans la troisième partie, nous nous efforcerons de projeter de manière brève les fondements d'un futur laboratoire.

Il va sans dire que notre travail n'est point exhaustif, mais a pour ambition de servir de base à la réalisation d'un prototype de laboratoire d'automatique à court terme.

Les quelques expériences réalisées, ou décrites seulement dans les deux premières parties de cette étude, permettent de juger des possibilités pédagogiques qu'offre chacun des postes présentés.

II. PREMIERE PARTIE

—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—

—o— MISE AU POINT ET DEMARRAGE DES POSTES

DU DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE —o—

—o—o—o—o—o—o—o—o—

CHAPITRE I.

POSTE D'ANALYSE DES PROPRIETES STATIQUES ET DYNAMIQUES

D'UN PROCESSUS THERMIQUE.

1. 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.

Une analyse expérimentale des propriétés dynamiques d'un processus nécessite la réalisation d'un modèle physique du fait que l'analyse de ces propriétés sur un processus réel est souvent impossible.

Sur le procédé réalisé, nous pouvons faire des essais expérimentaux, qui sont consacrés surtout à l'étude de l'évolution de la température.

2. METHODES D'ANALYSE DES PARAMETRES DYNAMIQUES D'UN PROCESSUS.

Dans la majorité des cas, la modélisation mathématique n'est pas simple du fait qu'elle met en jeu des équations mathématiques aux dérivées partielles souvent très difficiles à résoudre. La forme de la fonction de transfert est choisie suivant 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 de cette expression dépend de la méthode et de la forme choisie de la courbe

2.1. - Méthodes de simulation.

2.1.1. Simulation analogique.

Consiste à simuler ou remplacer le système par des éléments physiques qui répondent aux mêmes lois que notre système, mais de structure plus simple aisément transformable et se prêtant facilement aux mesures. Le modèle ainsi constitué est appelé MODELE ANALOGIQUE.

2.1.2. Simulation directe.

Consiste à mettre le système en parallèle avec des circuits électroniques que représentent une certaine forme de transmittance dont les paramètres sont réglables. On injecte le même signal (échelon) sur les deux entrées. Le réglage des paramètres dynamiques permet de réduire le plus possible l'erreur existante entre les deux sorties. On dit alors que l'objet est simulé à un modèle mathématique présenté par une transmittance.

2.2. - Méthodes non paramétriques.

On détermine les réponses impulsionnelles $h(t)$ en utilisant le théorème de convolution ou les fonctions de corrélation telle que la réponse :

$$y(t) = \int_0^{\infty} h(u) u(t-b) du$$
$$u(t-b) = 0 \quad \text{pour } t < b$$

En pratique, cette méthode n'est pas utilisée faute de sensibilité du système aux signaux pseudo-aléatoires tels que les SBPA et les STPA (séquences binaires pseudo-aléatoires et ternaires pseudo-aléatoires).

2.3. - Méthodes paramétriques.

Il existe plusieurs méthodes paramétriques qui sont basées sur la détermination des paramètres du système après avoir mis le modèle sous une forme paramétrique. L'ordre 'n' du système peut être supérieur à un, entier ou fractionnaire. On se limite de traiter toutes ces méthodes paramétriques vue leurs simplicité et précision satisfaisante.

2.3.1. Méthode de STREJC améliorée.

Pour l'identification des systèmes par la méthode de STREJC améliorée, on procède comme suit :

- On enregistre la réponse du système à un échelon unité. Sur l'enregistreur, on prend comme origine des temps l'instant où l'on applique l'échelon.
- On trace un trait vertical au moment qui correspond au début de l'évolution de la courbe. Entre l'origine des temps et le trait vertical, on mesure le temps mort éventuel qu'on note .
- On trace la droite tangente au point d'inflexion (Fig. 231 a) et on note les valeurs T_u et T_a .
Il faut bien noter que T_a 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 monogramme (Fig. 231 b) donne directement la valeur de 'n' (ordre du système), en face de celle de T_u/T_a .
 - En traçant une droite reliant T_a et T_u/T_a (ou la valeur de n), on lit sur l'échelle médiane la valeur de la constante de temps T.
- Ayant déterminé ζ , n et T, la transmittance du système (modèle de STREJC) est la suivante :

$$H(p) = \frac{G e^{-\zeta p}}{(1+Tp)^n}$$

où G est le gain statique.

2.3.2. Méthode de BROIDA.

Cette méthode consiste à identifier une fonction du n^{ème} ordre à une fonction du premier ordre affecté d'un retard pur.

La courbe du premier ordre passe par deux points situés sur la courbe enregistrée, ayant pour ordonnées 0,028 et 0,40 (c-à-d 28% et 40% de la valeur finale).

Ces deux points déterminent deux temps t_1 et t_2 , (Fig. 232) on calcule alors facilement les constantes de temps et le retard pur par les formules suivantes :

$$\theta = 5,5 (t_2 - t_1)$$

$$\zeta = 2,8 t_1 - 1,8 t_2$$

La transmittance s'écrit alors comme suit :

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

G_s est le gain statique.

2.4. - Analyse fréquentielle.

La détermination des paramètres dynamiques d'un processus thermique est aussi possible quand les moyens le permettent par la méthode fréquentielle.

Cette méthode consiste à voir le comportement du processus en régime harmonique ou sinusoïdale.

La sinusoïde constitue un signal canonique particulièrement remarquable pour les systèmes linéaires. C'est le seul signal dont la forme se conserve en traversant un système linéaire. Dans notre cas, le processus est tellement lent qu'il exige un signal sinusoïdal à très basses fréquences, ce qui est difficile à utiliser et même à réaliser.

Généralement, on utilise des générateurs mécaniques pour créer ces signaux. Alors, la précision des mesures est limitée par les imperfections de l'appareillage.

Pour déterminer la réponse en fréquence d'un système, il suffit de le soumettre à une entrée sinusoïdale, ensuite tracer la courbe donnant le gain en fonction de la phase pour chaque fréquence.

Le signal sinusoïdal doit être appliqué dans la zone linéaire de la caractéristique statique du système..

3. ETUDE EXPERIMENTALE.

Le but de cette étude est d'analyser les propriétés statiques et dynamiques d'un modèle de processus thermique et les donner sous forme de transmittances qui peuvent être utilisables dans la régulation de ce processus.

3.1. - Présentation du modèle.

Ce modèle est constitué d'une gaine en bois où nous pouvons débiter un flux de fluide (air) à l'aide d'un ventilateur. Ce débit d'air est réchauffé par une résistance de chauffage située en aval du ventilateur.

Un capteur de température (thermomètre à résistance) placé à l'intérieur de la gaine permet de mesurer la température. Les différentes positions (trous) permettent de contrôler l'évolution de la température en plusieurs lieux de la gaine.

Un autotransformateur relié à la résistance de chauffage permet de faire varier sa puissance chauffante.

Schémas du processus.

- Fig. 31a : schéma bloc du procédé

avec q : le débit d'air du ventilateur

θ_e : la température d'entrée

θ_s : la température de sortie

$F_1(p)$ fonction de transfert liée à q

$F_2(p)$ fonction de transfert liée à

- Fig. 31b : schéma du système de mesure

avec U_c : tension de compensation

U_1 : tension délivrée par le pont de mesure

U_s : tension de sortie du système.

- Fig. 31c : schéma général du procédé avec montages de mesures.

3.2. - Méthode de mesure.

3.2.1. Etalonnage du capteur.

Avant de commencer les essais, nous devons étalonner le capteur. (Il s'agit d'un thermomètre à résistance N_i 100 $R_o = 100$). Pour cela, on relèvera la caractéristique donnant la tension à la sortie du thermomètre à résistance en fonction de la température mesurée à l'aide d'un thermomètre de laboratoire (à mercure). La pente de cette courbe représente la sensibilité du capteur.

3.2.2. Caractéristique statique.

Il s'agit de relever la caractéristique donnant l'évolution de la température en fonction de la tension d'alimentation de la résistance de chauffage. C'est à dire la tension délivrée par l'autotransformateur $= f(u)$. La pente de cette courbe représente le gain statique.

3.2.3. Caractéristique dynamique.

Pour l'analyse des propriétés dynamiques, on utilisera la méthode des réponses indicielles, notre excitation est un changement brusque de la position du curseur de l'autotransformateur qui alimente la résistance, ce qui provoque un changement de la température dans la chambre.

La réponse du modèle est enregistrée par une table traçante, l'étude de cette réponse nous permet d'obtenir les paramètres du processus qui nous permettront d'établir la fonction de transfert du modèle.

Dans ce cas, on néglige le temps de réponse du capteur vu que les processus thermiques sont relativement lents. On fera les essais avec et sans ventilateur.

Remarque.:

L'échelon de tension doit être appliqué avec prudence : on veillera à l'appliquer dans la zone linéaire de la caractéristique **statique** du procédé.

3.3. - Résultats et interprétations.

331 caractéristiques du capteur.

La sensibilité mesurée du thermomètre à résistance est :

$$K = \frac{\Delta U}{\Delta \theta} = 32 \text{ m V/}^\circ\text{C}$$

Cette sensibilité est nettement plus grande que celle d'un thermocouple (100 V/°C).

3.3.2. Caractéristique statique.

Le tableau 332a donne les relevées $\theta = f(u)$ dans le cas où nous avons utilisé le ventilateur (convection forcée) et dans le cas où le ventilateur est à l'arrêt (convection naturelle).

Dans ce tableau nous avons :

- U - tension délivrée par l'autotransformateur
- I - courant dans la résistance de chauffage
- P - puissance dissipée dans cette résistance
- θ_{ss} - température de sortie sans ventilateur
- θ_{sa} - température de sortie avec ventilateur.

La courbe Fig. 332b présente une zone linéaire entre 20°C et 75°C avec un gain statique de 0,57°C/V.

Dans la courbe Fig. 332c, cette zone linéaire est comprise entre 22°C et 34°C avec le gain statique de 0,078°C. On remarque bien que l'utilisation du ventilateur influe beaucoup sur l'augmentation de la température de sortie.

3.3.3. Caractéristique dynamique.

Les courbes (Fig. 333b Fig. 333e) ont été enregistrées dans de différentes conditions.

Le tableau 333a donne ces conditions d'enregistrement dans ce tableau, l'indice 'o' est relatif à l'état initial du procédé (avant l'application de l'échelon) et 'F' à l'état final (échelon appliqué).

Les résultats d'analyse sont donnés dans le tableau 333f. La méthode d'identification utilisée est celle de STREJC.

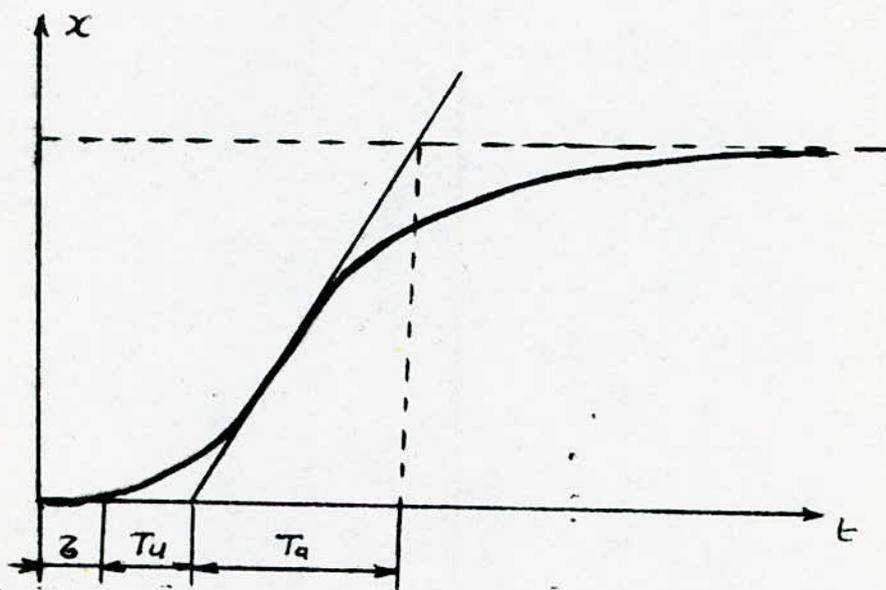


Fig 1.2a

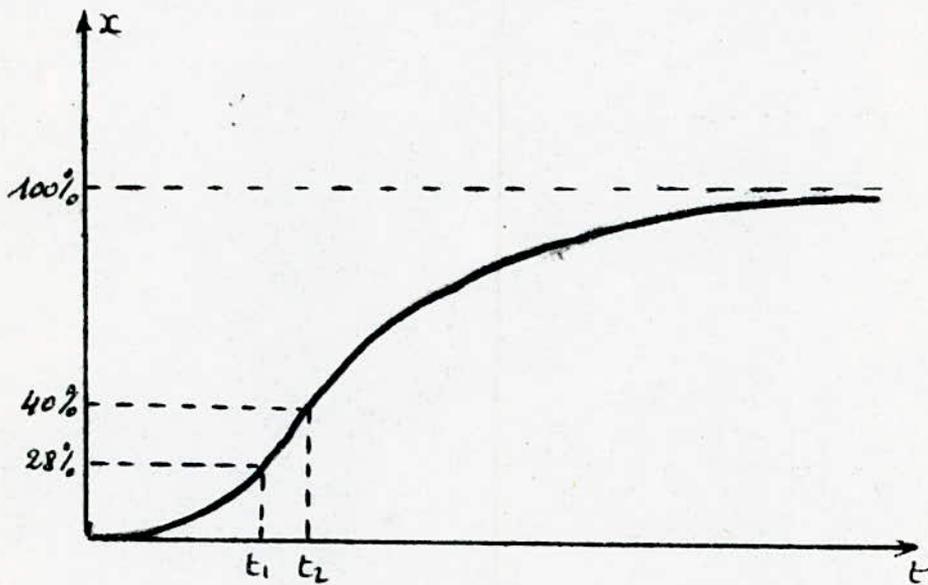
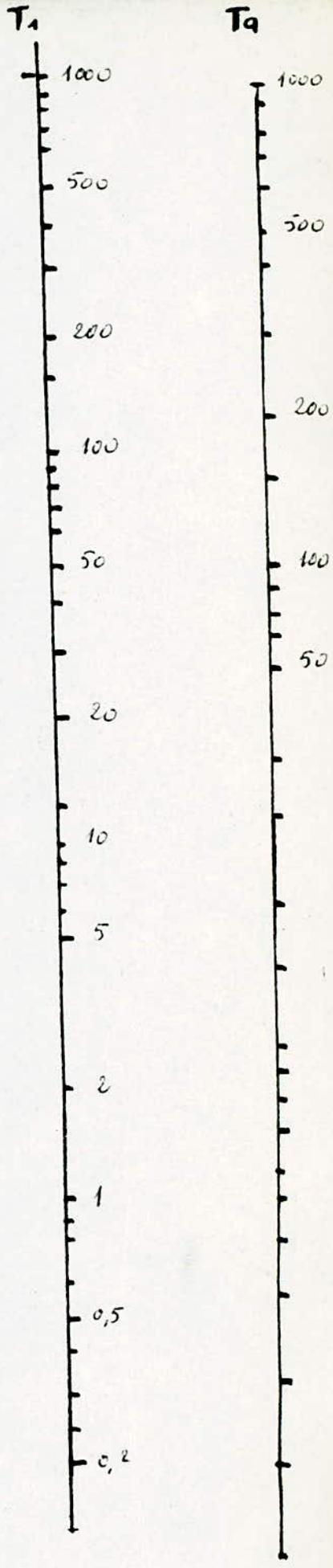
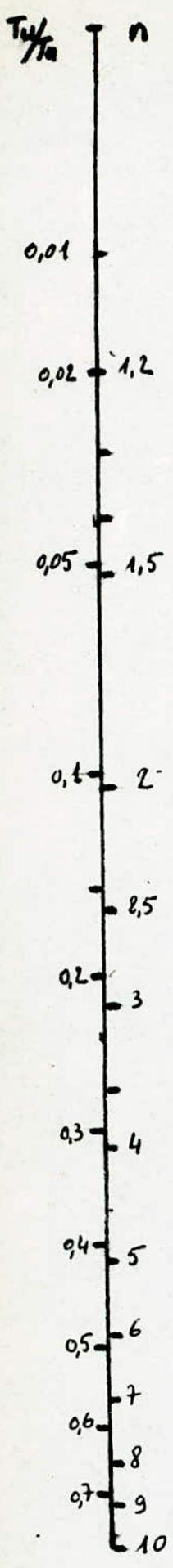


Fig 1.2c



Monogramme Transmittances

Fig 1.2 b

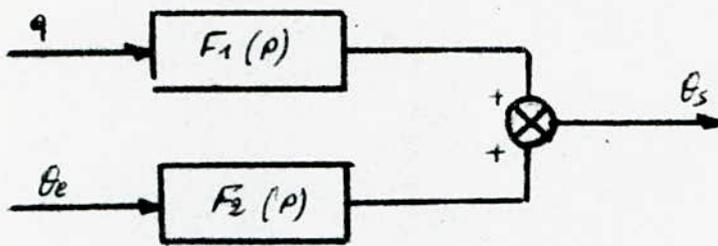


Fig 13.2a Schema Fonctionnel du Procédé

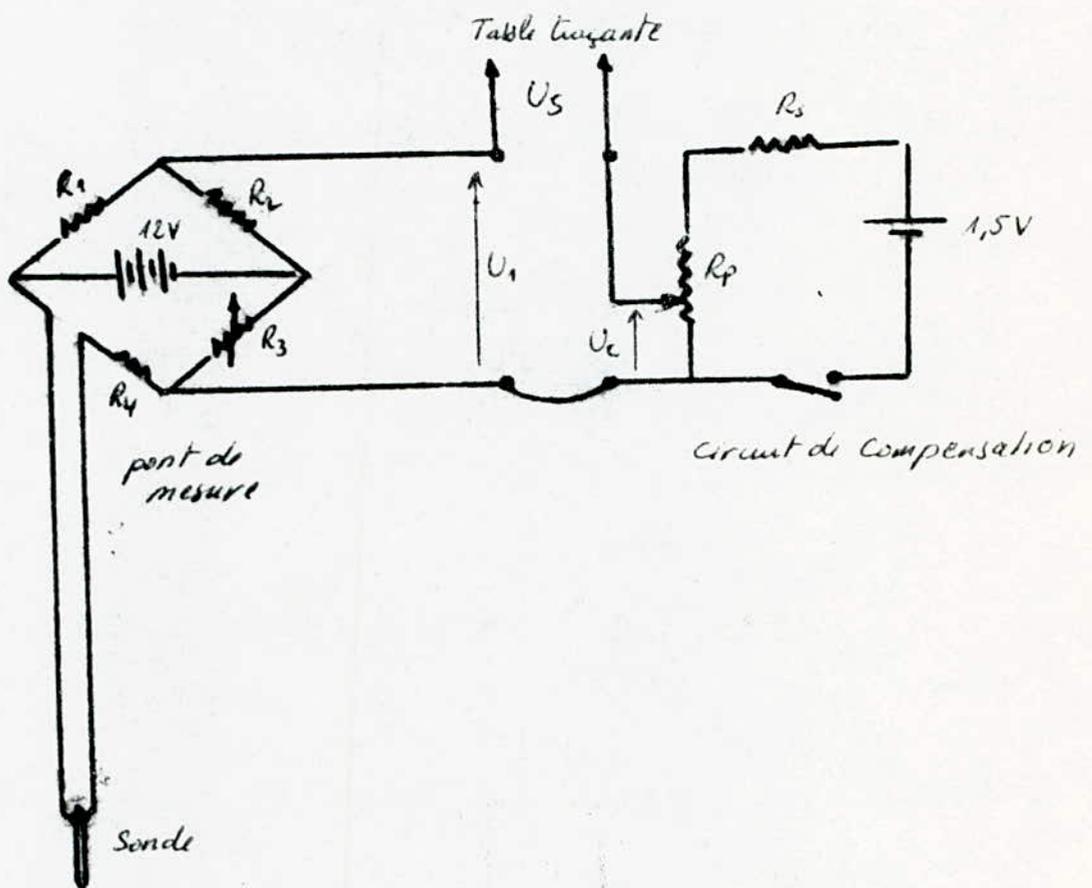


Fig 13.26 Schema du Systeme de mesure

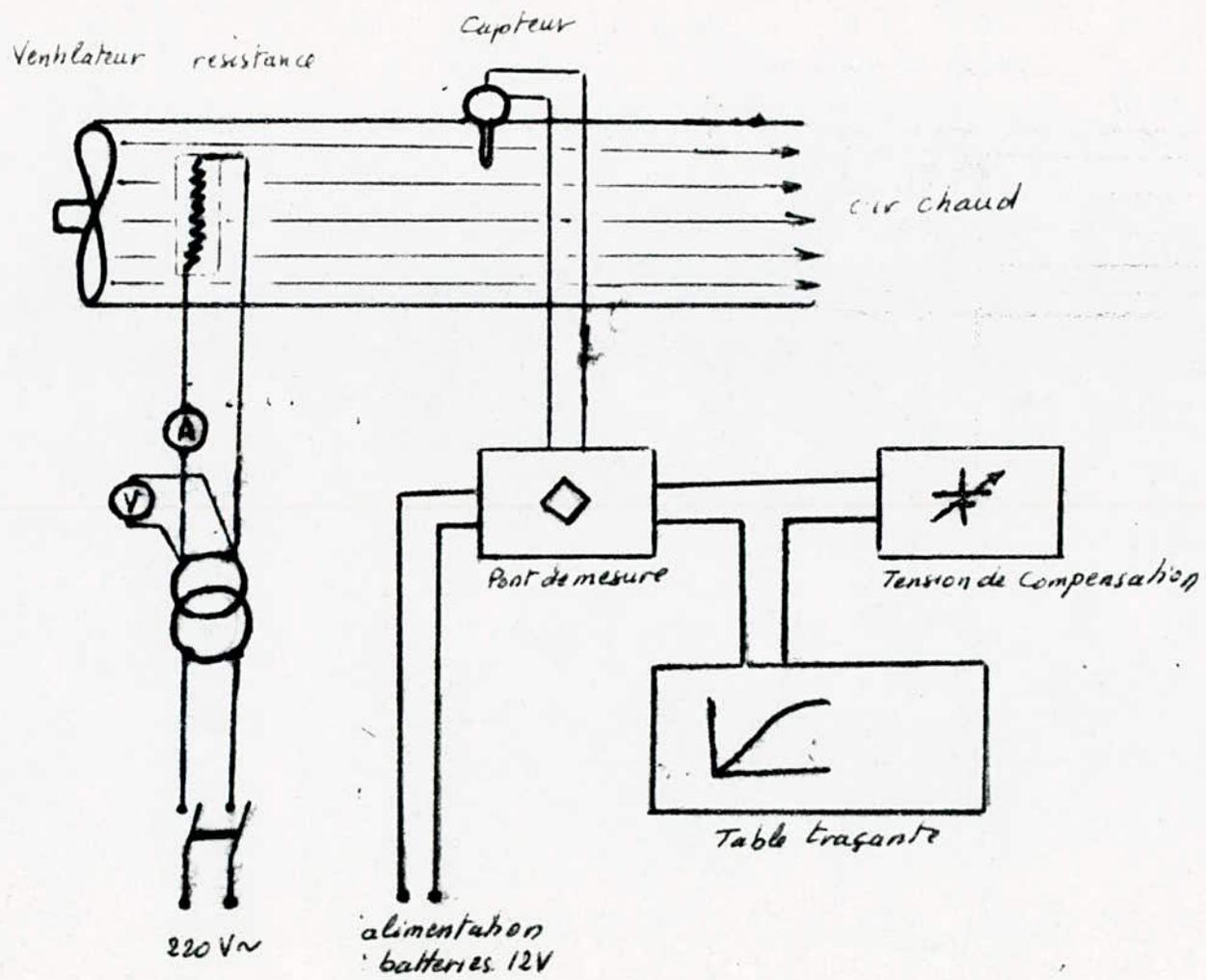


Fig 13.2 c

Schema general du procede' avec le montage de mesure

T A B L E A U - 1.4.1. a

U	I	P	ss	sa
(V)	(A)	(W)	(°C)	(°C)
158	1,1	199	29	23,5
171	1,36	233	36	24,5
184	1,47	271	47	25
198	1,58	314	55	26
212	1,7	362	62	27
229	1,84	422	74	27,5
249	2	496	78	30,5
271	2,17	589	82	32
295	2,36	695	85,5	34,5

ss [°C]

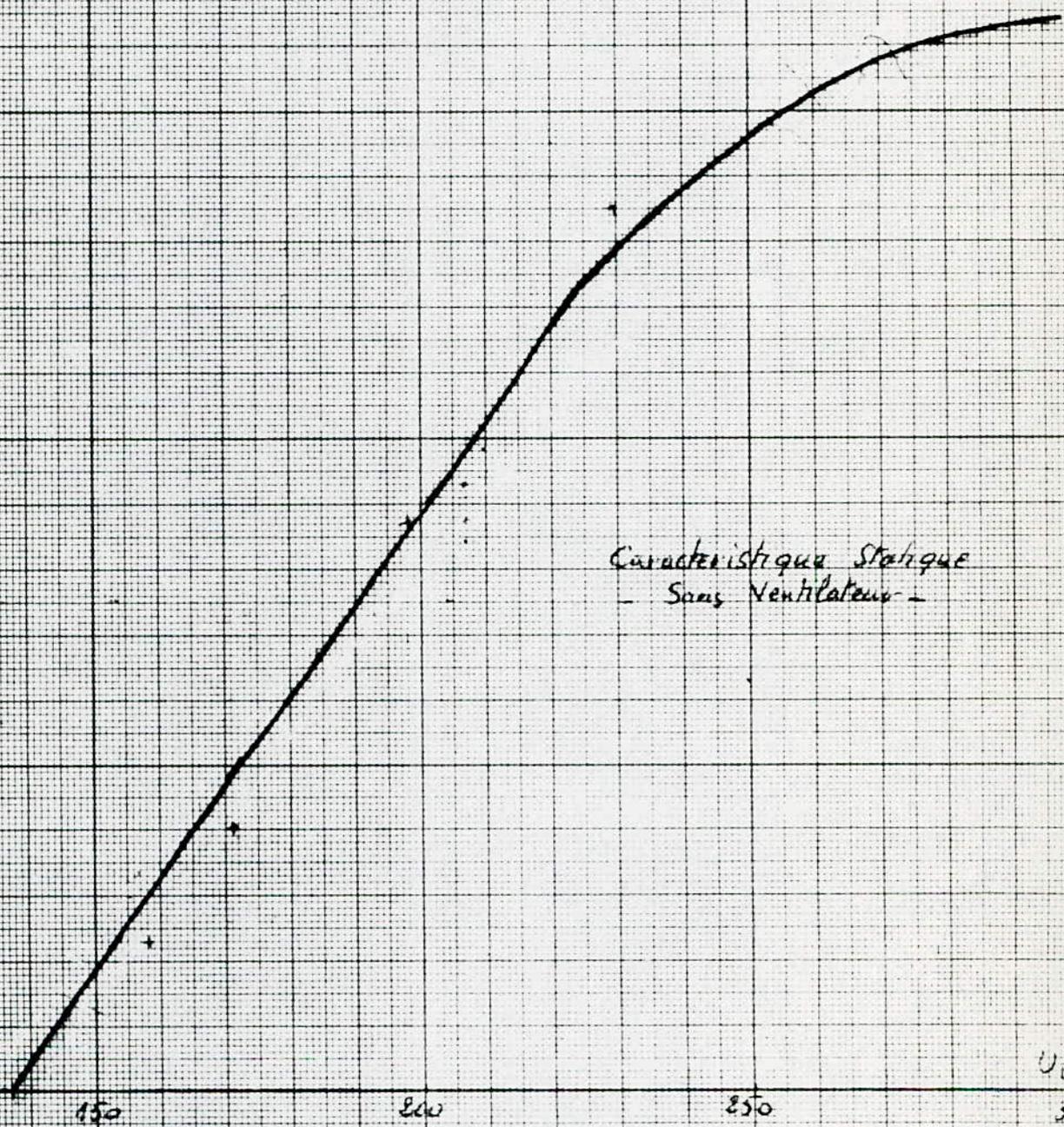


Fig. 1.41 b.

sa [°C]

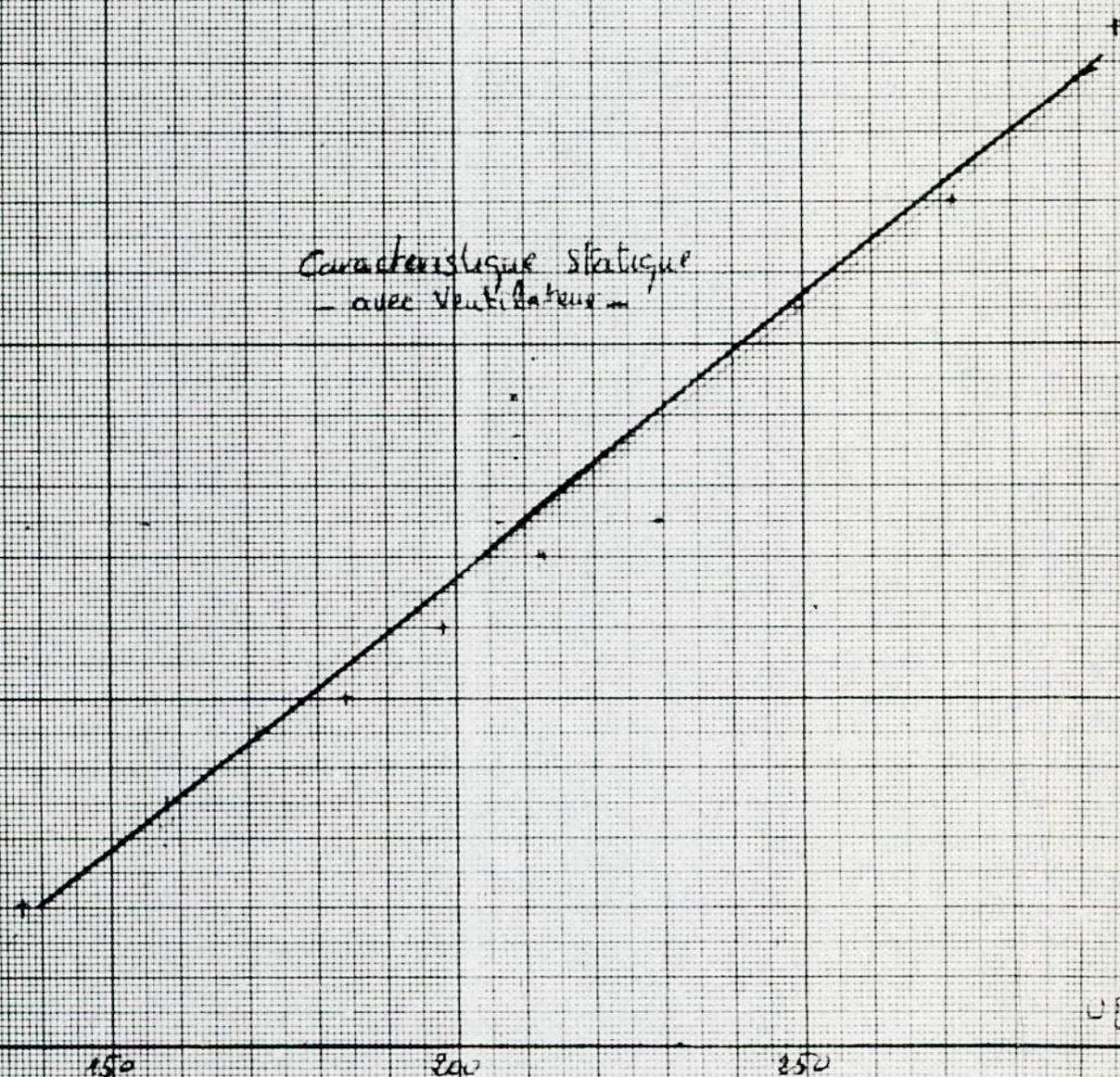


Fig 1.4.1c

5 10 15

N°... de Figure	Grandeurs d'entrée et de sortie	Vitesse de la table	Amplification de la table	θ	F	U_o	I_o	P_o	U_F	I_F	P_F	Remarques
		S/cm	V/cm	°C	°C	V	A	W	V	A	W	
1.4.2.b	$U = f(t) ; \theta = f(t)$	100	10	44	72	180	1,5	270	230	1,85	425	Sans Ventilateur
1.4.2.c	" "	50	1	25	29	180	1,45	270	230	1,85	425	Avec Ventilateur
1.4.2.d	" "	50	2	29	32	230	1,85	425	270	2,15	580	Avec Ventilateur
1.4.2.e	" "	50	2	32	29	270	2,15	580	230	1,85	425	- Avec Ventilateur - Echelon Négatif

T A B L E A U - 1.4.2. a

N° de la Figure	Echelon de Tension (V)	Ecart de Température (°C)	Gain Statique (°C/V)	Retard (s)	Ordre du Système	Constante de Temps	Transmittances	Remarque
1.4.2.b	50	44° à 72°	0,56	80	1,600	530	$\frac{256 e^{-30P}}{11+530P}$	Sans Ventilateur
1.4.2.c	50	25° à 29°	0,08	30	1,4	240	$\frac{108 e^{-30P}}{11+240P}$	Avec Ventilateur
1.4.2.d	40	29° à 32°	0,075	50	1,2	360	$\frac{200 e^{-30P}}{11+360P}$	Avec Ventilateur
1.4.2.f	- 40	32° à 29°	0,075	50	1,5	380	$\frac{200 e^{-30P}}{11+380P}$	Avec Ventilateur échelon négatif

TABLEAU - 1.4.2. f

Serie
de thermisteur
à ventouse

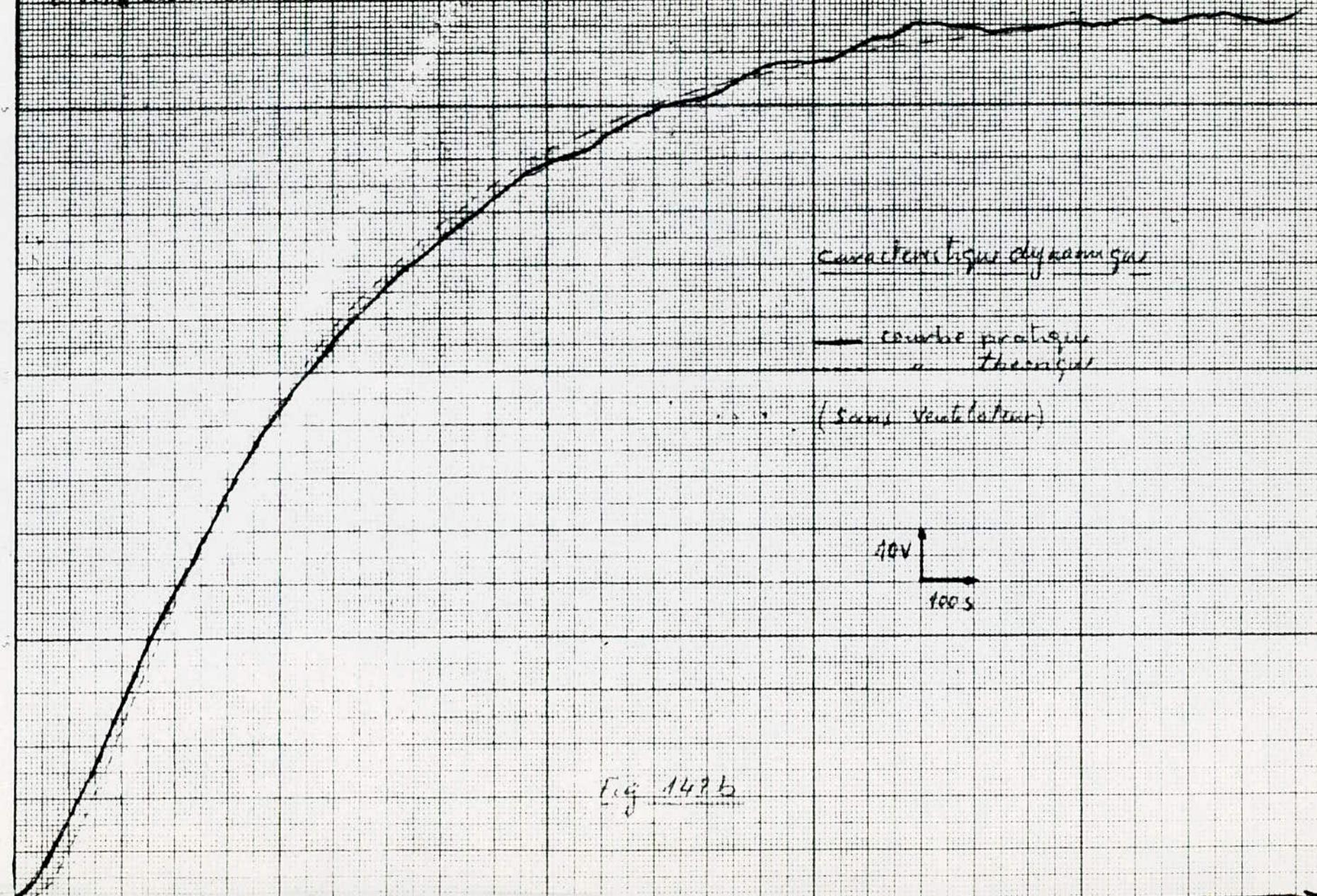
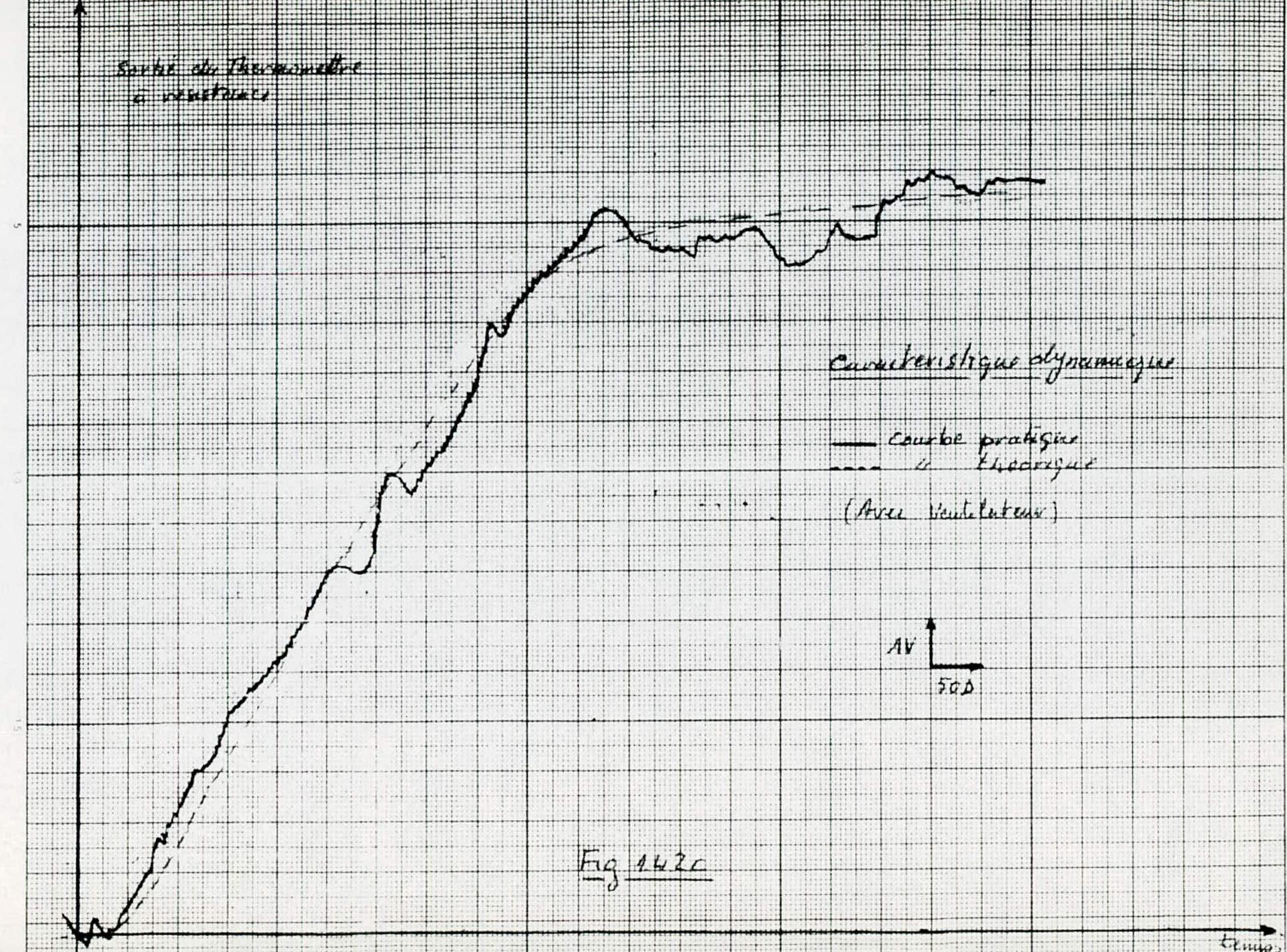


Fig 148b

Sortie du thermomètre
à résistance



Caractéristique dynamique

— Courbe pratique
- - - " théorique
(Avec ventilateur)

AV
500

Fig 142c

temps

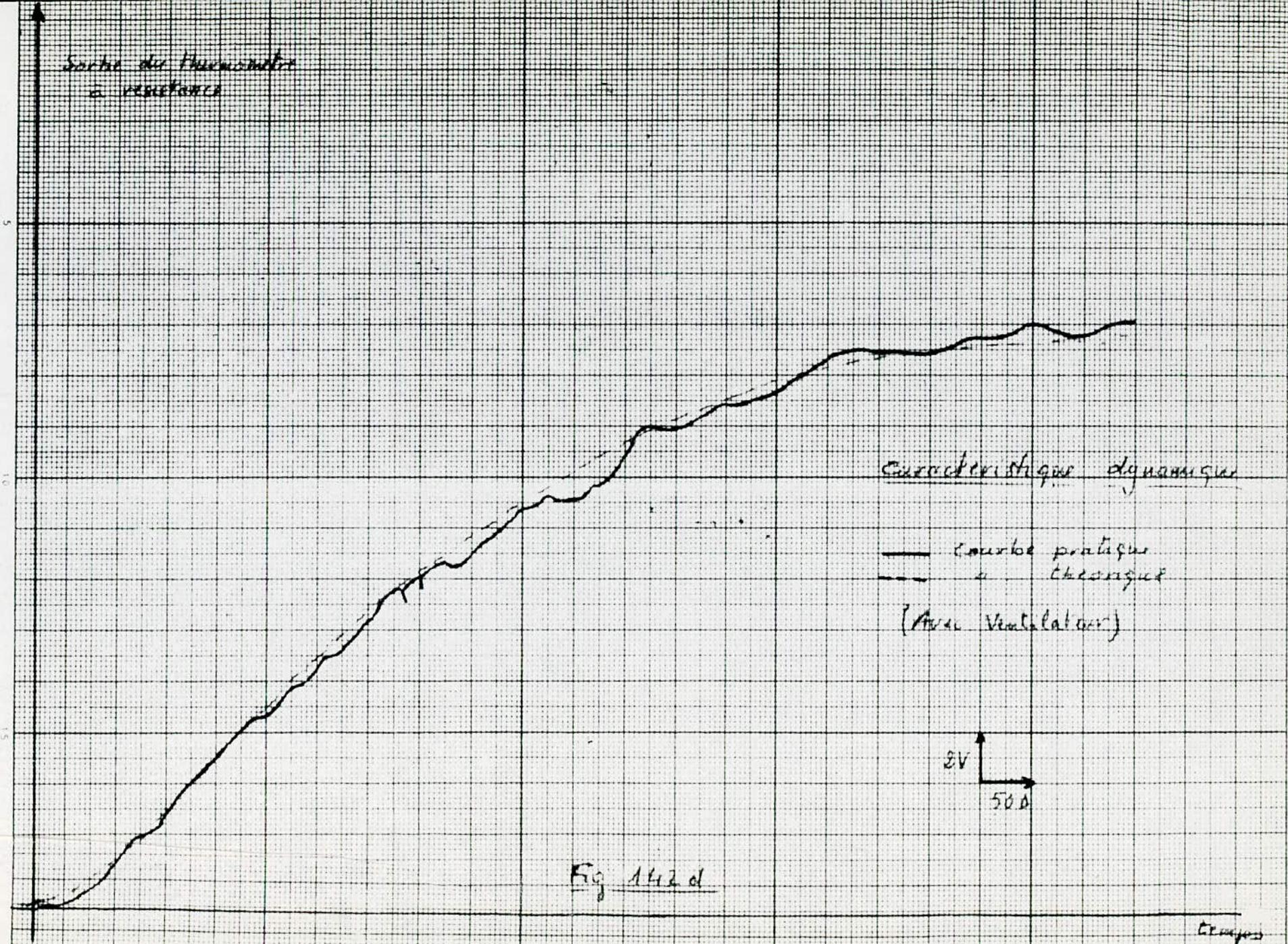


Fig 142 d

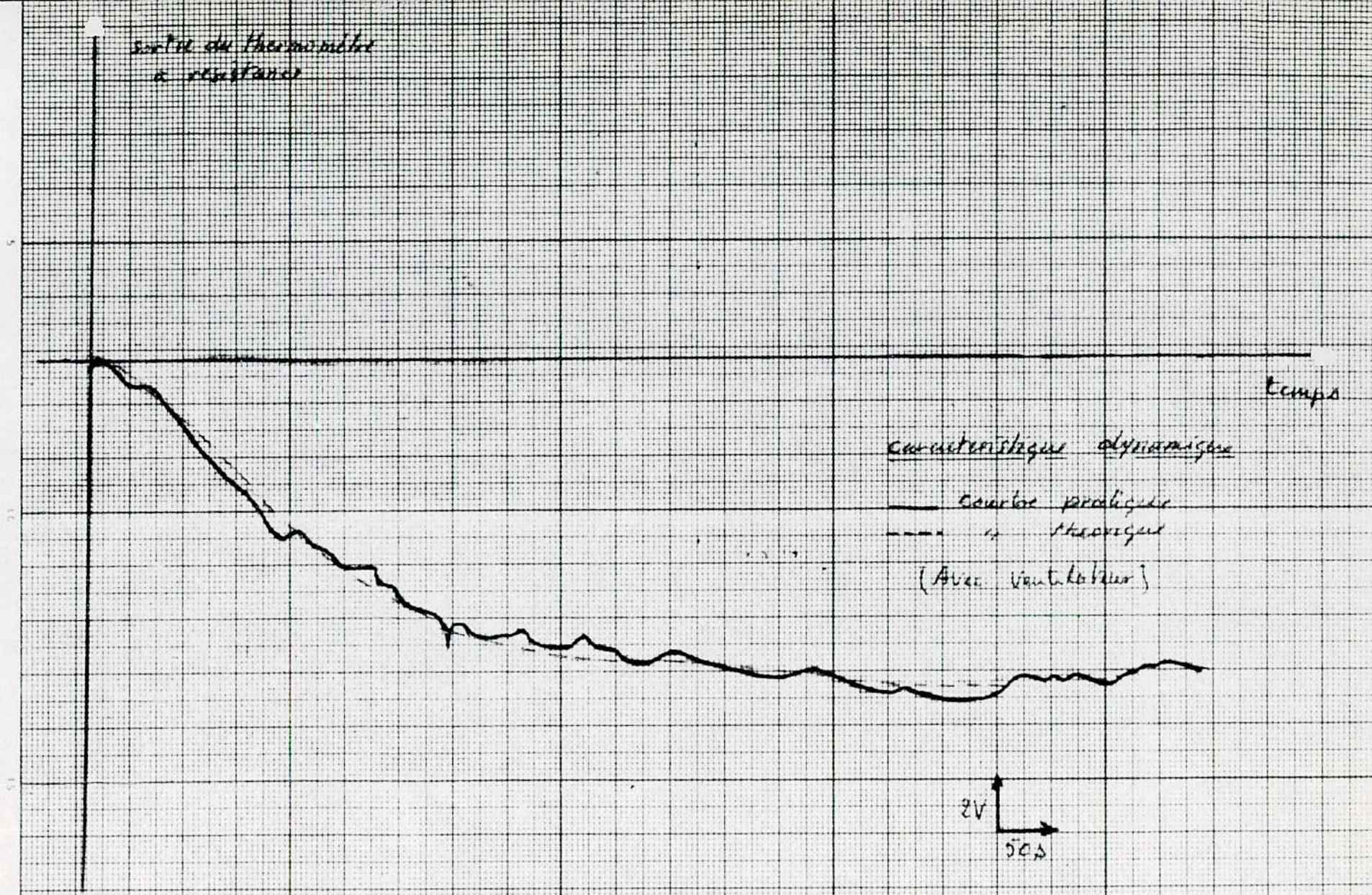


Fig 142e

C H A P I T R E II

POSTE D'ETUDE DU SYSTEME DE LA POURSUITE AUTOMATIQUE

DU SOLEIL.

1. INTRODUCTION.

Ce système est réalisé dans le but de maximaliser le rendement des panneaux solaires (ou capteurs solaires). En effet, dans le cas où le capteur est orienté d'une manière optimale, il ne capte qu'une infime partie du rayonnement solaire, bien que le soleil brille, alors que dans le cas où il suivrait le mouvement du soleil dans sa course diurne, il capterait une plus grande quantité d'énergie ce qui contribue à un accroissement du rendement du dispositif.

Le schéma type d'un système réel de la poursuite automatique du soleil est représenté par la Fig. 1. La position du soleil est détectée par un senseur optique et transmise par ce dernier sous forme d'un signal à un régulateur qui agit en conséquence sur le mécanisme d'orientation du panneau solaire.

Un dispositif auxiliaire détecte le niveau d'éclairement du soleil et commande lorsque cet éclairement descend en dessous d'un certain seuil (couché du soleil) le retour automatique du panneau en position service du matin.

2. DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DU DISPOSITIF.

Le dispositif réalisé se compose essentiellement de trois parties : le senseur optique, le régulateur et le mécanisme d'orientation.

Le senseur optique et le régulateur constituent le circuit de commande du dispositif. C'est la partie purement électronique.

Le mécanisme d'orientation est entraîné par un système de traction électrohydraulique.

2.1. - Système de traction.

C'est le mécanisme qui assure le mouvement d'orientation du panneau solaire.

Il est constitué :

- d'un circuit d'alimentation en pression hydraulique
- d'un impulsateur
- d'un servomoteur
- et d'un mécanisme de transmission.

2.1.1. Circuit d'alimentation en pression hydraulique.

Ce circuit est représenté sur la Fig. 211. La force de traction du système est assurée par la pression de l'eau courante obtenue par un branchement en dérivation au niveau de la conduite d'alimentation hydraulique du laboratoire.

Les électrovannes sont commandées alternativement par un impulsateur délivrant un signal carré.

A la première alternance, l'électrovanne (a) est alimentée donc ouverte mais l'électrovanne (b) ne l'est pas donc fermée. L'ouverture de l'électrovanne (a) assure la mise sous pression des servomoteurs par l'intermédiaire du distributeur hydraulique, cela met en mouvement le piston du servomoteur.

A la seconde alternance, l'électrovanne (a) n'est plus alimentée donc fermée, en même temps l'alimentation de l'électrovanne (b) dont l'ouverture fait évacuer l'eau ramène le piston du servomoteur à sa position initiale. Le système fonctionne ainsi d'une manière continue.

2.1.2. Impulsateur.

Le signal carré qui commande les électrovannes est généré par un montage de deux impulsateurs électroniques utilisés pour la commande des moteurs d'essuis-glace dans certains véhicules.

L'alimentation de ce montage est faite à partir d'une source continue de 12V.

La Fig. 212a donne le schéma de montage de ces impulsateurs avec réglage des fils.

La Fig. 212b donne la forme du signal généré par chaque impulsateur ainsi que le signal résultant de leur assemblage.

2.1.3. Servomoteur.

Le servomoteur utilisé ici est une valve à eau de chauffe-eau sur laquelle on a pris soin de boucher les orifices supplémentaires et prolonger son appui de membrane par une tige assez longue de façon à émerger de l'orifice du servomoteur.

Un système de deux bras électromagnétiques vient se monter par l'intermédiaire d'un support à l'extrémité libre de cette tige.

Ainsi le mouvement de la membrane du servomoteur sera transmis à la tige qui le transmettra intégralement aux systèmes de bras électromagnétiques qui assurent à leurs tours l'entraînement de la roue.

2.1.4. Mécanisme de transmission.

Ce mécanisme décrit sur la Fig. 213 convertit le mouvement de translation périodique du piston du servomoteur en mouvement de rotation (orientation) du panneau. Le support portant les bras électromagnétiques d'entraînement est lié mécaniquement au

piston du servomoteur. Le mouvement de ce dernier est donc transmis directement aux bras qui effectuent des poussées périodiques au niveau d'appuis disposés uniformément sur la face supérieure de la roue d'entraînement du panneau. Un jeu de poulies et une courroie assurent la transmission du mouvement de la roue au support du panneau.

Les bras d'entraînement sont des tiges métalliques soudées sur le contact mobile d'un relais électromagnétique Fig. 214b, ceci permet de lier le bras à l'action du relais (d'où le nom de bras électromagnétique) et d'avoir ainsi une action d'embrayage ou de débrayage du bras suivant que la bobine du relais est excitée ou non.

Les bras électromagnétiques sont fixés sur un même support et disposés de part et d'autre de l'axe de rotation de la roue. Ce qui fait qu'on a la possibilité de commander les deux sens de rotation de la roue par un seul servomoteur.

2.2. - Circuit de commande.

Il est constitué d'un senseur optique, d'un amplificateur et de bras électromagnétiques.

2.2.1. Senseur optique.

Il se compose de deux photoresistances placées à l'intérieur d'un bâti surmonté d'un collimateur. La lumière incidente est dirigée par une lentille se trouvant dans le collimateur de telle façon à avoir une trace focale tangente aux deux cellules. Lors du déséquilibre, l'une des photoresistances se trouvera éclairée. Elle réagira à cela en envoyant un signal qui met en action le système de régulation.

2.2.2. Amplificateur.

C'est un montage électronique qui permet de comparer et d'amplifier le signal d'action provenant du senseur optique lors du déséquilibre du système. Ce signal agit ensuite sur les bras électromagnétiques.

2.2.3. Bras électromagnétiques.

En réalité, le signal délivré par l'amplificateur n'agit pas directement sur les bras, du fait que le mouvement de ce dernier ne s'accordait pas avec le signal d'action qu'il reçoit. Pour avoir cette concordance, on a utilisé des relais supplémentaires actionnés par le signal provenant de l'ampli, ils commandent par l'intermédiaire de leurs contacts fermés au repos les bras électromagnétiques.

La Fig. 2.2.5. représente le schéma général du circuit de commande.

3. TRAVAUX PRATIQUES.

3.1. - But du TP.

- Montrer le fonctionnement du dispositif
- Relever certaines caractéristiques du système
- Application de la fonction descriptive pour l'analyse de la stabilité du système

3.2. - Schéma bloc du système de commande.

Le schéma bloc du système complet Fig. 3.2a se compose de deux éléments linéaires et de deux autres non linéaires.

Les éléments linéaires sont :

- L'amplificateur qui introduit dans le système de commande un coefficient de proportionnalité K
- Le système roue et panneau qui peut être assimilé à un élément du premier ordre dont la fonction de transfert est :
$$\frac{1}{T_m S}$$

Les éléments non linéaires sont : le senseur optique et les bras électromagnétiques.

Pour simplifier l'analyse du système, on supposera que les deux blocs formés par le senseur optique et les bras électromagnétiques forment un seul bloc non linéaire assimilable à un relais à trois positions.

Le schéma bloc simplifié est donné par la Fig. 3.2.b

3.3. - Manipulations et mesures.

3.3.1. Caractéristique du système senseur optique - bras électromagnétiques.

Pour établir cette caractéristique, on relèvera le déplacement au bout du bras en fonction du déplacement de la source.

3.3.2. Caractéristique statique du système complet.

Il s'agit de relever la caractéristique $\alpha_p = f(\alpha_s)$: déplacement du panneau en fonction du déplacement de la source.

En partant d'une position initiale (position 0 sur les cedrans), on déplacera la source progressivement vers la droite (ou vers la gauche), et on notera en même temps du panneau.

3.3.3. Caractéristique dynamique du système.

Pour relever cette caractéristique, on introduit un certain changement (brusque) de la source et on note les variations successives de la position du panneau en fonction du temps, soit la caractéristique $\alpha_p = f(t)$.

3.3.4. Remarque.

- La Fig. 341 donne la caractéristique du système senseur - bras
- La Fig. 342 donne la caractéristique statique du système complet
- La Fig. 343 donne la caractéristique dynamique du système complet.

3.5. - Analyse du système.

3.5.1. Méthodes d'analyse des systèmes non linéaires.

Parmi ces méthodes on distingue :

- . La méthode de la fonction descriptive
- . La méthode du plan de phase
- . La méthode de modélisation analogique
- . La méthode de modélisation numérique.

La méthode de la fonction descriptive est une linéarisation harmonique de l'élément non-linéaire. Le système est ensuite analysé par la méthode fréquentielle. La base principale de cette méthode est de négliger les harmoniques supérieures dans la réponse du système pour l'excitation sinusoïdale.

La précision de cette méthode est meilleure si on arrive à filtrer les harmoniques supérieures.

La méthode du plan de phase est précise. La courbe de réponse du système est donnée dans le plan "position" en fonction de la vitesse (X, \dot{X}) . Elle est applicable pour un système du premier ordre subissant un échelon unitaire.

On obtient la courbe $X = f(t)$ à partir de la trajectoire $X = f(\dot{X})$.

Les méthodes de modélisation analogique et numérique sont les méthodes les plus efficaces et les plus précises dans l'analyse des systèmes non linéaires. La réponse peut être obtenue plus rapidement dans les systèmes analogiques mais la modélisation numérique est plus précise.

3.5.2. Application de la méthode descriptive pour l'analyse de notre système représenté par le schéma bloc simplifié - Fig. 3.2.b

- La fonction descriptive $J(A)$ du bloc non linéaire est :

$$J(A) = \begin{cases} 0 & \forall A < a \\ \frac{2B}{a} \sin \varphi (\cos \varphi + \cos \beta - J \sin \gamma) & ; \quad \forall A \geq a \end{cases}$$

avec $B = 1 \text{ cm}$

$$\sin \varphi = \frac{a}{A} = \frac{3}{A}$$

$a = 3^\circ$

$$\sin \gamma = \frac{a - b}{A} = \frac{0,5}{A}$$

$b = 2,5^\circ$

$$\sin \beta = \sin \varphi - \sin \gamma$$

Connaissant les paramètres de cette fonction descriptive, on peut tracer sa fonction (donnée par des tables).

- La fonction de transfert du bloc linéaire est :

$$G(s) = \frac{K}{T_m s}$$

- Le cycle limite est déterminé par l'équation :

$$J(A) \cdot G(j\omega) - 1 = 0$$

$$\text{soit } J(A) \cdot \frac{K}{T_m j\omega} - 1 = 0$$

Avec K coefficient d'amplification de l'ampli : $K = 100$

T_m constante du temps du système roue panneau

c'est le temps maximal nécessaire au panneau pour suivre la source se déplaçant entre ses deux positions extrêmes. On trouve expérimentalement $T_m = 300$ s

$$\text{d'où : } G(j\omega) = -\frac{J}{j\omega}$$

Le tracé sur le plan complexe des courbes $-\frac{1}{J(A)}$ et $\frac{J}{j\omega}$, nous permet de juger de

la stabilité du système. En effet, si ces deux courbes n'ont pas de points d'intersection pour $0 \leq \omega \leq \infty$ et $0 \leq A \leq \infty$, on pourra dire que le système est stable (d'après la méthode amplitude - phase).

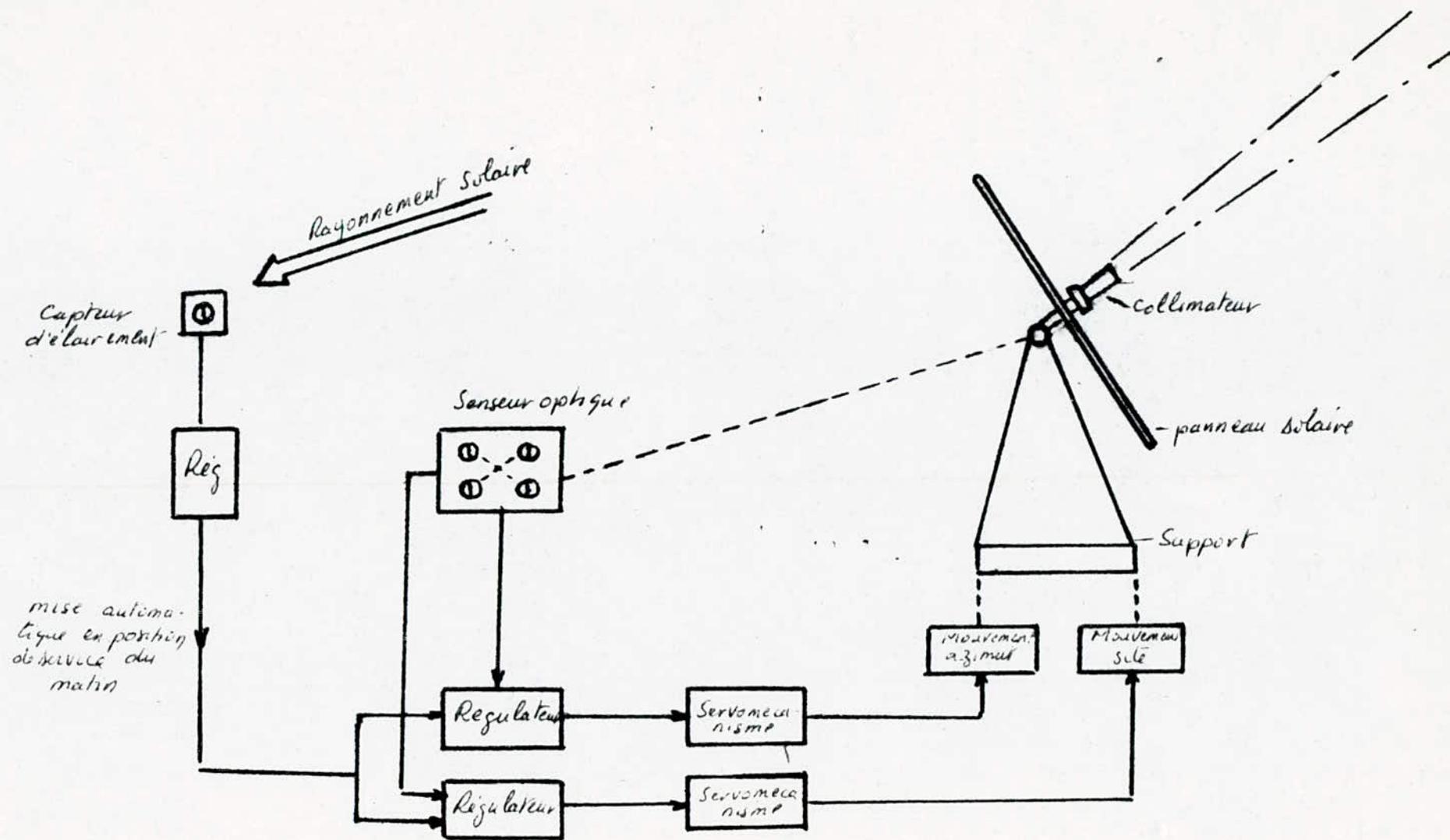


Fig 1 Schéma général du système de commande d'orientation des panneaux solaires

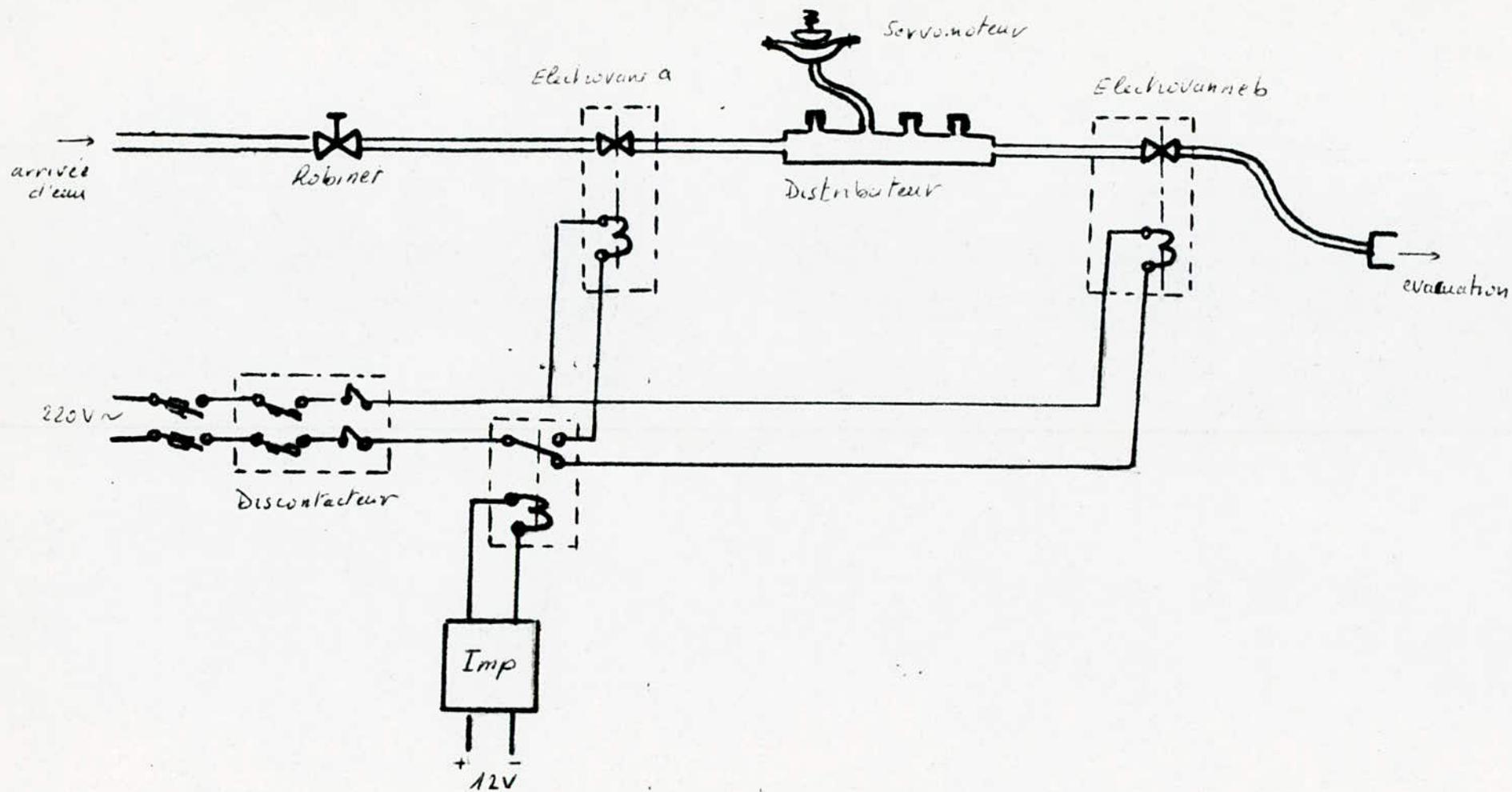


Fig 2.11 circuit d'alimentation en pression d'eau.

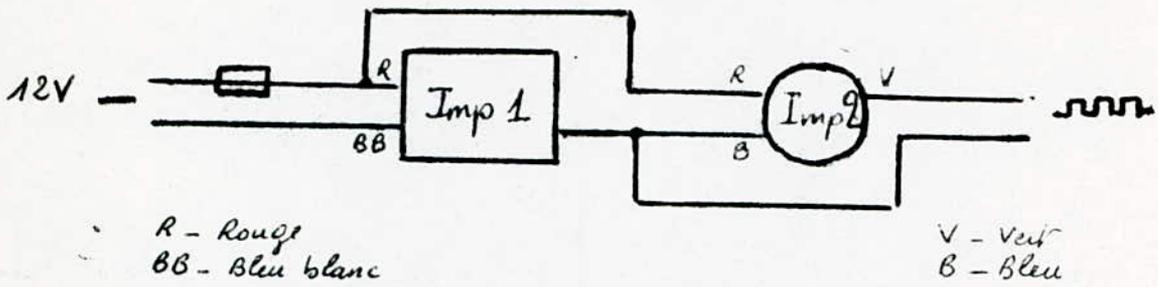
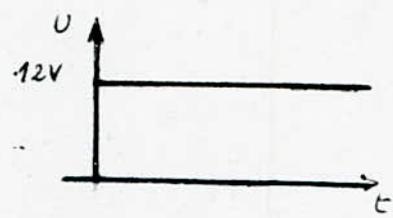
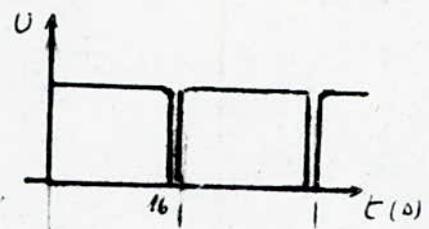


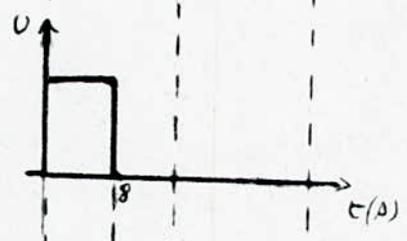
Fig 212 a Schema de montage de impulsateurs



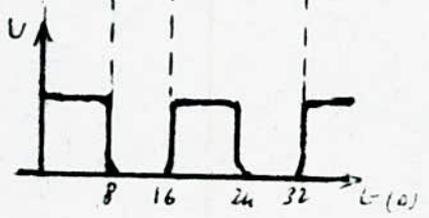
Signal d'entrée



Reponse de l'impulsateur 1 (seul)



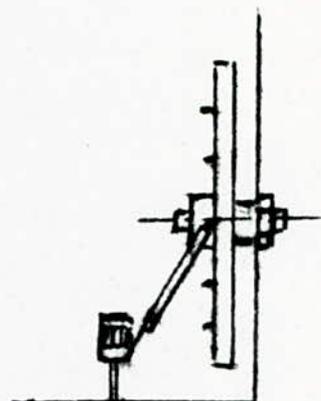
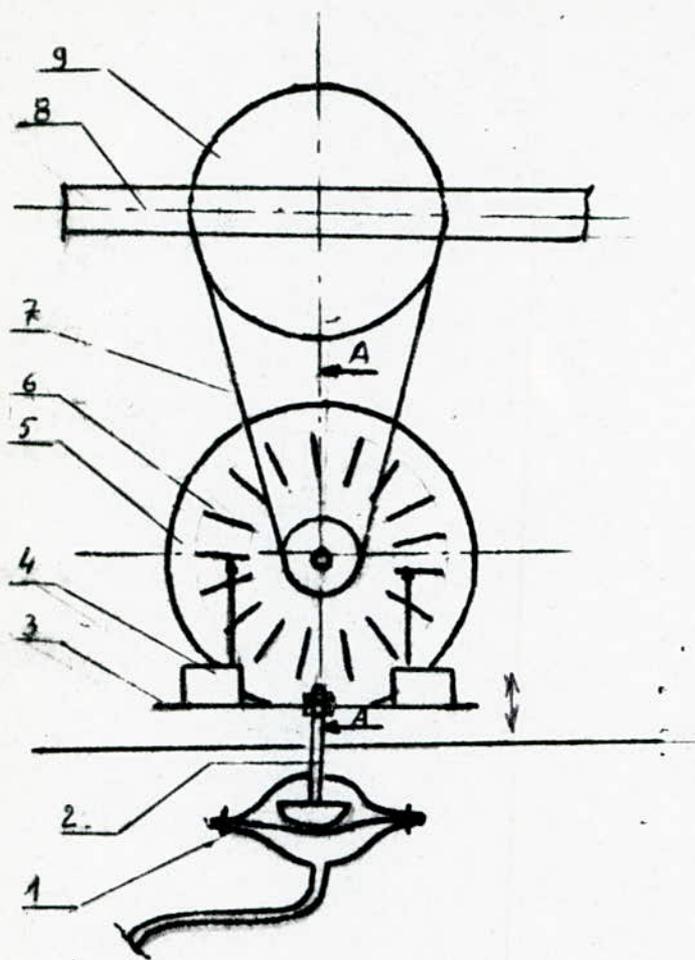
Reponse de l'impulsateur 2 (seul)



Reponse du montage

Fig 212 b

Forme du signal genere par chaque impulsateur (seul) et signal resultant



Section AA

Fig 214a Mecanisme
de Transmission

- 4 - Servomoteur
- 2 - piston du SM
- 3 - Support des bras
- 4 - bras electromagnetique
- 5 - Roue
- 6 - Appuis
- 7 - Courroie
- 8 - Support du panneau
- 9 - Poulie
- 10 - bobine
- 11 - Ressort de rappel
- 12 - Bras d'entrainement
- 13 - Alimentation de la bobine

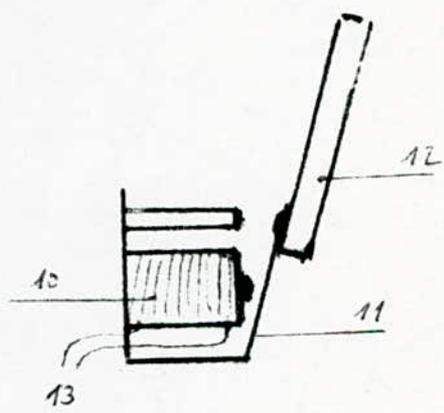
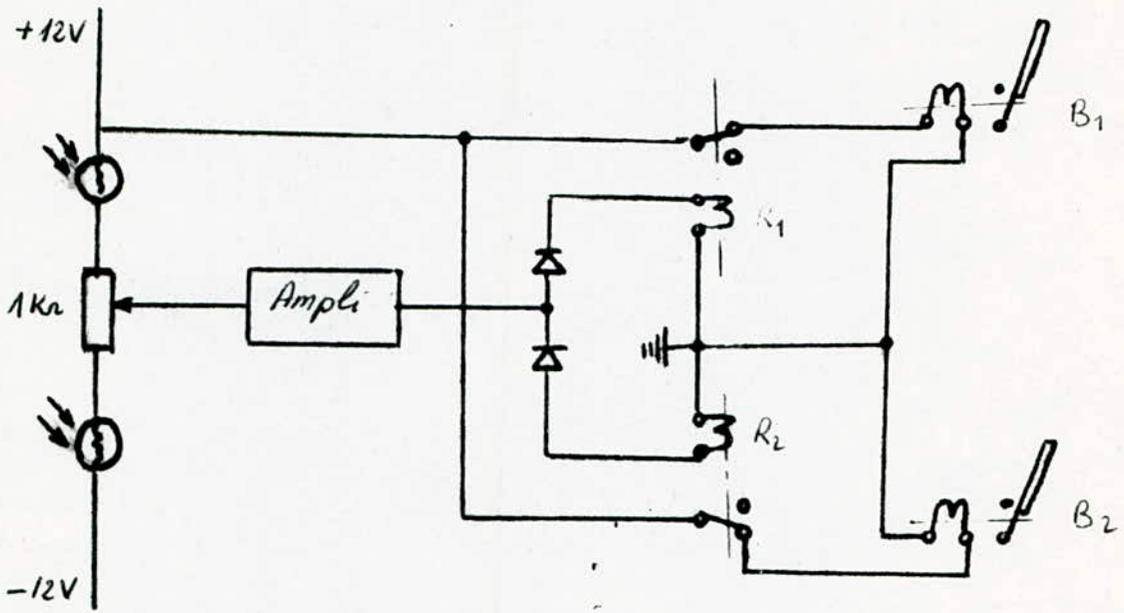


Fig 214b Details du bras
electromagnetique



R_1, R_2 - relais auxiliaires
 B_1 - Bras electrom. droit
 B_2 - " " gauche

Fig 2.2.3 Schéma du circuit de commande

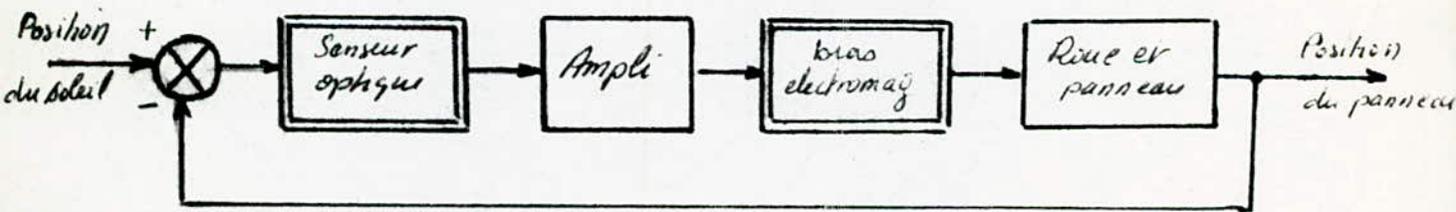


Fig Schéma bloc du système

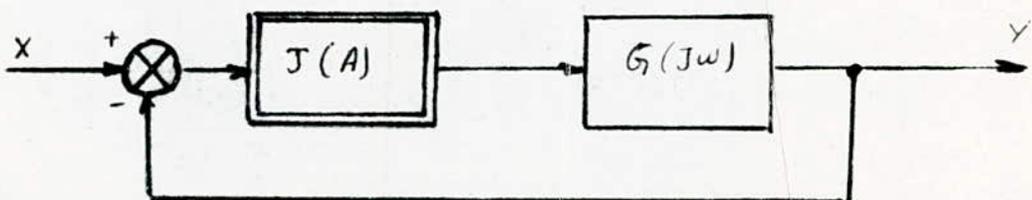


Fig Schéma bloc simplifié

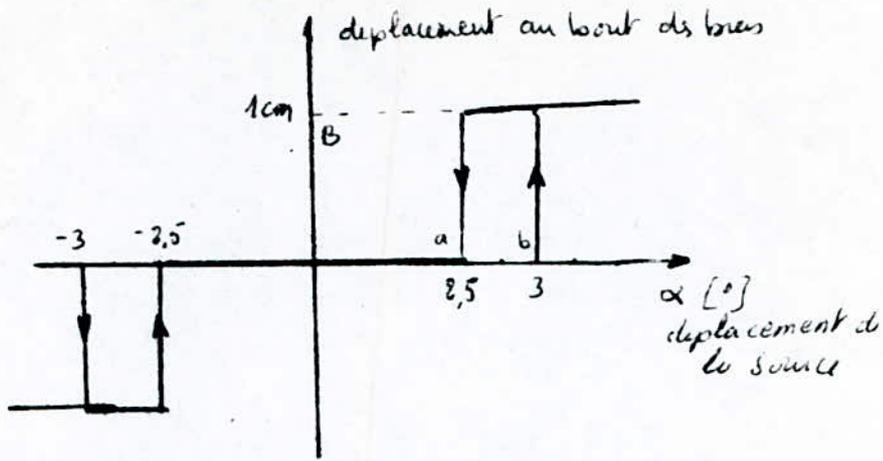


Fig 34.1 caractéristique du système senseur-bras.

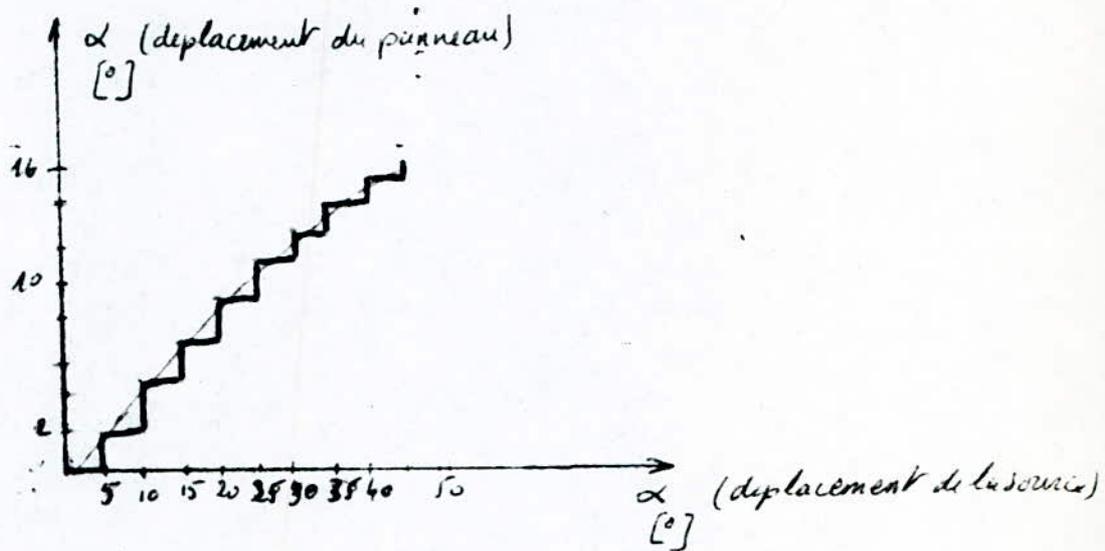


Fig 3-4.2 caractéristique ^{statique} du système complet

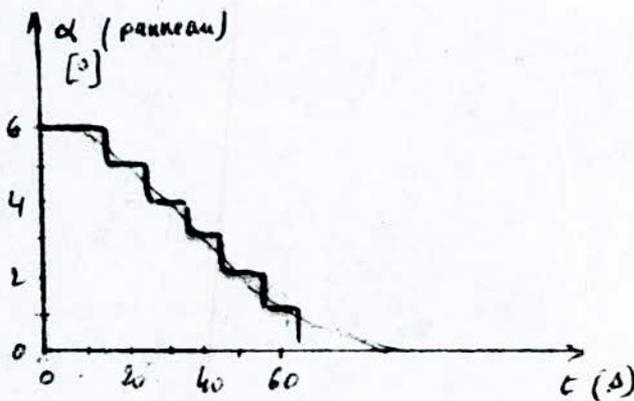
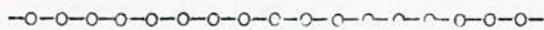


Fig 34.3 caractéristique dynamique

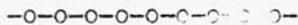
/// DEUXIEME // - ARTIE



-o- PRESENTATION DE QUELQUES POSTES

D'AUTOMATIQUES EXISTANTS

AU SEIN DE L'ENP -o-



C H A P I T R E I.

SYSTEME DE REGULATION AUTOMATIQUE DE LA TEMPERATURE

D'EAU DANS UN RESERVOIR

1. INTRODUCTION.

Parmi les systèmes automatiques, on distingue :

- Les systèmes programmés et séquentiels où l'automatisation porte sur un nombre fini d'opérations prédéterminées dans leur déroulement.
- Les systèmes asservis où tous les cas possibles n'étant pas prévisibles. Le déroulement d'une opération ne peut être connu à l'avance (présence de perturbations etc ...)

Parmi les systèmes asservis, on distingue :

- Les régulateurs lorsque la tâche à réaliser consiste à maintenir une ou plusieurs grandeurs physiques à des valeurs fixes.
- Les asservissements lorsque la tâche à réaliser consiste à faire suivre une loi non fixée à l'avance à une ou plusieurs grandeurs physiques.

Tenant compte des classifications présentées ci-dessus, le système présenté peut être traité comme le système de régulation réalisé à l'aide des éléments de commande pneumatique et électrique.

2. DESCRIPTION DU SYSTEME DE LA COMMANDE.

Le système de la commande est décrit sur les figures : 2.1, 2.2 et 2.3.

La Fig. 2.1 représente le schéma bloc du système

La Fig. 2.2 représente le schéma de connexion

La Fig. 2.3 représente le schéma de fonctionnement du régulateur pneumatique.

Selon le schéma bloc, la sortie du processus thermique ' ' est reliée à un capteur manométrique de la température (7). La valeur de la température est représentée par la translation t à l'entrée du régulateur pneumatique. La valeur demandée de la température aussi sous forme de la translation t_0 est comparée à la valeur réelle t . A la sortie du régulateur, on a la pression d'air comprimé P , ce signal entre dans le servomoteur pneumatique par l'intermédiaire de positionneurs amplificateur pneumatique (2). Le mouvement de translation à la sortie du servomoteur (4) est utilisé comme le signal de contre réaction de positionneur (2) et parallèlement comme le signal de la comman-

de de l'autotransformateur.(5).

Le mouvement de translation t est transformé en mouvement de rotation qui provoque le changement de la position du contact mobile de l'autotransformateur. Dans l'élément de transmission, on peut envisager le jeu mécanique (non linéaire) de la tension à la sortie de l'autotransformateur) qui est connecté à l'entrée du processus thermique. Les variations de la tension u provoquent les variations de la température .

Sur le schéma de connexion Fig. 22, le réservoir (2) est alimenté à partir de l'arrivée de l'eau d'alimentation dont le débit peut être stabilisé à l'aide d'un robinet.

Le principe de fonctionnement du régulateur pneumatique Fig. 2.3 est le suivant :

Le changement de la température mesurée T provoque le changement de la pression du gaz contenu dans le réservoir du thermomètre (1).

Ce changement de la pression provoque le déplacement de la membrane (2) et du levier (3) du régulateur. Le levier (3) change la position de la plaque (4) par rapport à la base du régulateur pneumatique. En effet, la pression de commande (P_s) alimentant la vanne pneumatique, le point de pivot du levier (3) peut être déplacé à l'aide de la came (5) de cette manière, on peut introduire dans le régulateur les valeurs de la température demandée.

Les manomètres (6) et (7) montrent les valeurs de la pression d'alimentation P et de la commande P_s . L'amplificateur de la commande (8) du régulateur est dans ce cas l'élément (5) sans contre réaction. La pression d'alimentation du régulateur peut être fixée à l'aide du manuel 9. La pression qui représente la valeur de la température T est mesurée par l'intermédiaire du manomètre (1°) sur lequel on a directement les valeurs de la température.

Le système des leviers du manomètre de mesure n'a pas été présenté pour simplifier la figure.

3. TRAVAUX PRATIQUES.

3.1. - But du T.P.

- Apprendre le principe de fonctionnement du système de la commande pneumatique
- Comparer le régime du fonctionnement stable et instable du système
- Etudier l'influence de non linéarité (jeu mécanique) sur la stabilité du système.

3.2. - Méthode de mesure.

On doit enregistrer les variations des paramètres principales du système. Pour cela, nous devons faire deux séries de mesures, l'une pour le régime stable (sans jeu mécanique) et l'autre pour le régime instable (avec jeu). Pour chaque série de mesure un

tableau du type de la Figure 3.2 sur lequel on fixe les instants de mesures et portons les valeurs des paramètres θ , P , r et u données par les appareils de contrôle du système au moment considéré.

3.3. - Compte-rendu du T.P.

Le compte-rendu doit contenir :

- 1°/ les tableaux de mesures et de calculs
- 2°/ les courbes avec les interprétations
- 3°/ conclusions et remarques.

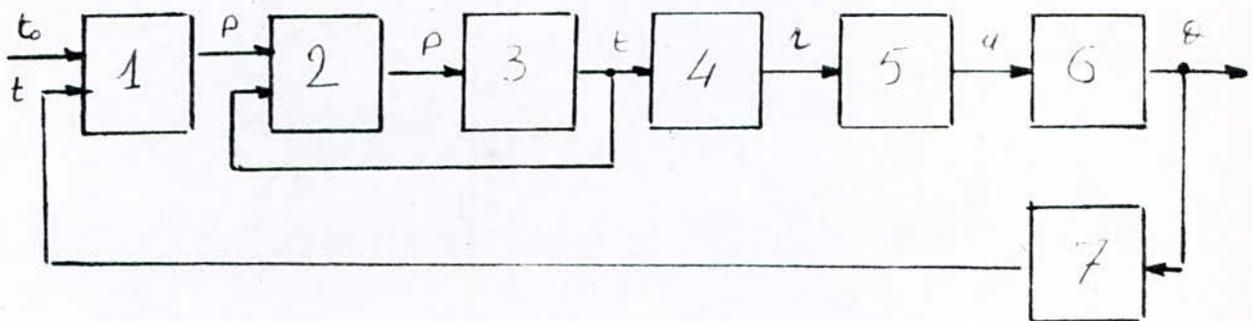


Fig 32 Schéma bloc

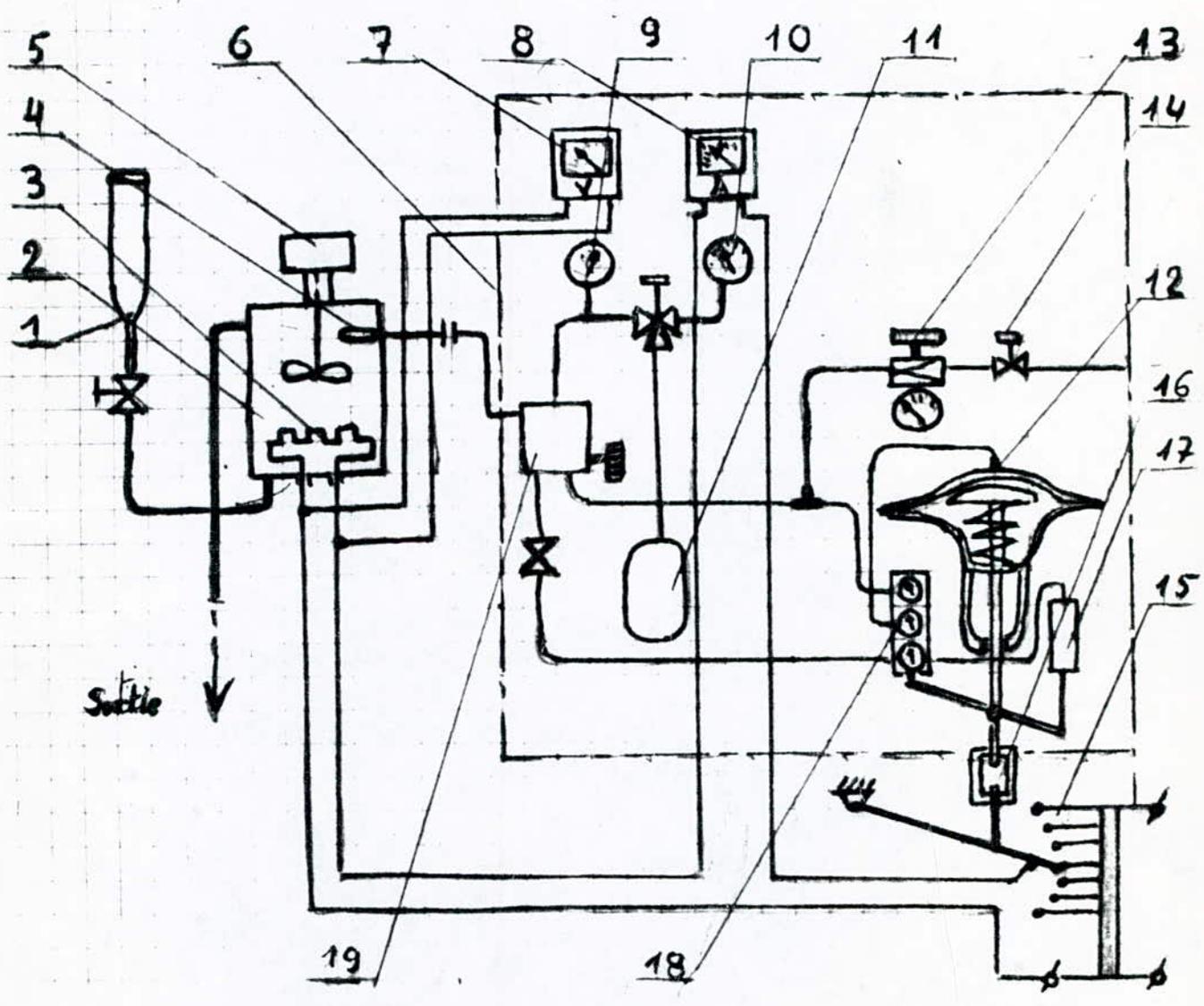


Fig 34 Schéma de commande

Légende.

Fig. 21 - Schéma bloc du système de commande

1 - Régulateur pneumatique PI	P	- pression
2 - Positionneur pneumatique	t (cm)	- translation
3 - Servomoteur	r (°)	- rotation
4 - Système de transmission (élément non linéaire)	u (v)	- tension
5 - Autotransformateur	(°C)	- température
6 - Processus thermique		
7 - Capteur de la température.		

Fig. 22 - Schéma de connexion du système de la commande

- 1 - Arrivée de l'eau d'alimentation
- 2 - Objet de commande (processus thermique)
- 3 - Résistance électrique de chauffage
- 4 - Capteur manométrique de la température
- 5 - Moteur électrique du mélangeur
- 6 - Système pneumatique de la commande PI
- 7 - Voltmètre
- 8 - Ampèremètre
- 9 - Manomètre à la sortie du régulateur
- 10 - Manomètre de l'élément d'intégration
- 11 - Réservoir de l'élément d'intégration
- 12 - Servomoteur pneumatique
- 13 - Réducteur de la pression avec un manomètre
- 14 - Vanne d'alimentation
- 15 - Autotransformateur 220 V/o 250 V
- 16 - Transmission mécanique avec ou sans jeu (élément non linéaire)
- 17 - Contre réaction du positionneur
- 18 - Ensemble des manomètres du positionneur
- 19 - Régulateur pneumatique PI.

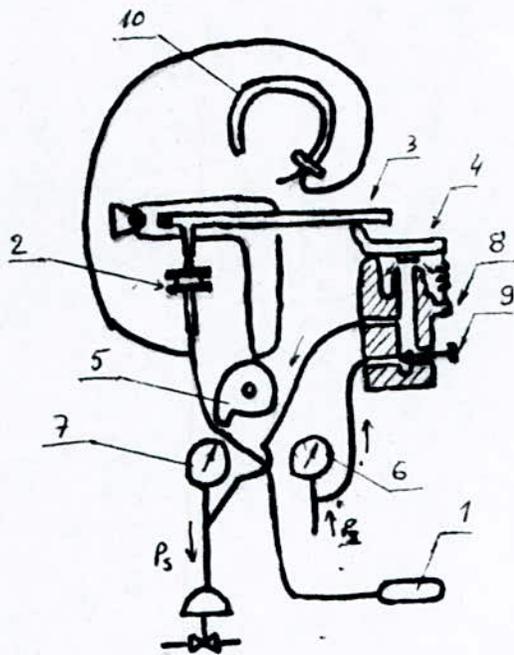


Fig 2.3 Regulateur pneumatique

- 1 - Thermometre
- 2 - membrane
- 3 - levier
- 4 - Appui
- 5 - Came
- 6 - 7 - manometres
- 8 - amplificateur
- 9 - manometre
- 10 - manometre gradue en °C

CHAPITRE II

SIMULATEUR PNEUMATIQUE D'ASSERVISSEMENT

1. INTRODUCTION.

Le simulateur pneumatique Fig. 1 est conçu pour aider les Etudiants à mieux comprendre le fonctionnement des petits systèmes et de leurs circuits d'asservissement, en même temps que pour démontrer à la fois quantitativement et qualitativement quelques principes fondamentaux de l'automatisme.

Il offre aussi, la possibilité de se familiariser avec les systèmes pneumatiques.

2. CARACTERISTIQUES.

- Régulateur proportionnel, intégral et différentiel
- Simulation pneumatique d'un système asservi
- Systèmes à boucle ouverte ou fermée
- Systèmes stables et instables
- Sept manomètres pour le contrôle des pressions dans le système
- Convertisseur électro-pneumatique pour l'introduction des perturbations
- Convertisseur pneumatique-électrique à deux voies permettant l'enregistrement graphique ou pas oscilloscope
- Toutes les composantes de même que la tuyauterie sont facilement identifiables par l'utilisation de couleur de codage
- Montage rapide des tuyaux
- Gamme très complète d'accessoires en option

3. DESCRIPTION DE L'APPAREIL.

Les composants et la tuyauterie de l'appareil sont montés sur la face avant de trois panneaux constituant le tableau de l'appareil.

Au centre, on a les cellules à retard, à gauche le régulateur et à droite le générateur de fonction.

3.1. - Cellules à retard.

Le système à réguler est simulé par un nombre d'éléments à retard (allant jusqu'à trois) reliés en série. Ces éléments fonctionnent sous le principe R - C (Résistance, capacité) et sont constitués d'une vanne réglable à pointeau suivie d'une chambre capacitive. La sortie de chaque cellule est indiquée par un manomètre.

La Fig. 3a représente le schéma de cette cellule ainsi que de son analogie électrique.

Sur le schéma, on a :

Po	: pression d'entrée	Uo	: tension d'entrée
P	: pression de sortie	U	: tension de sortie
C	: capacité		
R	: résistance		

La Fig. 3b donne le schéma de connexion interne d'une cellule.

3.2. - Régulateur.

Son action peut être soit :

- Proportionnalité (P)
- Proportionnalité + Intégration (P I)
- Proportionnalité + Dérivation (P D)
- Proportionnalité + Intégration + Dérivation (P I D)

L'opération recherchée est obtenue en combinant les cellules produisant l'action P, PI ou D.

3.3. - Générateur de fonction.

Un convertisseur électrique-pneumatique (C.E.P.) à actions différentielles faisant partie de l'ensemble est utilisé pour produire les différentes formes de signaux requises pour les essais, les perturbations. Pour les fonctions en échelon, un interrupteur permet d'envoyer au convertisseur un échelon de tension provenant d'un réseau d'accumulateurs et de résistances. On peut faire varier à la fois la grandeur de l'échelon et l'instant du déclenchement. Pour les signaux d'essais sinusoïdaux, on doit utiliser un générateur B.F. pour couvrir la plage 0 - 100 Hz. Un signal de faible intensité : 50 Hz superposé au signal d'entrée électrique améliore la forme ondulatoire du signal et la réponse en fréquence du C.E.P.

4. RESISTANCE PNEUMATIQUE ET REGULATOUR.

4.1. - But du TP.

- 1°/ - montrer le fonctionnement de l'appareil
- 2°/ - étalonnage d'une résistance variable pneumatique
- 3°/ - étude du régulateur P.

4.2. - Resistance pneumatique.

4.2.1. Introduction.

Pour simuler le retard causé par une seule transmittance dans un ensemble on utilise une restriction variable suivie d'une chambre capacitive dans chaque étage. La graduation de la restriction est fonction linéaire de l'ouverture de la vanne et est graduée en temps.

4.2.2. Description mathématique.

En supposant que le débit est proportionnel à la pression dans la cellule (Fig. 3a), on obtient l'équation suivante :

$$q = \frac{P_o - P}{R} \quad \text{et} \quad q = C \frac{dP}{dt}$$

$$P_o = C R \frac{dP}{dt} + P$$

$$\text{Soit} \quad P = P_o \left(\frac{1}{1 + TD} \right) \quad \text{où} \quad D = \frac{d}{dt}$$
$$T = C R$$

de là, on trace le diagramme fonctionnel Fig. 4.2.2.

4.2.3. Mesures;

La réponse P à une entrée en échelon A appliquée brusquement est :

$$P = A (1 - e^{-t/T})$$

pour $t = T$ alors $P = 0,632 A$, donc on peut mesurer la constante de temps en enregistrant la croissance exponentielle de la pression P .

Une série d'enregistrements pour différentes ouvertures de la vanne permet de tracer une courbe d'étalonnage.

4.3. - Régulateur.

4.3.1. Introduction.

Un régulateur proportionnel est nécessaire pour produire un signal de correction directement proportionnel à la différence entre les valeurs réelles et affichée d'un signal. La proportionnalité est généralement indiquée sur le régulateur sous le nom de "Proportionnal Band", et se présente, en effet, comme un facteur de gain, tel que :

$$\text{Proportionnal Band } (\%) = \frac{100}{\text{Gain}}$$

La bande proportionnelle indiquée sur la plupart des régulateurs l'est à titre indicatif

et, pour connaître les valeurs précises obtenues au simulateur, il est nécessaire d'établir une courbe d'étalonnage suffisamment précise.

4.3.2. Caractéristique statique du régulateur P.

La caractéristique statique est obtenue à partir du fonctionnement en B.O du régulateur Fig. 4.3.2.

La valeur mesurée à l'entrée du régulateur vient de la sortie C.E.P., et le signal de sortie y du régulateur peut être mesuré à l'aide d'un manomètre.

La valeur de consigne c (échelon) vient du générateur de fonction, dans ces conditions, on a l'équation de la sortie du régulateur :

$$y = G \cdot \xi$$

avec G = le gain du régulateur P

$$\xi = c - m \text{ écart de l'erreur}$$

4.3.3. Caractéristique du régulateur P en boucle fermée.

Dans ce cas, la sortie y du régulateur est reliée à son entrée m et on a : $y = G\xi$, avec $\xi = c - y$, on a $y = G(c - y)$ d'où on tire $y = \frac{G}{G+1} C$

et on a finalement :

$$\xi = C \frac{1}{G + 1}$$

avec cette formule, on peut, connaissant la valeur de la consigne C et le gain G tracer la caractéristique théorique du régulateur P en boucle fermée.

4.3.4. Mesures.

- Caractéristique statique du régulateur P.

On doit relever la caractéristique $y = f(\xi)$. Pour cela, on doit réaliser le montage Fig. 4.3.2. où on se fixera une valeur de consigne C , et pour chaque valeur d'entrée m , on notera la valeur de sortie y correspondante et on calculera ensuite l'erreur $\xi = c - m$

On répètera l'essai pour différentes valeurs du gain G (ou bande passante) du régulateur.

- Caractéristique du régulateur P en boucle fermée.

On doit relever la caractéristique $\xi = f(G)$. Pour cela, on doit réaliser le montage Fig.4.3.3. où on se fixera une valeur de consigne C , et pour chaque valeur de sortie y correspondante et on calculera ensuite l'erreur $\xi = c - m$ (avec $m = y$)

4.4. - Résultats.

La Fig. 4.2.3. montre un exemple typique de courbe d'étalonnage d'une résistance variable

La Fig. 4.3.2. caractéristique statique du régulateur P

La Fig. 4.3.3. caractéristique du régulateur à boucle fermée.

5. T.P. II.

Etude de la réponse en fréquence d'un ensemble de trois cellules.

5.1. - But du TP.

- Utilisation du générateur de fréquence
- Etude des réponses en fréquence.

5.2. - Schéma bloc du système.

Le schéma bloc est représenté sur la Fig. 5.2. Pour une entrée sinusoïdale de la forme $i = A \sin \omega t$ les fonctions de transfert liant x , y et z respectivement à i sont :

$$\frac{x}{\theta i} = \frac{1}{1 + j\omega T_1}$$

$$\frac{y}{\theta i} = \frac{2}{(1 + j\omega T_1)(1 + j\omega T_2)}$$

$$\frac{z}{\theta i} = \frac{2}{(1 + j\omega T_1)(1 + j\omega T_2)(1 + j\omega T_3)}$$

On peut déduire les modules et phases de x , y et z respectivement à partir de θi pour différentes valeurs de .

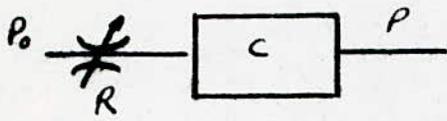
5.3. - Manipulation et mesure.

Réaliser le montage de la Fig. 5.3. et brancher un générateur T.B.F. à l'entrée du C.E.P. Régler les restrictions d'après l'étalonnage réalisé au chapitre 4.1, pour que les constantes de temps soient respectivement $1/2$, 1 et 2 s environ. Balayer la bande de fréquence s'étendant de $0,03$ Hz à la plus haute fréquence possible. Laisser le système se stabiliser avant d'enregistrer les sorties x , y et z pour chaque valeur de la fréquence.

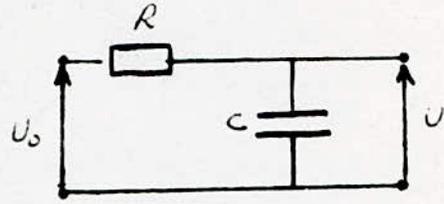
5.4. - Résultats.

On peut mesurer les gains et déphasage relatifs à x , y et z sur les enregistrements et tracer leurs fonctions.

La Fig. 5.4. présente un résultat typique.

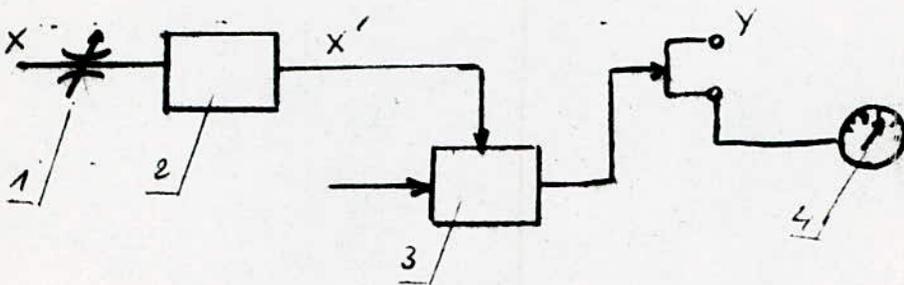


Schema d'une cellule
à retard simple



Schema analogue

Fig 34



- 1 - Robinet à pointeau
- 2 - Reservoir (capacité)
- 3 - Amplificateur de puissance
- 4 - manomètre
- X - Variable d'entrée
- X' - " " de l'ampli
- Y - Variable de sortie

Fig 36 Schema de connexion d'une cellule

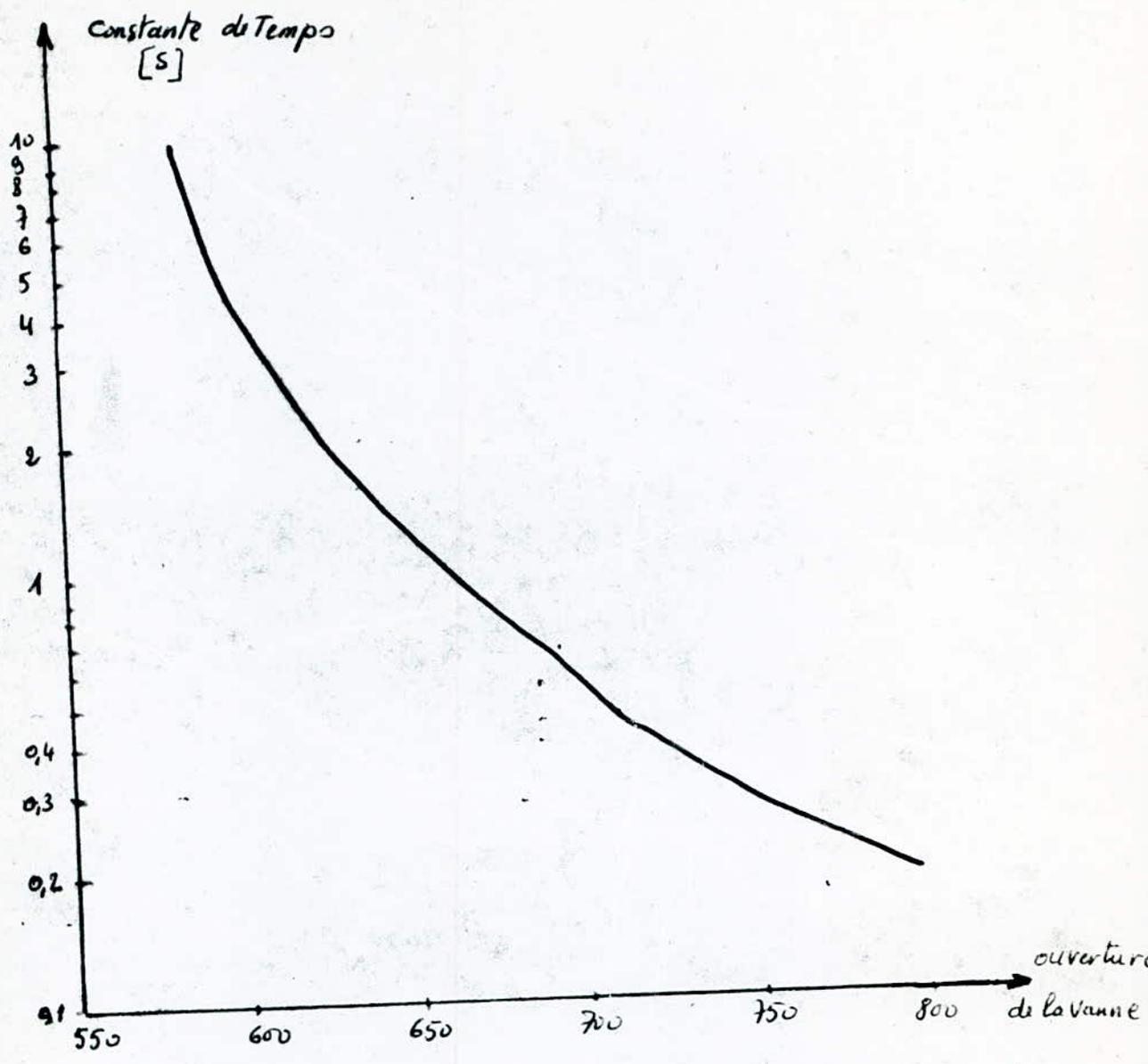
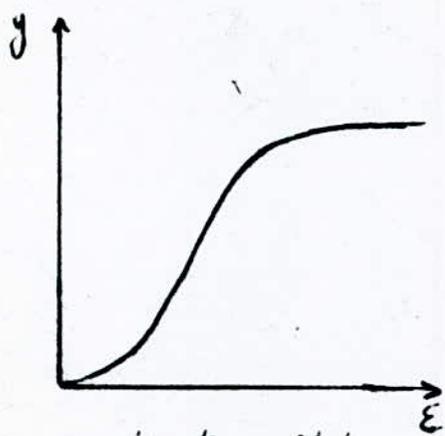
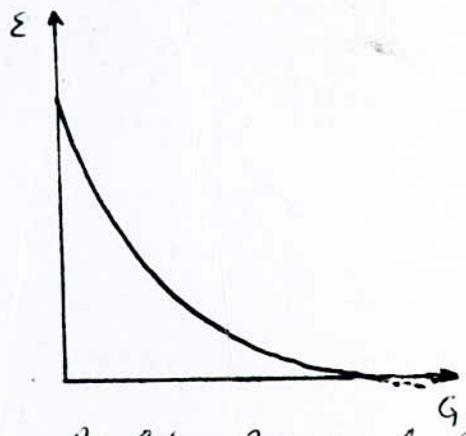


Fig 4.23 courbe d'étalonnage d'une résistance variable



caractéristique statique du régulateur P

Fig 4.32



Régulateur P en boucle fermée

Fig 4.33

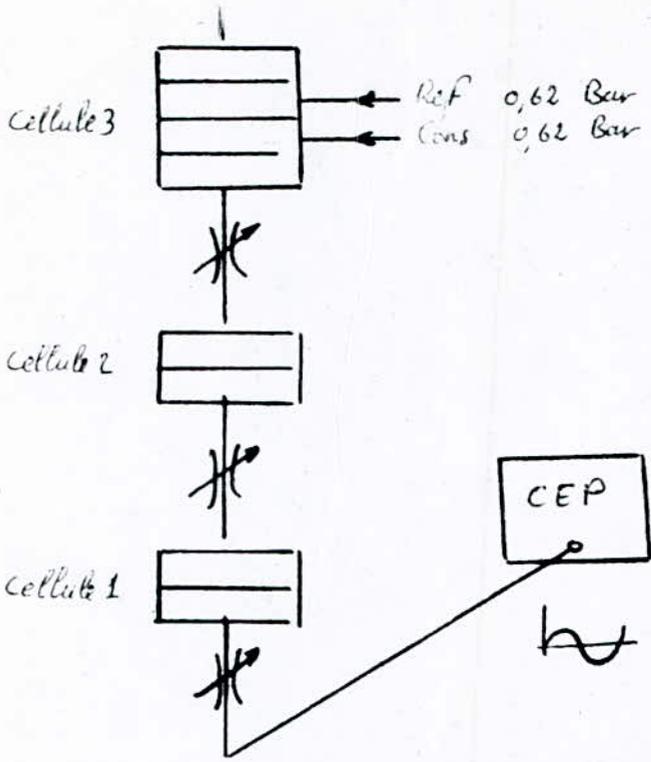


Fig 5.3 Schema du montage

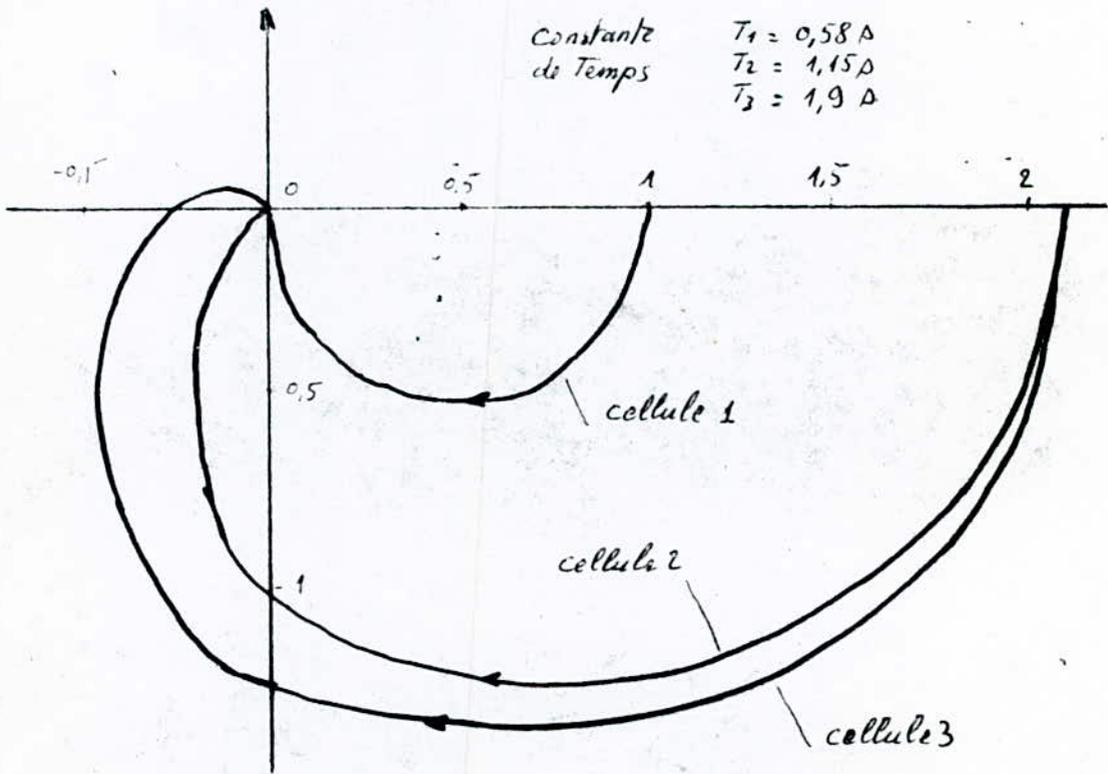


Fig 5.4

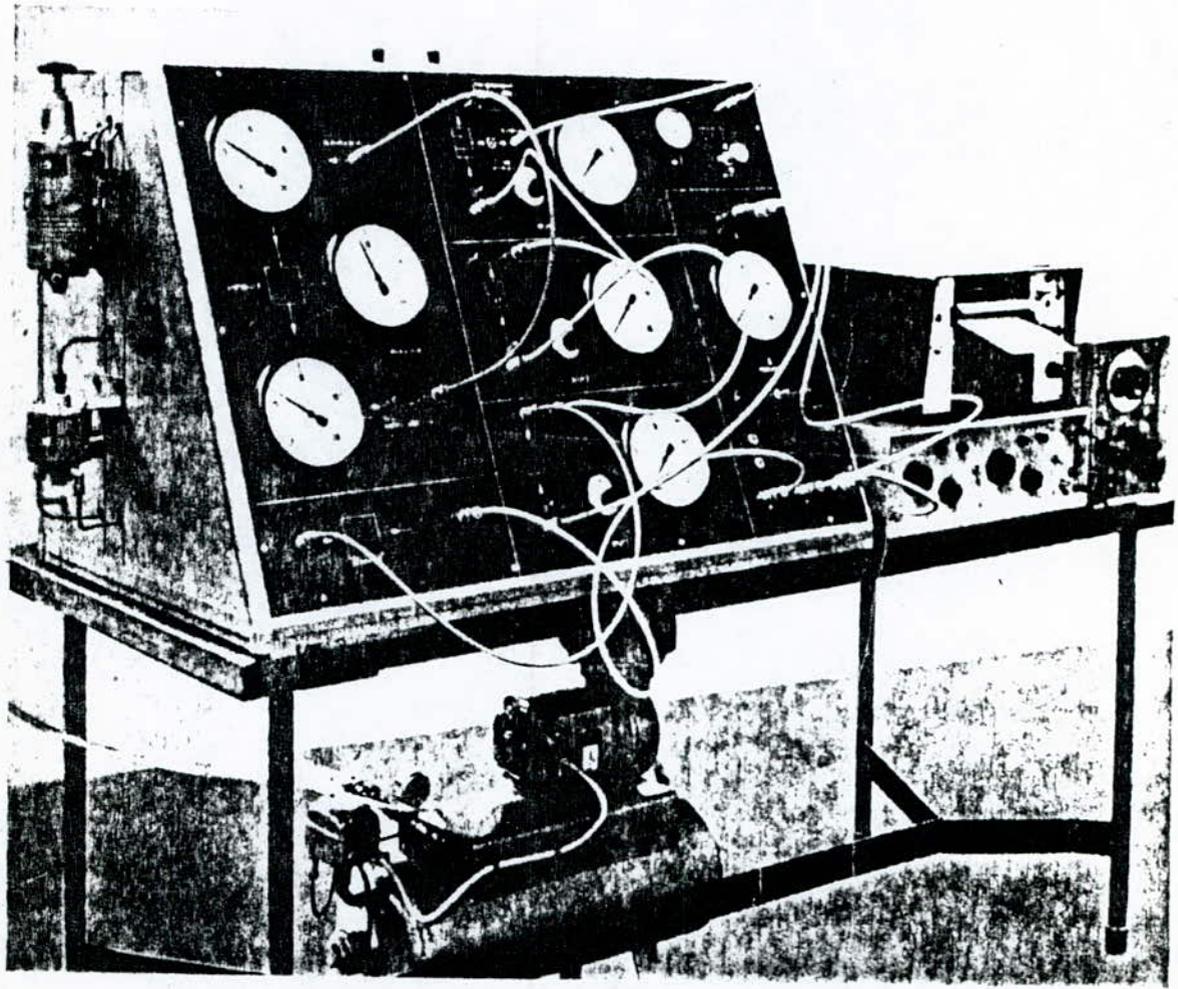


FIG. 1

CHAPITRE III.

SYSTEME DE REGULATION AUTOMATIQUE DE LA PRESSION

D'AIR DANS LA BUSE DE LAVAL

1. INTRODUCTION.

Les processus nécessitant une régulation de pression sont très courants dans la pratique industrielle.

Le principe général de cette régulation consiste à maintenir à l'intérieur d'une chambre (processus) la pression à une valeur préalablement choisie.

Dans ce cas, on a comme grandeur à régler la pression dans le processus et comme grandeur réglante le degré d'ouverture de la vanne qui commande l'admission ou l'échappement du gaz comprimé alimentant le processus.

La pression dans la chambre est transmise à un régulateur qui la compare à la valeur de consigne et agit en conséquence sur le servomoteur actionnant la vanne de contrôle produisant ainsi la soupression ou la surpression nécessaire à la stabilisation de la pression dans le processus.

Le système de régulation que nous proposons de présenter n'est pas destiné à la régulation de pression dans la buse de LAVAL en particulier, mais peut être généralisé à d'autre processus.

2. BUT DU T.P.

- Comparer les régimes de fonctionnement instable et stable du système de la commande
- Déterminer les paramètres du régulateur ainsi que les données techniques du processus pour le fonctionnement stable et instable
- Etudier l'influence des capacités (éléments inertiels) connectées en série avec le processus sur la stabilité du système.

3. DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DU SYSTEME.

Dans le schéma de connexion du système Fig. 3.1., la buse de LAVAL est alimentée à partir de la chambre d'air comprimée (8) équipée en manomètre (7). La pression dans cette chambre est transmise vers le régulateur pneumatique (1), soit directement si les vannes (14) et (13) sont dans la pression (a) ou bien par la capacité (10) avec la résistance pneumatique (9) position (b) ou bien par les deux capacités (10) et (11) avec les résistances pneumatiques 6 et 9 position (c).

Le régulateur (1) est alimenté du réseau pneumatique par un réducteur (12). Les manomètres (3) montrent le signal proportionnel à la sortie du régulateur et (4), le signal d'intégration. Le réservoir (5) avec la vanne à pointeau servent comme élément d'intégration pour fixer le temps T_i . Si la pression dans la chambre (8) est trop grande par rapport à la valeur demandée, le régulateur (1) envoie les signaux pneumatiques vers le servomoteur (2) qui commence à ouvrir la vanne (16) dans le sens de diminuer la pression dans la chambre (8), et inversement si la pression dans la chambre est trop petite, le régulateur envoie des signaux au S.M dans le sens d'augmenter la pression.

Le système est stable sans capacité supplémentaire et devient instable avec les capacités 10 et 11.

Si le système devient instable, il faut jouer sur les coefficients d'amplification du régulateur (ou sur sa B.P.) et sur les temps d'intégration T_i (augmenter T_i) pour adapter les propriétés dynamiques du régulateur aux propriétés dynamiques du processus.

Sur le schéma bloc Fig. 3.2., la pression de sortie est envoyée au régulateur, soit directement, soit par l'intermédiaire de capacités (10) et (11) déterminées par les transmittances :

$$\frac{K_1}{T_1 S + 1} \quad \text{et} \quad \frac{K_2}{T_2 S + 1}$$

4. MANIPULATIONS ET MESURES.

1) Démarrage du système :

- Ouvrir la vanne d'alimentation (17) à l'entrée d'air comprimée après la vérification que le compresseur est en marche et on a la pression d'air dans le réseau, fixer les vannes (13) et (14) dans la pression (a)
- Fixer la pression d'alimentation du régulateur à l'aide du réducteur (12) sur la valeur $1,2 \text{ KgF/cm}^2$.

2) Etude du système stable :

- Fixer la valeur demandée sur le régulateur
- Augmenter le coefficient d'amplification du régulateur jusqu'à valeur maximale
- Constater si le système est stable, dans le cas contraire, diminuer le coefficient d'amplification jusqu'au moment où le système devient stable.

3) Etude du système instable et possibilités de sa stabilisation :

- Connecter les vannes (13) et (14) selon la position (b)
- Constater si le système est stable ou instable

- Corriger le coefficient de proportionnalité ainsi que le temps d'intégration jusqu'au moment de la stabilisation
- Introduire la deuxième capacité et les vannes (13) et (14) sur la position (C) et répéter les manipulations du point précédent.

Remarque : Il faut noter pour chaque mode de fonctionnement tous les paramètres du régulateur et du processus.

5. COMPTE-RENDU DU T.P.

Etablir les tableaux avec les résultats de mesure (un modèle de tableau de mesure est donné à la fin de ce chapitre).

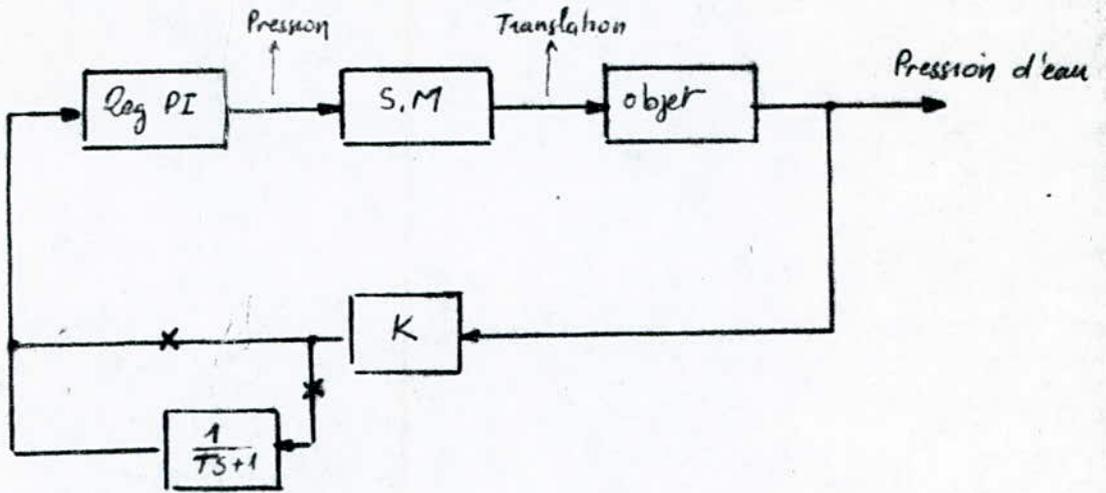


Fig. 22 Schema bloc

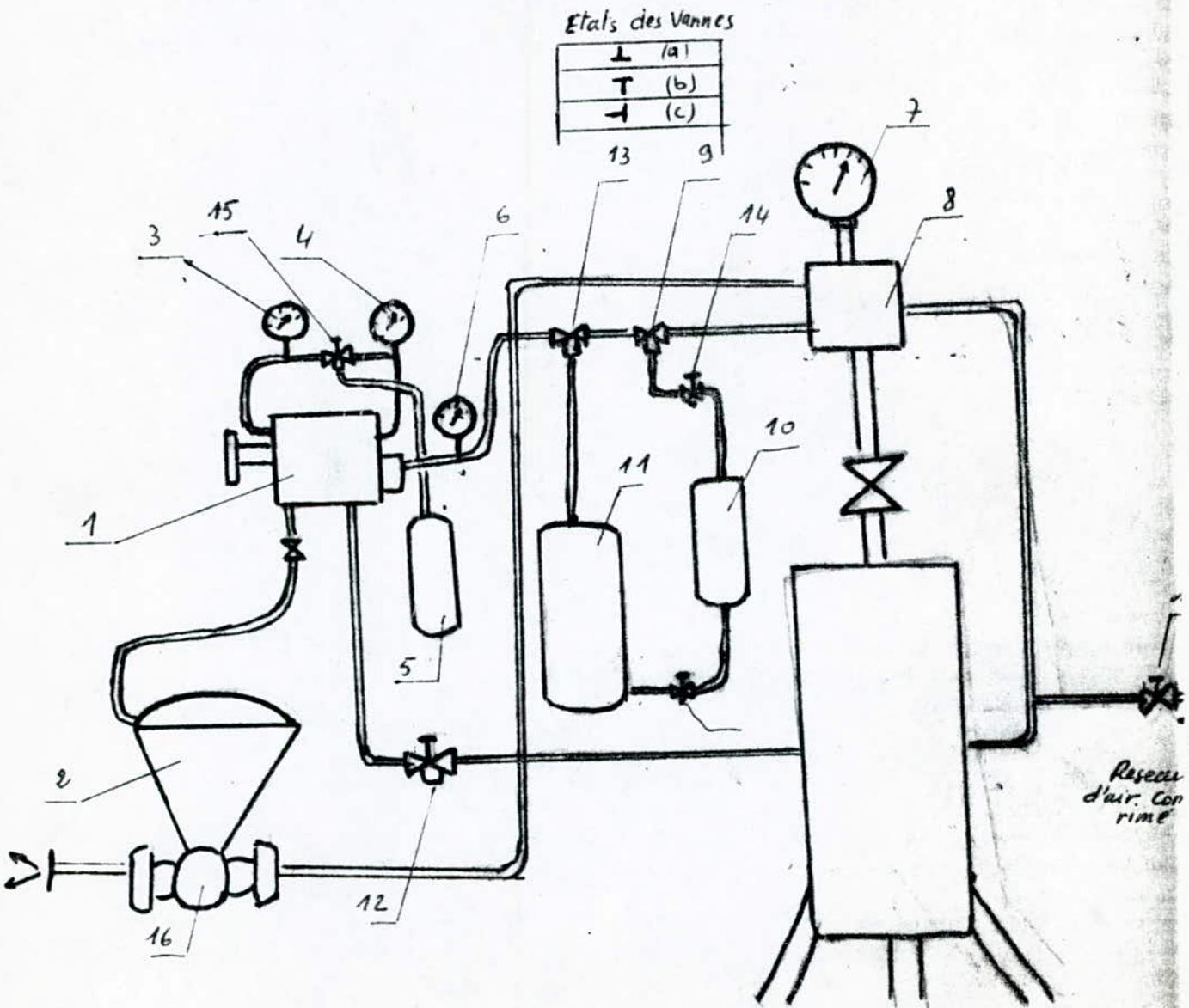


Fig 22 Schema de connexion

Fig. 3.1. - Schéma de connexion du système de régulation automatique de la pression d'air dans la buse de LAVAL.

- 1 - Régulateur pneumatique P I
- 2 - Servomoteur pneumatique
- 3 - Manomètre du régulateur P I (partie Proportionnelle)
- 4 - Manomètre du régulateur P I (partie Intégrale)
- 5 - Réservoir d'action d'intégration
- 6 - Vanne entre les réservoirs 10 et 11
- 7 - Manomètre de la buse de LAVAL
- 8 - Buse de LAVAL
- 9 - Robinet du réservoir 10
- 10 - 11 - Réservoirs (pour changer les propriétés dynamiques du processus)
- 12 - Réducteur d'air comprimé
- 13 - 14 - Vannes à trois voies
- 15 - Vanne à pointeau
- 16 - Vanne à la sortie d'air comprimé
- 17 - Vanne d'alimentation

III ROISIEME III- ARTIE

-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-

-o- PROJET DE REALISATION D'UN LABORATOIRE

A LONG TERME

-o-

-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o

1. INTRODUCTION.

Cette partie n'a pas l'ambition de donner une structure définitive au laboratoire d'automatisme, mais aura moins le mérite de poser les fondements à partir desquels des manipulations entrant dans le cadre des T.P concernant les modules : "Régulation automatique et simulation" et "systèmes asservis", pourront être lancées.

Nous présenterons la disposition générale des manipulations correspondant aux modules ci-dessus cités, et qui sont au nombre de huit (8). A cet effet, nous nous contenterons de décrire le matériel nécessaire et le déroulement cyclique des manipulations.

Les détails relatifs à chaque type de T.P seront décrits en annexe.

2. LOCAL.

2.1. - Capacité.

On estimera la capacité pédagogique que devra avoir le laboratoire à :

- 100 Etudiants au total
- 30 Etudiants par séance.

2.2. - Dimensions.

- Longueur 16 m
- Largeur 10 m
- Superficie 160 m²

2.3. - Alimentation en énergie.

- Source Alternatif, 220 V, 50 Hz
- Source d'air comprimé : Pression (6 Kg/cm²) débit (12 m³/h)
- Huile sous pression : (0 + 100 bars)
- Alimentation stabilisée en courant continu (0 + 20 V)

2.4. - Répartition des postes.

(Voir le plan ci-joint)

3. LISTE DES MANIPULATIONS.

- . TP 1 - Régulateur quasi-continu de la température
- . TP 2 - Régulateur pas à pas P I
- . TP 3 - Choix et mise au point des régulateurs PI et PID
- . TP 4 - Régulateur pneumatique P I D

- . TP 5 - Synthèse du régulateur pour l'objet de commande multidimensionnel
- . TP 6 - Commande optimale d'un processus thermique
- . TP 7 - Commande numérique directe avec un microprocesseur
- . TP 8 - Modélisation des systèmes de la commande à l'aide des calculateurs analogiques.

4. LISTE DU MATERIEL POUR CHAQUE TP.

Sujet du TP.	Quantité	Dispositifs	Données techniques principales
1	2	3	4
1	1	Four électrique	2 KW, 220 V, 50 Hz
	1	Régulateur électronique à deux positions, pour Thermocouple	0 - 200 °C
	2	Thermocouple Fe Co	Avec les fils de compensation
	1	Contre-réaction thermique	P I D
	1	Contacteur	220 V, 50 Hz, $I_n = 20A$
	1	Table traçante	X-Y, / U = 1m V-100 V
	1	Alimentation stabilisée	12 V, avec un diviseur de tension
2	1	Modèle électrique du processus	Trois constants de temps, $T_1 = T_2 = T_3 = 50 - 100 \text{ sec}$
	1	Régulateur pas à pas	P I
	2	Relais	12 V c.c., 2 paires de cont.
	1	Alimentation stabilisée	12 V
	1	Servomoteur électrique	220 V, 50 Hz, 0,2 Kgm
	2	Potentiomètres	200 Ohms, 25 W
	1	Table traçante	U = 1 mV - 100 V

1	2	3	4
3	1	Régulateur électronique	Sign. de sortie Is = 0 - 100 mA
	1	Modèle électrique du processus automatisé 1 - entrée 1 - mémoire 1 - générateur d'impulsion 1 - sortie	Modèle peut être réalisé à partir des comp. électr.
	1	Table traçante	1 mV - 100 V
	1	Alimentation stabilisée	12 V
4	1	Régulateur pneumatique	PID, P = 0,2 - 1,0 Kg/cm ²
	1	Convertisseur pneumatique	Déplacem. $\pm \frac{1}{2} \frac{0}{2}$ 0,2 - 1,0 Kg/cm ²
	1	Servomoteur pneumatique à piston	Pression 0,2-1,0kg/cm ²
	2	Potentiomètres	R1 = 1,2 K Ohm, R2 = 7,7 K Ohm
	1	Servomécanisme complet	2 Potentiomètres + amplificateur + moteur électrique
	1	Simulateur analogique du processus	3 éléments inertiels, 1. él. à retard pur
	1	Compresseur d'air avec un réservoir et un réducteur	Un = 220 V, p = 6/1 Kg/cm ²
	1	Table traçante X - Y	1 mV - 100 X
	1	Alimentation stabilisée	12 V
5	1	Simulateur analogique du processus	Calculateur analogique électronique universel
	1	Model analogique du système de la commande	
	1	Oscilloscope à mémoire	P, ex. H.P. ou Textronix
	1	Table traçante	1 mV - 100 V

1	2	3	4
6	1	Minicalculateur	P ex. H.P.
	1	Imprimante	Complet avec minical.
	1	Table traçante	1 mV - 100 V
	1	Compensateur optimal	Ev. programmé à l'aide de minicalculateur
	1	Visualisateur alfa-numérique	Complet avec minicalculateur
7	1	Minicalculateur	P. ex. H.P.
	1	Interface industriel entre calculeur et le procédé	P. ex. Intedigit
	1	Commutateur	Complet avec minicalculateur
	2	Convertisseurs A/N	Comme ci-dessus
	1	Model analogique du processus multidimensionnel	P. ex. Calculeur analogique universel
8	1	Générateur des signaux périodiques	P. ex. des signaux rectangulaires
	1	Model électrique du processus	Réalise p. ex. à l'aide des amplificateurs opérationnels
	1	Simulateur analogique du processus	Réalisé à l'aide de calculeur analogique universel
	1	Comparateur des grandeurs de sortie	
	1	Oscilloscope	P. ex. Tektronix
	1	Multimètre	A - V - 0

5. ORGANISATION DES T.P.

5.1 - Roulement pédagogique.

Il sera établi en fonction du nombre de groupe d'Etudiants et des séances de T.P.

Toutefois, nous proposons le roulement cyclique suivant :

n° de la séance du TP	1	2	3	4	5	6	7	8
1	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
2	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G1
3	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G1	G2
4	G4	G5	G6	G7	G8	G1	G2	G3
5	G5	G6	G7	G8	G1	G2	G3	G4
6	G6	G7	G8	G1	G2	G3	G4	G5
7	G7	G8	G1	G2	G3	G4	G5	G6
8	G8	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7

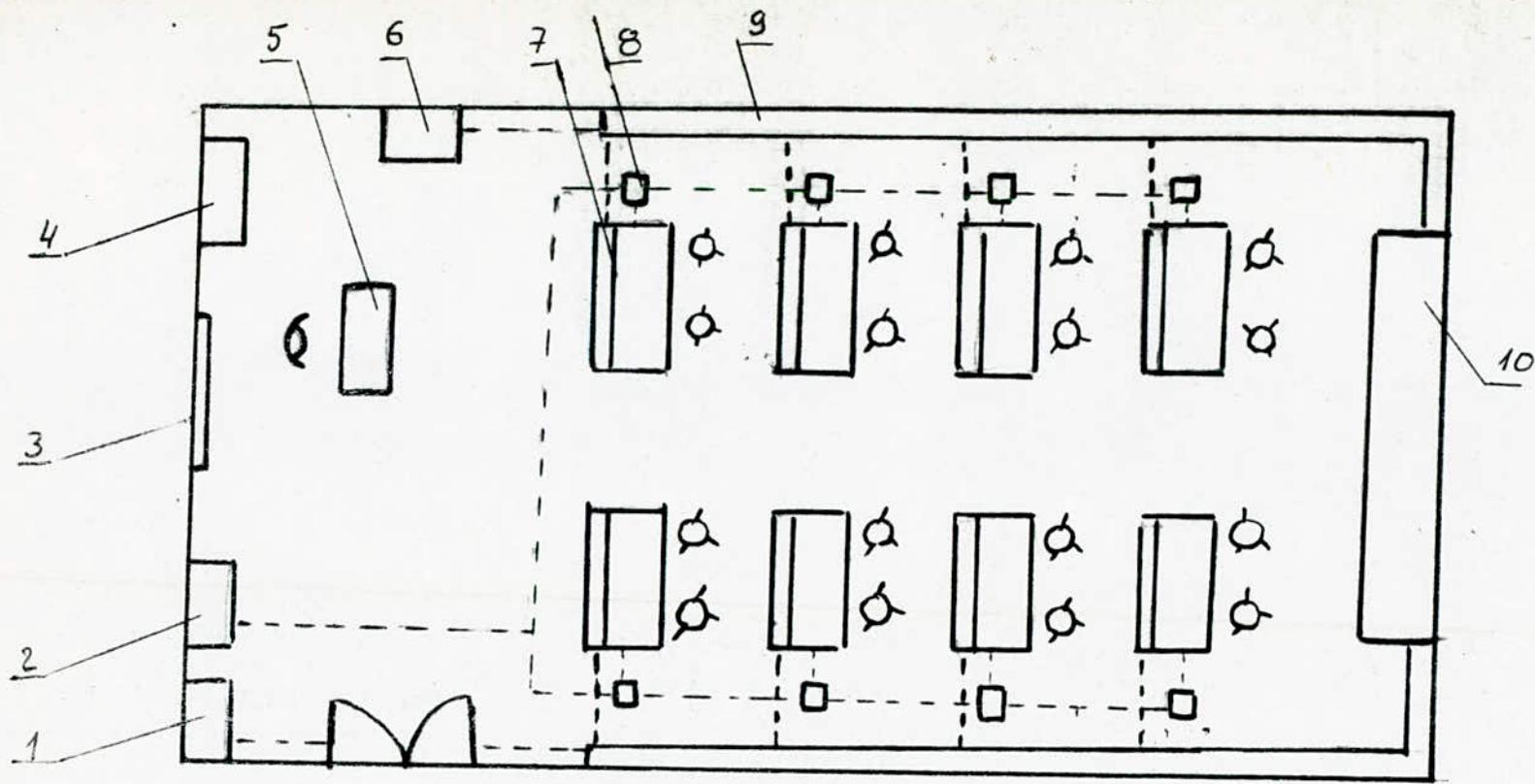
G_i : numéro du groupe.

5.2. - Durée de chaque TP.

3 Heures

5.3. - Documentation.

Chaque poste doit être muni d'une documentation technique où on décrira le poste, son fonctionnement et le contenu de la manipulation.



- 1 - Armoire de commande de l'alimentation en pression
- 2 - Armoire de distribution de l'énergie électrique
- 3 - Tableau
- 4 - Armoire de rangement du matériel pédagogique
- 5 - Bureau du professeur
- 6 - Dispositif d'alimentation en pression d'huile
- 7 - pupitre d'essai
- 8 - Bouche de raccordement électrique
- 9 - distribution de l'énergie pneumatique
- 10 - Etagère pour le rangement du matériel

Plan d'implantation

/// O N C L U S I O N .

Il va sans dire que le rôle des travaux pratiques en automatique est primordial dans la mesure d'une part où il met en évidence la théorie, et d'autre part, complète de manière non négligeable les connaissances acquises en cours.

C'est dans ce contexte qu'a été développé ce travail qui pourra servir de base de travail pour la réalisation d'un laboratoire (pour une éventuelle filière d'automatique). Ce projet demandera, cela va de soi, une collaboration étroite entre les différents départements et équipes de recherche de l'E.N.P.

Enfin, en conclusion, nous pouvons affirmer que la réalisation de travaux pratiques, relatifs à l'automatique, peut être faite dans le cadre des projets de fin d'études ; toutefois, cela sera subordonné à un achat du matériel adéquat, nécessaire à la perfection d'un laboratoire.

///--L N N E X E S.

- TP.1 - REGULATION CASICONTINUE DE LA TEMPERATURE.
- TP.2 - REGULATEUR PAS A PAS PI.
- TP.3 - CHOIX DES MISES AU POINT DU REGULATEUR PI ET PID.
- TP.6 - COMMANDE OPTIMALE D'UN PROCESSUS THERMIQUE.

TP.1

REGULATION CASICONTINUE DE LA TEMPERATURE

1. BUT DU TP.

- Analyse des propriétés de la régulation à deux positions.
- Choix des paramètres de la contre-réaction pour la régulation à deux positions avec la correction.
- Analyse du fonctionnement du système avec les régulateurs pas à pas et choix de la mise au point du régulateur.

2. DESCRIPTION DU SYSTEME.

2.1. - Régulation à deux positions.

L'objet de commande est le four électrique laboratoire dans lequel, la température est stabilisée par le régulateur MTe - Fig. 2.1.

Comme l'élément de correction, on a appliqué l'élément de contre-réaction Ps. L'élément de base de cette contre-réaction est le petit thermocouple qui est réchauffé par un réchauffeur miniature alimenté dans les périodes d'enclenchement de la puissance électrique d'objet à partir d'un transformateur équipé de quelques bornes. Le thermocouple de cette contre-réaction est connecté en parallèle avec le thermocouple de mesure.

2.2. - Régulation pas à pas.

Le schéma bloc du système est représenté sur la Fig. 2.2. Le régulateur ARK commande par le commutateur ST et le servomoteur SM. Avec la sortie du moteur est couplé un déphaseur PF qui peut créer les signaux d'allumage pour les amplificateurs à thyristor TWM triphasés. La température mesurée à l'aide d'un thermomètre TE, à la sortie duquel le signal de la tension du convertisseur APU change en signal de commande standard (signal sous forme de courant).

3. MANIPULATIONS ET MESURES.

3.1. - Recherche du système de la commande à deux positions. *pas à pas*

- 3.1.1. Déterminer les coefficients d'amplification résultants des éléments PF et TWM.
- 3.2.2. Déterminer les transmittances du processus avec PF et TWM en plus en supposant que $T = (T^+ + T^-)/2$
- 3.2.3. Vérifier le choix du temps d'intégration du servomoteur dans le système.

- 3.2.4. Choisir la mise au point du régulateur PID selon le critère de 20% de dépassement et observer le parcours de la commande.
Déterminer N en supposant Y_{max} , et de la manière expérimentale choisir H.

4. COMPTE-RENDU DU TP.

Dans le compte-rendu du TP, il faut présenter :

- 1°/ Le schéma du système et parcours des paramètres et des valeurs de la commande en fonction du temps.
- 2°/ Les courbes et les calculs effectués selon le programme de recherche.
- 3°/ Les conclusions et remarques.

TP.2

REGULATEUR PAS A PAS PI

1. BUT DU TP.

- Etude des propriétés dynamiques du régulateur PAS à PAS.
- Détermination de la mise au point optimale de ce régulateur.

2. DESCRIPTION DU POSTE.

Le schéma du régulateur pas à pas examiné sur le poste de recherche est présenté sur la Fig. 4.13.

Le signal de l'écart est sous forme de la tension alternative de l'ordre de quinzaine de mV.

La fréquence 50 Hz est amplifiée par l'amplificateur électronique. Il faut adapter le principe du régulateur pour les éléments électroniques accessibles sur place, c'est-à-dire pour les circuits intégrés ou amplificateurs analogiques, amplificateurs opérationnels, ou bien on peut utiliser aussi n'importe quel transistor applicable dans le système d'amplification électronique.

Le schéma du régulateur connecté avec le modèle du processus est présenté sur la Fig. 4.14.

Le modèle du processus se compose de 3 éléments inertiels RC, l'objet est commandé par la tension continue variable à cause du changement de la position du servomoteur S_m commandé par les commutateurs St_1 et St_2 .

Les derniers éléments d'objet c'est un *modulaire* alimenté par le système de mesure du régulateur et fournissant la tension variable qui représente l'écart de régulation. La valeur demandée de la valeur réglée peut être fixée à l'aide du poten-

tiomètre Pz.

L'excitation indicielle influant à l'entrée du processus peut être introduite à l'aide du commutateur W2 et potentiomètre Az.

Les constantes de temps possible à obtenir sont égales à :

$$T_1 = (47 + 91) \text{ secondes}$$

$$T_2 = (52 + 98) \quad "$$

$$T_3 = (44 + 84) \quad "$$

TP.3

CHOIX DES MISES AU POINT DU REGULATEUR PI ET PID

1. BUT DU TP.

- Détermination des paramètres d'un processus.
- Détermination des mises au point du régulateur PI et PID.
- Détermination de la caractéristique du régulateur.

2. DESCRIPTION DU POSTE.

Le schéma du modèle du processus est montré sur la Fig. (6.8). Le modèle se compose de quatre parties :

- L'élément d'entrée
- La mémoire
- Le générateur
- L'élément de sortie

Le courant à la sortie du régulateur commande les thyristors. Le système monté ici permet d'obtenir la proportionnalité exacte entre les courants à la sortie du régulateur et la tension U_1 alimentant le bloc de la mémoire.

Le courant à la sortie du modèle du processus peut être égal à $0 + 5 \text{ mA}$ ou $0 + 15 \text{ mA}$ en fonction de la position d'interrupteur PL_1 .

Dans l'élément de l'entrée, on a prévu la possibilité d'introduire des signaux de perturbation ou U_{z1} . La résistance d'entrée de cet élément est non linéaire.

Le retard est réalisé à l'aide d'un commutateur à 25 positions fonctionnant avec un simple système de la mémoire à condensateur.

A chaque contact d'un commutateur, on a 25 condensateurs à capacité $0,25 \text{ F}$. Grâce à la connexion de cet commutateur selon la figure, le contact mobile déterminant les retards

se trouve à 24 pas arrière des contacts d'enregistrement. La vitesse du déplacement du commutateur peut être réglée dans de grandes limites à l'aide du générateur d'impulsions.

Le fonctionnement du générateur est le suivant :

Après desexcitation du relais P, les condensateurs C_0 qui étaient chargés avant jusqu'à la tension E_1 se déchargent dans le circuit E_1 , R_0 , C_0 avec la constante de temps $R_0 C_0$, pendant cette décharge du condensateur, le transistor est fermé et commence à conduire à partir du moment où la tension du condensateur C_0 est inférieure à la tension de blocage.

Quand le relais F est excité, le condensateur C_0 est connecté par les résistances R_3 à la source E_1 et ensuite ferme le circuit de l'électroaimant E du commutateur de la mémoire. Cet électroaimant ouvre le circuit du relais P, le relais desexcité, le commutateur effectue un pas et le cycle commence de nouveau.

On peut obtenir la valeur du retard T_0 entre 0 + 110 s, la valeur T_0 peut être changée de la manière continue.

Transistor de la sortie fonctionne avec la contre-réaction négative forte, grâce à la linéarité de sa caractéristique assez grande.

Le système $R_{10} C_3$ est l'élément dynamique qui introduit la constante du temps $T_1 =$

$$T_1 = R_{10} \cdot C_3.$$

La deuxième constante du temps du modèle du processus est connectée avec l'équilibrage du potentiel entre les condensateurs de la mémoire et les condensateurs C_3 .

3. MANIPULATIONS ET MESURES.

- 1 - On doit déterminer (à l'aide du régulateur), les propriétés dynamiques du processus
 - a) par la méthode d'excitation du processus
 - b) par la méthode de réponse à l'excitation indicielle
 - c) par la méthode de réponse à l'excitation rectangulaire.
- 2 - A partir des résultats obtenus, déterminer les paramètres du processus T_0 , T et K_{Ob} .
- 3 - Déterminer les mises au point du régulateur PI proposé par ZIEGLER et NICHOLS et ~~é~~connecter le système du fonctionnement manuel au fonctionnement automatique.
- 4 - Dans le régulateur, il faut changer de manière indicielle la valeur demandée x_0 et déterminer le parcours en fonction du temps des valeurs réglées x .
- 5 - Dans le régulateur PI, il faut choisir les mises au point examiner le parcours transitoire pour le processus périodique et avec les oscillations de 20%.
- 6 - A partir des résultats des points 1 et 2, tracer les caractéristiques fréquentielles du processus du régulateur PI et pour le circuit de commande PI.

- 7 - Pour les mises au point choisies dans le point 5, déterminer de la manière expérimentale la zone de fréquence du système de perturbation qui sont plus amplifiés par le système avec la commande que sans la commande.

Dans le compte-rendu du TP., on doit présenter les remarques et discussions.

TP.6

COMMANDE OPTIMALE D'UN PROCESSUS THERMIQUE.

On effectue ce TP. à l'aide d'un ordinateur. Pour la synthèse du système de commande optimale et vecteur $C(t)$ du compensateur, on peut appliquer le programme numérique en langage ALGOL ou FORTRAN.

1. BUT DU TP.

- Synthèse de la commande optimale d'un processus thermique non linéaire.
- Synthèse d'un compensateur de la stabilisation du processus selon la trajectoire optimale.

2. DESCRIPTION DU POSTE.

La conception de la commande par ordinateur d'un four est représenté sur la Fig. 6.1.

L'état du processus est représenté par le vecteur x déterminé par la température de fumée θ et température des éléments dans le four Y .

L'objet est commandé par le changement du débit de gaz. Le ordinateur qui fonctionne dans le temps réel réalise deux fonctions de base.

1°/ Il fournit de la mémoire les valeurs optimales q et vecteur d'état X . Le parcours q et X sont les solutions du problème de la commande optimale à partir de son modèle mathématique.

2°/ Joue le rôle d'un compensateur dans le cas où, à cause des perturbations, on obtient l'écart S_x d'état observé x par rapport à l'état optimal \hat{x} .

La tâche du ordinateur c'est de déterminer la correction de commande $S_q(\theta)$.

Cette correction doit permettre la compensation de l'écart et obtenir le processus selon la trajectoire optimale.

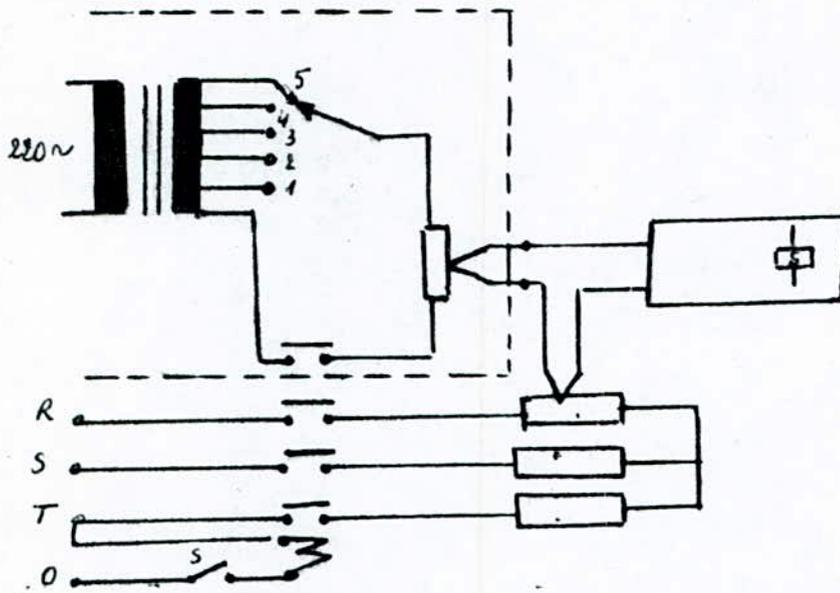


Fig 2.1 Regulation continue de la température

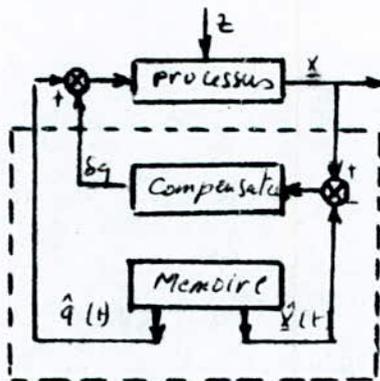
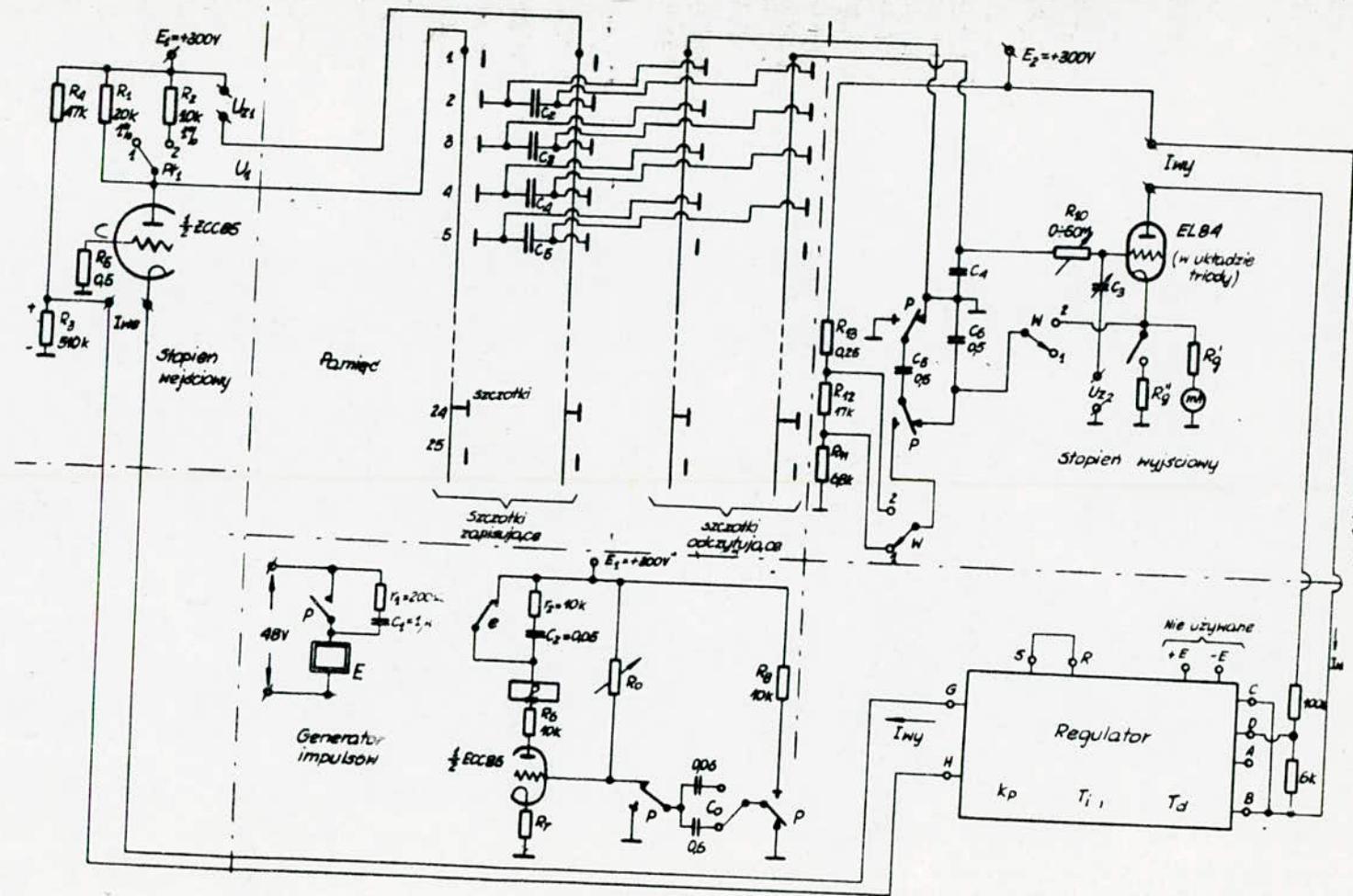


Fig 6.1 commande par ordinateur



Rys. 6.8

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

- 1/ - LITVYBUS du Laboratoire d'Automatique d'Electronique
"THEORIE DE LA COMMANDE ET THEORIE DES SYSTEMES" Travaux Pratiques
Edition : Ecole Polytechnique de RZESZOW (1978)

- 2/ - W. FARDL
J. PULCZEWSKI
A. WERSBICKI
Laboratoire d'Automatique Partie III
"REGULATEUR ET SYSTEMES ASSERVIS"

Ecole Polytechnique de VARSOVIE

- 3/ - DP. ECKMAN
"REGULATION AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE"
DUNOD (1963)

- 4/ - Projets de Fin d'Etudes
"SYSTEME D'ORIENTATION AUTOMATIQUE DES CONCENTRATEURS DU RAYONNEMENT SOLAIRE"
Etudié par O. BELABED et S. KHERAT (Janvier 1984)

"ANALYSE EXPERIMENTALE DES PROPRIETES DYNAMIQUES D'UN PROCESSUS THERMIQUE"
Etudié par B. DERRAS et A. CHELLALI (Juin 1982)

- 5/ - Revues et Catalogues
"LABORATOIRE ET ATELIER D'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE" G.T.E. - EDUTEC

"Simulateur Pneumatique d'ASSERVISSEMENT"