

50 376  
1968  
49

50.376  
1968  
49

N° d'ordre 116

Thèse  
présentée  
à la Faculté des Sciences de l'Université de Lille  
Pour obtenir  
le titre de Docteur de 3ème Cycle en Automatique  
par  
Monsieur Jean-Claude SACRE  
Licencié ès-Sciences Appliquées



Titre de la thèse :

" Etude et réalisation d'un calculateur hybride destiné au dépouillement de mesures sur des matières textiles ".

Soutenue le 19 Octobre 1968 devant la Commission d'examen :

Messieurs :	R. DEHORS	Président
	P. VIDAL	Rapporteur
	E. CONSTANT	Examineurs
	F. LAURENT	

LISTE DES PROFESSEURSDOYENS HONORAIRES

Monsieur PRUVOST P.  
 Monsieur LEFEBVRE H.  
 Monsieur PARREAU M.  
 Monsieur TILLIEU J.

PROFESSEURS HONORAIRES

MM. ARNOULT, BEGHIN, BROCHARD, CAU, CHAPELION, CHAUDRON,  
 CORDONNIER, DEHEUVELS, DEHORNE, DOLLE, FLEURY, P. GERMAIN,  
 LAMOTTE, LELONG, KOURGANOFF, Mme LELONG, MM. MAZET, A. MICHEL,  
 NORMANT, PARISELLE, PASCAL, PAUTHENIER, ROIG, ROSEAU,  
 ROUBINE, WIEMANN, ZAMANSKY, KAMPE DE FERIET.

DOYEN

Monsieur DEFRETIN R.

PROFESSEURS

MM. DURCHON M.	Zoologie (ASSESEUR)
HEUBEL M.	Chimie Minérale (ASSESEUR)
BACCHUS P.	Astronomie et calcul numérique
BECART M.	Physique
BERKER R.	Mécanique des Fluides
BLOCH V.	Psychophysiologie
BONNEMAN-BEMIA P.	Chimie et Physico-chimie industrielles
BONTE A.	Géologie appliquée
BOUISSET S.	Physiologie animale
BOURIQUET R.	Botanique
CELET P.	Géologie
CORSIN P.	Paléobotanique
DECUYPER M.	Mathématique
DEDECKER P.	Mathématique
DEHORS R.	Physique industrielle
DELATTRE Ch.	Géologie

MM. DELEAU P.	Géologie
DELHAYE M.	Chimie Minérale
DESCOMBES R.	Calcul différentiel et intégral
GABILLARD R.	Radioélectricité et Electronique
GERMAIN J.	Chimie général et Chimie organique
GLACET Z.	Chimie
GONTIER G.	Mécanique des fluides
HEIM de BALZAC H.	Zoologie
HOCQUETTE M.	Botanique générale et appliquée
LEBEGUE A.	Botanique, Collège Scientifique Universitaire
Mme LEBEGUE G.	Physique
M. LEBRUN A.	Radioélectricité et Electronique
Mle LENOBLE J.	Physique
MM. LIEBAERT R.	Radioélectricité
LINDER R.	Botanique
LUCQUIN	Chimie
MARION E.	Chimie
Mle MARQUET S.	Mathématique
MM. MARTINOT-LAGARDE A.	Mécanique des fluides
MAUREL R.	Chimie
MENNESSIER G.	Géologie
MONTREUIL J.	Chimie Biologie
PEREZ J.P.	Physique
PHAM MAU QUAN	Mécanique générale
POITOU G.	Algèbre supérieure
POUZET P.	Mathématiques
PROUVOST J.	Géologie, Résidence Académique
ROUELLE E.	Physique et électricité industrielles
SAVARD J.	Chimie générale
SCHALLER F.	Zoologie
SCHILTZ R.	Physique
Mme SCHWARTZ M.H.	Mathématiques
MM. TRIDOT G.	Chimie minérale appliquée
VIVIER G.	Zoologie
WARTERLOT G.	Géologie et minéralogie

MM. WERTHEIMER R. Physique  
METTETAL M. Zoologie

MAITRE DE CONFERENCE

MM. ANDRE J. Zoologie  
BEAUFILS J.P. Chimie Générale  
BLANCHARD J.M. Chimie appliquée  
BOILLET P. Physique  
BUI TRONG LIEU Mathématiques  
CHASTRETTE Chimie générale  
COMBET. E. Mathématiques  
CONSTANT E. Physique  
DANZE J. Géologie  
DERCOURT Géologie et Minéralogie  
DEVRAINNE Chimie Minérale  
Mme DRAN Chimie appliquée  
MM. FOATA D. Mathématiques  
FOURET R. Physique  
GAVORET J. Physique théorique  
HERZ J. Calcul numérique  
HUARD DE LA MARRE Calcul numérique  
LACOMBE D. Mathématiques  
MAES S. Physique  
MONTARIOL F. Chimie minérale et métallurgie  
MORIAMEZ M. Physique  
MOUVIER G. Chimie  
NGUYEN PHONG CHAU Physique Industrielle  
PANET Electrotechnique  
RAUZY G. Mathématiques  
SAADA Physique  
SEGARD Chimie Biologique  
TUDO Chimie minérale appliquée  
VAILLANT Mathématiques  
VAZART B. Botanique  
VIDAL Physique industrielle

MAITRES-ASSISTANTS

Mr. ABBAR M.	Physique
AMIET J.L.	Zoologie
M <sup>le</sup> AYATS M.C.	Mathématiques
MM. BELLET J.	Physique
BOSMORIN J.	Mathématiques
M <sup>me</sup> BOURDELET F.	Physique
MM. BRIDOUX M.	Chimie Minérale
CALAIS J.P.	Mathématiques
CARLIER J.	Physique
M <sup>le</sup> CHARRET R.	Zoologie
M <sup>mes</sup> CRUNELLE M.	Chimie minérale
DANZE	Paléobotanique
M. DEBOUDT M.	Physique
M <sup>mes</sup> DEFFRETIN S.	Géologie
DELHAYE M.B.	Chimie minérale
M. DEPREZ G.	Physique
M <sup>me</sup> DIXMIER S.	Mathématiques
MM. DOUKHAN J.C.	Physique
DUHAMEL A.	Chimie appliquée
DYMENT A.	Mécanique des fluides
FONTAINE J.	Radioélectricité
GROLIER J.	Géologie et minéralogie
HENRY A.	Botanique
M <sup>me</sup> HOCQUETTE H.	Botanique
MM. JOURNAL G.	Physique générale
JOLY R.	Zoologie
M <sup>me</sup> LECONTE M.J.	Mathématiques
M <sup>le</sup> LEGRAND D.	Mathématiques
M. LEROY Y.	Radioélectricité
M <sup>le</sup> LUSSIAA-BERDOU J.	Mathématiques
MM. MAIZIERES	Electromécanique
MESSELYN J.	Physique
MIGEON M.	Chimie minérale
MONTUELLE B.	Botanique
PERTUZON E.	Physiologie animale

MM. PILLONS A.	Mathématiques
POIROT A.P.	Mathématiques
PONCHEL B.	Physique
PONSOLLE L.	Chimie générale
RACZY L.	Radioélectricité
RISBOURG A.	Radioélectricité
ROUSSEAU J.	Physique
VAN HEEMS J.	Physique
WATERLOT M.	Géologie

CHEFS DE TRAVAUX

Mme BOUVIER F.	Chimie appliquée
MM. GOBERT J.	Physique
PARSY F.	Mathématiques
TISON P.	Mathématiques

SECRETAIRE GENERAL, ATTACHE PRINCIPAL

Monsieur LEGROS

ATTACHES D'ADMINISTRATION

Messieurs COLLIGNON  
FACON  
JANS  
LEROY



A mes parents, A ma fiancée

### Avant propos

Le travail que nous présentons a été effectué au Laboratoire d'Automatique Appliquée de la Faculté des Sciences de Lille, dirigé par Monsieur le Professeur DEHORS auquel nous exprimons toute notre gratitude pour l'accueil qu'il nous a réservé, pour les moyens matériels mis à notre disposition et pour le précieux enseignement qu'il a su nous dispenser.

Monsieur le Professeur DEHORS nous a grandement honoré en voulant bien accepter la présidence de notre Jury et nous espérons qu'il trouvera ici l'expression de notre respectueux attachement.

Monsieur le Professeur VIDAL nous a suivi et guidé par ses conseils judicieux qu'il a prodigué durant toute cette étude. Nous sommes heureux de le remercier sincèrement et de lui exprimer notre amicale gratitude.

Nous sommes reconnaissant à Monsieur le Professeur CONSTANT d'avoir considéré avec bienveillance nos travaux et de nous faire l'honneur d'être membre de notre jury.

Que Monsieur LAURENT, Chargé de recherches au centre national de la Recherche Scientifique, qui a su nous faire profiter largement de son enseignement et de ses travaux, trouve ici l'expression de notre amicale gratitude.

Nous remercions aussi Monsieur LIENART, Chef du service Contrôle Qualité de "La Lainière" qui a été à l'origine de ces travaux.

Que Monsieur PRONIER directeur de la société "Léonard" et Monsieur DAULMERIE, Ingénieur trouve ici notre reconnaissance pour les fluctueux échanges qui nous ont permis de préciser certains aspects des phénomènes étudiés.

Nous tenons à rendre hommage à Monsieur FLIPO et à Monsieur PETTE ainsi qu'à toute l'équipe de chercheurs pour leur esprit d'équipe et pour leur aide amicale.

Enfin nous tenons à remercier le personnel et l'équipe technique qui a participé d'une façon très active à l'élaboration de ce mémoire.

Nous ne saurions terminer sans témoigner notre reconnaissance à la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique qui, par son aide matérielle, nous a permis de nous pencher sur des problèmes concrets supports de recherches très prometteuses.



1ère PARTIE

INTRODUCTION

Le problème qui a fait l'objet de nos recherches consiste à vérifier et à contrôler des échantillons de matière textile ; les mesures prélevées conditionnant la mise en marche et la continuité de la production d'un atelier.

En effet dans l'industrie lainière, les ateliers de préparation des filatures demandent une tolérance sur la régularité des rubans de laine peignée.

Jusqu'à présent la section d'un échantillon est en général enregistrée sur une bande de papier par l'intermédiaire d'un capteur mécanique. Cet enregistrement est dépouillé par une personne qui calcule manuellement la valeur moyenne et l'écart type avec un nombre très restreint (environ 20) de prélèvements.

La connaissance des caractéristiques du produit textile permet d'utiliser au mieux le fil en cours de fabrication et, en particulier de déterminer son aptitude au tissage.

L'importance sur le plan industriel des mesures de section moyenne et d'écart type est telle que les services de contrôle et de qualité souhaitent simplifier et augmenter la précision de ces mesures dans le but d'améliorer les conditions d'exploitation.

Le service Contrôle Qualité de "La Lainière" possède deux calculateurs numériques, de faible et de forte puissance dont l'utilisation peut être envisagée en considérant toutefois les problèmes de coût et d'interférence avec les autres travaux occupant les calculateurs.

Dans cette première partie nous étudierons plus particulièrement l'ensemble des possibilités qui sont offertes à l'automaticien tant au point de vue du capteur qu'au point de vue de la chaîne de calcul et des organes intermédiaires. Nous serons amenés à choisir entre les diverses solutions possibles en fonction des critères qui nous sont imposés (rapidité, coût du traitement...) et de ceux qui nous semblent indispensables (fiabilité, précision...)

## CHAPITRE I

### ENONCE DU PROBLEME

#### 1.1. GENERALITES ET DONNEES DU PROBLEME

Dans une dizaine d'ateliers de préparation de filature un appareil mesure mécaniquement la section ou la masse linéique d'un ruban de laine peignée. Cet instrument enregistre les écarts par rapport à une section voisine de la section moyenne sur une bande de papier. L'enregistrement d'une largeur de 7 centimètres et d'une longueur d'environ 1 mètre représente l'évolution de la section d'un échantillon d'une dizaine de mètres. La durée d'un cycle de mesure dure environ 7 minutes.

A partir du dispositif de mesure ou d'enregistrement nous nous proposons, par un procédé économique, de fournir des renseignements précis sur le lot dans lequel l'échantillon a été prélevé. D'autre part l'étude afin d'augmenter en particulier le rendement demande à être orientée vers une transmission rapide des résultats statistiques à l'atelier intéressé.

#### 1.2. PRESENTATION DES DIFFERENTS CAPTEURS UTILISES EN REGULARIMETRE DANS LES INDUSTRIES TEXTILES.

Il existe plusieurs dizaines de régularimètres pour fils, mèches et rubans. Toutefois la plupart de ces appareils n'ont pas dépassé le stade du laboratoire et n'ont donné lieu à aucune construction industrielle. [ 1 ]

Chaque type d'appareil fournit des mesures différentes même pour des échantillons apparemment semblables, car une mesure sur une matière naturelle est chose extrêmement délicate et sujette à caution. En effet tout palpeur quel qu'il soit entraîne une déformation de l'échantillon et ne peut ainsi assurer la répétabilité de la mesure ; aussi les problèmes de capteurs sont encore actuellement du domaine de la recherche. Pour chacun des détecteurs actuellement disponibles sur le marché, il est possible de mettre en défaut le principe même de la mesure, car

bien souvent on ne peut déterminer exactement ce que l'on mesure.

Nous allons essayer de passer en revue les capteurs susceptibles d'être employés pour la mesure qui nous intéresse.

Les classifications des régularimètres sont multiples et la plus rationnelle se base sur la variable physique mesurée. On peut ainsi répartir les régularimètres suivant les catégories suivantes :

- Variation de la masse linéique

- par pesées d'éléments de même longueur
- par l'utilisation de vibration
- par variation de capacitance.

- Variation de l'épaisseur mesurée sous pression

- Saco Lowell (appareil décrit paragraphe 1,3)
- micromètre de Huberty (calcul de l'écart type sur des éléments de longueur identique)
- Le Kusebauch
- Le Gleifometer (du coefficient de variation en fonction de la longueur de l'échantillon)

- Variation en volume de longueurs égales

- appareil de Viviani

- Variation de diamètre

- par mesure photo électrique
- par mesure thermo électrique
- par mesure pneumatique.

D'autres types d'appareils mesurent les variations de la charge de rupture, les variations de torsion ou encore les variations du nombre de fibres en section droite.

Dans l'étude présente nous ne nous intéresserons qu'au capteur en fonctionnement à "La Lainière" et nous montrerons les difficultés d'une mesure sur ce régularimètre.

### 1.3. DESCRIPTION DU CAPTEUR UTILISE [ 2 ]

Le capteur actuel est constitué essentiellement par un cylindre et une poulie à gorge qui comprime et entraîne l'échantillon à mesurer, la position relative de ces éléments représentant l'épaisseur de laine. L'axe du cylindre est solidaire d'un bras de levier dont les extrémités portent respectivement une fixation sur le bâtit de la machine et une plume positionné devant une bande papier ; celle-ci défile à une vitesse proportionnelle à celle de la poulie. (figure 1,1).

### 1.4. REPONSE DU CAPTEUR A DIVERS SIGNAUX D'ENTREE

Pour caractériser les non-linéarités du capteur nous tracerons les réponses à divers signaux dans le cadre de certaines hypothèses simplificatrices, et nous regarderons ensuite l'effet introduit par ces simplifications.

#### 1.4.1. Hypothèses

Supposons, que le cylindre et la poulie ont un rayon identique ( $R = R'$ ), et que la longueur du bras de levier est infinie. Compte tenu de ces hypothèses, le cylindre ne peut se déplacer que verticalement, ainsi la variable de sortie est constituée par la différence de position relatives des axes au repos et en mouvement.

Les entrées appliquées au système sont constituées par des lames de section rectangulaire ou seule l'épaisseur de la barre est variable. Ces lames sont en outre supposées indéformables ; et la vitesse avec laquelle la laine avance est suffisamment lente pour que les phénomènes d'inertie relatifs à la masse du cylindre n'interviennent pas.

Nous pouvons dès lors compte tenu de ces hypothèses considérer le système comme étant celui décrit par la figure 1,2 ou  $E(L)$  est la grandeur d'entrée et  $H(L)$  la grandeur de sortie.

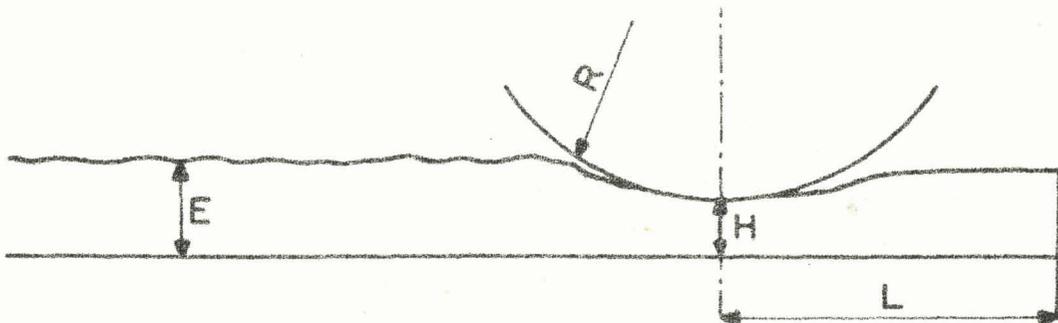


FIGURE 1.2.

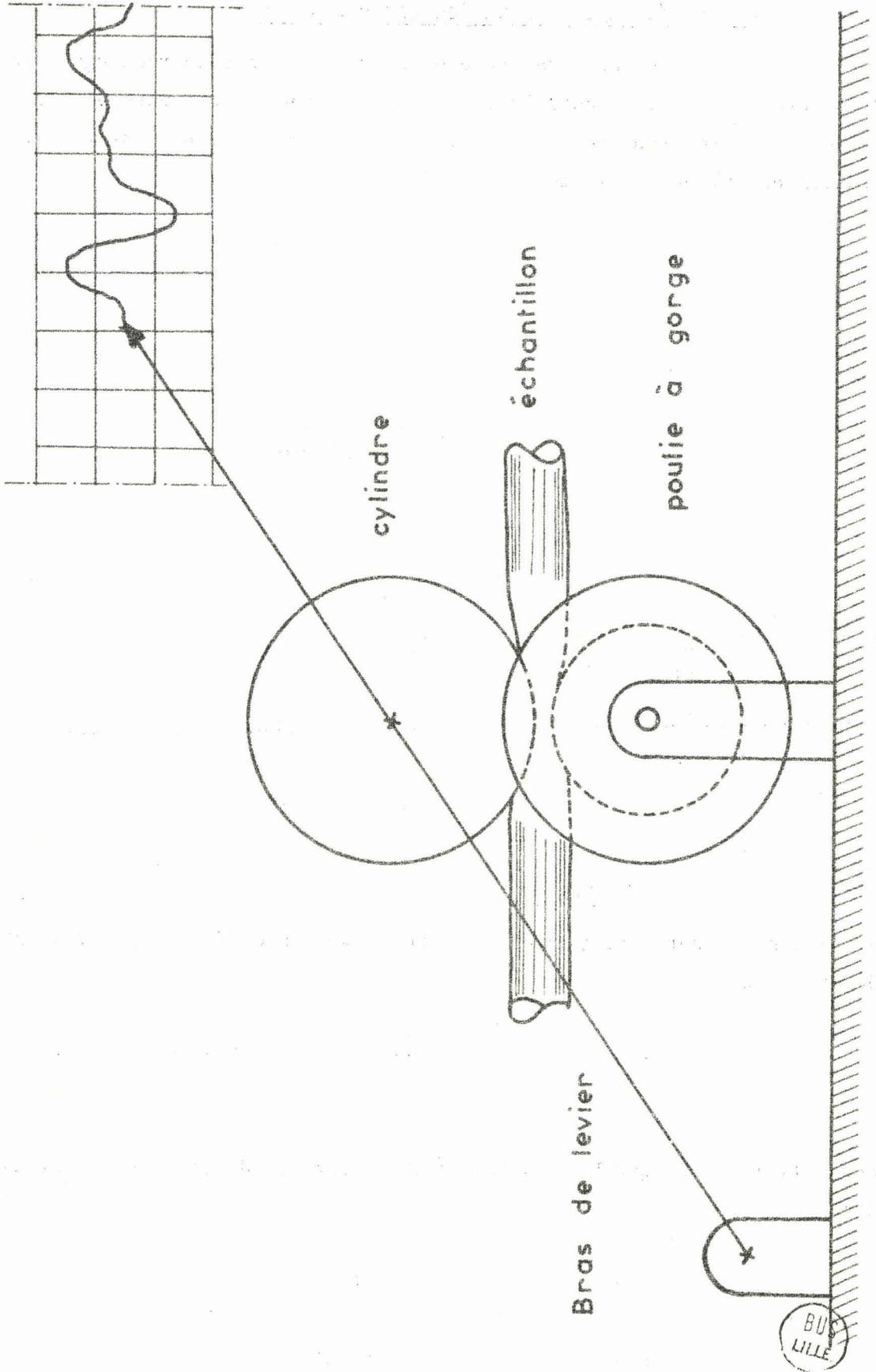


FIGURE 1,1 - Principe du capteur utilisé

### 1.4.2. Réponse du capteur à un échelon d'épaisseur

La barre est dans cet essai un élément dont la section rectangulaire est constante. Déterminons tout d'abord la loi de déplacement du cylindre en fonction de la distance entre le front de l'échantillon et la verticale passant par le centre de rotation du cylindre (figure 1,3).

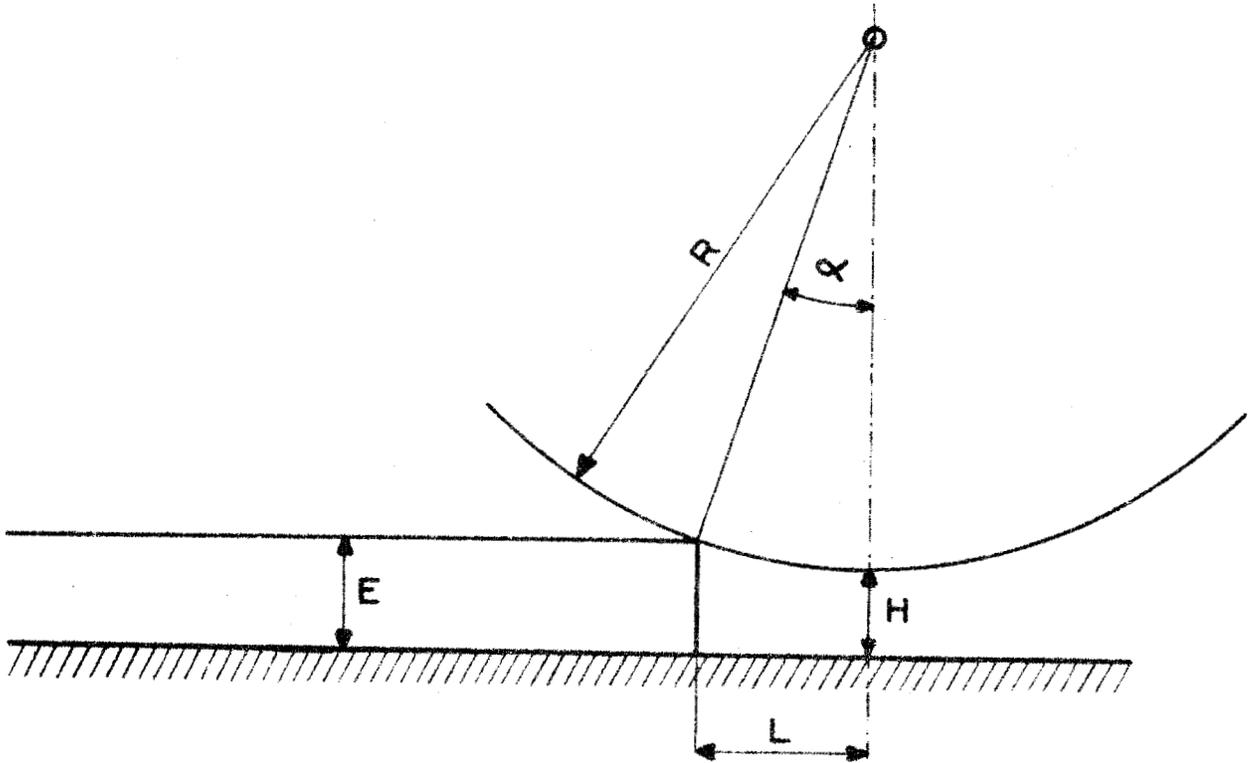


FIGURE 1,3

Toutes les distances sont notées dans la suite en variable réduite par rapport au rayon R du cylindre

$$e = \frac{E}{R} \quad \ell = \frac{L}{R} \quad h = \frac{H}{R}$$

la distance  $\ell$  limite pour que h soit différent de zéro se déduit des relations suivantes :

$$\ell = \sin \alpha \quad (1,1)$$

$$\cos \alpha = 1 - e \quad (1,2)$$

ce qui entraîne :

$$\ell = \sqrt{2e - e^2} \quad (1,3)$$

ainsi si :

$$\ell \leq -\sqrt{2e - e^2} \quad h \equiv 0$$

$$\text{si} \quad -\sqrt{2e - e^2} < \ell < 0$$

$$\text{alors} \quad \cos \alpha + e = 1 + h \quad (1,4)$$

$$\ell = \sin \alpha$$

$$\text{et} \quad \boxed{h = \sqrt{1 - \ell^2} + e - 1} \quad (1,5)$$

$$\text{et si} \quad \ell > 0 \quad \text{alors} \quad h = e$$

Il convient de noter que dans les équations ci-dessus la longueur  $\ell$  intervient comme un temps puisque la vitesse de défilement est constante.

Différentes réponses ont été tracées pour plusieurs valeurs de  $e$  sur le graphique n° 1,4.

Pour obtenir la réponse à un échelon décroissant il suffit simplement de changer le sens de l'axe des longueurs.

Il est évident d'après l'expression de l'équation (1,5) que le système étudié anticipe ou retarde selon que le point de contact est respectivement à gauche ou à droite de l'axe du cylindre. En outre un phénomène de courbure du signal est apparu et il s'en suit que la valeur moyenne de la variable de sortie est plus grande que celle de l'entrée.

### 1.4.3. Réponse du capteur à une entrée sinusoïdale

Supposons la lame précédente remplacée par une autre matière dont l'épaisseur est définie au moyen de la relation

$$e_L = A + K \cos 2 \pi \frac{L}{D}$$

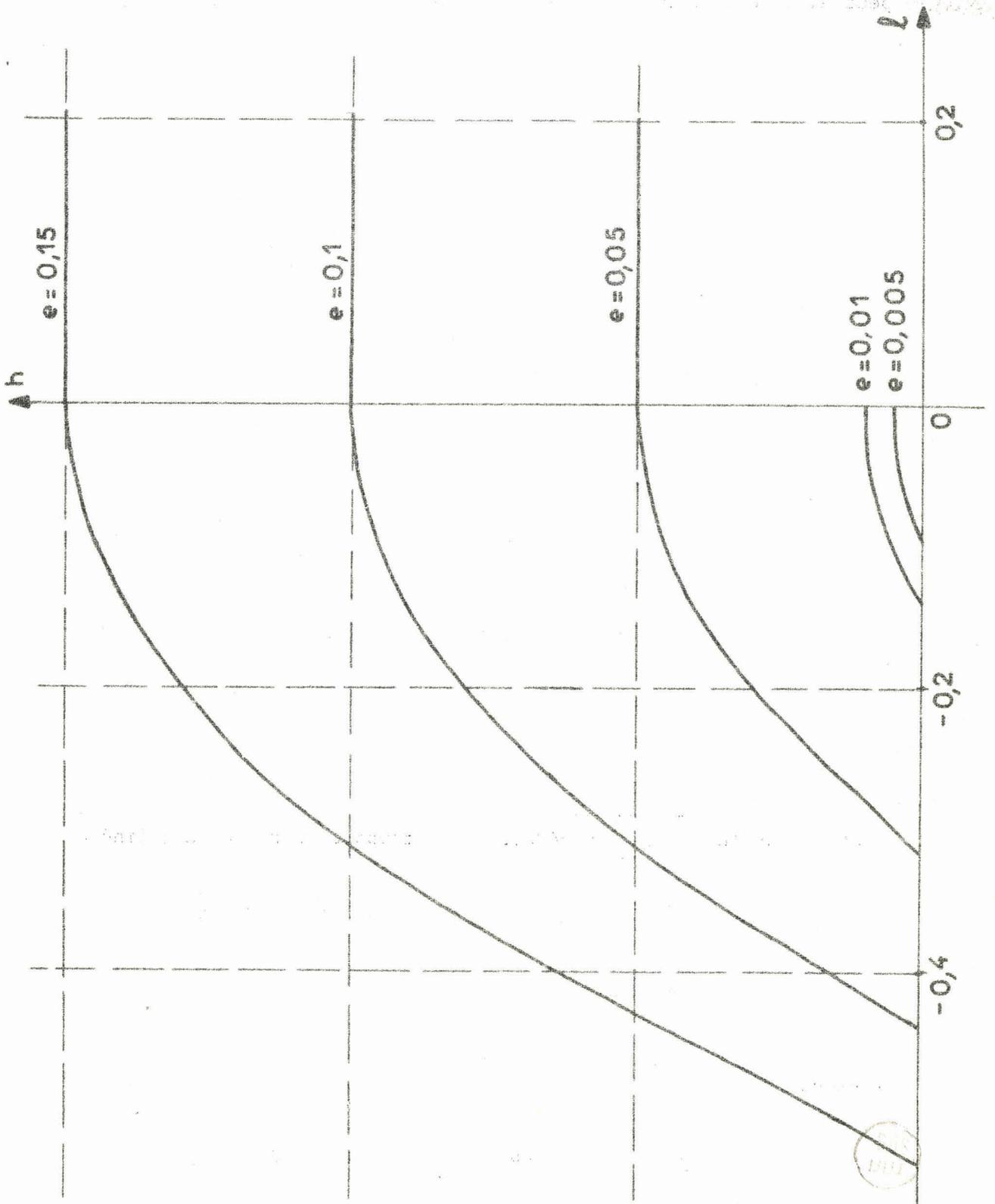


FIGURE 1,4 - Réponse du capteur à divers échelons

le système peut alors être représenté de la façon suivante (voir figure 1,5)

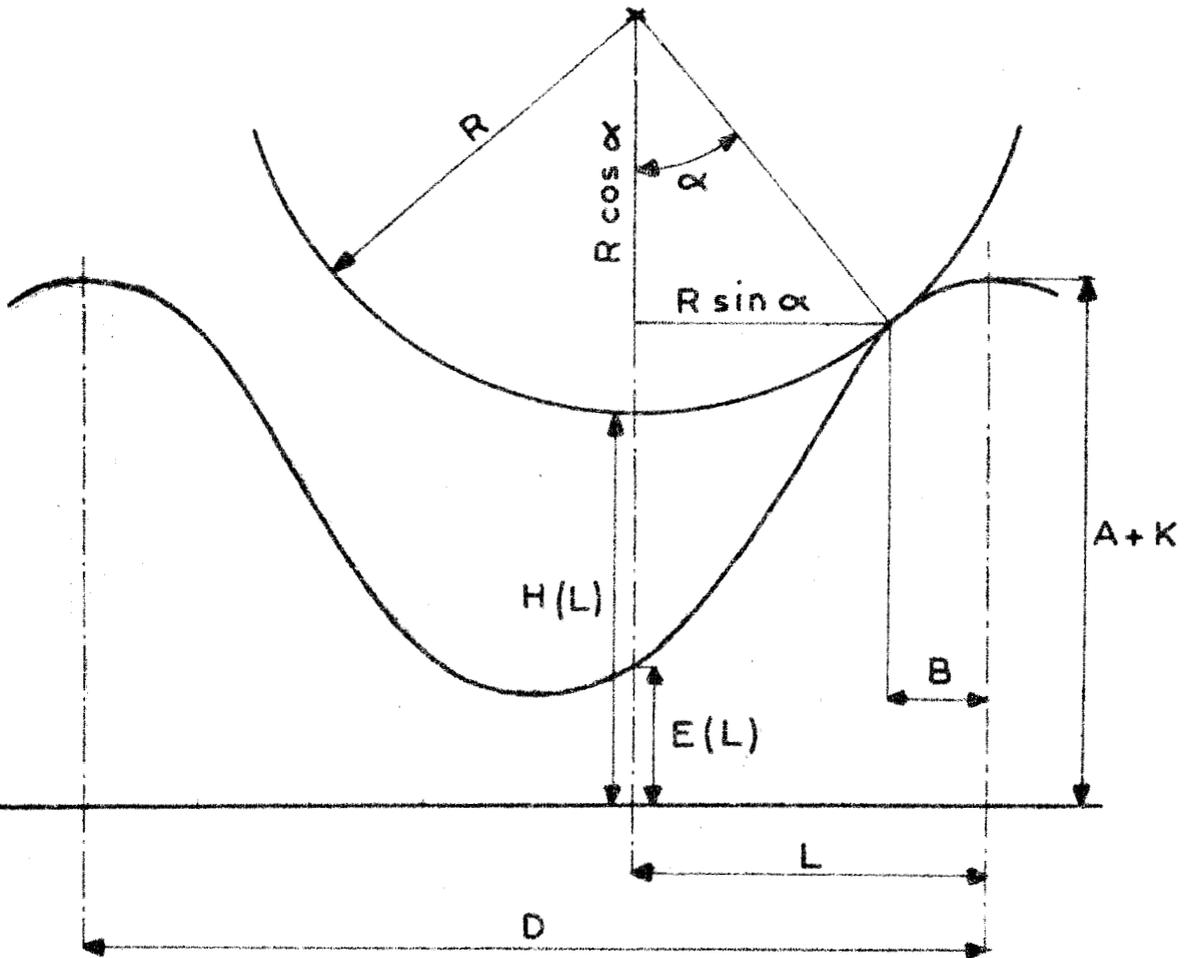


FIGURE 1,5

En utilisant les variables réduites par rapport au rayon du cylindre

$$a = \frac{A}{R} \quad k = \frac{K}{R} \quad \ell = \frac{L}{R} \quad d = \frac{D}{R} \quad b = \frac{B}{R}$$

$$e = \frac{E}{R} \quad h = \frac{H}{R}$$

Il vient :

$$e_{\ell} = a + k \cos 2\pi \frac{\ell}{d} \quad (1,6)$$

la distance  $e_{\ell}$  est la réponse théorique d'un capteur parfait

$$\text{nous avons } \cos \alpha + e_b = 1 + h \quad (1,7)$$

$$\sin \alpha + b = \ell \quad (1,8)$$

$$e_b = a + k \cos 2\pi \frac{b}{d} \quad (1,9)$$

au point de contact entre le cylindre et la lame il y a égalité des tangentes soit :

$$\frac{k2\pi}{d} \sin 2\pi \frac{b}{d} = \operatorname{tg} \alpha \quad (1,10)$$

les équations (1,7) à (1,10), correspondent à une valeur de  $\ell$  comprise entre 0 et  $d/2$  et, étant donné la forme d'onde il y a symétrie de la réponse par rapport à  $\ell = 0$  et par rapport à  $\ell = d/2$ .

Les équations (1,7), (1,8), (1,9), (1,10) ne donnant pas d'expression explicite de la réponse, toutefois elles peuvent s'écrire en éliminant la variable  $b$ .

$$\cos \alpha + a \pm k \sqrt{1 - \frac{d^2}{k^2 4\pi^2}} \operatorname{tg}^2 \alpha = 1 + h \quad (1,11)$$

$$\sin \alpha + \frac{d}{2\pi} \operatorname{Arc} \sin \left( \frac{d}{k2\pi} \operatorname{tg} \alpha \right) = \ell \quad (1,12)$$

la condition de validité de ces équations étant

$$0 < \frac{d}{k 2\pi} \operatorname{tg} \alpha < 1 \quad (1,13)$$

D'autre part pour <sup>que</sup> la sinusoïdale soit entièrement explorée (nous entendons par exploration complète le fait que chacun des points de la sinusoïdale soit en contact avec le cylindre en un point et un seul ce qui n'explique pas la linéarité de la réponse) il faut que le rayon de courbure du cercle soit inférieur au plus petit rayon de courbure de la sinusoïde c'est-à-dire pour  $\ell = d/2$

Pour une sinusoïde d'équation (1,6) le rayon de courbure s'exprime au moyen de la relation :

$$\frac{1}{-k \frac{4\pi^2}{d^2} \cos 2\pi \frac{\ell}{d}} \quad (1,14)$$

au point  $\ell = d/2$  celui-ci devient

$$r = \frac{1}{k} \frac{d^2}{4\pi^2} \quad (1,15)$$

pour que l'exploration soit complète il faut

$$r > 1 \quad (1,16)$$

ce qui compte tenu de l'expression (1,16) donne une relation entre l'amplitude et la fréquence du signal d'entrée.

De ce qui précède il ressort que nous retrouvons pour une entrée sinusoïdale les phénomènes d'anticipation et de retard mis en évidence dans le cas d'un échelon. La condition d'exploration complète du signal d'entrée indique qu'il ne peut exister qu'un seul point de contact entre l'échantillon et le cylindre si les relations (1,15) et (1,16) sont remplies.

D'après les équations (1,7) à (1,10) il est évident que le système étudié est linéaire, lorsque  $\alpha = 0$ , cas réalisable seulement pour  $R = 0$  (le cylindre étant remplacé par un couteau).

### 1.5. Etude des diverses non linéarités du capteur

L'étude du capteur dans le cadre des hypothèses simplificatrices que nous avons émises a permis de mettre en évidence la non linéarité principale de l'appareil. Il en existe d'autres dont l'importance n'est pas négligeable.

La supposition que les rayons du cylindre et de la poulie, sont identiques permet uniquement de simplifier la mise en équations du phénomène et il conviendrait de tenir compte du rayon le plus grand pour la limitation en amplitude et en fréquence.

La longueur du bras de levier nécessairement réduite pour augmenter l'amplification du signal introduit une non linéarité détruisant la symétrie du signal de sortie lorsqu'elle existe pour le signal d'entrée. L'axe du cylindre ne se déplace plus sur une droite verticale mais sur un arc de cercle dont le centre de rotation est le point de fixation du bras de levier. Un compromis entre la linéarité et l'amplification du signal est à considérer. En dehors des non linéarités

esquissées ci-dessus, il est indispensable de faire intervenir la matière textile que nous voulons mesurer. Le ruban traversant l'appareil est écrasé par une masse et la matière étant élastique, il existe une surface de contact entre le ruban et les deux cylindres. Ce phénomène entraîne que la mesure effectuée fait intervenir la masse du ruban sur une certaine longueur variable en fonction des irrégularités du fil.

En outre l'élasticité de la laine est fonction de beaucoup d'éléments et en particulier de sa provenance et de sa préparation dans les ateliers de peignage. Cette élasticité est non linéaire en fonction de l'écrasement impliqué, de la section du ruban, de la loi de distribution des fibres, de leur orientation, de la torsion du fil etc...

Nous pouvons donc définir la grandeur de sortie du capteur. Comme une fonction de l'épaisseur, de la masse sur une certaine longueur, des irrégularités, de l'élasticité, des rayons des cylindres, de la vitesse de défilement...

Toutefois les enregistrements effectués par cet appareil peuvent être comparés aux enregistrements issus de capteurs basés sur d'autres principes (par exemple capacitifs). Ces mesures par comparaison montrent que les variations de l'épaisseur autour d'une valeur proche de la valeur moyenne sont pratiquement du même ordre de grandeur et approximativement linéaire. En conséquence nous considérerons l'appareil que nous possédons comme satisfaisant et nous nous intéresserons désormais uniquement à sa grandeur de sortie en supposant qu'elle reflète exactement la variable d'entrée.



## CHAPITRE II

### PRINCIPE DE LA REALISATION

#### 2.1. MOYENS DE RECUEILLIR L'INFORMATION

Le problème du recueil de l'information consiste à traduire une variable mécanique en un langage assimilable par l'organe de calcul, aussi quelle que soit la méthode, numérique ou analogique, que nous utiliserons, la transformation d'un déplacement mécanique en variation de tension, codifiée ou non, paraît nécessaire.

Beaucoup de procédés sont à notre disposition et peuvent être classés de la façon suivante :

- appareil à lecture directe utilisant la déviation du bras de levier sans se préoccuper de la bande de papier.
- dépouillement ultérieur à la mesure de l'enregistrement : (lecteur de courbe).

Ces deux classes d'appareil permettent une sortie analogique du signal. S'il y a lieu d'échantillonner et même de codifier la mesure par exemple pour permettre d'entrer sur un calculateur numérique il est toujours plus facile de le faire par l'intermédiaire d'un signal électrique plutôt que par celui issu d'une nouvelle mécanique.

Nous allons tout d'abord examiner différentes techniques de transformation.

#### 2.1.1. Capteur de déplacement mécanique [ 3 ]

La plupart des transformateurs de déplacement mécanique en différence de potentiel électrique utilisent un des quatre procédés suivants :

- montage potentiométrique
- variation de capacité
- variation d'inductance mutuelle (transformateur différentiel)
- variation d'éclairement (photo-électricité)

Le transformateur utilisable dans notre montage doit avoir les qualités suivantes :

- influencer le moins possible le comportement du capteur
- une bonne fiabilité
- un gain élevé (pour éviter les perturbations extérieures)
- une bonne linéarité

Pour ces raisons nous ne garderons que le transformateur différentiel qui en outre ne présente pas l'inconvénient d'accroître la masse écrasant le ruban de laine ni d'introduire un frottement supplémentaire.

### 2.1.2. Lecteur de courbes

2

Un lecteur de courbes est un appareil qui travaille en suiveur avec une loi qui lui est imposée (par exemple défilement à vitesse constante dans une des directions). Ces instruments sont basés généralement sur des asservissements à servomoteur commandé par une cellule photo électrique. Le déplacement mécanique est ensuite transformé en variation de potentiel par l'intermédiaire d'un potentiomètre. Bien que relativement coûteuse et d'un emploi délicat cette classe d'appareils n'est pas à rejeter, car ces instruments permettent éventuellement de lire le contenu d'une bande plus rapidement qu'elle n'a été enregistrée. Il est alors possible d'envisager de n'utiliser qu'un seul lecteur pour la dizaine d'ateliers à équiper. Néanmoins cette solution serait intéressante à condition que l'organe de calcul placé derrière ce lecteur soit unique. Elle possède cependant l'inconvénient d'introduire un retard fonction de l'éloignement du capteur de section au lecteur de courbe et de l'occupation de ce dernier.

En conclusion deux solutions s'offrent à nous pour recueillir une information analogique à partir du capteur mécanique. Le choix entre ces solutions se fera par la suite en considérant l'organe de calcul proprement dit et les conditions d'exploitation de toute la chaîne.

## 2.2. EXAMEN APPROFONDI DE DIVERSES SOLUTIONS ENVISAGEABLES

4

### 2.2.1. Exposé du problème

Un certain nombre de moyens sont à notre disposition pour résoudre le problème posé, et il est possible de concevoir plusieurs choix selon que nous utiliserons un organe de calcul plutôt qu'un autre. Néanmoins nous allons envisager l'ensemble des éléments sous un angle général tout en ne perdant pas de vue l'aspect

industriel du contrôle en considérant les divers problèmes énumérés ci-dessous :

- facilité d'emploi de l'instrumentation
- rapidité d'élaboration des résultats recherchés
- transmission de ceux-ci à l'atelier de fabrication
- centralisation de l'ensemble des résultats portant sur l'ensemble des ateliers comme documents pour des études statistiques à plus longue échéance
- prix de revient de l'appareillage
- fiabilité, encombrement...

### 2.2.2. Calculateur "en ligne"

Comme nous l'avons déjà signalé l'utilisation d'un calculateur est envisageable calculateur numérique ou calculateur spécialisé du type hybride, et dans ces conditions la chaîne de contrôle la plus simple que nous pouvons imaginer est schématisée figure (2.1.)

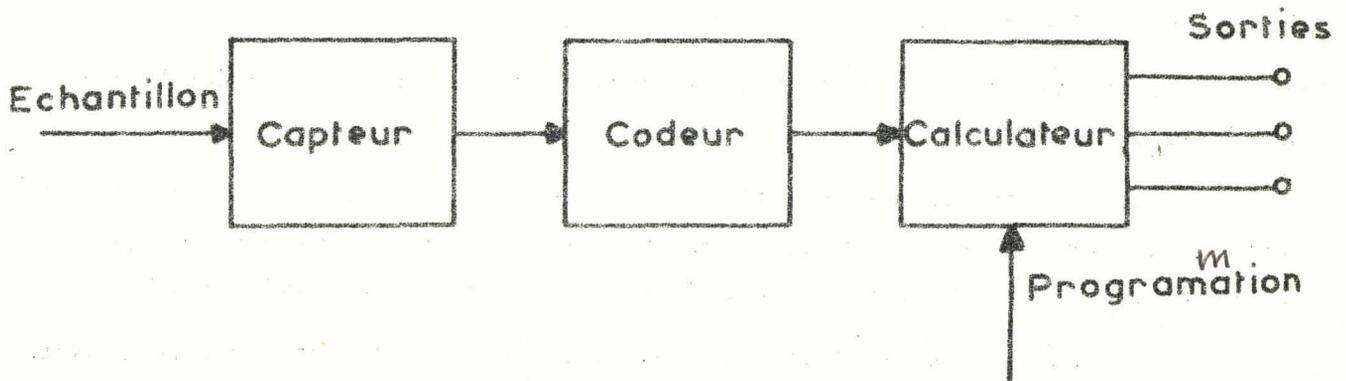


FIGURE 2,1 - Système avec calculateur en ligne.

Ce principe de réalisation impose d'équiper chaque atelier indépendamment des autres et fournit par conséquent les résultats souhaités le plus rapidement possible ; on peut même obtenir les résultats instantanément lorsqu'une longueur suffisante de l'échantillon a traversé le capteur (calculateur travaillant en temps réel, ou en ligne). Dans ce modèle la centralisation des résultats ne peut se faire qu'épisodiquement, l'urgence dans le sens atelier service Qualité de la transmission étant moindre (l'établissement d'une liaison électrique et par conséquent d'un traitement immédiat est cependant toujours possible mais plus ou moins

facile à réaliser selon l'implantation géographique des ateliers) la fiabilité de ce système, bien que pouvant être excellente, peut être améliorée par des équipes de dépannage dont l'emploi peut être justifié par un nombre élevé d'ateliers.

Un tel assemblage paraît dans ces conditions peu économique quant à son prix de revient, et seul un calculateur analogique ou hybride spécialisé pourrait éventuellement aboutir à une réalisation semi-industrielle peu coûteuse.

### 2.2.3. Calculateur "hors ligne"

Pour que le point de vue financier soit acceptable nous pouvons envisager de regrouper à un niveau plus proche de l'entrée l'ensemble des signaux de façon à ce que la plus grande partie de la chaîne soit commune à tous les ateliers.

Regrouper les mesures à un niveau quelconque implique obligatoirement une contraction de celles-ci dans l'échelle de temps. En effet le calculateur étant unique il faut que le temps d'entrée des données et de calcul soit petit on ne peut concevoir du moins à partir de la surveillance d'un nombre relativement important d'ateliers une exploration cyclique des capteurs du fait même que cette étude est basée sur la rapidité avec laquelle les résultats doivent être fournis et le prix de revient de l'opération.

A partir de ces considérations nous pouvons établir le schéma bloc présenté figure (2,2).

Les divers organes de cette chaîne sont présentés sous la forme de schéma-bloc et leur composition réelle peut être très différente suivant le type de calculateurs choisi (ils peuvent même dans certains cas ne pas exister).

Par exemple les sorties des blocs enregistreurs seront constituées soit par une bande perforée, soit par un enregistrement analogique (bande magnétique...) ou tout simplement par l'enregistrement dont nous disposons actuellement.

Pour contracter dans le temps les mesures nous devons imposer un retard minimum correspondant au temps d'enregistrement car l'opération de contraction ne peut débuter que lorsque toutes les mesures sont disponibles. Dans notre cas particulier il faut en plus considérer le temps de transfert des données au centre de calcul et en outre un éventuel temps d'attente si l'ensemble de calcul n'est pas immédiatement disponible (calcul en temps partagé)

### 2.2.4. Transport des informations

2

Lorsqu'on envisage le transfert des informations et non leur traitement sur place à l'endroit de leur élaboration il convient pour cela de se pencher sur

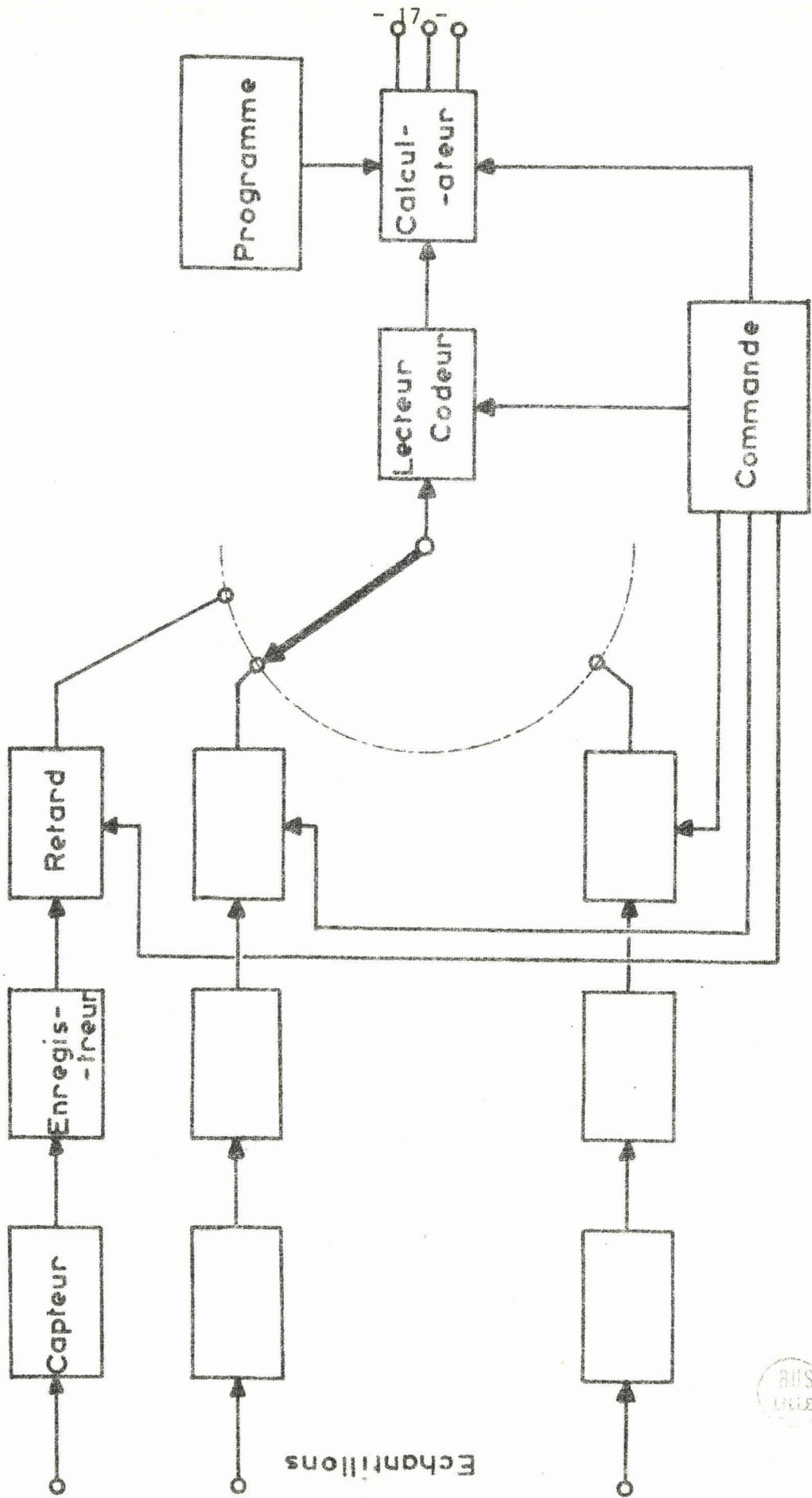


FIGURE 2,2 - Système avec calculateur hors ligne





ce problème.

Toute une gamme de solutions basée sur deux techniques différentes peut être proposée et la mise en service de l'une ou de l'autre dépend des moyens mis à la disposition de l'utilisateur.

Avec les structures actuelles de l'entreprise considérée nous pouvons admettre qu'un transport des mesures ou de l'échantillon par un porteur assurant le retour de l'information à l'atelier est possible rapide et peu onéreux. Toutefois, il convient d'envisager à plus longue échéance, la pose de lignes téléphoniques pour amener les mesures du capteur à l'enregistreur et pour renvoyer sur les lieux de travail le résultat du calcul. Cette solution apparamment plus coûteuse peut se justifier après une étude préalable de sa rentabilité, compte tenu principalement de la localisation des ateliers (distants parfois de plusieurs kilomètres)

Néanmoins dans l'immédiat, nous utiliserons les structures existantes en prévoyant une évolution possible du processus dirigée vers une automatisation plus complète de tout l'ensemble mesure et calcul.

### 2.3. CHOIX DE L'ORGANE DE CALCUL

Comme nous l'avons déjà signalé plusieurs calculateurs peuvent être envisagés ou sont à notre disposition pour le traitement des données, ainsi dans ce paragraphe nous allons mettre en évidence les possibilités de chacun d'eux avec ses principaux avantages et inconvénients.

#### 2.3.1. Traitement de l'information sur calculateur EMD 8.48

Une étude préalable basée sur le calculateur EMD 8.48 (Marcel Dassault) permet de montrer aisément qu'il est capable d'exécuter tous les calculs demandés, avec cependant une limitation quant au nombre de points de mesure par échantillon (ceux-ci ne permettent pas d'obtenir la précision souhaitable sur le résultat des calculs).

Ce calculateur outre les inconvénients inhérents au principe même du calcul numérique nécessite avant chaque opération l'introduction de tout le programme, introduction relativement lente (bande perforée).

Néanmoins il convient de noter que l'utilisation d'un calculateur numérique dans la chaîne présente certains avantages surtout du point de vue de la fiabilité et de la souplesse de ses organes de sortie.

### 2.3.2. Traitement sur un calculateur de forte puissance

L'utilisation d'un calculateur de forte puissance dont l'achat pourrait être envisagé par l'usine est lié à d'autres travaux dont l'importance est loin d'être négligeable. Toutefois ce calculateur se trouverait relativement éloigné des ateliers et entraînerait la pose de lignes téléphoniques.

Une étude sérieuse devrait également faire entrer en ligne de compte le coût du traitement.

Un tel ensemble de calcul n'étant pas pour l'instant à notre disposition et la résolution du problème qui nous intéresse n'exigeant pas son achat, nous avons préféré abandonner cette possibilité de traitement de l'information malgré ses avantages indiscutables (précision...).

### 2.3.3. Utilisation d'un calculateur spécialisé

Les opérations mathématiques destinées à fournir les résultats statistiques exigés étant relativement simples on peut envisager de construire un ou plusieurs calculateurs hybrides spécialisés interprétant les signaux de mesure.

La technologie mise à notre disposition à l'heure actuelle permet de satisfaire les conditions exposées au paragraphe (2.1.) et seul quelques problèmes concernant la conservation des résultats se posent mais peuvent se résoudre et ne présentent pas un obstacle à la construction d'une telle calculatrice.

En outre ce matériel bon marché, peu encombrant, sans entretien s'adapte facilement aux changements d'échelles de temps.

### 2.3.4. Conclusion

La solution de traitement de l'information à l'aide d'un calculateur spécialisé que nous venons de dégager paraît être la plus simple de toutes celles envisagées, et satisfait aisément les caractéristiques imposées. Elle présente outre cela des qualités de souplesse et d'adaptation à des transformations ultérieures non négligeables.

Dans la deuxième partie de notre mémoire nous allons proposer un modèle de calculateur conçu pour réaliser les opérations statistiques souhaitées.



## DEUXIEME PARTIE

### CALCUL DE L'ECART TYPE

Après l'étude préalable présentée au cours des chapitres précédents, nous nous proposons dans cette partie de présenter la réalisation d'un calculateur hybride spécialisé pour la mesure statistique de l'écart type considéré. Pour cela nous analyserons les équations à résoudre par le calculateur afin d'en dégager sa composition ; ensuite nous élaborerons chacun des éléments en tenant compte des limites technologiques des composants et en ne perdant pas de vue l'aspect concernant la précision du résultat du calcul.

CHAPITRE III

ANALYSE STATISTIQUE

INTRODUCTION

Un des problèmes essentiels de la réalisation est fondé sur la détermination de paramètres du système issus d'une analyse statistique (écart type - valeur moyenne - moyenne quadratique).

La définition de l'écart type comme la racine carrée du moment centré d'ordre 2 (annexe 1) conduit à l'expression mathématique suivante de celui-ci pour une variable continue :

$$\sigma_x = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt - \left[ \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \right]^2 \right]^{1/2} \quad (3,1)$$

Lorsqu'on échantillonne linéairement la variable x dans l'intervalle de temps T, n fois (n échantillons équidistants) l'écart type s'exprime alors au moyen de la relation :

$$\sigma_x = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right]^2 \right]^{1/2} \quad (3,2)$$

Il est évident que dans ce cas la précision dépend uniquement de la variable n. Cette remarque suggère l'utilisation de l'expression (3,1) comme équation de base pour la conception d'un calculateur spécialisé

Le changement de variable

$$x = x_0 + a_0 z \quad (3,3)$$

conduit à la relation  $\sigma_x = |a_0| \sigma_z \quad (3,4)$

et en choisissant judicieusement les paramètres constants  $x_a$  et  $a_o$  une simplification technologique peut être envisagée tout en adoptant le même procédé de calcul.

### 3.1. CHOIX DE LA LONGUEUR DE L'ECHANTILLON

Le calculateur spécialisé que nous désirons construire doit effectuer des mesures sur un échantillon prélevé dans un stock de fil et le problème se pose de se demander quelle longueur d'échantillon faut-il choisir pour que le résultat du calcul reflète le contenu du stock.

Il convient de noter que la limite d'intégration T (équation 3.1.) est directement liée à la longueur de l'échantillon par l'intermédiaire de la vitesse apparente V du déplacement de l'échantillon par la relation :

$$T = \frac{L}{V} \quad (3,5)$$

La vitesse étant une constante il revient au même de définir L ou T

Afin de déterminer la valeur du paramètre T introduisons l'expression liant la variance à la longueur par l'intermédiaire de  $x(T)$ . ( $x$  épaisseur de l'échantillon).

$$\mu_2(x)(T) = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(T) dT - \left[ \frac{1}{T} \int_0^T x(T) dT \right]^2 \quad (3,6)$$

Cette expression peut être représentée au moyen d'une courbe ; celle-ci partant de l'origine est généralement croissante et tend vers une asymptote horizontale (figure 3,1).

L'ordonnée de l'asymtote de la courbe liant la variance à la longueur constitue le carré de la valeur de l'écart-type recherché.

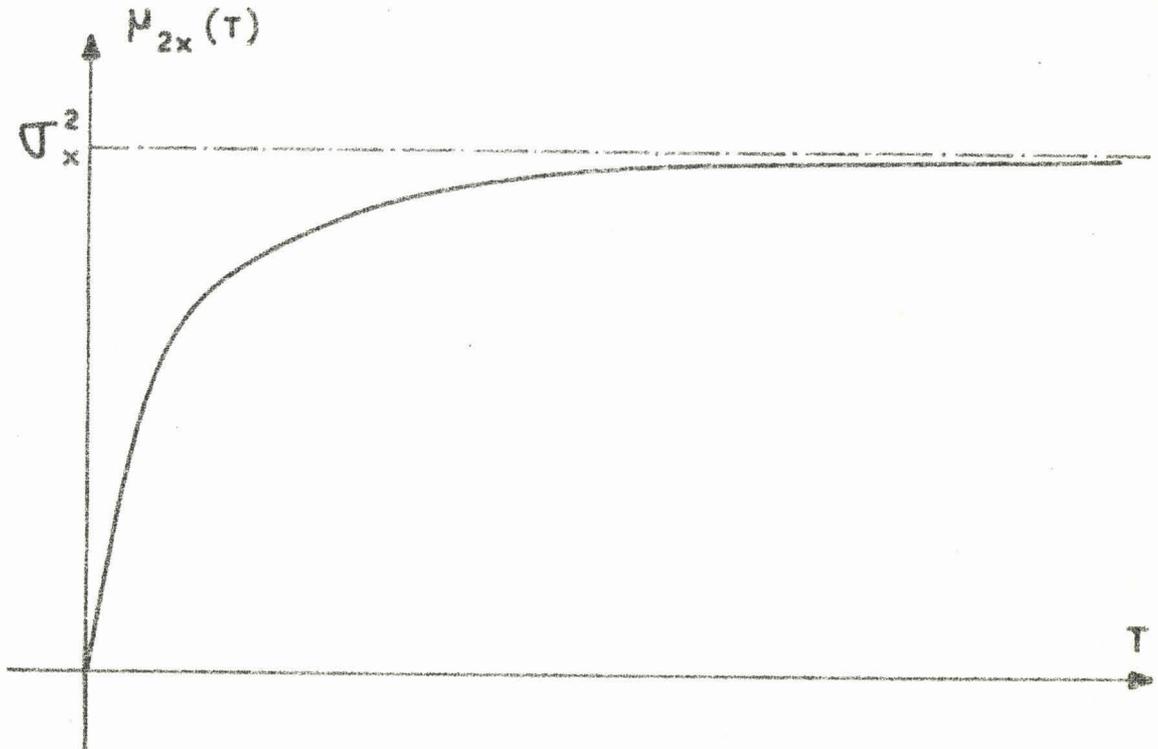


FIGURE 3,1 : Allure générale de la courbe variance - Longueur -

Afin d'illustrer ceci nous avons tracé pour une fonction  $x(T)$  connue la courbe variance longueur ou temps de passage entre les rouleaux de l'appareil la fonction  $x(T)$  choisie correspond à une entrée aux bornes du calculateur présentant une forme sinusoïdale :

$$x(T) = \sin \omega T \quad (3,7)$$

avec :

$$\omega = \frac{2\pi}{T_0} \quad (3,8)$$

Dans ces conditions l'expression de la variance  $\mu_{2x}(T)$  est :

$$\mu_{2x}(T) = \frac{1}{2} - \frac{1}{4\omega T} \sin 2\omega T - \frac{1}{\omega^2 T^2} \left[ 1 - \cos \omega T \right]^2 \quad (3,9)$$

La variation de  $\mu_{2x}$  est représentée par le graphique (3,2).

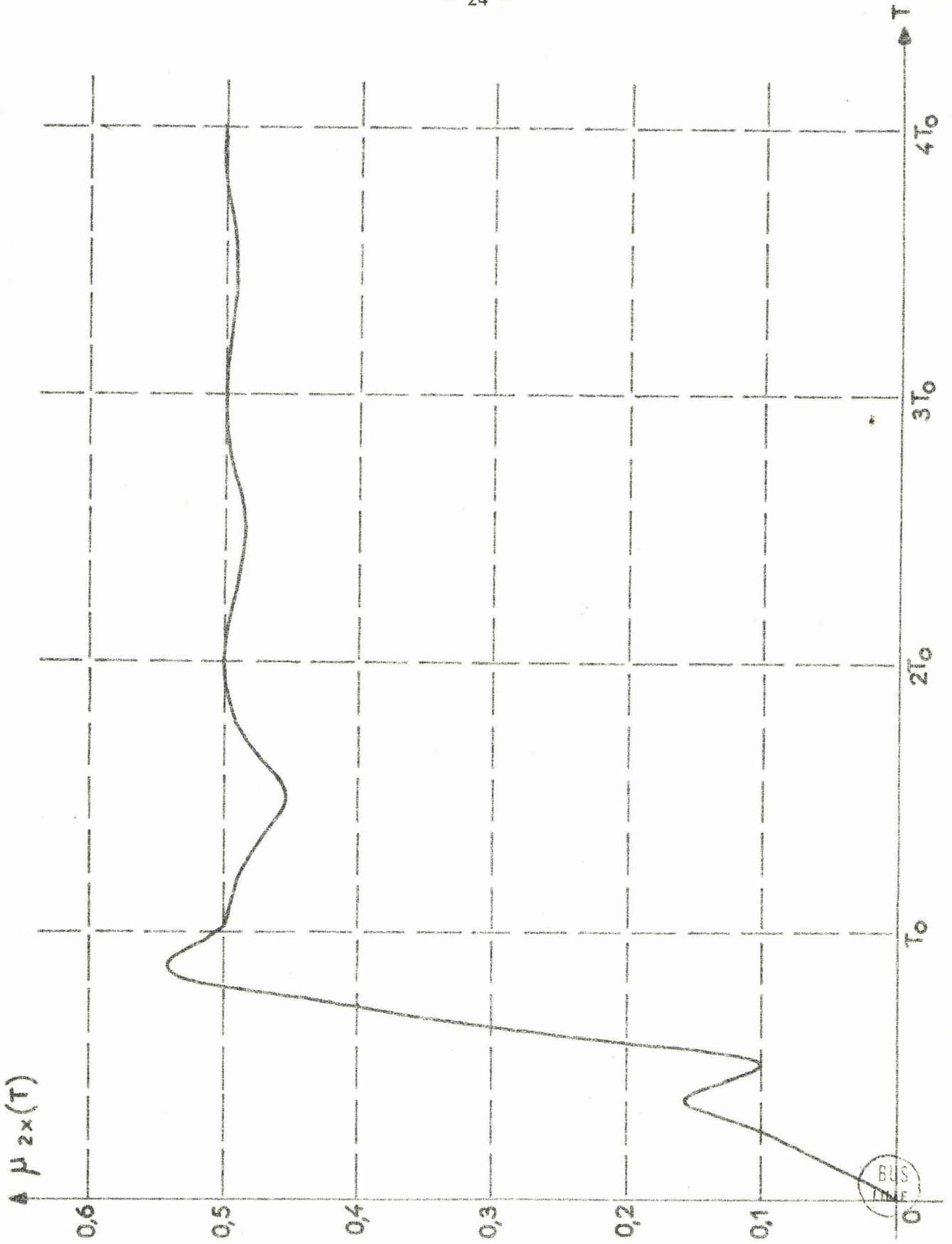


FIGURE 3,2 - Courbe variance longueur pour une entrée sinusoïdale

BUS  
M.F.

Il est alors aisé, pour cette fonction d'entrée de montrer qu'il faut utiliser au moins quatre périodes du signal d'entrée afin d'obtenir la variance cherchée avec moins de un pour cent d'erreur.

Lorsque la fonction d'entrée est aléatoire la méthode pour déterminer la longueur minimum de l'échantillon à utiliser relève des théories statistiques toutefois son principe est celui exposé ci-dessus. Pour des fonctions aléatoires du type de celles rencontrées dans les filatures nous tracerons (chapitre 5) les courbes variances longueur.

A partir de celles-ci nous pourrons établir une loi liant graphiquement la précision à la longueur de l'échantillon du fil. Si l'évolution du tirage est suffisamment lente pour que le nombre d'échantillons mesuré soit grand la probabilité, pour que la précision soit meilleure que celle désirée, augmente et tend vers un.

### 3.2. PRINCIPE DU CALCULATEUR 7

Le système d'équations (3,1), (3,3) et (3,4) permet d'établir la formulation générale de l'écart type :

$$\sigma_x = |a_0| \left[ \frac{1}{T} \int_0^T z^2(t) dt - \left[ \frac{1}{T} \int_0^T z(t) dt \right]^2 \right]^{1/2} \quad (3,10)$$

Cette expression fait apparaître diverses opérations : intégrations, addition, élévations au carré et extraction de racines carrées. Ces opérations élémentaires conduisent à l'établissement du schéma bloc du calculateur présenté (figure 3,3).

La sortie  $\sigma_x$  est présente aux instants d'échantillonnage T, les conditions initiales sur les intégrateurs étant nulles à l'instant zéro.

On obtient comme variables d'états l'écart type  $\sigma_x$ , la valeur moyenne  $\bar{z} = M$  et le carré de la moyenne quadratique  $Q^2$

Les organes composant le schéma-bloc ci-dessus, bien qu'ils soient réalisables théoriquement au moyen des techniques analogiques ne peuvent être directement empruntés à celles-ci.



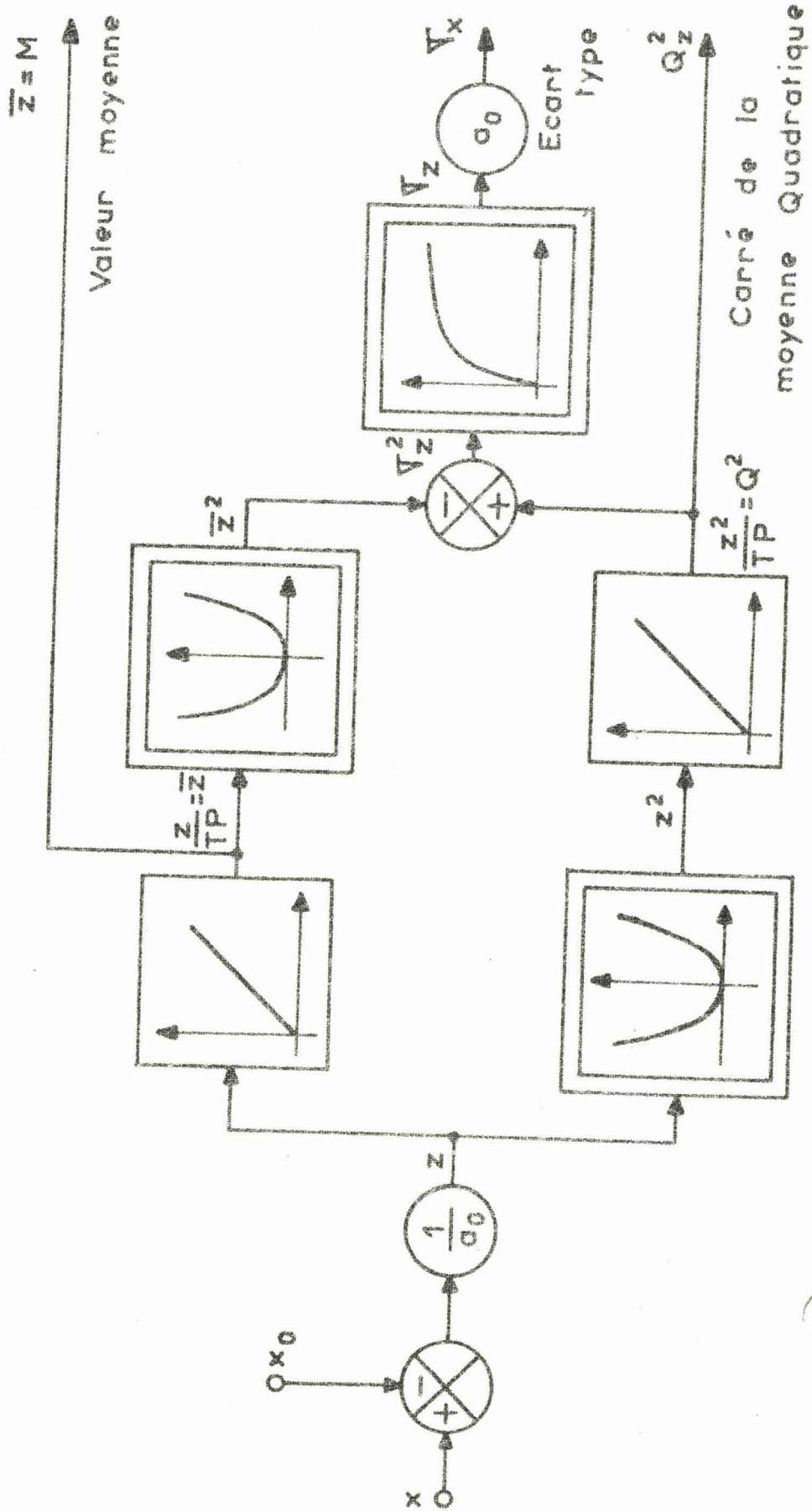


FIGURE 3,3 - Schéma-bloc du calculateur spécialisé

BUS  
FILE

En effet la technologie actuelle ne permet pas d'espérer une précision suffisante des calculs et il convient en conséquence de rechercher des organes mieux adaptés aux fonctions qu'ils doivent simuler.

Ce résultat est obtenu selon une technique hybride par l'introduction d'un quantifieur intégrateur qui sera présenté au cours du chapitre suivant.

### 3.3. CONCLUSION

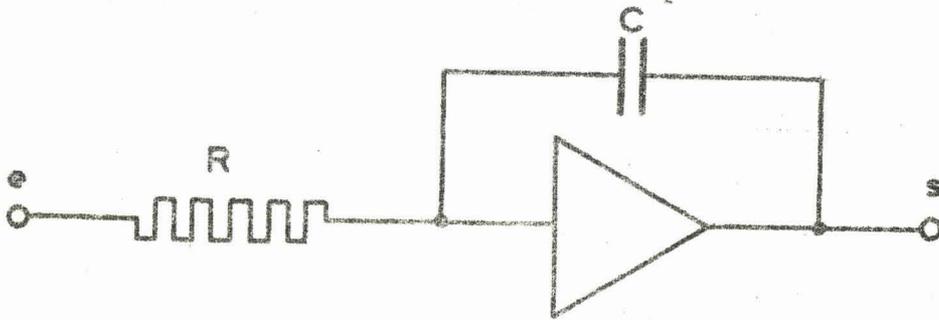
A partir des expressions mathématiques exprimant l'écart type nous avons pu, en séparant chacune des opérations de base, obtenir un schéma-bloc qui servira de base à la construction d'un calculateur spécialisé. Les divers éléments de celui-ci seront étudiés séparément dans le chapitre suivant, et adaptés aux exigences technologiques de façon à ce que l'ensemble puisse fonctionner avec la précision désirée.

## CHAPITRE IV

### OPERATEUR HYBRIDE DE BASE

#### INTRODUCTION

Pour intégrer une variable en calcul analogique il convient de réaliser le montage suivant (figure 4,1). [ 8 ]



la constante de temps du système est :

$$\tau = RC$$

On ne peut augmenter indéfiniment les valeurs de R et de C, les phénomènes de dérive des amplificateurs prenant alors une importance primordiale et augmentent l'imprécision des calculs.

Il convient donc pour réaliser le calculateur présenté figure 3.3. d'élaborer une intégration pendant plusieurs minutes, en utilisant un compteur composé de "bascules" placées en cascades. La mise en oeuvre de ce dispositif nécessite la transformation de la tension d'entrée en fréquence. [ 9 ]

#### 4.1. REALISATION DU CONVERTISSEUR ANALOGIQUE DIGITAL

Le problème à résoudre consiste en la réalisation hybride d'un organe émettant des impulsions dont le nombre et le signe sont représentatifs de la grandeur d'entrée. [ 10 ]

Le dispositif adopté figure 4,2 émet une impulsion chaque fois que l'intégrale du signal d'entrée atteint un certain seuil (quantum  $q$ ).

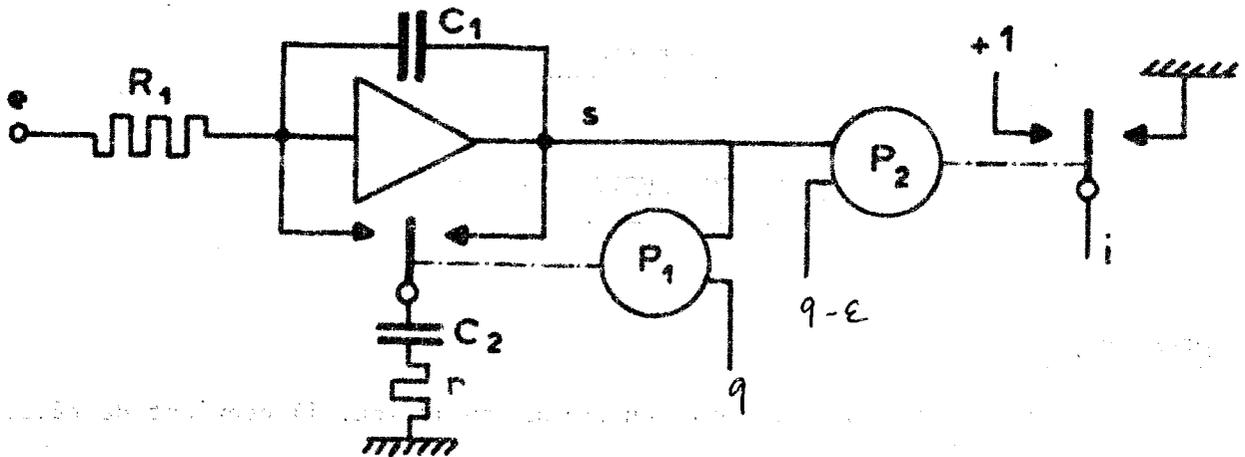


FIGURE 4,2 - Schéma de principe du modulateur

Principe de fonctionnement [ 11 ]

Lorsque le comparateur n'est pas excité le système se comporte comme un intégrateur de constante de temps  $R_1 C_1$ .

L'armature supérieure du condensateur  $C_2$  portée au potentiel  $s$  possède une charge  $q_2 = s c_2$

Lorsque la tension de sortie  $s$  devient égale à  $q - \epsilon$  le comparateur  $P_2$  commute et  $i$  prend la valeur 1 ; un instant après  $s$  devient égal à  $q$  et le comparateur  $P_1$  change d'état. Le noeud d'entrée de l'amplificateur restant au potentiel zéro le condensateur  $C_2$  se décharge avec la constante de temps  $r C_2$  et toute sa charge est transmise au condensateur  $C_1$ . Lorsque les condensateurs  $C_1$  et  $C_2$  sont égaux, il y a mise à zéro du potentiel  $s$  de sortie de l'amplificateur. Les comparateurs  $P_1$  et  $P_2$  reprennent leurs positions initiales et le système est prêt à l'élaboration d'une deuxième impulsion.

Remarque

L'opération de remise à zéro peut être considérée comme instantanée, les valeurs des résistances  $r$  et  $R_1$  étant très différentes (signalons l'utilité de la résistance  $r$  de très faible valeur, destinée à limiter l'intensité transitoire du courant de décharge du condensateur  $C_2$ ).

Dans ces conditions l'intégrale du signal d'entrée (supposé ici toujours du même signe) est proportionnelle au nombre d'impulsions émises.

#### 4.2. COMPTEUR [12]

L'emploi de compteur présente en calcul analogique beaucoup d'avantages par rapport à un simple intégrateur notamment en ce qui concerne la mise en mémoire des états pris successivement par le système simulé.

La variable de sortie du compteur possède un caractère logique et offre la possibilité de conserver la valeur de l'intégrale du signal d'entrée lorsque celui-ci prend la valeur zéro et par conséquent de mettre en mémoire le résultat du calcul aussi longtemps qu'il est souhaité.

#### 4.3. CONVERTISSEUR DIGITAL-ANALOGIQUE

Afin d'obtenir une sortie analogique du signal intégré condition nécessaire à une poursuite des calculs il convient de convertir le résultat binaire délivré par les compteurs. Ce décodage est réalisé dans notre prototype au moyen d'un convertisseur digital-analogique. [13]

Le procédé le plus intéressant emploie une "échelle de deux" dont le principe de base est rappelé figure (4,3).

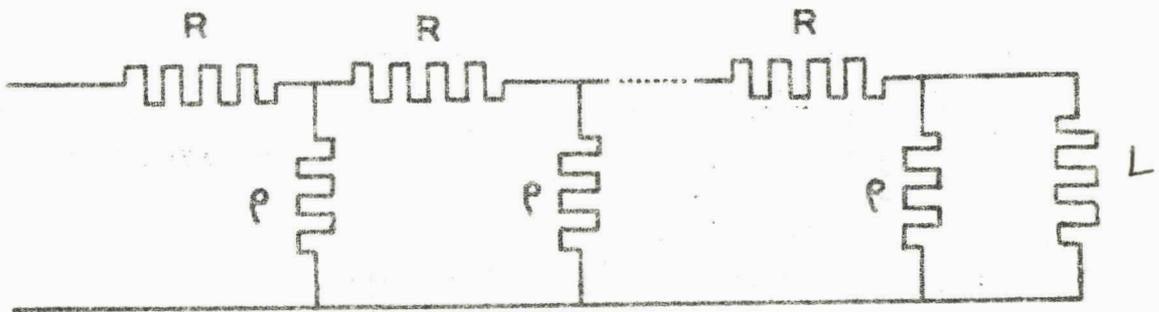


FIGURE 4,3

L'impédance d'entrée de la nième cellule, chargée par l'impédance L s'écrit :

$$z_n = R + \frac{\rho L}{\rho + L}$$

L'impédance itérative d'une cellule est :

$$z_n = L = R + \frac{\rho L}{\rho + L}$$

d'où :

$$L = \frac{R + \sqrt{R^2 + 4 \rho R}}{2}$$

Le choix de  $\rho$  tel que  $\rho = 2R$  conduit alors à la relation  $L = 2R$ .

Une mise en série de  $n$  cellules présente compte tenu de ce choix une impédance d'entrée égale à  $2R$ .

Dans le montage présenté figure (4,4) en chaque noeud, le courant fourni par la bascule correspondante se divise en parts égales entre chaque branche issue de ce noeud. Les poids respectifs de chacune des bascules est donc de simple en double à partir de la dernière.

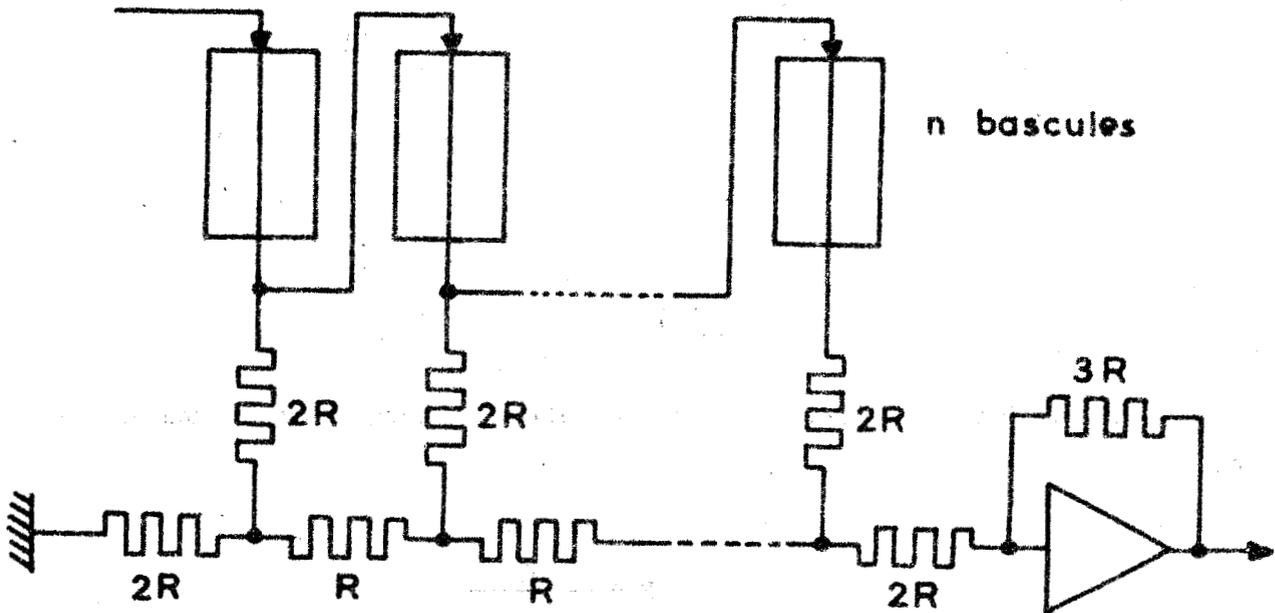


FIGURE 4,4 - Convertisseur digital analogique

La résistance de bouclage de l'amplificateur opérationnel est choisie égale à  $3R$  fois le module de base des résistances  $R$  afin d'obtenir une sortie  $S$  égale à l'unité lorsque toutes les bascules sont dans l'état un.

#### 4.4. INTEGRATEUR HYBRIDE DE BASE

Les divers organes exposés ci-dessus sont à la base de la réalisation d'un intégrateur pouvant fonctionner pendant un intervalle de temps très long sans atteindre de saturation. Le schéma de l'ensemble est indiqué figure 4,5.

Il est possible de définir la constante de temps d'un intégrateur comme le temps nécessaire à la sortie pour atteindre le niveau de l'échelon d'entrée appliqué, les conditions initiales étant nulles. Si l'échelon d'entrée est égal à 1 (niveau de référence) la sortie est égale à 1 lorsque le compteur est rempli, ce qui, celui-ci étant composé de  $n$  bascules, demande  $2^n$  impulsions. Le temps  $t$  pour élaborer une impulsion est alors :

$$t = R_1 C_1 q$$

et la constante de temps  $T$  de tout le système :

$$T = 2^n q R_1 C$$

Celle-ci dépendant de quatre paramètres est très aisément réglable par l'intermédiaire de  $n$ ,  $q$  et  $R$ . ( $C$  est difficile à régler en calcul analogique).

La résistance reliant la sortie du modulateur au noeud de l'amplificateur du convertisseur digital-analogique ne se justifie que si  $n$  est faible ; en effet si  $n$  est supérieur ou égal à 7 l'erreur introduite par cette suppression est inférieure à  $1/128$ . Ce qui correspond à la perte d'une impulsion de commande.

Pour illustrer ce phénomène nous avons tracé les réponses à un échelon unitaire pour un intégrateur théorique et pour notre opérateur lorsque les constantes de temps sont identiques et que  $n = 3$  (figure 4.6).

Nous remarquons en outre que dans notre modèle le phénomène de saturation est remplacé par une remise à zéro de toutes les variables. Le système ne se sature pas.



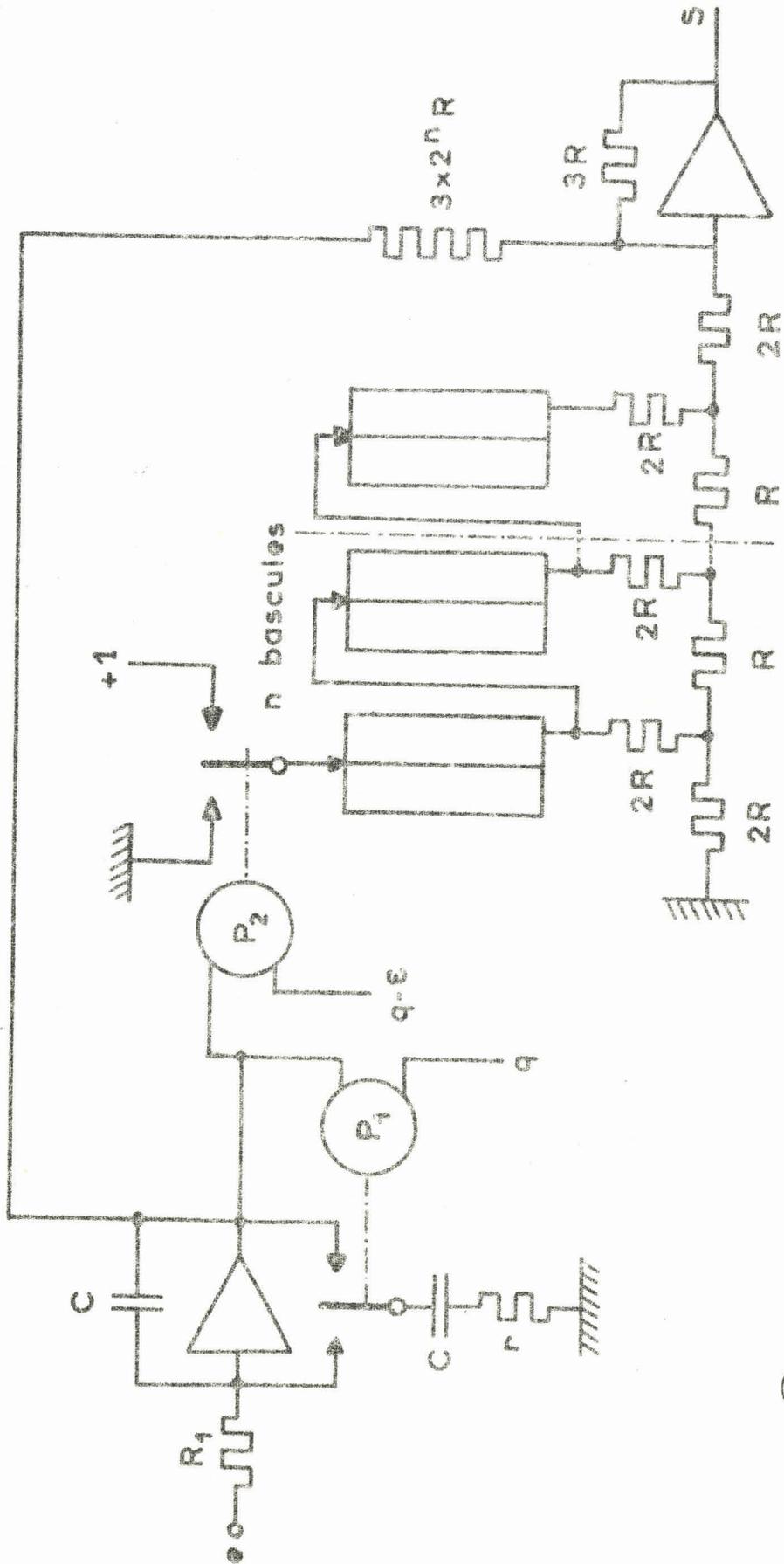
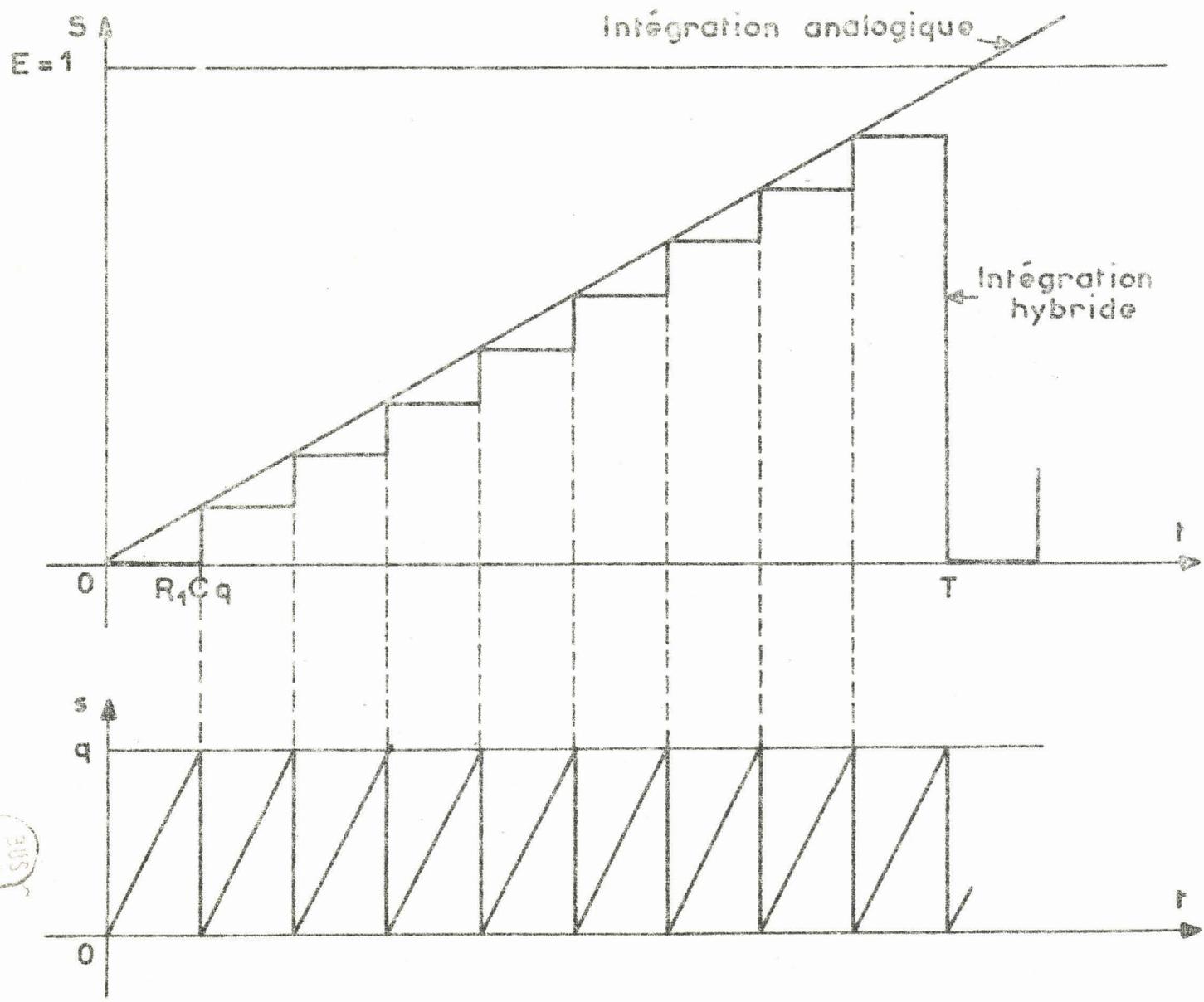


FIGURE 4,5 - Schéma de l'intégrateur hybride (entrée toujours du même signe)





3005  
UNIVERSITÉ

FIGURE 4,6 - Réponse à un échelon unitaire de l'intégrateur hybride de base lorsque  $n = 3$



#### 4.5. INTEGRATEUR HYBRIDE GENERALISE

Le principal inconvénient de l'intégrateur précédent réside en le fait qu'il ne peut intégrer que des signaux de signe unique. Pour palier à cet inconvénient il convient principalement de transformer la partie comptage du système et de différencier le signe de l'entrée (figure 4.7).

Le comparateur  $P_3$  détecte le signe de l'intégrale du signal d'entrée et commande simultanément les valeurs de comparaison. Les comparateurs  $P_1$  et  $P_2$  ainsi que la fonction des bascules qui travaillent en compteur ou en décompteur. Afin d'utiliser au maximum la capacité du compteur il faut à l'instant initial prédéterminer son contenu à une valeur moitié de sa contenance maximale et compenser celui-ci à l'aide du convertisseur digital-analogique.

#### 4.6. CONCLUSION

En dehors des avantages du procédé d'intégration défini au cours des paragraphes précédents l'opérateur proposé présente un intérêt important en qualité d'élément de calcul hybride. En effet la quantification de l'intégrale permet de réaliser des éléments dont le comportement est très différent suivant le choix des paramètres  $(n, q, R_1)$ . On peut même envisager de changer la constante de temps, le pas de la quantification... de façon continue ou discontinue au cours du calcul. En outre les possibilités d'affichage des conditions initiales, de travail séquentiel et même de changement de structure sont grandement facilités par la structure logique du montage indiqué.



REALISATION ET RESULTATS PRATIQUES

Introduction :

La construction d'un calculateur spécialisé pose un très grand nombre de problèmes techniques et le ~~leur~~ point de vue théorique adopté au chapitre précédent, a seulement permis d'en définir le principe.

Dans ce sens, nous précisons tout d'abord les éléments du calculateur proprement dit et ensuite nous envisagerons la question des organes périphériques d'exploitation des données.

Le dernier volet de l'étude sera consacré à la confrontation du système proposé avec les problèmes réels, et en particulier, à la détermination de la longueur minimum à donner à l'échantillon en tenant compte, d'une part des impératifs de l'exploitation et d'autre part des possibilités du calculateur hybride.

5.1. ORGANE DE CALCUL

Les organes de calcul particuliers au système sont au nombre de deux. D'une part nous distinguons l'intégrateur hybride, et d'autre part les générateurs de fonction parabolique.

La plupart des opérations du système hybride sont directement empruntés aux techniques du calcul analogique et mis en oeuvre d'une manière très économique à l'aide d'amplificateurs opérationnels intégrés.

5.1.1. Intégrateurs

L'intégrateur de base que nous utilisons est celui décrit au paragraphe 4.4.

La constante de temps a été fixée au début des travaux à dix minutes. Le nombre de bascules égal à huit impose pour l'intégrateur analogique une constante de temps  $\tau$  tel que :

$$\tau = R_1 C q = \frac{600}{2^8} = 2,34_s$$

La valeur de  $q$  est définie par le seuil du relais comparateur. Il en résulte :

$$q = \frac{3}{4}$$

La capacité  $C$  est choisie égale à  $3,3 \mu\text{F}$ , par conséquent, la valeur de  $R_1$  est de l'ordre du mégohm, et elle peut être simplement ajustée pour imposer une constante de temps générale de 10 minutes.

Au comparateur  $P_2$  est avantageusement substitué ~~par~~ un circuit de mise en forme qui délivre des impulsions susceptibles d'être comptées sans aléas de fonctionnement.

Les bascules alimentées par les niveaux de référence des amplificateurs opérationnels sont à logique positive, cette condition impose une entrée toujours négative à l'intégrateur. Cette contrainte ne diminue en rien les possibilités de l'ensemble, en effet, une translation ou une multiplication de la grandeur d'entrée par une constante ne modifie pas la variable de sortie. La module de base pour la valeur des résistances de l'échelle de deux est choisie égale à  $50 \text{ k}\Omega$ . En effet il en résulte une valeur très acceptable pour la résistance de bouclage de l'amplificateur opérationnel associé.

### 5.1.2. Générateur de fonction

Un générateur de fonction parabolique résoud simplement le problème du calcul du carré d'une fonction. Dans le cas particulier que nous envisageons il nous suffit de considérer la branche qui correspond à une entrée négative.

La conception est classique, considérons la cellule de base de la figure 5.1.

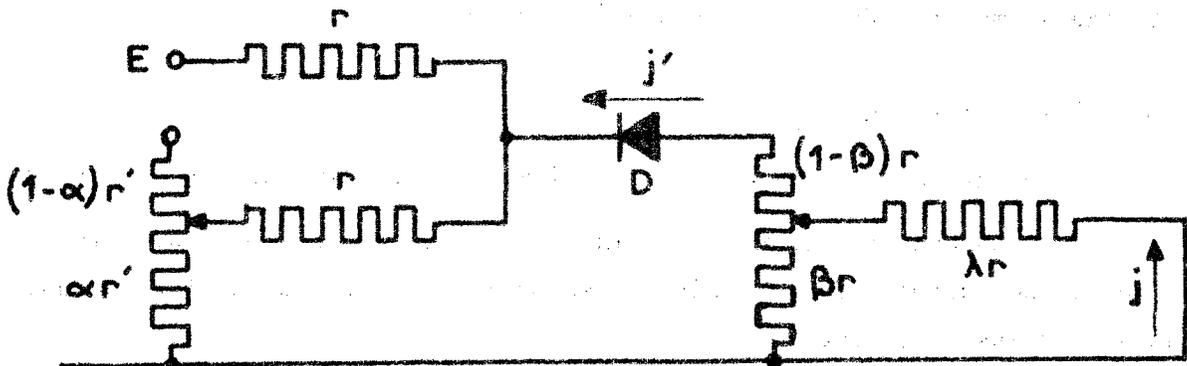


FIGURE 5.1. Cellule de base des générateurs de fonction

Par construction :  $r' \ll r$ , supposons  $|E| > \alpha$  le courant dans la diode devient :

$$j' = \frac{\alpha - E}{2R + r} \quad \text{avec} \quad R = \frac{\lambda + \beta - \beta^2}{\lambda + \beta} r$$

soit :

$$j = j' \frac{\beta}{\lambda + \beta}$$

et il vient :

$$j = \frac{1}{r} \frac{(\alpha - E)\beta}{3\lambda + 3\beta - 2\beta^2}$$

Dans le cas contraire :

$$|E| < \alpha \quad \text{nous avons} \quad j = 0$$

La courbe représentant  $j(E)$  est constituée de deux segments dont l'un part de l'origine avec une pente nulle, l'autre coupe l'axe des abscisses en  $-\alpha$  et sa pente ne dépend que de  $\beta$ . [14]

La mise en parallèle de plusieurs éléments et leur connection à l'entrée d'un amplificateur opérationnel constitue un générateur de fonction par segments. Un réglage convenable des  $\alpha_i$  et  $\beta_i$  permet d'obtenir une fonction parabolique satisfaisante avec une dizaine de cellules élémentaires.

Remarque : [15]

L'emploi de diodes dont la caractéristique courant tension est coudée améliore du moins dans le cas d'une fonction parabolique l'allure de la caractéristique du générateur de fonction.

Dans la réalisation les valeurs choisies pour les résistances sont :

$$r = 500 \text{ K}\Omega \quad r' = 50 \text{ K}\Omega \quad \lambda r = 100 \text{ K}\Omega$$

et la résistance de bouclage de l'amplificateur opérationnel est prise égale à 200 K $\Omega$  ce qui donne un réglage optimum au montage.

## 5.2. ORGANES COMPLÉMENTAIRES

Le résultat du calcul n'est disponible à la sortie de la machine qu'à

l'instant T, il convient donc d'arrêter l'évolution, et de mettre en mémoire, les différentes données à cet instant. D'autre part, il est indispensable de pouvoir simplement réitérer le calcul. Cette opération dans l'état actuel de l'atelier s'effectue manuellement. Nous avons donc adjoint au calculateur un chronomètre électronique et un ensemble de commande .

### 5.2.1. Chronomètre électronique

Cet organe a pour seul but de définir par un seuil l'instant T à partir d'une origine des temps donnés. La réalisation d'un temporisateur présente certaines des difficultés relatives à la construction d'un intégrateur destiné à fonctionner sur longue durée, c'est pourquoi nous avons utilisé cet élément de base pour notre horloge.

Si nous entrons en permanence la moitié de la valeur de référence à l'entrée de l'opérateur décrit au paragraphe 5.1.1, démuné toutefois du traducteur digital analogique, le dernier bistable basculera à l'instant T.

### 5.2.2. Ensemble de commande

La mémorisation de l'état des intégrateurs étant assurée par le capteur, il faut arrêter l'émission des impulsions dès que le temps T est atteint. Pour cela, nous agissons sur les amplificateurs modulateurs en les bouclant en court-circuit.

Cette technique évite les dérives, en effet les sorties restent ainsi identiquement nulles. Un relais électromagnétique à plusieurs contacts commandé par un signal d'horloge assure une réalisation simple de ces bouclages. Les états des bascules, sont alors mis en mémoire puisque l'évolution du système est bloquée, en outre, au même instant, un voyant signale l'arrêt du calcul et la disponibilité du résultat.

Une remise à zéro des mémoires de la machine permet la reprise du calcul et l'analyse d'un nouvel échantillon. Cette opération peut être effectuée à tout instant en particulier lorsqu'il est nécessaire d'interrompre une séquence, par exemple à la suite d'une erreur de manipulation de l'échantillon.

## 5.3. ELEMENTS PERIPHERIQUES

Pour assurer une stabilité de structure aux organes de calcul, il est indispensable d'alimenter ces éléments par des sources de tensions stables. C'est pourquoi nous avons tout d'abord entrepris la réalisation d'une alimentation stabilisée symétrique (figure 5.2.). Celle-ci utilise dans la boucle de réaction



des amplificateurs opérationnels en auto-alimentation.

L'utilisation d'amplificateurs identiques dans les autres éléments du montage donne alors à cette alimentation des caractéristiques qui permettent une utilisation optimale des composants.

#### 5.4. RESULTATS EXPERIMENTAUX

L'installation d'un tel ensemble de calcul dans le complexe industriel impose une connaissance complète des instruments et de leurs possibilités. Dans ce sens le calculateur doit subir deux types de vérification qui concernent, d'une part la précision des résultats fournis, et, d'autre part la mise en route proprement dite de tout l'ensemble ainsi élaboré.

##### 5.4.1. Vérification du calculateur

Il est tout d'abord indispensable de vérifier le fonctionnement du calculateur ; la méthode très simple que nous avons adoptée consiste à lui faire capter des signaux connus pour lesquels l'écart type calculable doit en principe coïncider avec le résultat expérimental.

Pour la mise en oeuvre de ce processus nous avons appliqués à l'ensemble des entrées diverses (échelons, forme d'ondes sinusoïdales et signaux carrés) faciles à obtenir avec une grande précision.

##### Réponse à des échelons

Pour un signal continu la variance est identiquement nulle quelle que soit l'amplitude de l'échelon, le relevé expérimental indique une valeur comprise entre 0,1 et 0,2 volt, lorsque les tensions de référence sont de 20 V. Ce résultat s'explique par la tolérance de l'impulsion admise, sur le contenu des intégrateurs, au paragraphe 4.4, et aussi par la précision des générateurs de fonctions.

##### Réponse à une onde sinusoïdale

A titre expérimental nous avons utilisé le calculateur en vue de l'analyse d'une tension sinusoïdale à laquelle était superposé un signal continu.

Les essais ont été effectués avec une fréquence et une amplitude variables dans une très large gamme, et les mesures ont indiqué une variance indépendante de la fréquence lorsque les périodes d'entrée sont inférieures à

2,5 minutes, et telle que :

$$\sigma^2 = \frac{1}{2} U_m^2$$

$U_m$  amplitude de la tension sinusoïdale d'entrée.

Remarque :

La différence entre la valeur indiquée de la variance et le résultat expérimental reste toujours ces essais entre 0,1 et 0,2V.

Remarque :

Il est à noter que dans les conditions de mise en oeuvre la variance maximum pour une entrée sinusoïdale est égale à 2,5 V, ce qui correspond à une amplitude du signal de 10 V et une tension de référence de 20 V pour une tension continue superposée de 10 V.

Réponse à des signaux carrés

Les signaux carrés présentent la particularité remarquable de présenter la variance la plus grande possible, les résultats expérimentaux sont de qualité égale aux précédents.

5.4.2. Détermination de la longueur de l'échantillon

Comme nous l'avons montré au paragraphe (3.1.) la longueur de l'échantillon où le temps de calcul est un des paramètres les plus importants à déterminer. Dans ce paragraphe nous envisageons une méthode pratique mise en oeuvre sur un échantillon réel dans le but d'obtenir la longueur minimale à analyser.

La vitesse de défilement du capteur est de 3 mètres à la minute, et la sensibilité du capteur est de 40 Volts par millimètre.

Au cours de cette expérience les contenus des intégrateurs sont relevés de minute en minute, ceux-ci affectés des coefficients convenables donnent une valeur de la variance en fonction de la longueur - figure 5,3. (Les échelles de variances ont été portées en  $\text{mm}^2$ ).

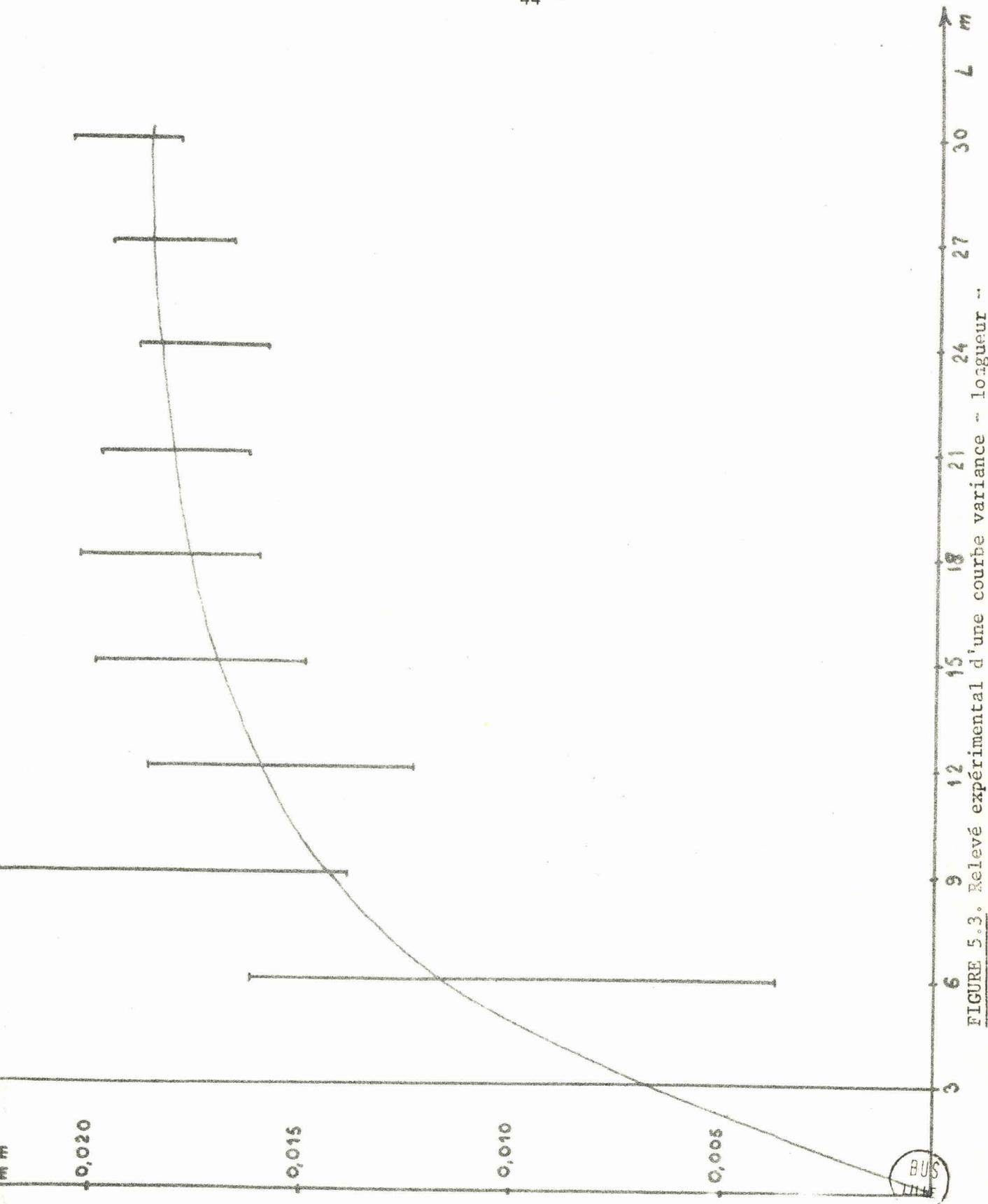


FIGURE 5.3. Relevé expérimental d'une courbe variance - longueur -

Nous retrouvons dans ces relevés l'allure générale des courbes variances-longueurs. La courbe expérimentale permet de conclure à l'existence d'une longueur minimum ; compte tenu de la précision des mesures, celle-ci doit être de 30 mètres pour le type d'échantillon considéré.

L'écart type est alors :

$$\sigma = 0,137 \pm 0,006 \text{ mm}$$

pour un fil de diamètre moyen de 1,4 mm.

### 5.5. CONCLUSION

Les résultats expérimentaux présentés dans ce chapitre permettent de conclure à la fiabilité du calculateur construit.

Il semble d'autre part que les possibilités de l'appareillage proposé dépasse de loin le cadre adopté dans notre étude. En effet, la précision de l'ensemble peut être amélioré et dans ce sens le processus d'intégration n'est pas limitatif ; de plus, les essais effectués ne constituent pas une règle générale d'utilisation, et, seule l'adaptation des paramètres du système aux divers échantillons et son utilisation en usine sur une longue période permettront de définir tous ses avantages par rapport à une méthode de calcul purement manuelle.

## CONCLUSION GENERALE

Le but de nos recherches consistait essentiellement à concevoir et à réaliser un organe de calcul hybride destiné au contrôle de la section d'un échantillon de matière textile.

Les études relatives aux capteurs dans l'industrie lainière ont permis de montrer et de mettre en évidence les nombreuses difficultés présentées par le prélèvement d'une mesure sur le produit traité. Toutefois à partir des informations issues du capteur nous avons envisagé plusieurs méthodes de résolution des calculs statistiques imposés par les utilisateurs. Celles-ci ont montré l'intérêt de l'élaboration d'un calculateur spécialisé tant du point de vue de son utilisation et de sa rapidité qu'au point de vue de la fiabilité, prix de revient, indépendance et possibilités d'améliorations ultérieures.

Les caractéristiques minimales de l'échantillon imposé pour une précision suffisante des résultats justifient la mise en oeuvre d'organes hybrides originaux.

Un prototype de calculateur a été construit et a permis par des essais industriels de déterminer les paramètres de l'échantillon et de servir de prototype à une construction en série semi-industrielle.

En outre le procédé d'intégration développé dans ce mémoire possède des possibilités d'application en calcul hybride tant pour des recherches théoriques qu'expérimentales.

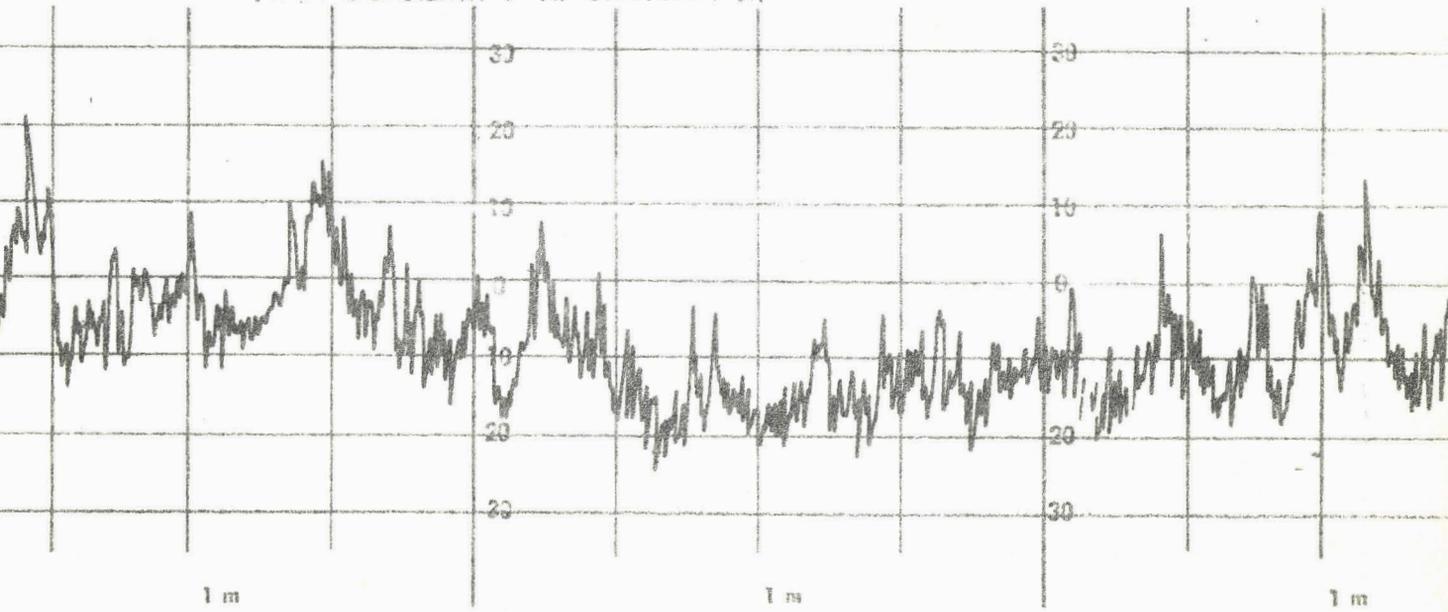
Le calculateur agissant principalement en détecteur de défaut ouvre la voie à une nouvelle voie de recherche consistant en l'élaboration d'un moyen de caractériser les défauts. En effet, le fil constitue le support de son histoire et une localisation de la panne peut aussi être envisagée à partir d'une analyse fréquentielle des signaux élaborés.

C'est dans ce sens qu'une poursuite de nos recherches est envisagée dans le cadre de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique.

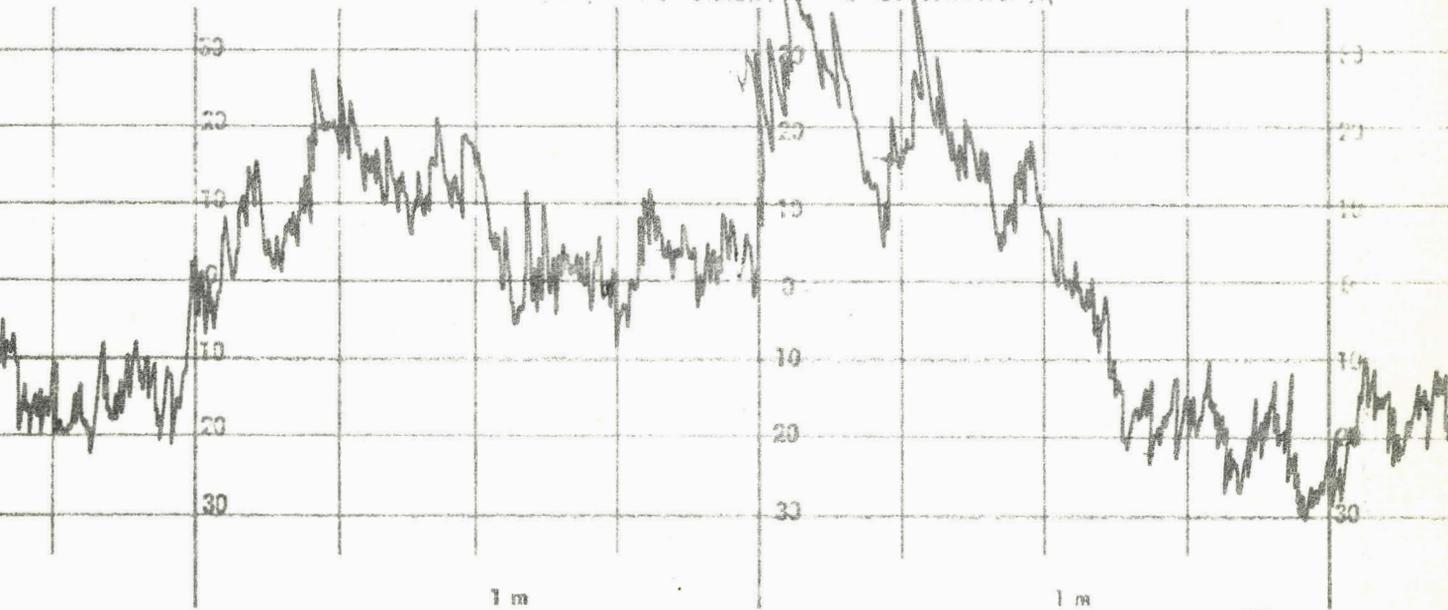
-----

APPENDICE

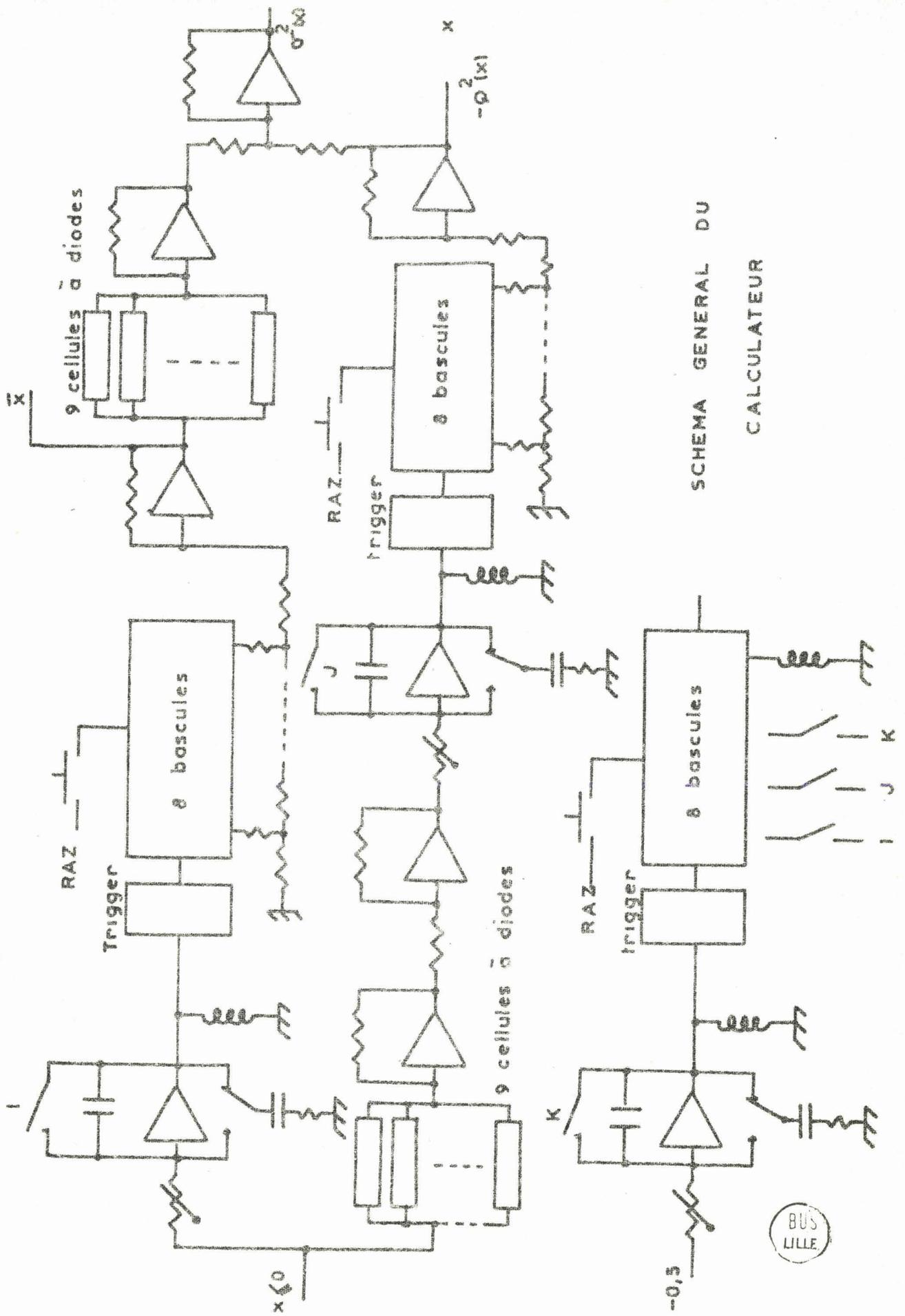
N. V. COGEST. S. A. GENTBRUGGE



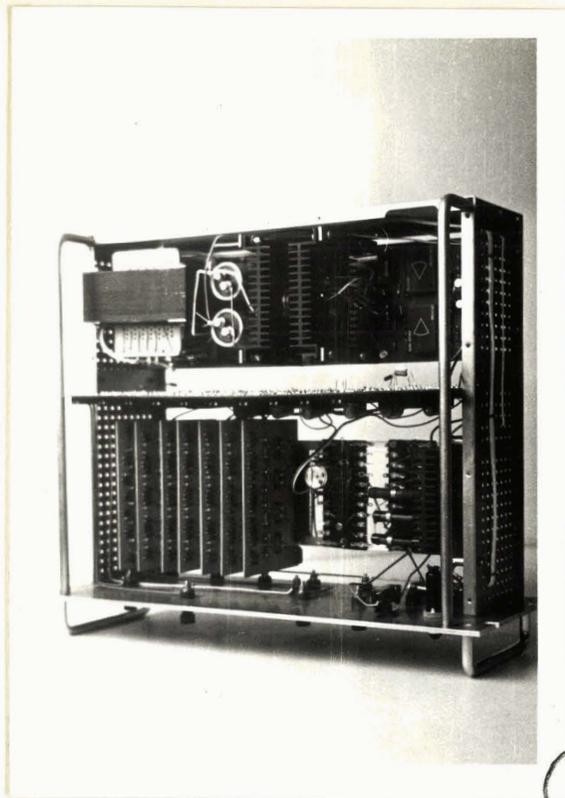
N. V. COGEST. S. A. GENTBRUGGE



Exemples typiques d'enregistrement des variations de l'épaisseur d'un échantillon (graduation en 1/100 de millimètres)

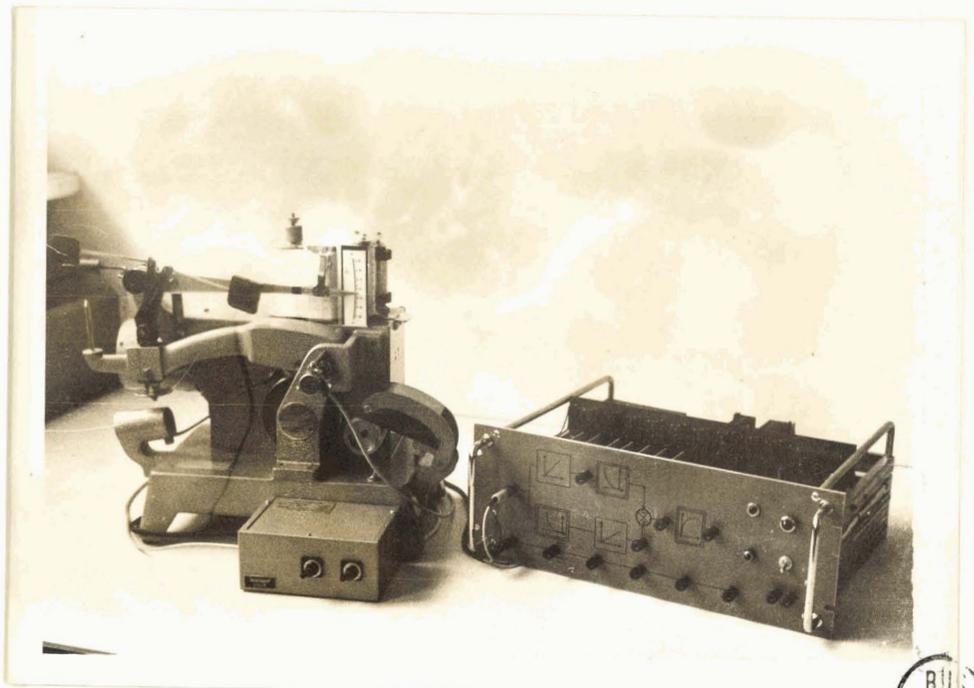


SCHEMA GENERAL DU CALCULATEUR



BUS  
LILLE.

*Vue de dessus du calculateur*



BUS  
LILLE.

*Vue générale de l'ensemble de mesure et de calcul*

## BIBLIOGRAPHIE

- [ 1 ] F. MONFORT  
Aspect scientifique de l'industrie lainière  
Dunod 1960.
- [ 2 ] Rapport du laboratoire d'électronique et d'automatique du Nord (LEANORD)  
Exploitation statistique centralisée de résultats de mesure  
E. 45. 67 R<sub>p1</sub> Juin 1967.
- [ 3 ] J. DEBAENE  
Capteurs de déplacement mécanique  
Techniques de l'ingénieur, Mesures et contrôle R. 780.
- [ 4 ] C. GRUNBERGER  
Centralisation, dépouillement et exploitation Automatique de résultats  
de mesures dans l'industrie.  
Technique de l'ingénieur, Mesures et contrôle R. 650.
- [ 5 ] C. LABROUSSE  
Statistique Dunod 1965.
- [ 6 ] J. BASS  
Elément de calcul de probabilités Masson 1962.
- [ 7 ] A.E. ROGERS et T.W. CONNOLLY  
Applications Industrielles du calcul analogique.  
Dunod 1966
- [ 8 ] S. FIFER  
Analogue Computation  
MC GRAW-HILL BOOK COMPANY

9

F. LAURENT

Les machines hybrides et leurs applications en Automatique —  
2ème Thèse de doctorat ès-Sciences (Mai 1968) Université de Lille.

10

P. VIDAL, M. BOURTON, F. LAURENT

Sur la simulation de l'influx nerveux  
C.R. Acad. Sci. Paris t. 262 p. 450.453 (21 Janvier 1966)

11

R. DEHORS, F. LAURENT

Simulation des fonctions de transfert discrètes sur calculatrice analogique  
pour courant continu  
C.R. Acad. Sci. Paris t.262 p.928.930 (18 Avril 1966)

12

F. LHOTE

La fonction de comptage en Automatique discrète. 2ème thèse de Doctorat  
ès-Sciences (Juillet 1968)  
Université de Lille

13

B.W. STEPHENSON

Analog Digital Conversion Handbook  
Digital equipment corporation 1964

14

F. LHOTE , G. MANESSE

Modèle à saturation et hystérésis pour l'étude analogique des amplificateurs  
rotatifs en régime harmonique.  
Revue générale de l'électricité - février 1966 - t. 75 n° 2

15

J.P. HENRY

Contribution à la simulation des non linéarités des systèmes et amplifica-  
teurs magnétiques  
Thèse de doctorat d'ingénieur (mars 1965) - Université de Lille.

16

*idem à* 8

17

F. LAURENT et C. MAIZIERES

Asservissement à une grandeur quelconque d'un retard pur obtenu par échantillonnage.

Revue Inter électronique n°3 Avril 1967.

18

P. VIDAL et M. BOURTON

Sur la simulation des processus de transmission nerveuse. Application au projet d'un nouveau type de régulateur.

Symposium sur l'informatique médicale et les intelligences artificielles  
Toulouse Mars 1967.

19

F. LAURENT

Stockage de l'information sous forme analogique et simulation des systèmes discontinus.

Revue Automatisme Tome 12 N° 7.8. Juillet Août 1967.

20

KUROKAWA KAZUO, IIDA KIKUO, ONO YUICHI, YAOI AKIHIKO, SUMIKURA FUMIO

Investigation on hybrid computing element using integrated circuit  
5ème Congrès International de AICA 1967

Lausanne 28 Août - 2 Septembre 1967 -

21

ZORAN STOJILJKOVIC

New type of non linear electrical resistance generator

5ème Congrès International de AICA 1967

Lausanne 28 Août - 2 Septembre 1967 -

22

M. BOURTON - J.C. SACRE - R. FLIPO

Sur le fonctionnement d'un système asservi du second ordre à période d'échantillonnage variable.

C.R. Acad. Sci. Paris t.265 p.29-32 (3 Janvier 1968).

23

RL MAYBACH

Hybrid analog digital sample averaging computer for astrac II

Annales de l'association internationale pour le calcul analogique

N° 4 Octobre 1967 Vol. IX.

ANNEXE I

ELEMENTS DE STATISTIQUE

5

6

Une variable aléatoire peut en général être étudiée statistiquement de deux façons différentes, soit en considérant directement la représentation continue de la variable, soit en quantifiant la variable continue de façon à obtenir une série numérique. Ainsi nous présenterons ce rappel en le basant sur le comportement de la variable aléatoire par :

- les valeurs moyennes
- les écarts

A.1.1. Les valeurs moyennes

Les moyennes des grandeurs sont en nombre de quatre :

- la moyenne arithmétique (M)
- la moyenne géométrique (G)
- la moyenne quadratique (Q)
- la moyenne harmonique (H)

Nous ne retiendrons dans cette étude que la moyenne arithmétique M et la moyenne quadratique Q.

- Pour une série numérique, M est donné au moyen de la formule :

$$M = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

ou n est le nombre d'échantillons

- en continu cette formule devient :

$$M = \bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt.$$

il est à noter que la formulation de M en continu constitue une extension de la formulation pour la série numérique lorsque n tend vers l'infini.

- pour une série numérique la moyenne quadratique Q est donné par la formule :

$$Q = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \right]^{1/2}$$

de même, celle-ci s'étend à une variable continue et devient alors :

$$Q = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

### A.1.2. Les écarts

Deux courbes possédant une valeur moyenne identique peuvent avoir une dispersion différente et il est nécessaire de caractériser le comportement de la courbe autour de sa tendance centrale par un certain nombre de paramètres.

On définit alors :

- le range  $R$
- la déviation quartile
- l'écart quadratique moyen  $\bar{\sigma}$
- la variance  $\sigma^2$
- le coefficient de dispersion  $\gamma$
- les moments simples ou centrés
- le Kurtosis

Nous ne rappellerons ici que les définitions utilisées dans le problème considéré.

- Le range R est l'étendue existant entre la plus haute et la plus basse notation de la série.

- l'écart quadratique moyen  $\sigma$  ou écart-type est défini pour une série numérique au moyen de la formule :

$$\sigma = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2}$$

la variance est égale au carré de l'écart type c'est-à-dire le moment centré d'ordre 2 ( $\mu_2$ ). Toutefois bien souvent en pratique on préfère prendre la formule développée

$$\sigma = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2 \right]^{1/2}$$

c'est-à-dire :

$$\sigma = \left[ Q^2 - M^2 \right]^{1/2}$$

En continu, il vient :

$$\sigma = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt - \left[ \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \right]^2 \right]^{1/2}$$

Afin de rendre les calculs plus simples et éviter ainsi les erreurs on peut utiliser une moyenne auxiliaire dite de travail.

Pour cela il est nécessaire de faire un changement de variable c'est-à-dire de remplacer  $x_i$  par une variable  $z_i$  telle que :

$$x_i = x_0 + a z_i$$

$x_0$  et  $a$  étant des constantes

la moyenne devient :

$$\bar{x} = x_0 + a \bar{z}$$

$$\text{et : } \sigma_x = |a| \sigma_z$$

l'amélioration se situe dans le fait suivant :

En choisissant astucieusement le changement de variable, le calcul proprement dit se fait sur la variable  $z$ .

le coefficient de dispersion  $\gamma$

Le coefficient de dispersion  $\gamma$  est égal par définition au rapport :

$$\gamma = \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

il s'exprime en pourcentage et permet ainsi la comparaison de distribution statistique dont les unités sont différentes.

Moments simples ou centrés

On appelle moment simple d'ordre  $k$  d'une série numérique la valeur :

$$m_k = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^k}{n} \quad \text{le moment centré}$$

est alors :

$$\mu_k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^k}{n}$$

Remarque :

On retrouve le résultat  $\mu_2 = \sigma^2$

## TABLE DES MATIERES

### INTRODUCTION GENERALE

Pages

### PREMIERE PARTIE

<u>Introduction</u> .....	1
<u>CHAPITRE I : Enoncé du problème</u> .....	2
1.1. Généralités et données du problème.....	2
1.2. Présentation des différents capteurs utilisés en réguli- mètre dans les industries textiles.....	2
1.3. Description du capteur utilisé.....	4
1.4. Réponse du capteur à divers signaux d'entrée.....	4
1.4.1. Hypothèses	
1.4.2. Réponse du capteur à un échelon d'épaisseur	
1.4.3. Réponse du capteur à une entrée sinusoïdale	
1.5. Etude des diverses non-linéarités du capteur.....	11
 <u>CHAPITRE II : Principe de la réalisation</u> .....	 13
2.1. Moyen de recueillir l'information.....	13
2.1.1. Capteurs de déplacement mécanique	
2.1.2. Lecteur de courbes	
2.2. Examen approfondi de diverses solutions envisageables....	14
2.2.1. Exposé du problème	
2.2.2. Calculateur en ligne	
2.2.3. Calculateur hors ligne	
2.2.4. Transport des informations	
2.3. Choix de l'organe de calcul.....	18
2.3.1. Traitement de l'information sur calculateur EMD 8.48	
2.3.2. Traitement sur calculateur de forte puissance	
2.3.3. Utilisation d'un calculateur spécialisé	
2.3.4. Conclusion.	

<u>DEUXIEME PARTIE : Calcul de l'écart type</u> .....	20
<u>CHAPITRE III : Analyse statistique</u> .....	21
<u>Introduction</u> .....	21
3.1. Choix de la longueur de l'échantillon.....	22
3.2. Principe du calculateur.....	25
3.3. Conclusion.....	27
<u>CHAPITRE IV : Opérateur hybride de base</u> .....	28
<u>Introduction</u> .....	28
4.1. Réalisation du convertisseur analogique digital - Principe de fonctionnement.....	28
4.2. Compteur.....	30
4.3. Convertisseur digital analogique.....	30
4.4. Intégrateur hybride de base.....	32
4.5. Intégrateur hybride généralisé.....	36
4.6. Conclusion.....	36
<u>CHAPITRE V : Réalisation et résultats pratiques</u> .....	37
<u>Introduction</u> .....	37
5.1. Organe de calcul.....	37
5.1.1. Intégrateurs	
5.1.2. Générateur de fonction	
5.2. Organes complémentaires.....	39
5.2.1. Chronomètre électronique	
5.2.2. Ensemble de commande	
5.3. Eléments périphériques.....	40
5.4. Résultats expérimentaux.....	42
5.4.1. Vérification du calculateur	
5.4.2. Détermination de la longueur de l'échantillon	
5.5. Conclusion.....	45

CONCLUSION

APPENDICE

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE

