

N° D'ORDRE 35

50376  
1961  
9



50376  
1961  
9

# THÈSES

Présentées à la  
Faculté des Sciences  
de l'Université de Lille  
pour obtenir le titre d'Ingénieur Docteur  
par

**Georges BIEZUNSKI**

*Première Thèse :*

APPAREIL POUR LE DOSAGE EN CONTINU  
DE LA TENEUR EN EAU DU CYCLOHEXANE  
PAR LA MESURE DES VARIATIONS DE PERMITTIVITE :  
« PERMITTOR »

*Deuxième Thèse :*

PROPOSITIONS DONNEES PAR LA FACULTE

Soutenues de 26 juin 1961, devant la Commission d'Examen

M. R. DEHORS . . . . .	<i>Président</i>
M. R. GABILLARD . .	} <i>Examineur</i>
M. A. LEBRUN . . . . .	
M. R. ARNOULT . . . .	

# LISTE DU PERSONNEL ENSEIGNANT DE LA FACULTÉ DES SCIENCES

## *Doyen Honoraire :*

M. PRUVOST.

## *Professeurs Honoraires :*

MM. ARNOULT, BEGHIN, CAU, CHAPELON, CHAUDRON, CORDONNIER, DECARRIERE, DEHORNE, DOLLE, FLEURY, P. GERMAIN, LAMOTTE, LELONG, M<sup>me</sup> LELONG, MM. MAZET, A. MICHEL, NORMANT, PARISELLE, PASCAL, PAUTHENIER, ROUBINE, WIEMANN, ZAMANSKY.

## *Professeurs :*

M. LEFEBVRE, Doyen, Professeur de Chimie Appliquée et Chimie de la Houille.  
M. ROUELLE, Assesseur, Professeur de Physique et Electricité Industrielles.  
M. BONNEMAN-BEMIA, Professeur de Chimie et Physico-Chimie industrielles.  
M. BONTE, Professeur de Géologie appliquée.  
M. CORSIN, Professeur de Paléobotanique.  
M. DECUYPER, Professeur de Mathématiques.  
M. DEFRETIN, Professeur de Biologie Marine.  
M. DEHEUVELS, Professeur d'Analyse supérieure et Calcul des Probabilités.  
M. DEHORS, Professeur de Physique industrielle.  
M. DELATTRE, Professeur de Géologie.  
M<sup>le</sup> DELWAULE, Professeur de Chimie minérale.  
M. DESCOMBES, Professeur de Calcul différentiel et intégral.  
M. DURCHON, Professeur de Zoologie.  
M. GABILLARD, Professeur de Radioélectricité et Electronique.  
M. GERMAIN, Professeur de Chimie générale et Chimie organique.  
M. GLACET, Professeur de Chimie.  
M. HEIM de BALSAC, Professeur de Zoologie.  
M. HEUBEL, Professeur de Chimie.  
M. HOCQUETTE, Professeur de Botanique générale et appliquée.  
M. KAMPE de FERIET, Professeur de Mécanique des Fluides.  
M. KOURGANOFF, Professeur d'Astronomie.  
M. LEBEGUE, Professeur de Botanique.  
M. MARTINOT-LAGARDE, Professeur de Mécanique des Fluides.  
M. PARREAU, Professeur de Mathématiques.  
M. PEREZ, Professeur de Physique.  
M. POITOU, Professeur d'Algèbre supérieure.  
M. ROIG, Professeur de Physique générale.  
M. ROSEAU, Professeur de Mécanique rationnelle et expérimentale.  
M. WATERLOT, Professeur de Géologie houillère.

## *Professeurs sans chaire :*

M<sup>le</sup> CHAMFY, Professeur de Mathématiques.  
M. GUILBERT, Professeur de Physique.  
M. LEBRUN, Professeur de Radioélectricité et électronique.  
M. MARION, Professeur de Chimie.  
M<sup>le</sup> MARQUET, Professeur de Mathématiques.  
M. MONTREUIL, Professeur de Chimie biologique.  
M. SAVARD, Professeur de Chimie générale.  
M. TILLIEU, Professeur de Physique.  
M. TRIDOT, Professeur de Chimie appliquée.  
M. WERTHEIMER, Professeur de Physique.

## *Maîtres de conférences :*

M. BECART, Physique.  
M. BOUISSET, Physiologie animale.  
M. CERF, Mathématiques.  
M. GONTIER, Mécanique des Fluides.  
M<sup>le</sup> LENOBLE, Physique.  
M. LACOMBE, Mathématiques.  
M. LINDER, Botanique.  
M. LUCQUIN, Chimie minérale.  
M. LURCAT, Physique.  
M. MAUREL, Chimie.  
M. POLVECHE, Géologie.  
M. SCHALLER, Zoologie.  
M. VIVIER, Zoologie.

## *Secrétaire :*

M<sup>me</sup> BOUCHEZ.



A ( MICHEL  
) EDITH  
( SERGE  
) NADINE ou JACQUES



Ce travail a été effectué pour le compte et dans les locaux des Etablissements KUHLMANN.

Nous tenons à remercier la Direction et Monsieur DEMARLES Chef du Département Mesures et Automaticité, des facilités accordées pour son exécution.

Monsieur le Professeur R. ARNOULT, alors Directeur de l'Institut de Radioélectricité de la Faculté des Sciences de Lille, au problème qui lui était soumis, a suggéré la solution qui a été réalisée et en a suivi l'évolution; qu'il veuille bien trouver ici l'expression de notre sincère et respectueuse gratitude.

Monsieur le Professeur CABILLARD, actuel Directeur de ce Laboratoire, Monsieur le Professeur DEHORS ont bien voulu s'intéresser à nos efforts et nous les remercions bien vivement.

Nous avons profité de l'aide constante, bienveillante et attentive de Monsieur le Professeur LEBRUN et de Monsieur LIEBAERT, Chef de Travaux et nous leur devons d'avoir surmonté les diverses difficultés rencontrées. Nous leur exprimons notre profonde reconnaissance.

Monsieur CORBISIER, Ingénieur responsable du Laboratoire d'Electronique des Ets KUHLMANN a considérablement facilité la bonne exécution de la phase finale. Qu'il en soit vivement remercié.

Madame BIEZUNSKI en acceptant un surcroît de peine, a su nous ménager le loisir pour mener à bien ce travail. Elle a été une compagne attentionnée, acceptant d'une humeur égale, les diverses manifestations des obstacles auxquels nous nous sommes heurtés. Qu'elle trouve ici témoignage de la profonde gratitude et de l'affection qu'elle mérite.

-----

APPAREIL POUR LE DOSAGE EN CONTINU

DE LA TENEUR EN EAU DU CYCLOHEXANE

PAR LA MESURE DES VARIATIONS DE

PERMITTIVITE :

" P E R M I T T O R "

---

---

- RESUME -

Ce travail est relatif à la réalisation d'un pont de mesure du type Wheastone généralisé, comprenant une capacité dans chaque branche.

Ce pont est très sensible : la tension détectée est <sup>6</sup> 10 fois plus faible que la tension d'alimentation de fréquence 100 k Hz.

Il est aussi très stable grâce à l'emploi d'une méthode de zéro à équilibrage automatique.

L'utilisation de ce pont pour la mesure de très faibles teneurs en eau (0 à 50 parties par million) dans le cyclohexane est décrite.

Les nombreuses difficultés rencontrées tant pour la construction que pour l'élimination des interférences parasites, sont indiquées et les solutions adoptées pour les surmonter sont précisées.

Les résultats obtenus sont énoncés.

Des considérations générales sur l'automatisation de ponts d'impédance à deux variables sont ajoutées.

- P L A N -

- Position du problème :

Introduction

Caractéristiques du cyclohexane

Mesures préliminaires

Caractéristiques exigées de l'appareil

1ère Partie : Appareil réalisé

Schéma général

1 : Appareillage électronique

1. 1. : Pont de mesure

1.1.1. Sensibilité

1.1.2. Cellules de mesure  $C_3$  et  $C_4$

1.1.3. Condensateurs tête de pont  $C_1$  et  $C_2$

1.1.4. Condensateur d'équilibrage

1. 2. : Transformateur d'alimentation

1. 3. : Générateur d'alimentation

1. 4. : Détecteur de déséquilibre

1. 5. : Asservissement de rééquilibrage

1.5.1. Equations du déséquilibre

1.5.2. Diagramme fonctionnel du système asservi

2 : Circuit du cyclohexane

2. 1. : Mouvement des liquides

2. 2. : Déshydratation du cyclohexane

2. 3. : La thermostatisation

3 : Résultats d'essais

3. 1. : Essais de stabilité de zéro.

2ème Partie : Sur l'équilibrage automatique des Ponts  
d'Impédance

Exposé du problème

- 1 : Variations de la tension de déséquilibre en fonction d'une impédance
  - 1.1. Dans le cas général, loin de l'équilibre
    - 1.1.1. Méthode analytique de Seletzky
    - 1.1.2. Méthode vectorielle de Hoadley et Graham
  - 1.2. Près de l'équilibre
    - 1.2.1. Les paramètres de réglage sont dans la même branche
    - 1.2.2. Les paramètres de réglage sont dans des branches différentes
- 2 : Convergence vers zéro de la tension de déséquilibre
  - 2.1. Par la recherche manuelle de zéros successifs
  - 2.2. Avec emploi de détecteurs de phase
    - 2.2.1. Au voisinage de l'équilibre
    - 2.2.2. Loin de l'équilibre
- 3 : Le pont automatique considéré comme un système asservi

Bibliographie.

- POSITION DU PROBLEME -

INTRODUCTION :

La fabrication industrielle de nombreux produits et en particulier de certains plastiques exige l'utilisation de matières premières de très haute pureté, ce qui pose des problèmes d'analyse très fine.

C'est ainsi que, pour le contrôle du cyclohexane utilisé pour la synthèse du polyéthylène, il faut doser en continu des teneurs en eau de 0 à 50 parties par million. En fait, une teneur supérieure à 7 p.p.m. doit arrêter la réaction. Dilater l'échelle de 0 à 10 p.p.m. serait donc apprécié.

Il s'agit, en outre, d'une mesure industrielle, cela sous-entend que ce dosage ne doit pas être effectué dans un laboratoire conditionné sous les yeux d'un spécialiste averti et attentif, s'entourant de précautions multiples.

L'appareil doit fonctionner seul, à l'atelier, sur un liquide brut, sans manipulation d'aucune sorte, donner le résultat de son analyse dans la minute qui suit, pouvoir transmettre à distance ce résultat et se prêter éventuellement à la régulation automatique.

La réalisation d'un tel appareil a été entreprise en Janvier 1957, des résultats encourageants ont été obtenus vers Juin 1959.

Parallèlement, une étude générale des problèmes rencontrés pour l'automatisation des ponts d'impédance à deux variables a été effectuée.

- CARACTERISTIQUES DU CYCLOHEXANE - (1)

- Formule :  $C_6H_{12}$  (Hexahydrobenzène)
- Masse moléculaire : 84,16 g
- Masse volumique : 0,779 g/cm<sup>3</sup>
- Point de fusion : 6,5° C.
- Point d'ébullition : 80,7° C. sous la pression atmosphérique
  
- Solubilité dans 100 parties : eau : insoluble  
alcool : infini  
éther : infini
  
- Permittivité : = 2,023 à 20°C.  
= 2,015 à 25°C.  
pertes indécélables

- MESURES PRELIMINAIRES -

Leur but a été de déterminer la variation de permittivité du cyclohexane due à l'introduction de l'eau.

Ces mesures ont été effectuées au laboratoire de Radioélectricité et d'Electronique de la Faculté des Sciences de Lille, au moyen d'un appareil à double battement permettant des mesures très fines de permittivité.

La température influant notablement sur les mesures, une thermostatisation sérieuse a été nécessaire.

Le cyclohexane préparé avec différentes teneurs en eau nous a été fourni en ampoules scellées.

Il nous semblait alors, que pour éviter toute contamination par l'humidité de l'air atmosphérique, sa manipulation en atmosphère contrôlée était nécessaire.

Explicitons ces différents points :

Capacimètre du Laboratoire de Radioélectricité :

Il est décrit en (2)

Nous en donnons simplement le principe :

Un circuit oscillant comprend, montés en parallèle, un condensateur à variation linéaire de capacité  $C_1$  et une cellule capacitive contenant le diélectrique étudié.

La mesure est faite à capacité constante : l'augmentation de capacité due au diélectrique est compensée par une diminution de  $C_1$  ; cette compensation est réalisée lorsque la fréquence de l'oscillation a repris sa valeur initiale.

Celle-ci est repérée par battement avec la fréquence porteuse de Droitwich (200kHz) connue à  $10^{-7}$  près.

Grâce à l'exécution très soignée du condensateur  $C_1$ , à la thermostatisation poussée de l'ensemble, on peut apprécier le 1/1000 de picofarad sur une variation de 24 picofarads.

#### Manipulation du cyclohexane à l'abri de l'air :

Le transvasement de l'ampoule scellée dans un flacon a eu lieu, dans une boîte à gants, balayée par de l'azote.

Le détail du remplissage de la cellule de mesure est donné figure 1.

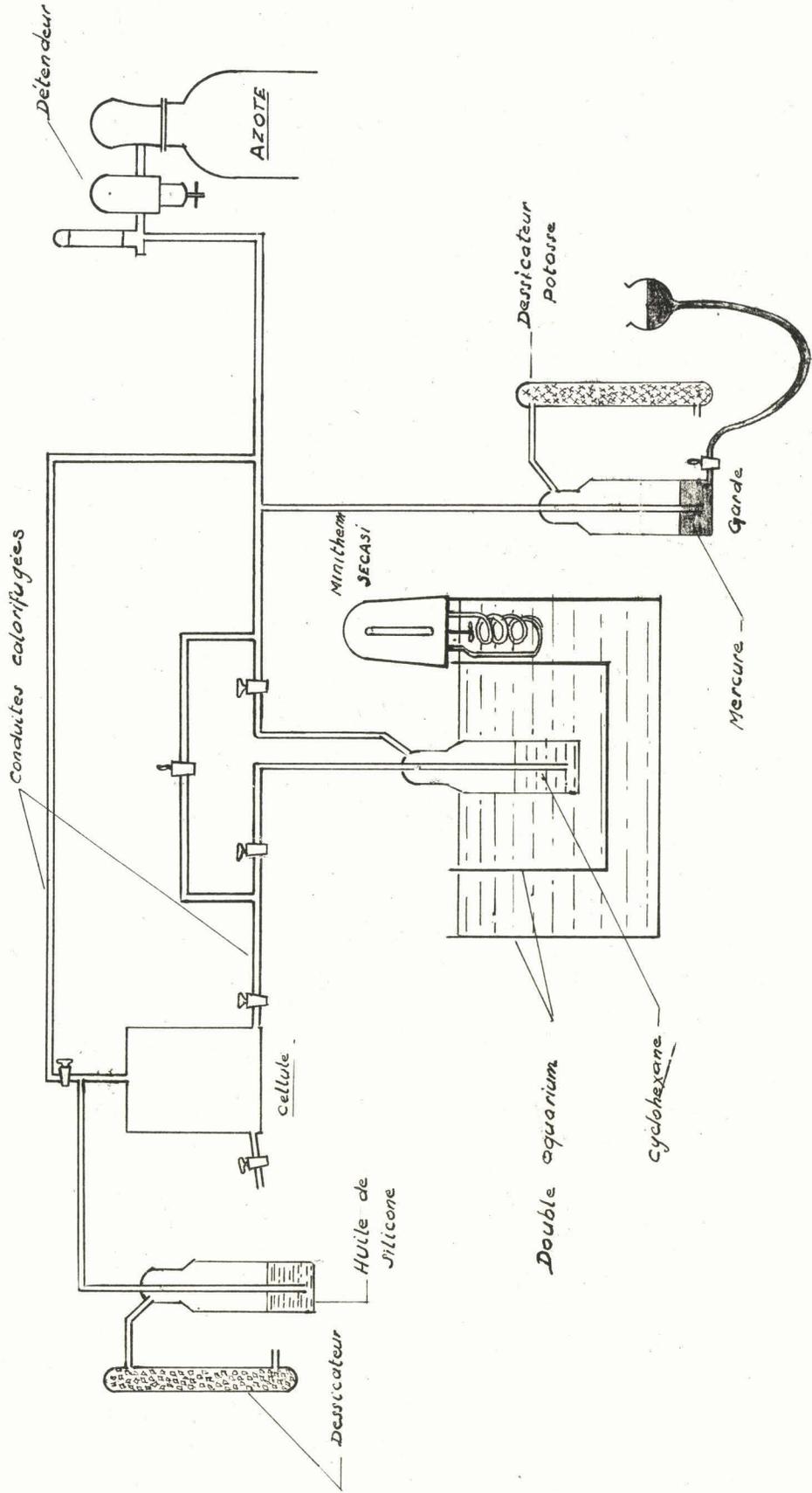
Dans un premier temps, on balaie l'ensemble des tuyauteries par un courant d'azote. Plaçant ensuite les robinets en position convenable, on refoule par action de la pression d'azote, le cyclohexane dans la cellule de mesure.

L'évacuation de la cellule est obtenue en envoyant la pression d'azote en tête de la cellule.

Une garde de mercure à niveau réglable permet de régler la vitesse de remplissage de la cellule.

L'azote de la cellule s'échappe à travers une garde de silicone jouant le rôle de soupape anti-retour.

REMPLISSAGE DE CELLULE A L'ABRI DE L'ATMOSPHERE



le 27.8.59

Fig: 1

Les mises à la pression atmosphérique de ces soupapes sont réalisées à travers des dessiccateurs.

L'azote employé est la qualité R de l'AIR LIQUIDE.

Pour permettre des mesures reproductibles, le flacon de cyclohexane est immergé dans un bain thermostatique.

Celui-ci se compose de deux aquariums remplis d'eau. La température de l'eau extérieure est maintenue constante à  $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$ ., grâce à un thermostat Minitherm SECASI.

Remarque : Lors des premières mesures de permittivité, une dérive lente de la valeur mesurée a été observée.

Après bien des investigations, il a été découvert que le cyclohexane dissolvait des fractions infimes de tubes souples de polyéthylène qui assuraient les liaisons entre les différentes tuyauteries.

La dérive disparut lorsque des tubes en téflon furent utilisés.

Résultats des mesures :

La teneur en eau du cyclohexane est déterminée par la méthode de Karl Fischer.

Premières séries de mesures avec une cellule de 50 picofarads à 20°C.

<u>Teneur : Karl Fischer</u>	<u>Valeurs relevées</u>
5 p.p.m. $\pm$ 100%	$(3\ 144 \pm 2) 10^{-3}$ picofarads
19p.p.m. $\pm$ 25%	$(3\ 150 \pm 2) 10^{-3}$ picofarads

soit très approximativement, une variation relative de  $\frac{5 \cdot 10^{-3}}{50}$  pour 25 p.p.m. de variation de la teneur en eau.

Deuxième série de mesures : mêmes conditions

<u>Teneur : Karl Fischer</u>	<u>Valeurs relevées</u>
1 p.p.m. $\pm$ ?	(3 154 $\pm$ 2) $10^{-3}$ picofarads
34 p.p.m. $\pm$ 20%	(3 161 $\pm$ 2) $10^{-3}$ picofarads

soit une variation de  $\frac{7 \cdot 10^{-3}}{50}$  pour une teneur en eau comprise entre 27 p.p.m. et 41 p.p.m.

En vérité, ces résultats permettent seulement d'émettre un jugement qualitatif sur l'influence de l'eau.

Cette imprécision est la conséquence directe des difficultés de doser d'aussi faibles quantités d'impuretés.

La méthode de Karl Fischer est la seule utilisable et sa précision est aléatoire.

Néanmoins, pour fixer les idées au départ, nous adoptons le chiffre suivant de variation relative de la capacité en fonction de la teneur en eau :

$$\frac{6 \cdot 10^{-3} \text{ picofarads}}{50 \text{ picofarads}} / \frac{1}{25 \text{ p.p.m.}} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ par p.p.m.}$$

Autrement dit, si par exemple, un condensateur rempli du cyclohexane a une capacité active de 200 picofarads, une variation de 1 p.p.m. de la teneur en eau de cyclohexane entraînera une variation de capacité de  $10^{-3}$  picofarads.

- CARACTERISTIQUES EXIGÉES DE L'APPAREIL -

1) Sensibilité :

Elle doit être de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-6}$

La stabilité du zéro doit être supérieure et nous la fixons à  $10^{-6}$ .

2) La mesure doit être continue.

Le liquide doit circuler dans l'appareil et toute influence hydrodynamique doit être éliminée.

3) Le cyclohexane industriel peut renfermer d'autres impuretés qui risquent d'interférer avec le dosage d'eau.

Une méthode différentielle entre une fraction de cyclohexane complètement déshydratée et une fraction brute est nécessaire.

4) L'adoption de cette solution oblige à prévoir une homogénéisation et une constance de la température des 2 liquides au 1/100 de degré.

En effet, nous avons vu que la permittivité du cyclohexane était de :

2,023 à 20°C.

et 2,015 à 25°C.

Si la capacité à vide d'une cellule de mesure est de 100 picofarads, la variation de capacité entraînée par une variation de température de 5°C. sera de :

$$\Delta C = 100 \text{ pF} \cdot (2,023 - 2,015) = 800 \cdot 10^{-3} \text{ pF}/5^\circ\text{C}$$

Si la sensibilité du pont est de l'ordre de  $10^{-3}$  pF (et correspond à une variation de 1 p.p.m. d'eau) on décèlera une variation ou une différence de température de :

$$\frac{5^\circ\text{C} \cdot 10^{-3}}{800 \cdot 10^{-3}} = 0,75 \cdot 10^{-2}^\circ\text{C} \text{ soit } 3/4 \text{ de centième de } ^\circ\text{C}.$$

Les circuits doivent donc être aussi symétriques que possible.

5) L'expérience a montré que l'apparition de bulles perturbait gravement la mesure.

Pour y remédier, deux remèdes sont possibles :

- Comprimer le liquide à l'aide d'une pompe.

- Aménager son cheminement à travers les différents organes de telle manière que sa température aille toujours en décroissant jusqu'aux cellules de mesure.

On sait en effet, qu'un liquide froid absorbe davantage de gaz qu'un liquide chaud.

6) L'échelle désirée s'étend 0 à 50 p.p.m., mais les conditions d'utilisation de l'appareil sont telles que ses indications sont surtout intéressantes dans la zone 0-10 p.p.m. que l'on souhaite dilatée.

7) La mesure doit pouvoir être transmise à distance à une salle de contrôle centralisé.

I - 1ère Partie :

A P P A R E I L      R E A L I S E

SCHEMA    GENERAL    (figure 2)

Le cyclohexane, de débit 10 litres par heure, est scindé en deux parties :

- L'une va directement à une cellule du pont de mesure.
- L'autre pénètre dans déshydrateur à contre-courant d'azote et sort complètement déshydratée.

Elle est alors envoyée dans une seconde cellule du pont de mesure.

Le mouvement de ces liquides est assuré par une pompe double qui permet de vaincre également la contre-pression à la sortie des cellules. Cette contre-pression est nécessaire pour éviter la formation de bulles.

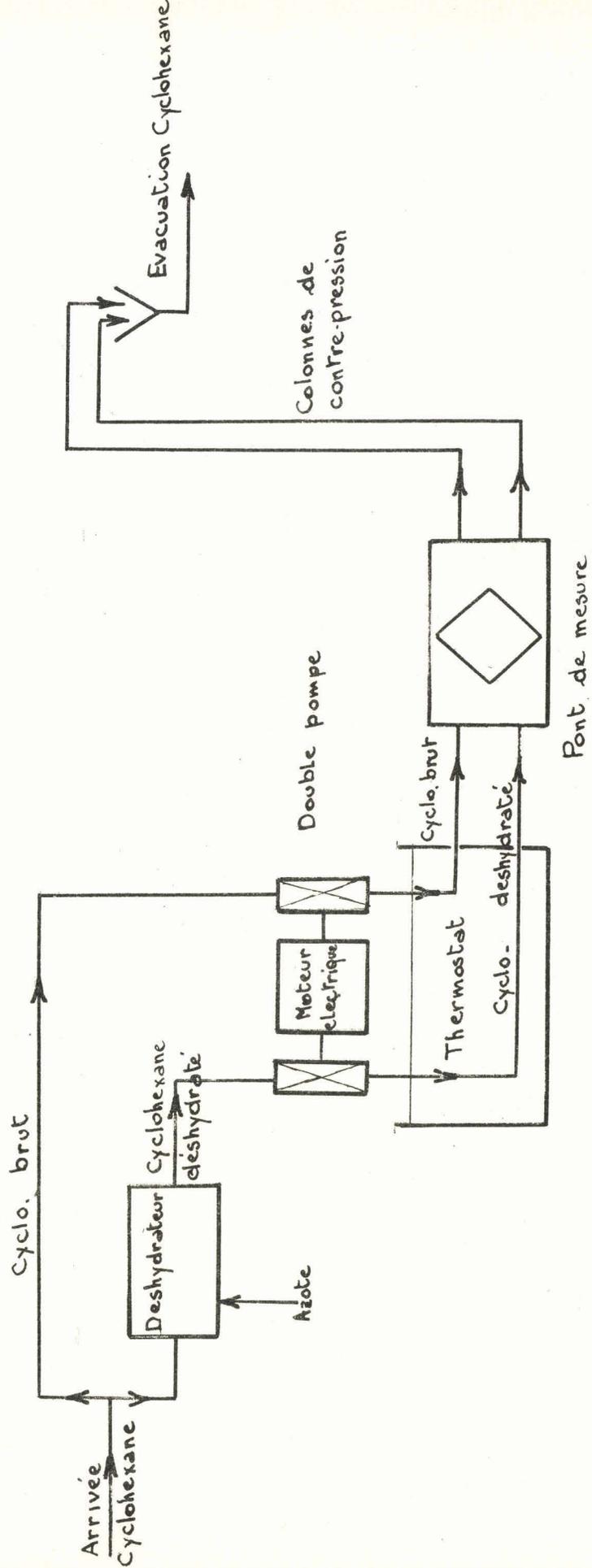
La température des deux liquides est homogénéisée et maintenue constante par la traversée d'un bain thermostaté.

La photographie de la figure 3 montre un aspect de l'ensemble de l'appareillage.

Nous allons décrire successivement :

- 1 : l'appareillage électronique
- 2 : Le circuit du cyclohexane
- 3 : Les résultats d'essais.





Permittor  
Schema de principe

## I - APPAREILLAGE ELECTRONIQUE

### Pourquoi avoir choisi une méthode de pont ?

La méthode du pont, dérivée du Pont de Wheastone, est une méthode idéale pour des mesures différentielles.

Par ailleurs, on sait en métrologie, que la précision d'une méthode de zéro ne dépend, en dernière analyse, que de la fidélité de l'étalon de comparaison et de la sensibilité du détecteur d'écart.

Dans notre cas particulier, profitant du fait que les traces infimes d'eau n'introduisent pratiquement pas de pertes, on peut ramener ces mesures à des comparaisons entre capacités pures.

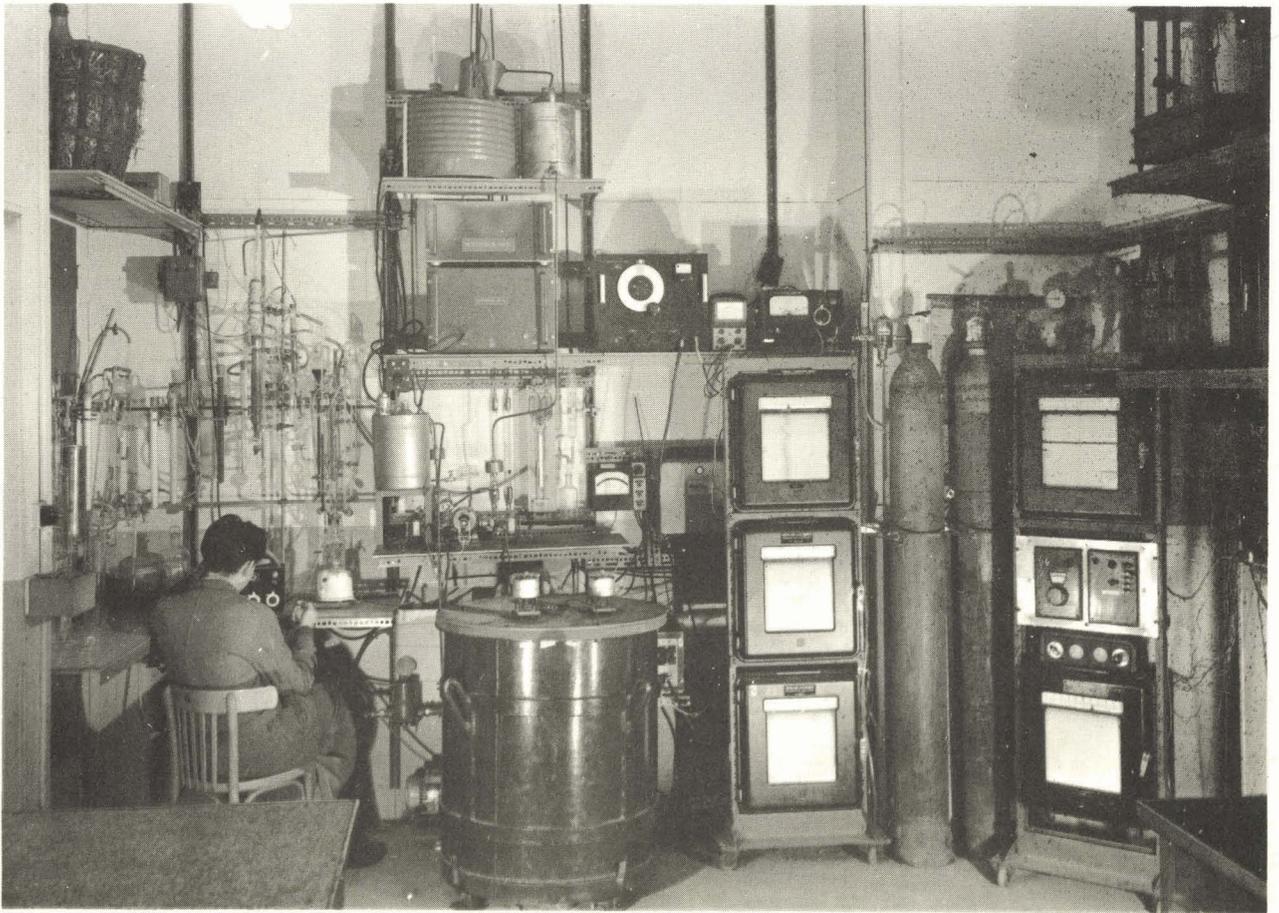
Or, il se trouve qu'un condensateur est défini essentiellement par des considérations géométriques et que sa stabilité est fonction de la rigidité mécanique de ses armatures.

Il est donc raisonnable de penser qu'une construction mécanique soignée et une thermostatisation convenable permettront d'atteindre la stabilité de  $10^{-6}$  requise.

La sensibilité ne présente pas de difficultés majeures, sachant qu'un détecteur peut couramment réagir à des signaux de l'ordre de 2 microvolts à la fréquence choisie, il suffit de produire un signal d'alimentation à amplitude suffisante : 25 volts dans notre cas.

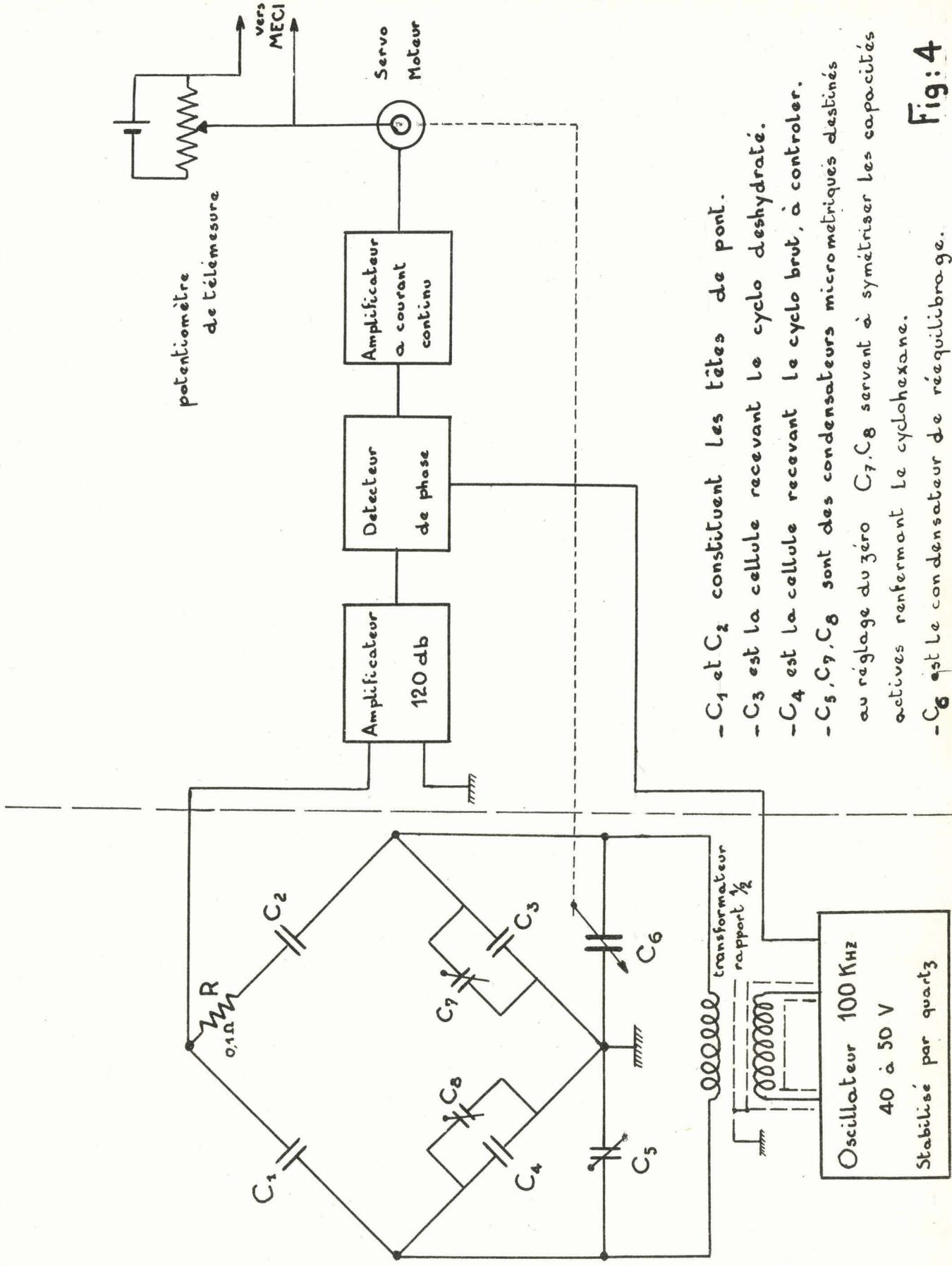
La puissance consommée est très faible.

La réalisation de l'élément étalon de comparaison est plus délicate, mais uniquement, par suite de la grande démultiplication nécessaire pour couvrir la faible échelle.



# Pont de mesure

# Amplification et enregistrement



- $C_1$  et  $C_2$  constituent les têtes de pont.
- $C_3$  est la cellule recevant le cyclo deshydraté.
- $C_4$  est la cellule recevant le cyclo brut, à contrôler.
- $C_5, C_7, C_8$  sont des condensateurs micrométriques destinés au réglage du zéro  $C_7, C_8$  servent à symétriser les capacités actives renfermant le cyclohexane.
- $C_6$  est le condensateur de rééquilibre.

Fig: 4

Il peut être profilé suivant une loi arbitraire, ce qui permet de dilater l'échelle dans une certaine région.

La construction d'un asservissement de rééquilibrage automatique à une seule variable, est également de technique courante.

Description succincte :

Le schéma général est représenté sur la figure 4 :

On distingue :

Un pont de quatre capacités pratiquement pures :

$C_1, C_2, C_3, C_4.$

$C_1$  et  $C_2$  constituent les têtes du pont.

$C_3$  et  $C_4$  sont les cellules recevant le cyclohexane brut et le cyclohexane déshydraté.

$C_6$  est le condensateur de rééquilibrage.

$C_7, C_8, C_5$  sont des condensateurs micrométriques destinés au réglage du zéro.

R sert à équilibrer les pertes résiduelles très faibles.

Ce pont est alimenté sous 25 volts, 100kHz à travers un transformateur de rapport 1/2.

La tension de déséquilibre après amplification, attaque un détecteur de phase.

Celui-ci produit une tension continue dont l'amplitude est proportionnelle au signal de déséquilibre et dont la polarité s'inverse avec la phase de celui-ci par rapport à la tension d'alimentation.

Le signal détecté, une nouvelle fois amplifié, commande le mouvement d'un servo-moteur attelé au condensateur de rééquilibrage et au curseur d'un potentiomètre de télémessure.

Fonctionnement :

Considérons tout d'abord le système à l'équilibre.

Le pont reçoit une alimentation de 25 volts, mais le signal d'erreur est nul, et par suite, le moteur d'équilibrage est immobile.

Supposons alors que la teneur en eau du cyclohexane vienne à varier. Une tension d'erreur apparaît aux bornes du pont et de l'amplificateur de déséquilibre, convenablement amplifiée et détectée, elle commande la rotation du servo-moteur qui entraîne le condensateur  $C_6$  dans le sens propre à ramener l'équilibre par disparition du signal d'erreur.

Nous allons examiner plus en détail ces différents constituants :

1-1 ; Pont de mesure

1-2 ; Transformateur d'alimentation

1-3 ; Générateur d'alimentation

1-4 ; Détecteur de déséquilibre

1-5 ; L'asservissement de rééquilibrage.

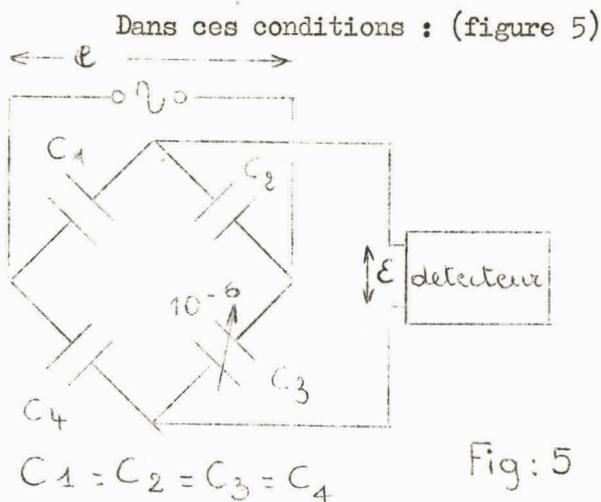
1-1 : PONT DE MESURE

1-1-1 : Sensibilité

Nous savons que la variation relative de capacité est de  $5 \cdot 10^{-6}$  par p.p.m. d'eau dans le cyclohexane.

Comme une variation de capacité de  $10^{-3}$  picofarads est décelable, nous fixons la capacité active d'une cellule remplie de cyclohexane à 200 picofarads.

Pour obtenir la sensibilité maximum, nous fixons les valeurs des autres condensateurs à 200 picofarads.



Si  $e$  est la tension d'alimentation du pont

Si  $\mathcal{E}$  est la tension de déséquilibre pour une variation relative de  $10^{-6}$  d'une branche (soit 1/5 de p.p.m.)

$$\mathcal{E} = \frac{e}{2} \cdot 10^{-6}$$

Nous choisissons 10 microvolts comme seuil d'un détecteur de déséquilibre.

Donc, pour avoir la sensibilité requise :

$$e = 20 \text{ volts}$$

Examinons maintenant la réalisation pratique des divers organes :

Le pont comprend les cellules de mesure  $C_3$  et  $C_4$ , les condensateurs tête de pont  $C_1$  et  $C_2$ , les condensateurs de mise à zéro.

1-1-2 : Cellules de mesure :  $C_3$  et  $C_4$  :

a) Choix de la distance inter-électrodes :

Ces cellules sont traversées en continu par du cyclohexane.

Il est absolument impératif que le régime soit laminaire : la moindre hétérogénéité de l'écoulement peut produire des interférences désastreuses avec la permittivité.

Une section large et donc une distance inter-électrodes assez grandes sont favorables.

Même conclusion pour éviter tout risque de capillarité.

Par contre, la capacité se trouve diminuée et, pour retrouver une sensibilité convenable, il faut augmenter la longueur.

Une distance inter-électrodes de 4 mm nous a semblé un compromis acceptable.

Remarque : Cette décision a entraîné comme conséquences la construction d'un appareil volumineux.

Si des efforts de réduction devaient être entrepris, le point suivant serait à considérer en premier lieu :

Pour un débit de cyclohexane donné, quelle est la distance inter-électrodes minimum d'un condensateur cylindrique telle qu'aucun effet hydrodynamique ne puisse être décelé par une mesure de permittivité de sensibilité  $10^{-6}$ .

La valeur d'une cellule remplie de cyclohexane est fixée à 200 picofarads, soit environ 100 picofarads à vide.

b) Calcul du condensateur cylindrique  $C_3$  et  $C_4$  : (fig. 6 )

- 22 -

Par la formule classique :

$$C_{\text{pf}} = \frac{\epsilon \cdot 1 \text{ cm}}{4,14 \log \frac{d_2}{d_1}}$$

$$\epsilon = 2$$

$$C = 200 \text{ pF}$$

$d_2$  = diamètre extérieur

$d_1$  = diamètre intérieur

$$d_2 = d_1 + 0,8 \text{ cm}$$

d'où

$$1 = \frac{200}{2} \cdot 4,14 \times \log \frac{d_2 - 0,8}{d_2}$$

On s'impose  $l < 20 \text{ cm}$

et on trouve qu'en prenant  $d_2 = 9 \text{ cm}$        $l = 16 \text{ cm}$

Ce sont les valeurs adoptées.

Remarque : Le calcul ne donne qu'un ordre de grandeur des dimensions, en vérité, les cylindres ne sont pas infinis et l'on n'a pas tenu compte de la capacité du couvercle ; mais cela n'a aucune importance pour notre réalisation.

c) Technologie : (figure 6)

La stabilité doit être quasi parfaite, donc la mécanique doit être extrêmement rigide.

Tout effet parasite doit être aussi réduit que possible. Aussi le seul isolant employé sera le téflon, dont les propriétés mécaniques et électriques (véritablement exceptionnelles) ont certainement rendu possible cette réalisation.

L'électrode centrale a été tirée d'un bloc de laiton massif tenu par 6 grosses vis dans une embase de téflon de 42 mm d'épaisseur.

Cette embase de téflon est poussée dans un bossage de l'enveloppe extérieure par un large écrou.

Le serrage est légèrement conique pour assurer une bonne étanchéité par le bas.

Une hypothèse un peu hasardeuse avait négligé le fluage du téflon. Grâce à un taux de travail faible, aucune manifestation de ce fluage n'est venue troubler le fonctionnement.

Néanmoins, nous avons observé à de rares reprises des variations de dimensions qui obligeaient à resserrer l'écrou.

Le liquide est introduit par la partie inférieure, tangentiellement.

Le couvercle est hémisphérique à l'intérieur pour favoriser un écoulement homogène.

Le liquide est évacué en son centre.

Dans la mesure du possible, toutes les formes ont été arrondies pour éviter d'offrir des points d'accrochage à des bulles éventuelles.

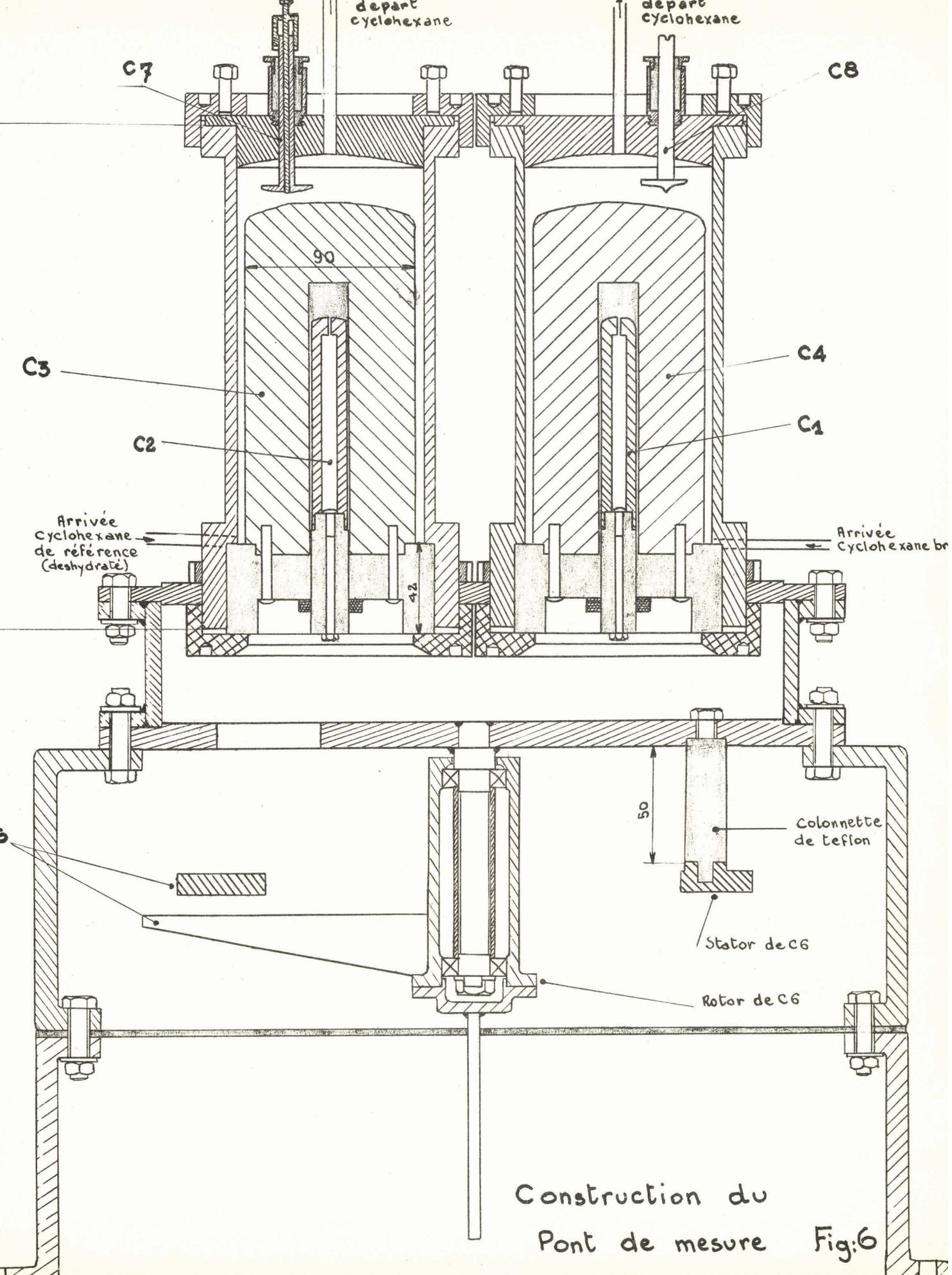
Les deux cellules ont été rigidement fixées sur une plaque d'acier de 8 mm.

La figure 7 présente une vue d'ensemble du pont.

d) Symétrisation des deux cellules  $C_3$  et  $C_4$  :

Rôle de  $C_7$  et  $C_8$  :

Les deux condensateurs  $C_7$  et  $C_8$  ont pour but de rendre égales les capacités actives de  $C_3$  et  $C_4$ .



Construction du Pont de mesure Fig:6

Ils sont constitués d'une tige filetée terminée par un disque et fixée dans le couvercle par l'intermédiaire d'un presse-étoupe en téflon. Le diamètre des disques a été déterminé expérimentalement et l'expérience a même montré la nécessité d'un réglage encore plus fin. Aussi, C<sub>7</sub> est-il traversé en outre par une aiguille fine.

Les capacités résiduelles de C<sub>3</sub> et C<sub>4</sub> viennent s'ajouter en parallèle sur les autres condensateurs et sont symétrisées avec eux.

Valeurs de C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, C<sub>7</sub>, C<sub>8</sub>, mesurées au pont Général Radio 7160 :

C<sub>3</sub> : vide - avec C<sub>7</sub> complètement enfoncé : 108 pF.

C<sub>3</sub> : vide - avec C<sub>7</sub> complètement dégagé : 101,7 pF.

C<sub>3</sub> : rempli de cyclohexane avec C<sub>7</sub> dégagé : 201,1 pF. à 20°C.

Capacité active de C<sub>3</sub> :  $\frac{201,1 - 101,7}{2,023 - 1} = 97,16$  pF.

Capacité résiduelle de C<sub>3</sub> :  $101,7 - 97,16 = 4,54$  pF.

C<sub>4</sub> : vide - avec C<sub>8</sub> enfoncé : 108,3 pF.

C<sub>4</sub> : vide - avec C<sub>8</sub> dégagé : 102,25 pF.

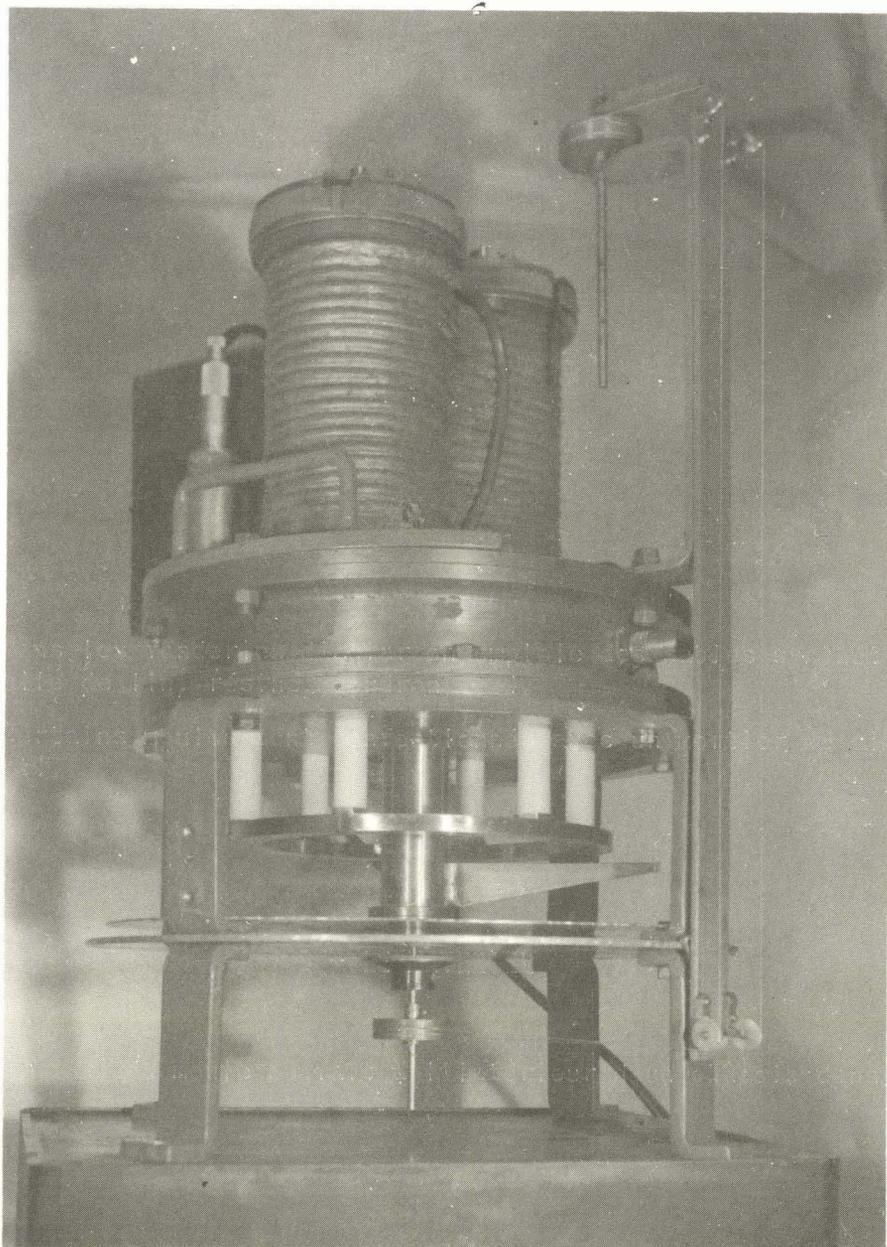
C<sub>4</sub> : rempli de cyclohexane avec C<sub>8</sub> dégagé : 201,25 pF.

Capacité active de C<sub>4</sub> :  $\frac{201,25 - 102,25}{2,023 - 1} = 96,77$  pF.

Capacité résiduelle de C<sub>4</sub> :  $102,25 - 96,77 = 5,48$  pF.

1-1-3 : Condensateurs Tête de Pont C<sub>1</sub> et C<sub>2</sub> :

Il est bien connu que la majeure partie des difficultés rencontrées dans la construction des pont vient des impédances parasites des divers constituants et qu'une attention toute particulière doit être accordée aux blindages et aux fils de liaison.



Pour nous, ces problèmes apparemment mineurs pouvaient ruiner, en créant un seuil de mesure, ou une sorte de bruit de fond d'amplitude élevée, tout espoir d'entrevoir la fine variation cherchée.

Aussi, au lieu de réaliser les condensateurs  $C_1$  et  $C_2$  de la manière classique, en éléments séparés, blindés et reliés par un fil aussi court que possible et rigide, aux autres organes, une idée que nous croyons originale, a été appliquée.

Les condensateurs  $C_1$  et  $C_2$  ont été constitués d'une électrode isolée, poussée dans une cavité forée à l'intérieur de l'électrode centrale de  $C_4$  et  $C_3$  ; ces dernières servent en somme d'électrodes communes à la cellule de mesure et à la tête de pont et aussi de blindage à cette dernière.

#### Calcul des condensateurs $C_1$ et $C_2$ :

A l'origine, l'électrode centrale devait être isolée par une fine feuille de téflon de 5/10 de mm, et l'exécution avait été faite pour avoir une capacité de 200 pF.

Par la suite, au cours de mises au point, recherchant la cause de pertes observées, nous avons soupçonné des particules encloses dans le téflon d'en être la cause, et nous avons enlevé ces feuilles de téflon et les avons remplacées par un piston de téflon pour guider l'extrémité supérieure de l'électrode centrale.

---

N. B. : Nous devons signaler que "maintes idées" jaillirent de discussions possibles dans le climat favorable du Laboratoire d'Electronique des Ets. KUHLMANN, et que leur mérite est à partager avec :

MM. CORBISIER - MEILLANT - COUCKE - LABBE.

De la sorte, les valeurs actuelles de  $C_1$  et  $C_2$  sont :

$$C_1 = 87,8 \text{ pF.}$$

$$C_2 = 86,95 \text{ pF.}$$

### Technologie

L'électrode centrale est fixée sur un rondin de téflon fileté et monté sur l'embase centrale de la cellule de mesure.

Un écrou de téflon bloque l'ensemble.

Une vis métallique centrale assure le contact électrique.

### 1-1-4 Condensateur d'équilibrage $C_6$ : (fig. 6)

Il est formé d'une couronne à largeur variable, fixée par 6 colonnettes de téflon de 5 cm de longueur.

Cette couronne constitue l'électrode chaude.

Un bras central, relié à la masse, porté par un axe monté sur roulements à billes se déplace devant cette couronne.

La variation de capacité est due à la variation des surfaces en regard et sa loi peut être profilée suivant une courbe quelconque.

Le plan de la figure 9 représente la came réalisée.

La courbe de la figure 10 donne la variation de capacité en fonction de l'angle de rotation. On peut remarquer les deux pentes de variation destinées à élargir l'échelle de 0 à 10 p.p.m., sur les premiers  $180^\circ$  ; la variation de capacité est de 0,05 pF. soit environ  $10^{-3}$  pF. pour  $3^\circ$ .

Les irrégularités de la courbe sont dues à l'imprécision de l'exécution mécanique.

Le servo-moteur d'équilibrage entraîne le rotor, pour éviter l'échauffement parasite du pont par les pertes calorifiques du moteur, celui-ci est placé en dehors du thermostat, l'accouplement est obtenu par une liaison par câble sans jeu.

Pour raccourcir les liaisons, ce condensateur variable a été placé sous le pont - et enfermé dans un carter formant blindage.

Si la capacité active sur une rotation de  $300^\circ$  est de l'ordre de :  $0,3 \text{ pF.}$ , la capacité résiduelle par rapport à la masse est de :  $25 \text{ pF.}$

Elle est compensée par le condensateur micrométrique  $C_5$ .

1-1-5 : Condensateur micrométrique  $C_5$  : (fig. 11)

Il est du type blindé.

Une électrode intérieure est fixée rigidement sur des entretoises en téflon.

Une vis micrométrique centrale descend à l'intérieur de cette entretoise et produit la variation de capacité.

Variation de capacité utile sur 50 tours :  $7,5 \text{ pF.}$

Capacité résiduelle :  $19,1 \text{ pF.}$

1. 2 : TRANSFORMATEUR D'ALIMENTATION :

---

N. B. : La conception et les essais de mise au point du transformateur d'alimentation, du générateur  $100 \text{ kHz}$  et du détecteur de déséquilibre eut été menés sous la bienveillante direction de Mr. LIEBART, Chef de Travaux au Laboratoire de Radioélectricité et d'Electronique de la Faculté des Sciences de Lille. Nous le remercions bien vivement.

Vue de face de  
l'armature fixe du  
condensateur  
de rééquilibrage

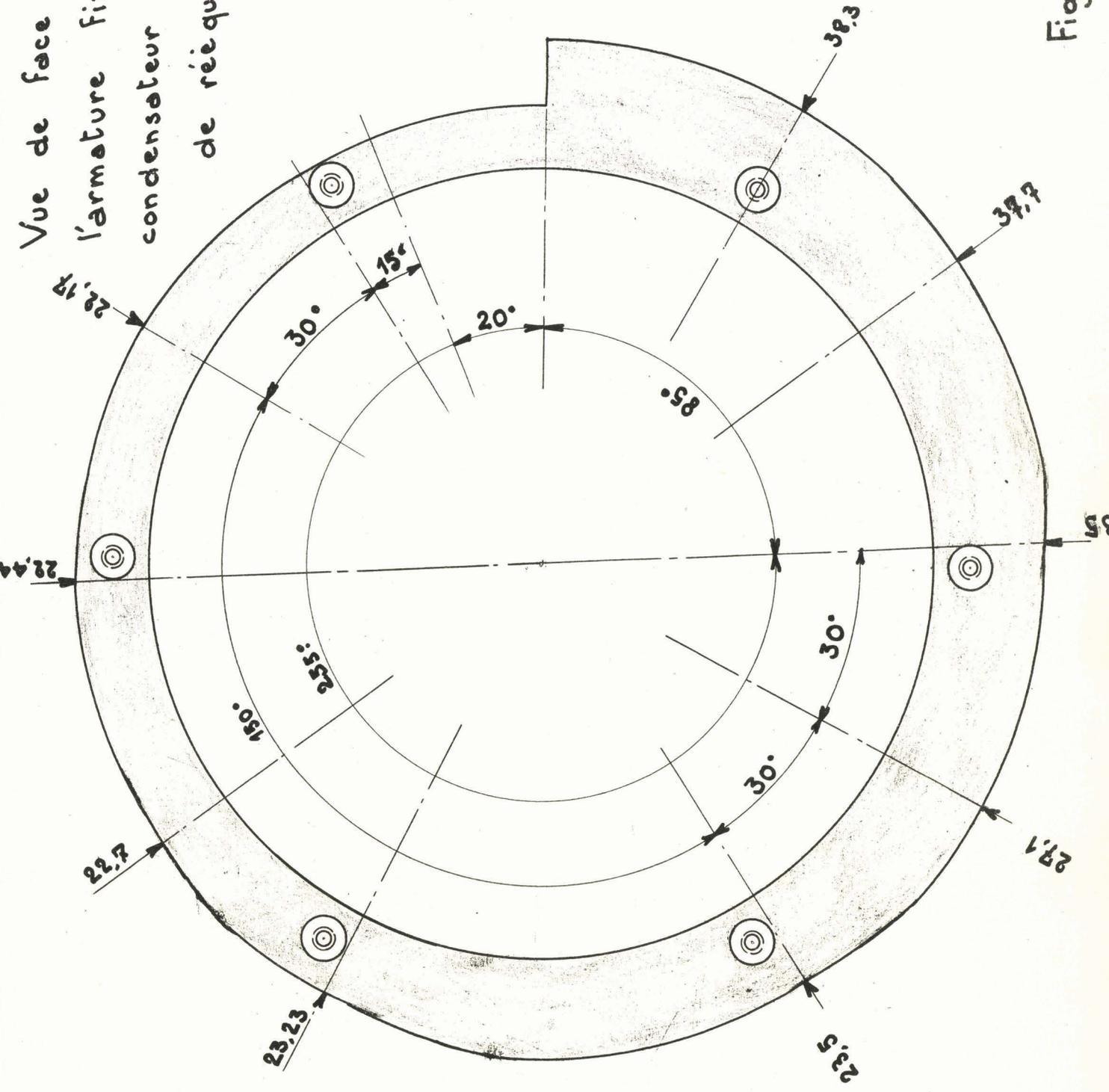


Fig: 9

Permittor      Condensateur à air      Came de rééquilibrage

Variations de la capacité en fonction de l'angle de rotation

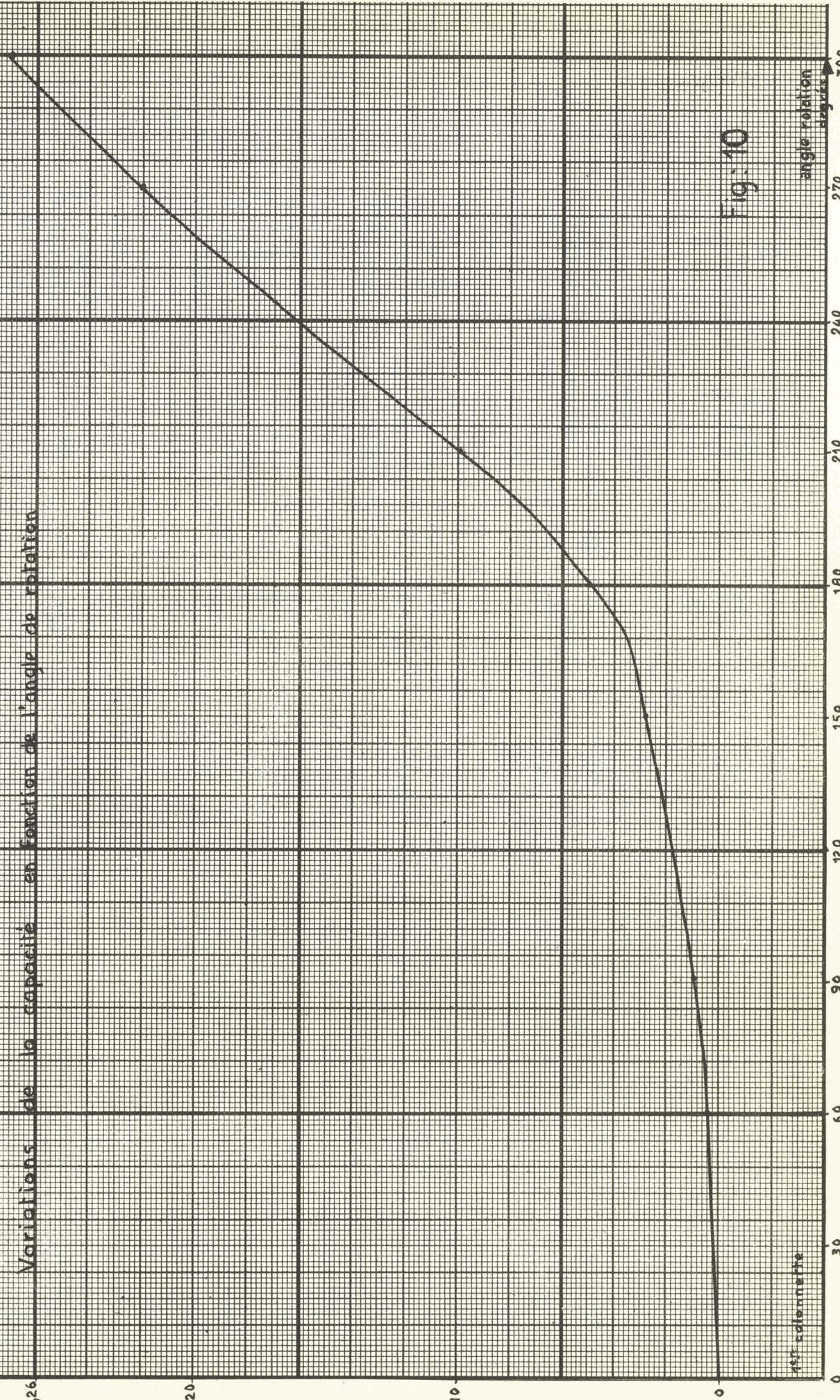
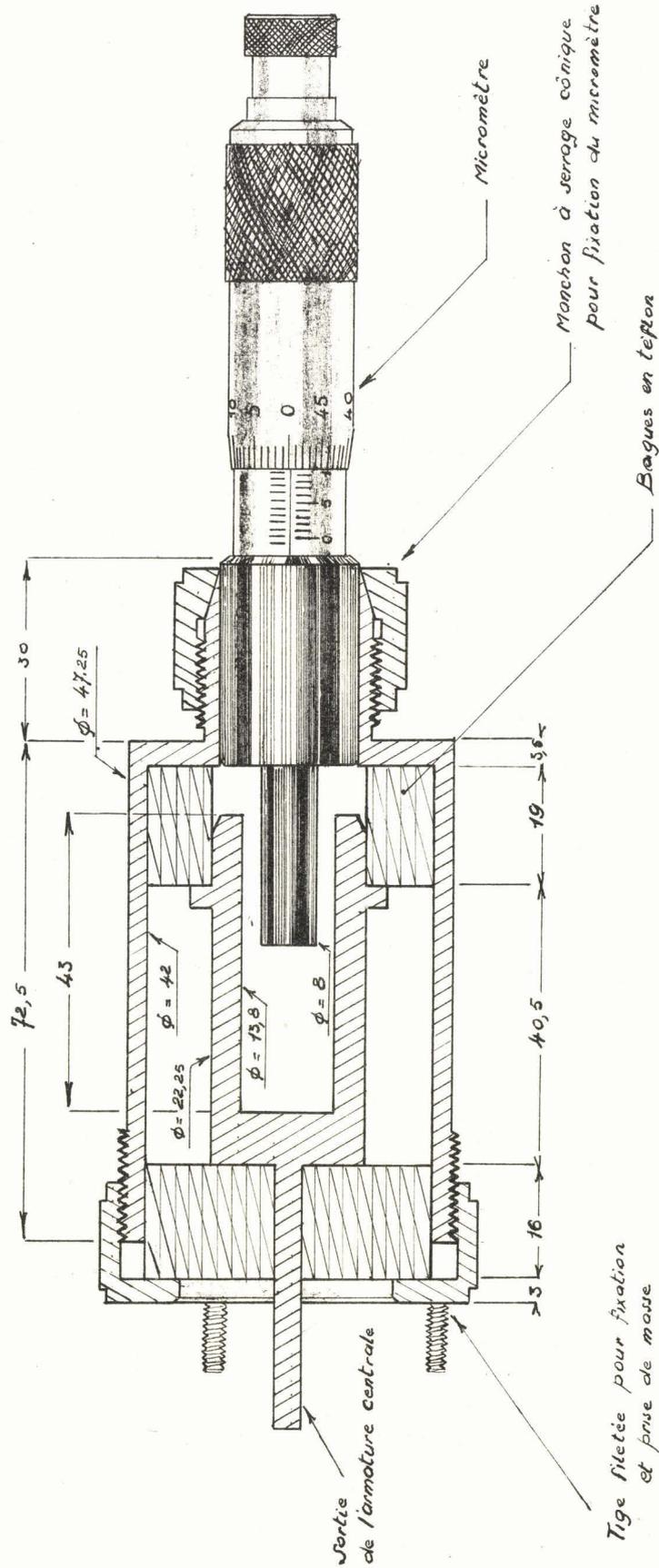


Fig: 10



VUE EN COUPE DU CONDENSATEUR MICROMETRIQUE

La construction du transformateur a été l'une des grosses difficultés.

A l'origine, nous pensions utiliser un transformateur Général Radio type 578C.

Or, si jusque là, lorsque nous présentions l'ensemble du pont au pont 716C, aucune perte n'était décelée, il n'en était plus de même lorsque le transformateur était connecté; fait plus grave : ces pertes étaient dissymétriques et l'équilibrage du pont à vide devenait problématique.

Nous allons préciser ce point, mais auparavant, nous décrirons le montage utilisé :

Montage de mesure : (figure 12)

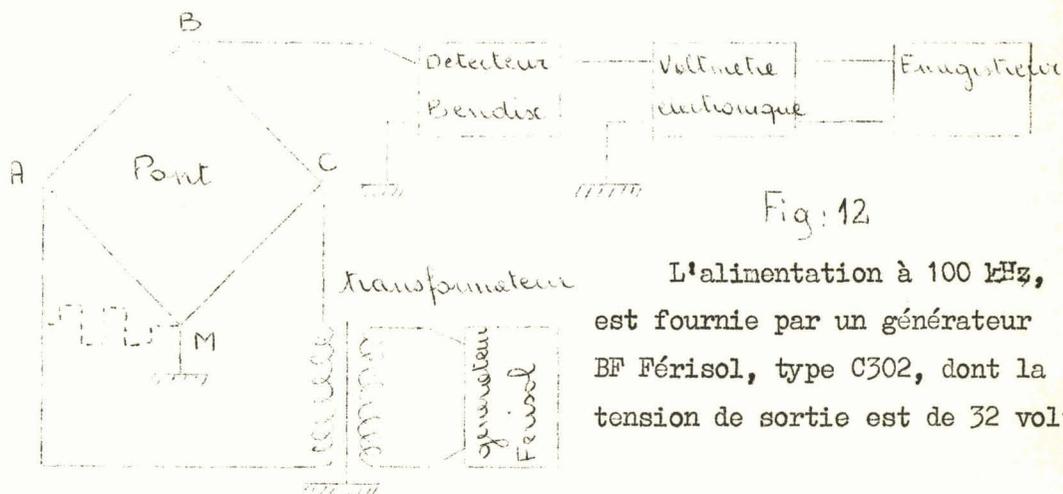


Fig: 12

L'alimentation à 100 KHz, est fournie par un générateur BF Ferrisol, type C302, dont la tension de sortie est de 32 volts.

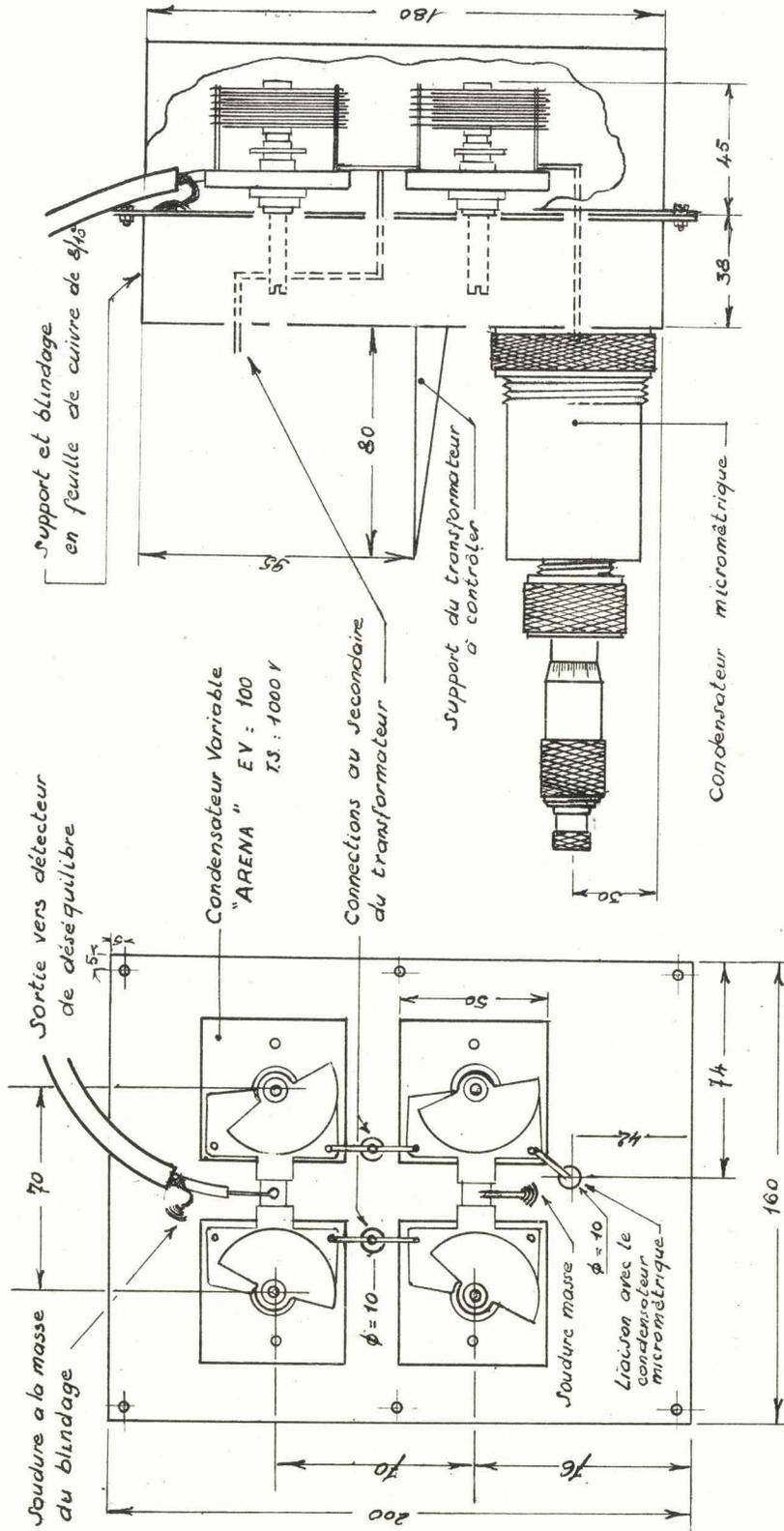
Le détecteur de déséquilibre est constitué par :

- un récepteur de goniométrie Bendix provenant des surplus et dont le signal de sortie à l'étage détection est mesuré par un voltmètre électronique "Voltohmist R-C-A".

Le microampèremètre de résistance interne 1.000 ohms, de ce dernier appareil peut être mis hors circuit à l'aide d'un inverseur. Celui-ci insère alors une résistance égale à celle du microampèremètre et la tension recueillie aux bornes de celle-ci est envoyée à un enregistreur du type potentiométrique MECL.

PERMITTOR

SCHEMA DE REALISATION DU PONT A CAPACITES



Echelle 1/25

Les côtes sont portées en millimètres sur le schéma

le 10-7-59

Fig: 14

Fig: 13

On obtient alors une sensibilité globale de l'ordre de  $100 \mu V$  à  $100 \text{ kHz}$  pour  $250 \text{ mm}$  d'échelle de l'enregistreur avec un seuil de mesure de l'ordre de  $5 \mu V$ .

Résultats obtenus avec le transformateur Général Radio 578C :

Pour obtenir un signal de déséquilibre inférieur à  $5 \mu V$ , il devient nécessaire d'insérer entre le point A et la masse M une résistance d'environ  $5 \text{ M}\Omega$  (fig. 12).

Inversant le branchement du transformateur, la résistance doit être inversée également.

Cela confirme bien que cette perte est introduite par une dissymétrie du transformateur.

D'autre part, le coefficient de température de cette perte est tel que, même pour l'ensemble thermostaté, le zéro obtenu est fugace.

Il devient donc évident qu'une diminution très nette de cette dissymétrie doit être apportée.

- Des essais systématiques sont alors entrepris.-

Comme le pont de mesure est très lourd à manipuler, un petit pont auxiliaire est construit.

Il est constitué de quatre condensateurs ARENA, variables à air, montés sur stéatite et d'un condensateur micrométrique fabriqué au laboratoire (figure 13).

Ce pont est alimenté également sous  $32 \text{ volts}$  et le même détecteur Bendix est utilisé.

Premier essai : On soupçonne le brai coulé à l'intérieur du transformateur Général Radio d'être le siège de pertes, on l'enlève en chauffant le tout à  $130^\circ\text{C}$  dans une étuve.

Pas d'amélioration.

Deuxième essai : On réalise un transformateur avec des tôles mumétal d'Imphy.

Primaire et secondaire concentriques :

Primaire : 2 couches - 50 tours : 25/100 soie.

Secondaire : 1 couche - 50 tours : 25/100 soie.

Isolement primaire - entre couches : téflon

Ecran cuivre entre primaire et secondaire

Isolement téflon sous le secondaire

Secondaire enfermé dans un blindage cuivre

Tout le transformateur est enfermé dans un blindage mumétal.

Résultat non satisfaisant.

Troisième essai : Noyau en ferrite ferromagnétique Fermalite L.T.T. (ferrite de manganèse).

On utilise deux circuits en L de petites dimensions.

Les primaire et secondaire sont bobinés sur mandrin téflon et disposés sur deux jambes opposées pour réduire la capacité.

Alimenté sous 6 volts, la résistance d'équilibre est 2000 M $\Omega$ .

Alimenté sous 32 volts, la résistance d'équilibre est 5,6 M $\Omega$ .

Quatrième essai : Les noyaux de ferrite étant maintenus par des armatures métalliques, on les soupçonne d'être le siège de pertes par courants induits.

On remplace ces armatures par des armatures en plexiglass.

La résistance de fuite sous 6 volts, tombe de 2000 M $\Omega$  à 10 M $\Omega$ .

En cherchant la cause de cette réduction de qualité, on en vient à soupçonner une capacité parasite à travers l'isolant d'enrobage des particules métalliques formant la ferrite.

On décide alors de métalliser les noyaux et de respecter rigoureusement la symétrie; on aboutit alors à un modèle donnant satisfaction.

Description du transformateur définitif : (Fig. 15 & 16)

Les noyaux de ferrite (Fermalite L.T.T. 1034A) sont recouverts d'une feuille de clinquant de cuivre rouge, fendue sur sa longueur pour éviter les courants de Foucault.

Le primaire est composé de deux couches de 39 spires de 25/100 sous soie bobinées sur un mandrin de téflon, séparées par une feuille de téflon; elles sont recouvertes ensuite d'une autre feuille de téflon sous une feuille de cuivre formant blindage extérieur.

Les blindage est fait de sorte à obtenir une symétrie rigoureuse par rapport à un plan médian parallèle aux spires.

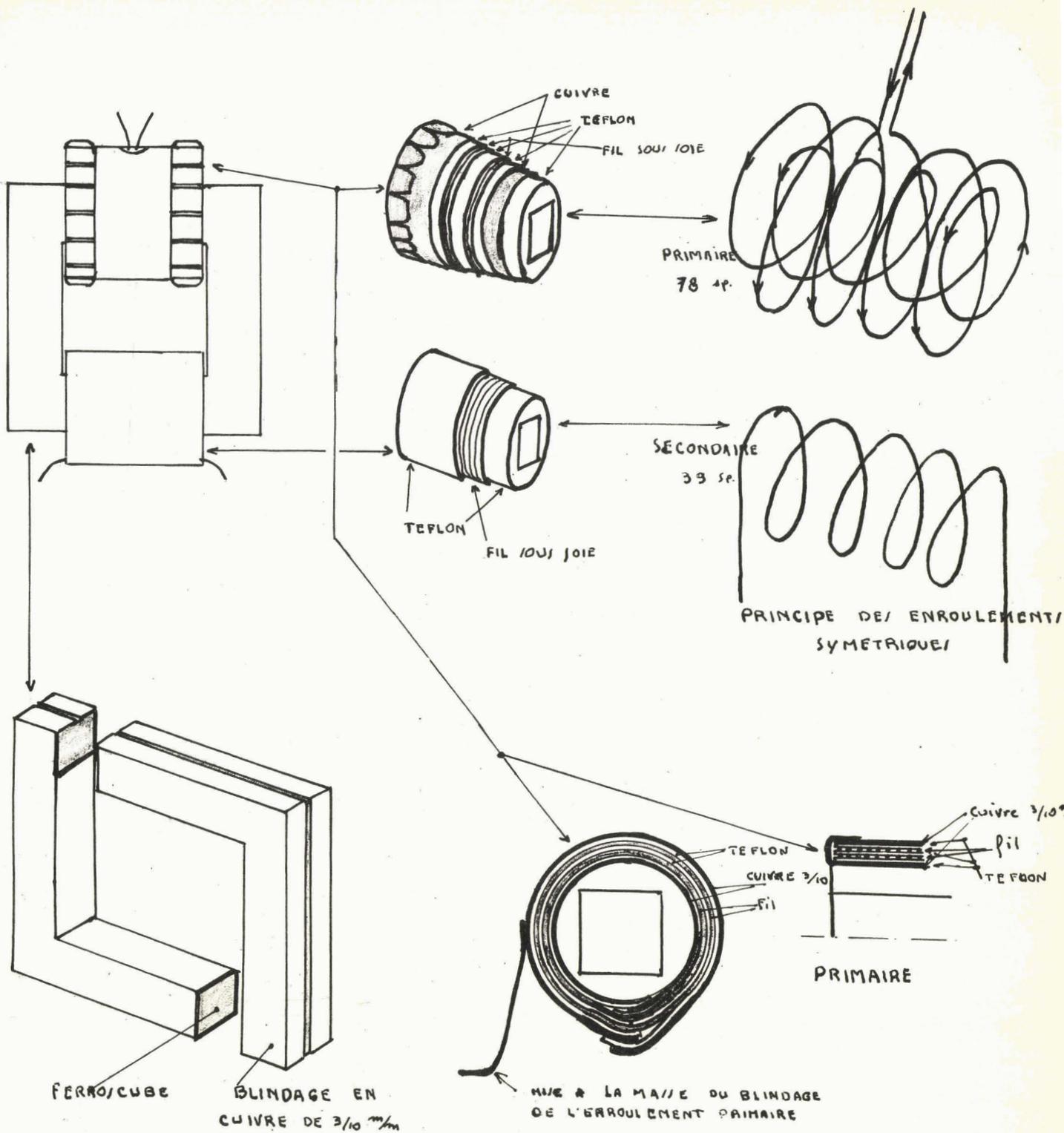
Le secondaire se compose de 39 spires, bobinées sur un mandrin de téflon et recouvertes d'une feuille de téflon. Aucun blindage ne recouvre le secondaire pour réduire les capacités par rapport à la masse.

Ces deux enroulements sont montés sur deux jambes différentes. Un écran de cuivre les sépare.

L'ensemble est enfermé dans un coffret en cuivre de grandes dimensions (les distances aux parois sont de trois fois les cotes du transformateur).

L'alimentation du primaire se fait à travers un câble coaxial bifilaire.

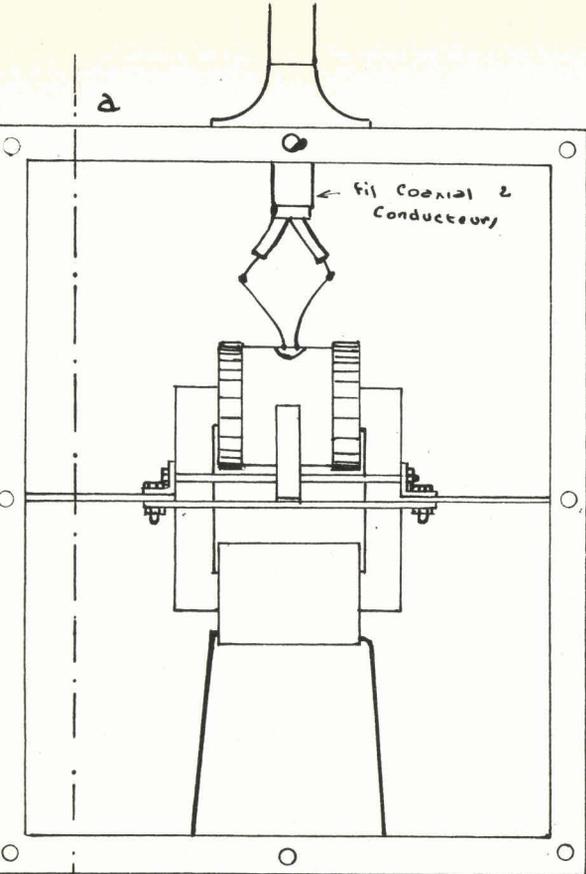
Les sorties du secondaire se font à travers des bornes en téflon. Les liaisons sont aussi courtes que possible et disposées symétriquement par rapport à la masse.



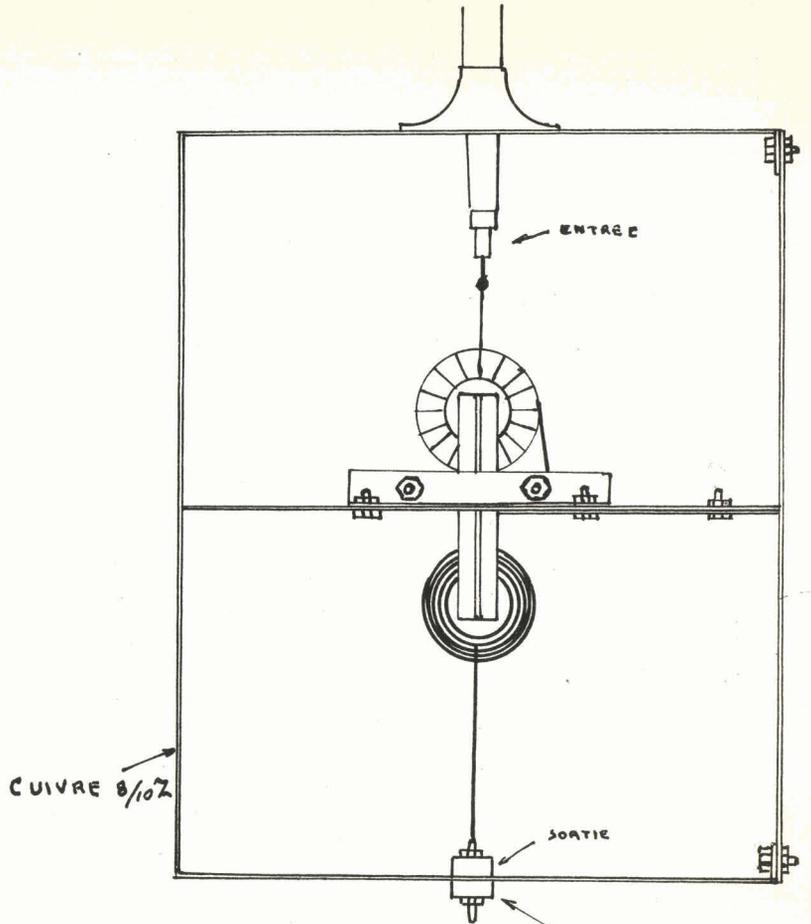
PERMITTOR

DETAIL/ DU TRAN/FORMATEUR D'ENTREE DU PONT

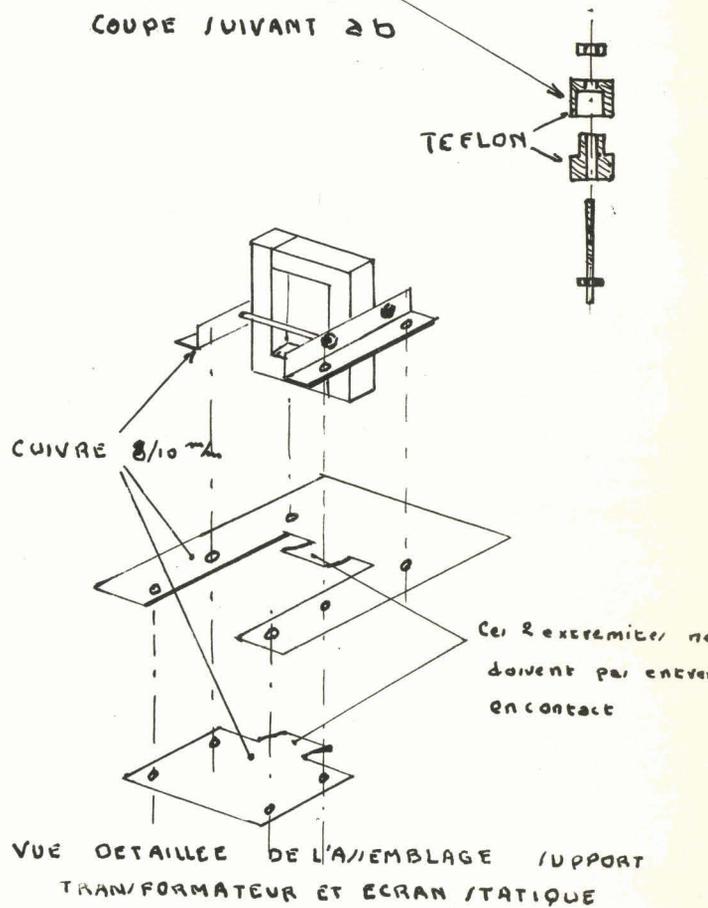
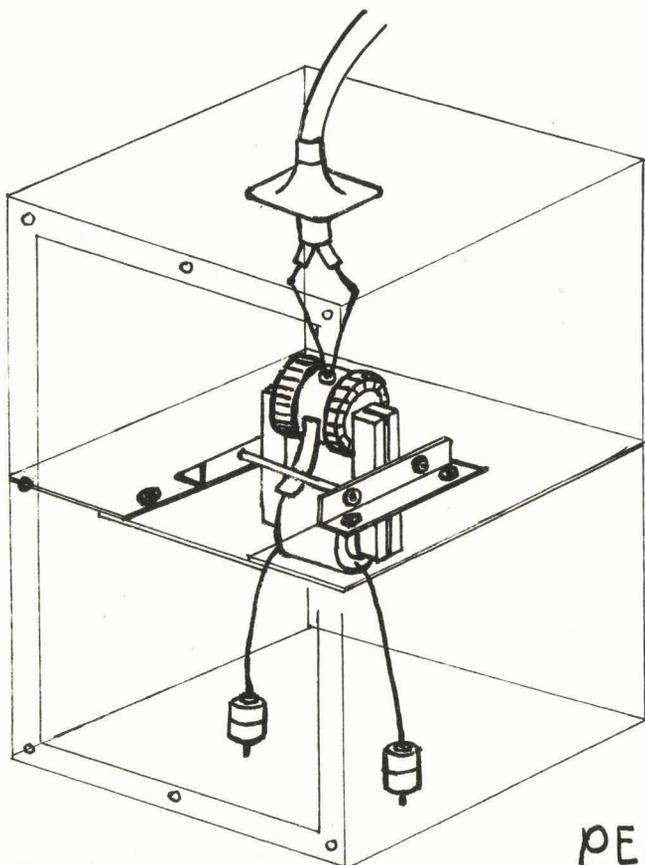
Fig: 15



VUE DE FACE  
COUVERCLE ENLEVÉ



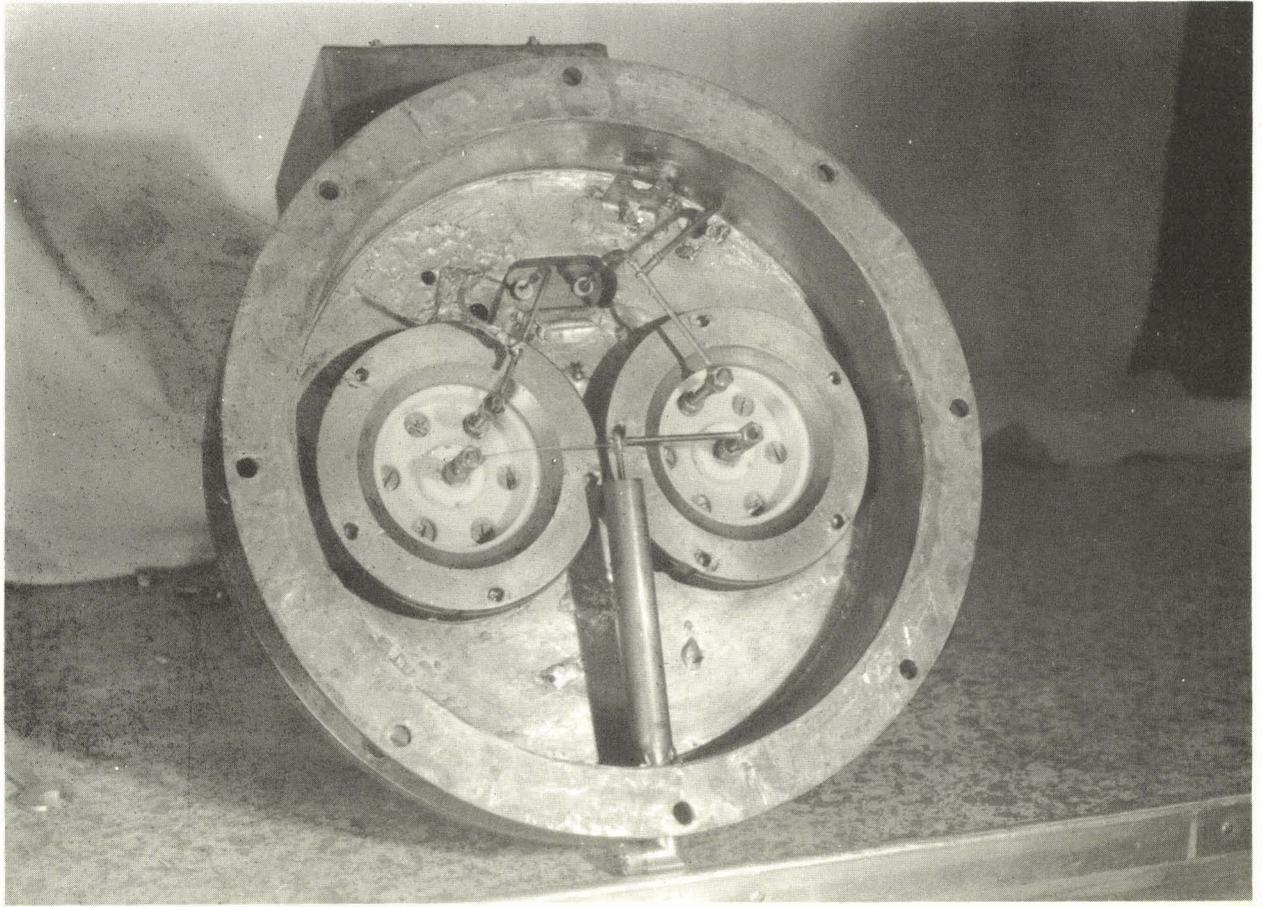
COUPE SUIVANT 20



# PERMITTOR

## SCHEMA DU TRANSFORMATEUR D'ENTRÉE DU PONT

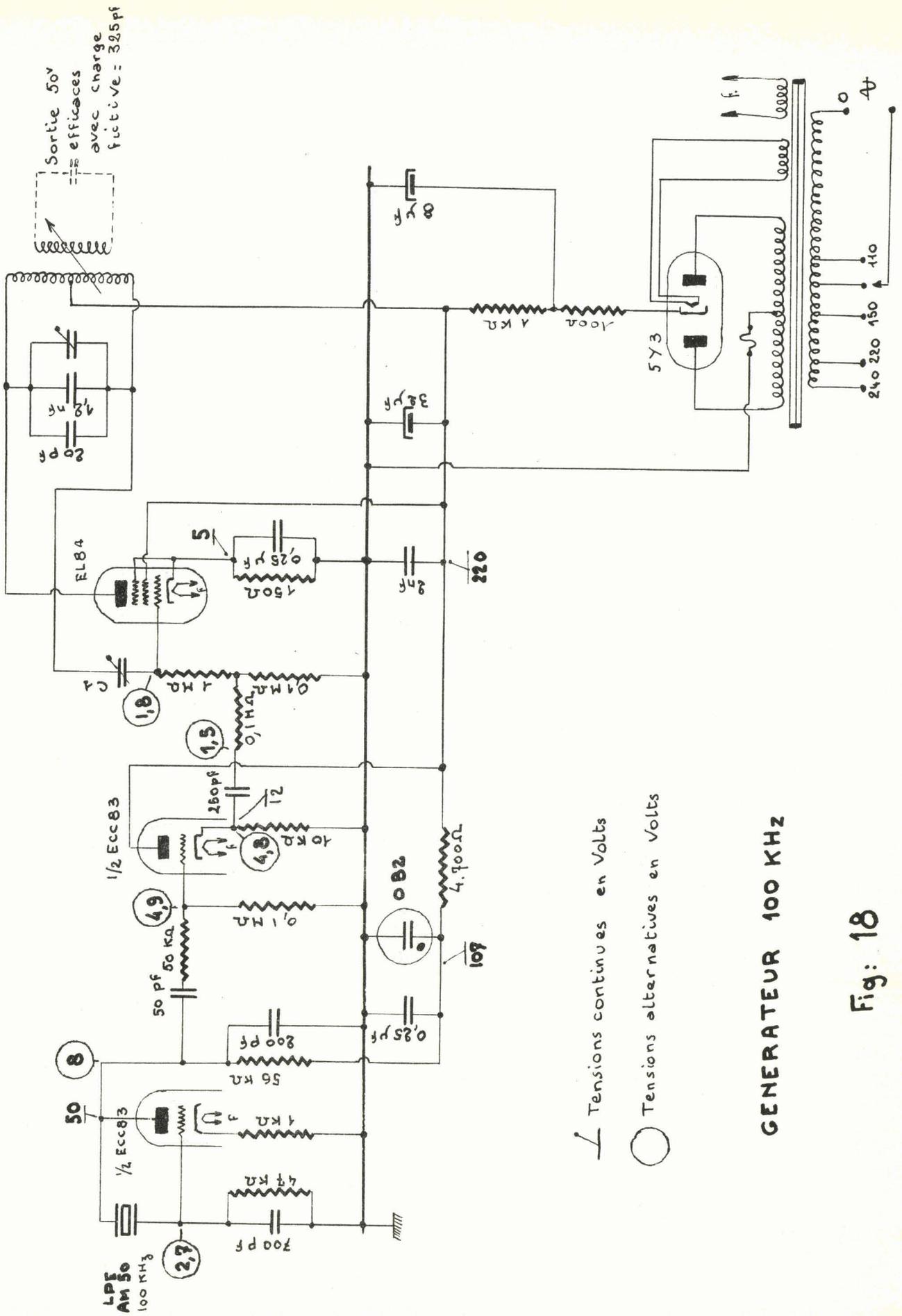
Fig: 16



On obtient alors une résistance de fuite de  $500 \text{ M}\Omega$  pour une alimentation de 32 volts. Cette résistance de fuite est compensée par la résistance de  $0,1 \text{ ohm}$  placée en série avec C2.

Remarque : LIAISONS DES DIVERS ELEMENTS :

La figure 17 permet de juger la disposition des divers éléments qui est conçue pour réduire, au minimum, la longueur des connexions. Celles-ci sont constituées par du gros fil de cuivre étamé de 20/10 ; à l'exception de la liaison de C2 à la tête du diagonale qui est faite en constantan de section choisie pour avoir les  $0,1 \text{ ohm}$  requis pour la compensation des pertes du transfo.



Sortie 50V  
= efficaces  
avec charge  
fictive = 325pf

∟ Tensions continues en Volts  
○ Tensions alternatives en Volts

**GENERATEUR 100 KHZ**

**Fig: 18**

### 1-3 GENERATEUR D'ALIMENTATION

Son schéma est représenté sur la figure 18.

La première moitié du tube ECC82 fonctionne en oscillateur stabilisé par quartz, suivant un montage dérivé du "Pierce". Une résistance de 1000 ohms dans la cathode assure une contre réaction pour améliorer la forme du signal. La tension anodique est stabilisée à 107 volts par un tube OB2.

La deuxième moitié de la ECC82, montée en cathodyne, sert d'étage séparateur.

L'étage de sortie comporte une EL84 pentrodyne, à circuit plaque accordé et sortie par couplage magnétique.

L'impédance de l'ensemble du pont, vu depuis la source, est équivalente à une capacité de 325 picofarads. On règle le couplage pour obtenir 50 volts efficaces à la sortie.

#### Caractéristiques du transfo du circuit oscillant :

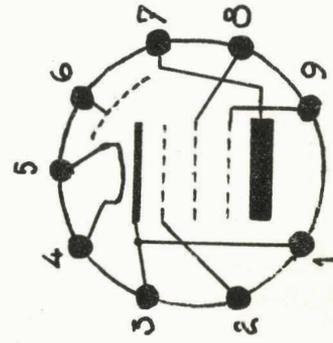
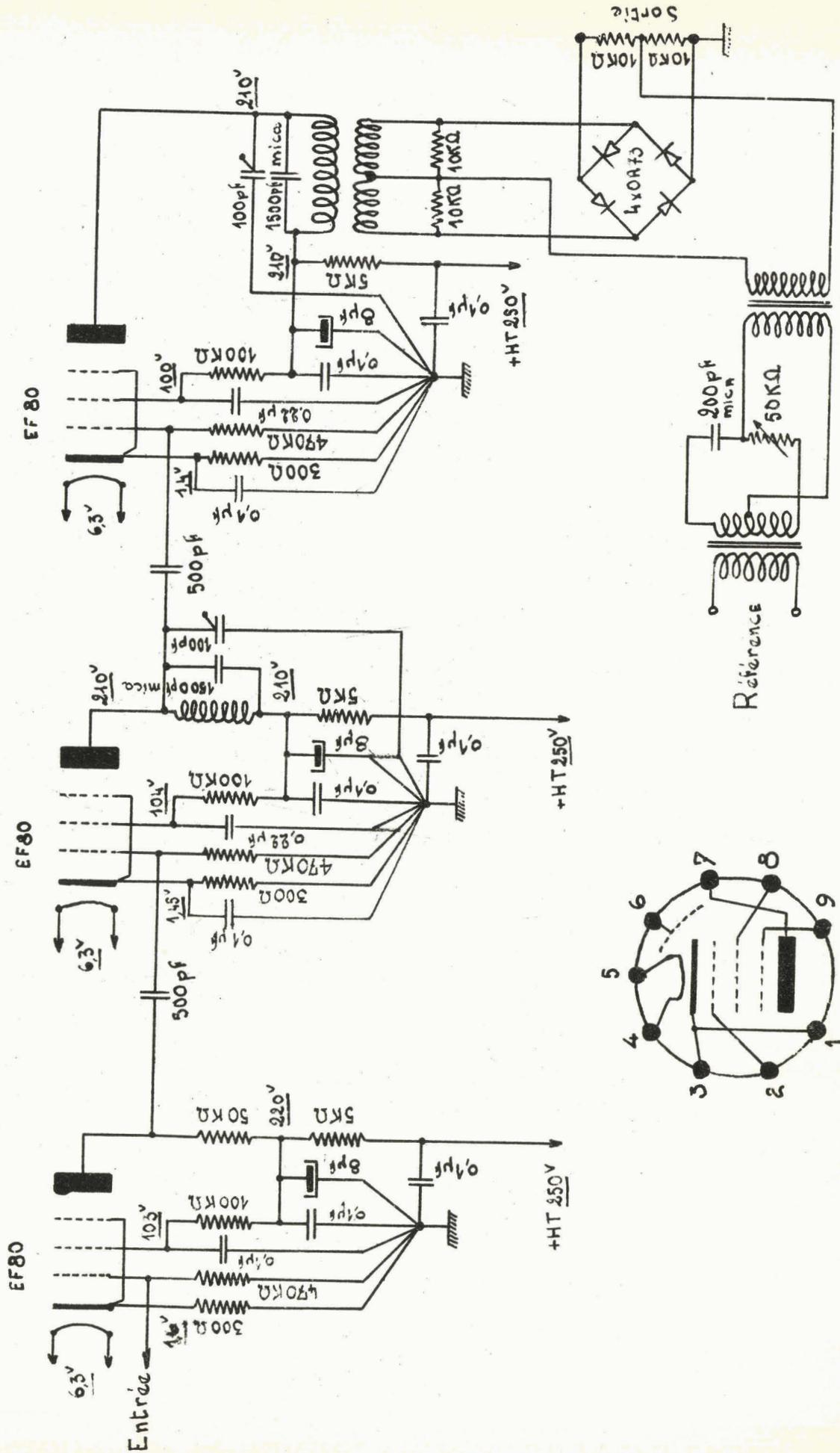
Bobinés sur mandrin presspahn de 65 mm de diamètre :

Primaire : 170 spires en fil divisé 60 brins 10/100 sous 2 couches soie.

Secondaire : 210 spires en fil 45/100 coton.

L'ensemble a été monté dans un coffret aux cotes standard du "Rack américain" de 5 unités.

# DETECTEUR DE PHASE



NOVAL EF 80.

1-4 DETECTEUR DE DESEQUILIBRE (fig. 19)

Le signal de déséquilibre du pont passe d'abord dans 3 étages amplificateurs, le premier apériodique, les 2 autres accordés.

Il attaque ensuite un détecteur de phase à 4 redresseurs secs montés en anneau. La tension de référence est fournie par le générateur et a un déphasage ajustable.

On recueille une tension continue, de polarité s'inversant avec la phase de la tension de déséquilibre par rapport à la tension d'alimentation, et par suite avec le sens de variation de la capacité de mesure.

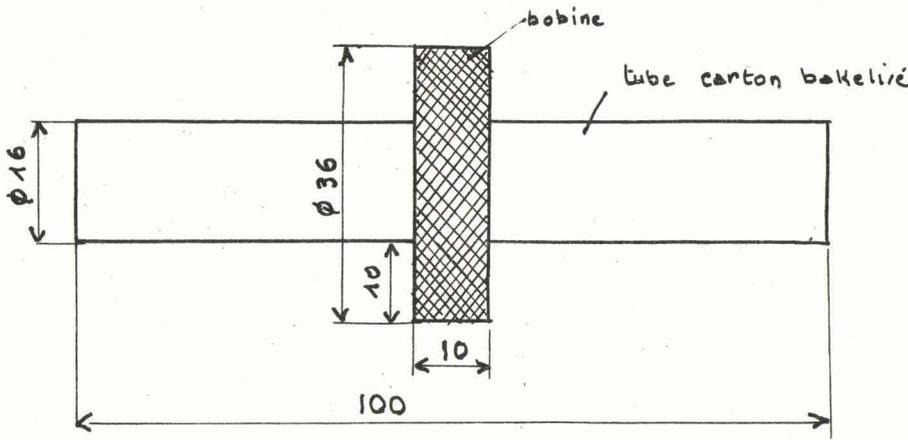
Sensibilité d'entrée : 2 microvolts

Gain en tension : 120 décibels

Les figures 20 & 21 donnent des détails technologiques sur les transformateurs utilisés.

Caractéristiques des transformateurs de l'amplificateur - détecteur de Phase  
100 kc/

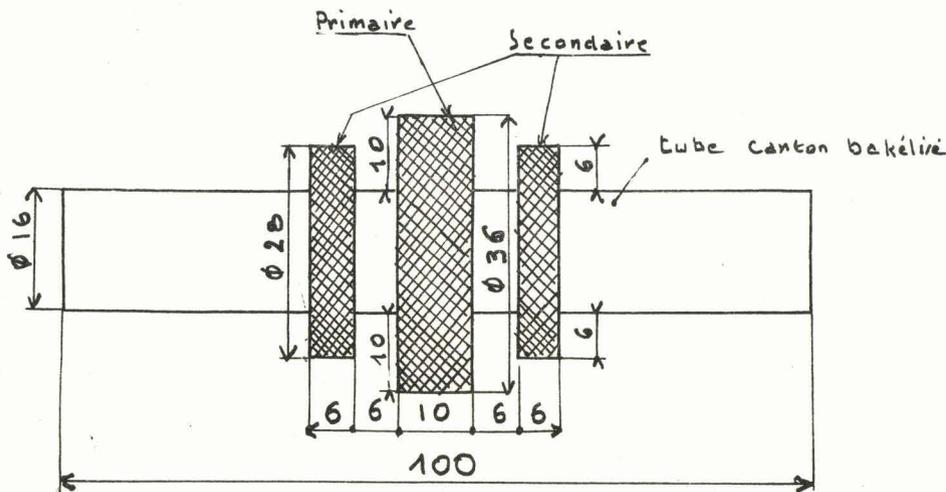
I Self d'accord du 2<sup>ème</sup> étage amplificateur



Echelle 1

bobinage en nid d'abeille  
300 spires  
fil de litz émaillé 30 fois 5/100<sup>m</sup>  
Blindage extérieur  $\varnothing$  100 mm  
longueur 130 mm  
en tôle cuivre de 3/10 mm

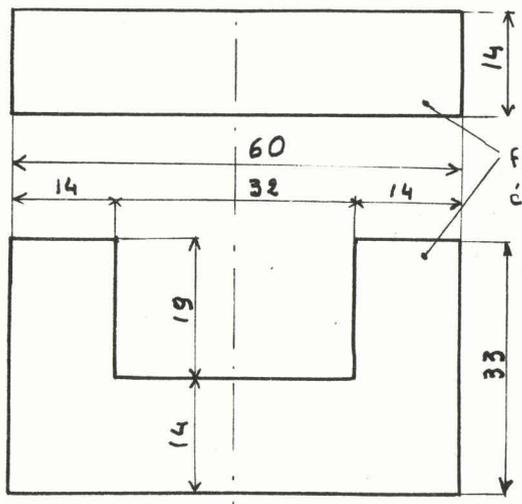
II Transformateur de liaison entre 3<sup>ème</sup> étage amplificateur et détecteur de Phase



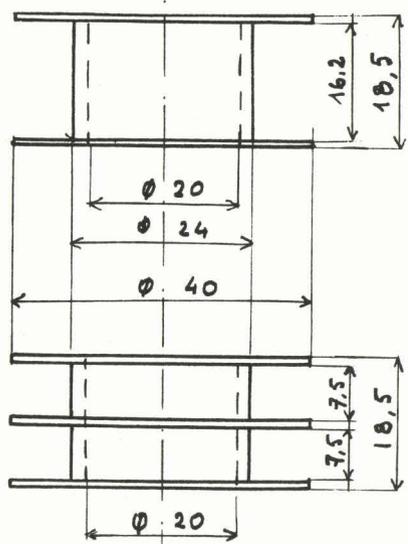
Echelle : 1

bobinage en nid d'abeille  
Primaire = 300 spires  
secondaire 2 x 150 spires  
fil de litz émaillé 30 fois 5/100<sup>m</sup>  
Blindage = 100 x 100 x 140 mm  
en tôle de cuivre 3/10 mm

III Transformateur de l'étage de déphasage



noyau de ferrocube  
épaisseur 14mm  
Qualité 3C1  
(Radiotechnique)



bobine pour bobinage Primaire

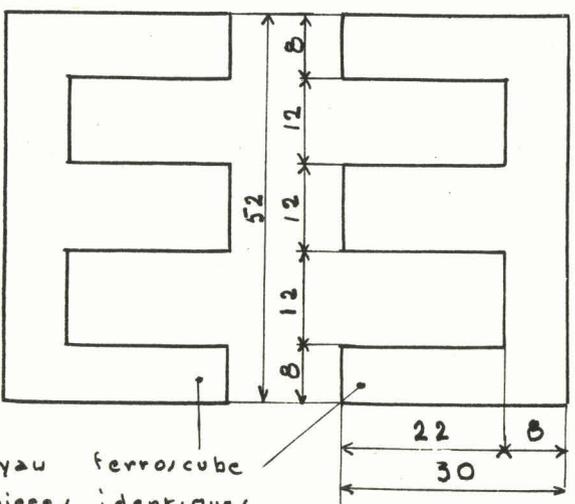
bobines en P.C.V

bobine pour bobinage Secondaire

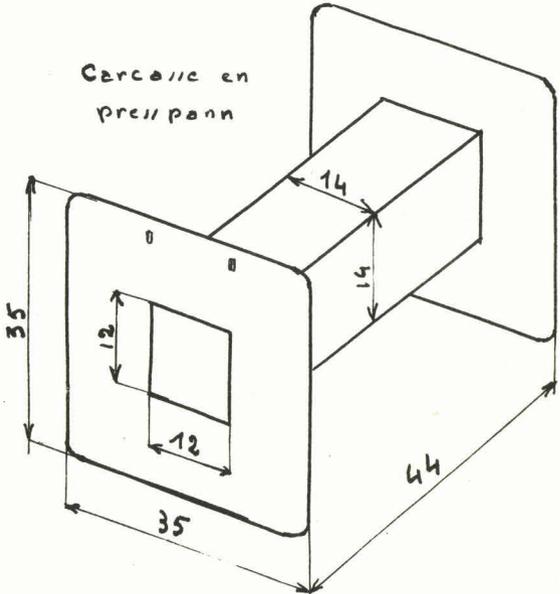
Primaire = 380 spires  
secondaire = 2 x 380 spires  
bobinage jointif en fil de litz émaillé 30 fois 5/100mm

Echelle : 1

IV Transformateur de liaison entre l'étage de déphasage et le détecteur de phase



Noyau ferrocube  
2 pièces identiques  
épaisseur 12mm  
Qualité 3A  
(Radiotechnique)



Carcasse en presspan

bobinage jointif en fil de litz émaillé 30 fois 5/100mm  
Primaire = 950 spires  
Secondaire = 950 spires  
blindage de 50 x 90 x 80 entole d'acier de 8/10mm

Echelle : 1

Fournisseur fil de litz = Trefilerie de Chauny 47 rue de la bruyère Paris 9<sup>e</sup>

Fig:21

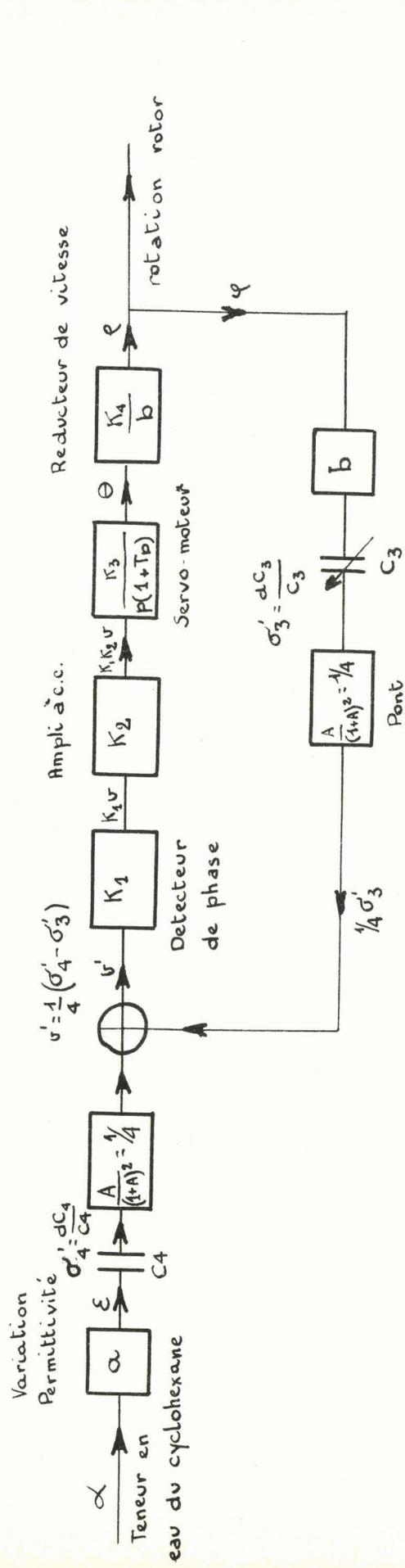


Fig:24 Diagramme fonctionnel du Permittor.

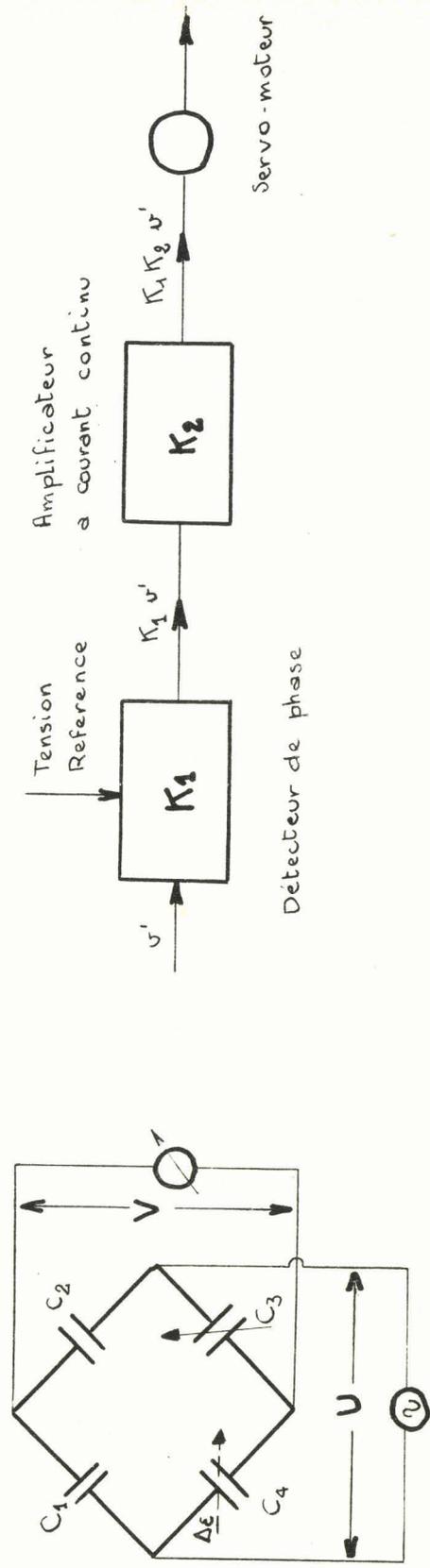


Fig:22 Representation du pont

Fig:23 Schema du détecteur de phase

et du servo-moteur

## 1-5 ASSERVISSEMENT DE REEQUILIBRAGE

Lors de tous les essais effectués, tant avec du cyclohexane sec qu'avec du cyclohexane hydraté, le seuil de déséquilibre décelable a toujours été atteint en faisant varier une capacité pure. Aucune composante de perte de la permittivité ne s'est manifestée. Le problème du rééquilibrage s'est donc trouvé ramené au cas simple d'un asservissement à une variable.

Des considérations sur l'équilibrage des ponts à 2 variables sont jointes en seconde partie.

### 1.5.1 : Equations du déséquilibre :

Groupant les différentes capacités, nous pouvons représenter le pont comme ayant chaque branche constituée par une capacité pure : (fig. 22)

$C_4$  est la capacité variant avec la permittivité du cycle.

$C_3$  est le condensateur qu'on manoeuvre pour ramener l'équilibre.

Appelons  $U$  la tension d'alimentation du pont

$V$  la tension de déséquilibre

$V'$  le rapport  $\frac{V}{U}$

$$(1) \quad V' = \frac{C_1 C_3 - C_2 C_4}{(C_1 + C_2)(C_3 + C_4)}$$

$$(2) \quad \text{à l'équilibre } C_1 C_3 = C_2 C_4 \quad \text{et } V' = 0.$$

1°) Variation de  $C_4$  :

Supposons que  $C_4$  s'écarte de la valeur d'équilibre de  $dC_4$  ; il apparait une tension de déséquilibre  $v_4^i$

$$(3) \quad v_4^i = \frac{\partial v^i}{\partial C_4} dC_4$$

Près de l'équilibre :

$$(4) \quad v_4^i = \frac{-C_2}{(C_1 + C_2)(C_3 + C_4)} dC_4$$

Posons :

$$A = \frac{C_1}{C_2} = \frac{C_4}{C_3} \quad \text{relation (2)}$$

$$\epsilon_4^i = \frac{dC_4}{C_4}$$

(4) s'écrit :

$$(5) \quad v_4^i = \frac{-C_2}{(C_1 + C_2)(C_3 + C_4)} dC_4 = -\frac{A}{(1+A)^2} \epsilon_4^i$$

2°) Variations de  $C_3$  :

Par un raisonnement analogue, si au lieu de  $C_4$ , c'était une variation de  $C_3$  qui rompait l'équilibre du pont, une tension de déséquilibre  $v_3^i$  apparaîtrait :

$$v_3^i = \frac{A}{(1+A)^2} \sigma \frac{i}{3}$$

Tension résultante avec un asservissement :

L'objet de l'asservissement est, pour toute variation de  $C_4$ , de manoeuvrer  $C_3$  pour annuler la tension de déséquilibre.

A un instant donné :

$$v^i = v_4^i - v_3^i$$

Le signe - entre  $v_4^i$  et  $v_3^i$  signifiant que les liaisons doivent être établies de sorte que l'action de l'asservissement tende à annuler  $v_4^i$

$$(6) \quad v^i = \frac{A}{(1+A)^2} (\sigma \frac{i}{4} - \sigma \frac{i}{3})$$

1. 5. 2 : Diagramme fonctionnel de l'asservissement :

a) Détecteur de phase : (figure 23)

La tension  $v^i$  est injectée au détecteur de phase. La tension de déséquilibre étant orthogonale à la tension de référence, car seules des capacités pures varient, le signal contenu recueilli est proportionnel.

Il est donc égale à  $K_1 v^i$

$K_1$  : coefficient de proportionnalité caractéristique du détecteur de phase.

Remarque : Aucune opération mathématique n'est effectuée, par suite de l'orthogonalité sur  $K_1 v'$  (au contraire d'une détection ordinaire qui redresse le signal d'entrée et dont le signal de sortie a toujours le même signe).

b) Servo-moteur :

Pour des raisons de commodité, parce que disponible au laboratoire, nous avons utilisé un ensemble amplificateur à courant continu - servo-moteur asynchrone diphasé équipant les potentiomètres enregistreurs MECI. Rappelons qu'un tel groupe réagit à des signaux continus de l'ordre de 5  $\mu$ v, d'impédance interne inférieure à 7.000 ohms et que son sens de rotation s'inverse avec la polarité du signal continu.

Le signal d'entrée, recueilli sur le détecteur, étant de l'ordre du volt, un diviseur de tension à résistance a été intercalé pour adapter les amplitudes des signaux.

Soit  $K_2$  l'amplification obtenue.

Posons :  $\Gamma$  le couple du moteur par unité de tension

J l'inertie du moteur

f son coefficient de frottement

$e = K_1 K_2 v'$  la tension d'entrée sur le servo-moteur

$\Theta$  l'angle de rotation du moteur

on a :

$$\Gamma e = J \frac{d^2 \Theta}{dt^2} + \frac{d \Theta}{dt}$$

Passons aux transformées de Laplace, (nous conservons les mêmes notations pour la simplicité de l'écriture).

$$\Gamma e = J p^2 \Theta + f p \Theta$$
$$\frac{\Theta}{e} = \frac{\Gamma}{J p^2 + f p} = \frac{\Gamma / f}{p (1 + J/fp)}$$

Posons :  $\Gamma/f = K_3$

$J/f = T$

$$\frac{\Theta}{e} = \frac{K_3}{p(1+Tp)}$$

Supposons une relation linéaire  $K_4$  entre la rotation  $\Theta$  du servo-moteur et la variation  $\sigma \frac{1}{3} = \frac{dC_3}{C_3}$  du condensateur de rééquilibrage.

$$\sigma \frac{1}{3} = \frac{K_3 K_4}{p(1+Tp)} e = \frac{K_1 K_2 K_3 K_4}{p(1+Tp)} v' = \frac{K_1 K_2 K_3 K_4}{p(1+Tp)} \frac{A}{(1+A)^2} (\sigma \frac{1}{4} - \sigma \frac{1}{3})$$

$$\sigma \frac{1}{3} = \frac{K}{p(1+Tp)} \frac{A}{(1+A)^2} (\sigma \frac{1}{4} - \sigma \frac{1}{3})$$

avec  $K = K_1 K_2 K_3 K_4$

$$\sigma \frac{1}{3} \left( 1 + \frac{K}{p(1+Tp)} \frac{A}{(1+A)^2} \right) = \frac{K}{p(1+Tp)} \frac{A}{(1+A)^2} \sigma \frac{1}{4}$$

$$\sigma \frac{1}{3} = \frac{K}{p(1+Tp)} \frac{A}{(1+A)^2} \frac{I}{1 + \frac{KA}{p(1+Tp)(1+A)^2}}$$

$$= \frac{KA}{p(1+Tp)(1+A)^2 + KA} = \frac{I}{1 + p(1+Tp) \frac{(1+A)^2}{A} \frac{1}{K}}$$

$$(7) \frac{\sigma \frac{1}{3}}{\sigma \frac{1}{4}} = \frac{1}{1 + \frac{I}{K} \frac{(1+A)^2}{A} p(1+Tp)}$$

- Application au pont construit :

$$- A = \frac{C_1}{C_2}$$

$$C_1 = 87,8 \text{ pF.}$$

$$C_2 = 86,95 \text{ pF.}$$

Nous pouvons donc considérer  $A \neq 1$

$$-\sigma \frac{1}{3} = \frac{dC_3}{C_3}$$

Les variations de  $C_3$  sont dues à la rotation  $\varphi$  du rotor à partir d'une position d'équilibre

$$dC_3 = b \varphi$$

$$\sigma \frac{1}{3} = \frac{b \varphi}{C_3}$$

$$-\sigma \frac{1}{4} = \frac{dC_4}{C_4}$$

Les variations de  $C_4$  sont dues à la variation de la permittivité du cyclohexane suivant sa teneur en eau.

Soit  $\mathcal{E} = f(p)$  la relation liant la permittivité  $\mathcal{E}$  à sa teneur en eau  $\alpha$ .

$$d \mathcal{E} = \frac{\partial f(\alpha)}{\partial \alpha} d \alpha$$

En première approximation, nous supposons

$$\frac{\partial f(\alpha)}{\partial \alpha} = \text{constante} = a.$$

$$d \mathcal{E} = a d \alpha$$

Soit maintenant  $\alpha$  l'écart de la teneur en eau par rapport à la position d'équilibre.

$$\delta \dot{4} = \frac{dC_4}{C_4} = \frac{a}{C_4} \alpha$$

La relation (7) s'écrit en considérant les transformées de Laplace  $\bar{\Phi}$  et  $\mathcal{L}$  de  $\psi$  et  $\alpha$ .

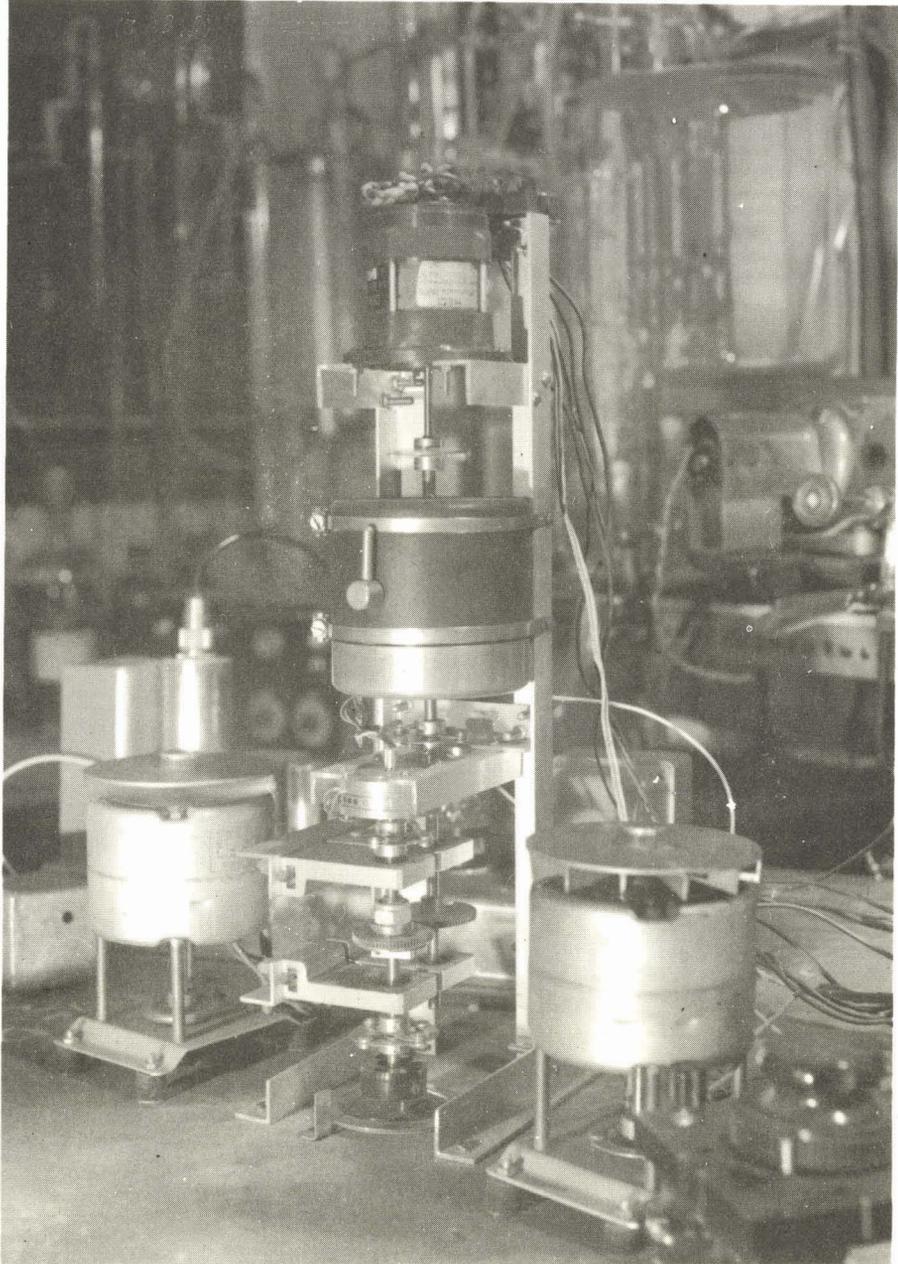
$$\frac{b/c_3 \bar{\Phi}}{a/c_4 \mathcal{L}} = \frac{1}{1 + 1/K_4 \cdot p(1 + T_p)}$$

$$\frac{\bar{\Phi}}{\mathcal{L}} = \frac{c_3}{c_4} \frac{a}{b} \frac{1}{1 + \frac{4}{K} p + \frac{4}{K} T_p^2}$$

comme  $\frac{c_3}{c_4} = \frac{1}{A} = 1$ , finalement :

$$(8) \quad \boxed{\frac{\bar{\Phi}}{\mathcal{L}} = \frac{a}{b} \frac{1}{1 + \frac{4}{K} p + \frac{4}{K} T_p^2}}$$

L'expression (8) est la fonction de transfert reliant la rotation du condensateur variable à la teneur en eau du cyclohexane.



Discussion :

Théoriquement, par suite des approximations faites, l'asservissement est un système du second ordre.

La fonction de transfert en chaîne ouverte présentant une intégration, l'erreur en régime statique est nulle.

Ces systèmes sont stables. La fréquence propre et le coefficient d'amortissement sont donnés par les formules classiques.

Bien qu'en fait, ce système ne soit pas du second ordre et que les saturations atteintes dans les amplificateurs le rendent non linéaire, nous n'avons pas rencontré de difficultés à le mettre en service.

Une boîte de vitesses à 12 rapports ERAL a été intercalée entre le servo-moteur et le rotor du condensateur. La vitesse du synchronisme du moteur est de 1.500 tours/minute. Une démultiplication de raison 1/2048 a été déterminée expérimentalement, comme compromis entre : la vitesse de réponse, la stabilité et l'absence de zone morte, avec une amplification moyenne.

Le curseur d'un potentiomètre LEGPA est couplé à l'axe du rotor du condensateur. La résistance entre une borne et le curseur est assurée par un pont de Wheastone automatique enregistreur MECI et donne la grandeur cherchée.

La photo de la figure 25 montre l'amplificateur à courant continu ainsi que le groupe servo-moteur démultiplicateur.

## 2 - CIRCUIT DU CYCLOHEXANE

Dans le schéma de fabrication du polyéthylène, une colonne à déshydrater le cyclohexane par distillation est prévue et le rôle du "Permittor" est précisément de contrôler la bonne marche de cette colonne.

Une fraction du cyclohexane ainsi traité en fabrication est envoyée à l'appareil de mesure. Le liquide se trouve alors à une température comprise entre 65 et 75°C. et sous une pression relative de 50 cm de cyclohexane.

La figure 26 présente les étapes qu'il parcourt jusqu'à l'appareil.

Pour retrouver les conditions de fabrication, au laboratoire, le liquide est chauffé au bain-marie à 70°C.

Les suspensions solides sont d'abord arrêtées sur un filtre très fin composé d'une rondelle de téflon fritté avec des pores de quelques microns.

Le liquide est ensuite scindé en deux parties.

Les débits dans chaque conduite sont égalisés à l'aide de micro-vannes.

Des rotamètres indicateurs permettent de vérifier la bonne exécution de ce réglage.

L'une des deux fractions du cyclohexane traverse alors le déshydrateur.

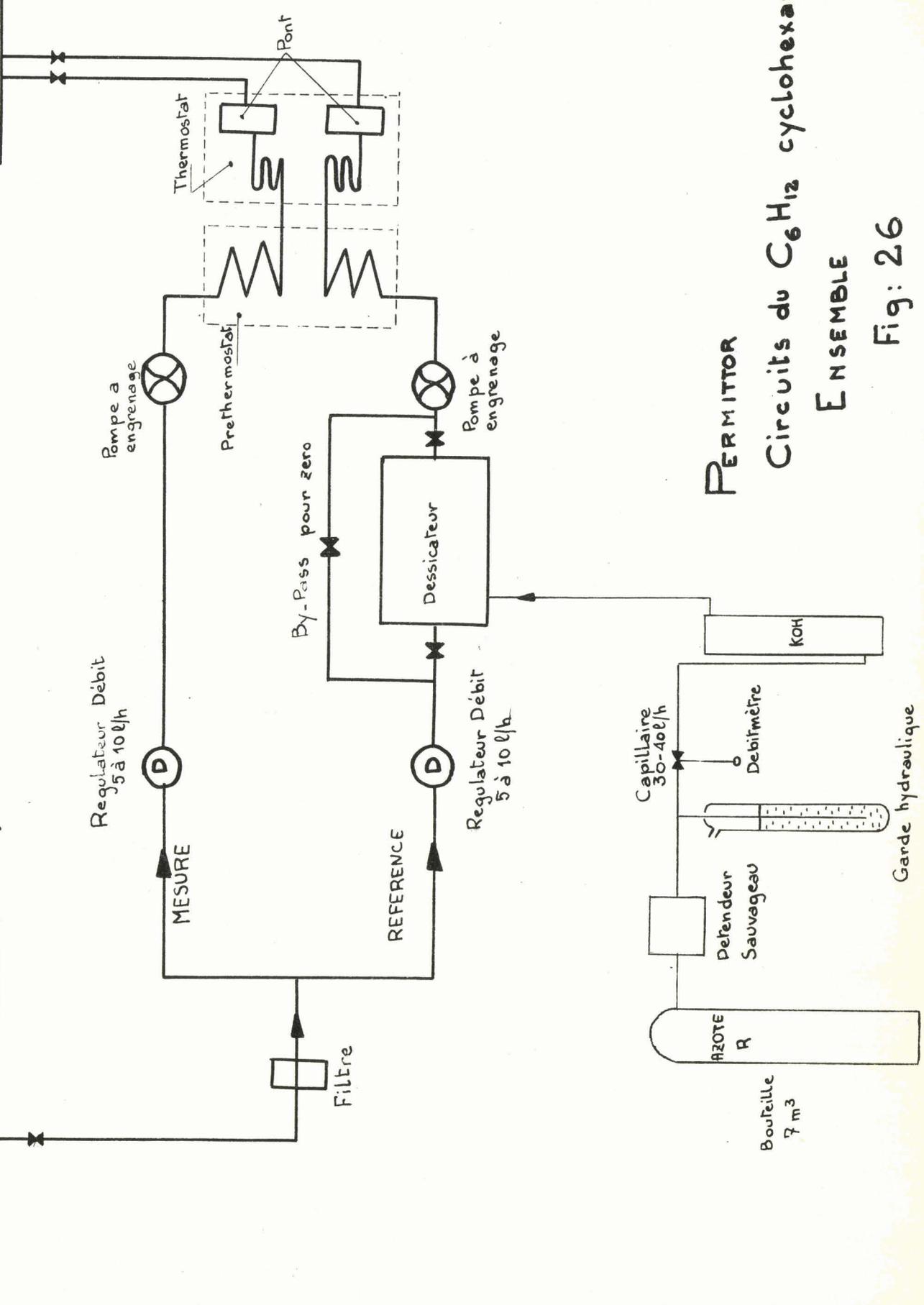
Les deux tubulures sont ensuite groupées pour l'entrée dans le thermostat qui doit homogénéiser leur température au 1/100 de degré près.

Puis les liquides pénètrent dans leur cellule respective pour la comparaison de leur permittivité.

A leur sortie, ils sont renvoyés en fabrication.

Sortie Colonne Cyclohexane de fabrication  
à déshydrate  
C<sub>95</sub> < T<sub>90</sub> < 95  
P = PA + 50 cm C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>

Retour fabrication  
Bac de recuperation  
cyclo,  
souille



PERMITTOR

Circuits du C<sub>6</sub>H<sub>12</sub> cyclohexane

ENSEMBLE

Fig: 26

Le débit total de cyclohexane est de l'ordre de 20 litres/heure.  
Le volume d'une cellule de mesure est d'environ  $1/4$  de litre. Le temps de réponse, dans la cellule seule, est de 1,5 minute.

Nous allons décrire :

- 2-1 : Les problèmes rencontrés pour le mouvement des liquides
- 2-2 : Le déshydrateur
- 2-3 : La thermostatisation

2-1 : NOUVEAU DES LIQUIDES

Lors des premiers essais, le remplissage des cellules s'opérait par gravité et nous ne pensions pas utiliser de pompes.

Mais un phénomène curieux s'est alors manifesté.

Les cellules sitôt remplies, l'aiguille de l'enregistreur faisait des bonds brusques ; la fréquence de répétition de ces bonds allait en diminuant jusqu'à leur disparition au bout de trois jours.

Il était manifeste qu'un phénomène parasite perturbait de façon brutale la capacité des cellules.

Nous avons émis l'hypothèse qu'il s'agissait d'un dégazage du liquide et que nous observions la disparition progressive des bulles de gaz dissous.

Les mesures prises, à la suite de cette hypothèse, ont éliminé cette perturbation, et sembleraient donc la confirmer.

Remarque : Si ce phénomène a été parfaitement reproductible lors du démarrage des essais et des enregistrements peuvent en témoigner, à l'heure actuelle, ces manifestations auraient disparu. Il est vrai, qu'entre-temps, d'autres paramètres ont été modifiés.

Ce point troublant serait donc à éclaircir.

Ces réserves faites, nous allons exposer les dispositions adoptées, peut être à tort.

Deux propriétés sont appliquées

a) La quantité de gaz dissoute est plus grande dans un liquide froid que dans un liquide chaud.

b) La compression d'un liquide peut arrêter le dégazage.

Les dispositions prises sont les suivantes :

a) Le cheminement du cyclohexane a été conçu pour que la température de celui-ci aille en décroissant jusqu'au pont.

L'expérience a montré qu'aucun calorifugeage intermédiaire n'était nécessaire.

b) Pour comprimer le liquide, au lieu de le laisser quitter les cellules à la pression atmosphérique, nous lui avons fait traverser une colonne de liquide de contrepression.

(Nous passons sous silence les essais faits avec du mercure et les ennuis qui en ont résultés : les impuretés du mercure ont souillé le cyclohexane et le rendaient impropre à tout autre essai ; nous avons dû étudier une purification très soignée de ce mercure) jusqu'au jour où après des essais infructueux de soupapes à membrane de téflon, et de guerre lasse, nous avons utilisé des colonnes de 3 mètres remplies de cyclohexane.

Mais cette contrepression jointe aux pertes de charge du liquide dans le filtre fritté et dans les tuyauteries nous ont obligés à utiliser des pompes pour assurer la circulation.

Pour un débit de l'ordre de 10 litres/heure dans chaque voie, avec une contrepression de l'ordre de 3 mètres de cyclohexane, et pour disposer d'un certain volant, nous avons estimé la pression motrice nécessaire à  $2 \text{ kg/cm}^2$ .

Ignorant les difficultés que nous allions rencontrer, nous avons recherché des pompes à engrenages.

Celles-ci ont l'avantage de donner à vitesse constante un débit constant, sans pulsations et une pression motrice élevée sous un faible volume.

Par ailleurs, elles sont très couramment utilisées dans l'automobile et dans les commandes hydrauliques pour véhiculer de l'huile, et sont donc de prix réduit. Cette dernière application, de loin la plus fréquente a été la source de nos malheurs : car aucun graissage n'est prévu, alors que le cyclohexane n'a pas les mêmes propriétés lubrifiantes que l'huile.

Nous avons essayé d'adapter nous-mêmes des pompes de Jeep récupérées chez un ferrailleur en remplaçant un engrenage métallique par un engrenage en téflon : si ce dernier corps, merveilleux dans de nombreuses applications, a un coefficient de frottement très réduit, il présente pour des applications mécaniques, le défaut rédibitoire d'avoir un coefficient de transmission thermique très faible et par suite de ne pas évacuer la chaleur produite dans tout mécanisme.

Finalement, le grippage bloquait tout fonctionnement.

Nous avons consulté une vingtaine de constructeurs français et étrangers : outre les caractéristiques de débit et pression, l'appareil retenu ne devait souiller en aucune manière le cyclohexane véhiculé. A l'exception du téflon, nous n'avons trouvé aucun matériau synthétique qui ne soit dissous peu ou prou par le cyclohexane. Seul, peut être le VITON a un comportement satisfaisant, mais son apparition a eu lieu trop tard pour nous.

Toutes les réponses ont été négatives à l'exception des pompes SIGMA pour viscosité et les pompes spéciales pour industrie chimique, type HERAKLES des Ets. JOHANNES.

Les premières ont l'étanchéité assurée par un rodage mécanique très soigné. Leur fabrication était d'ailleurs abandonnée et les Etablissements SIGMA ont eu l'obligeance de fouiller dans leurs réserves pour nous en livrer.

Elles nous ont permis en tout cas de démarrer nos essais. Les deux pompes ont été montées sur les deux arbres d'un moteur à courant continu de 1/15 de CV à vitesse maintenue constante grâce à un régulateur de vitesse électronique ROCHAR.

Plus tard, beaucoup d'espairs ont été placés dans le groupe moteur-double pompes fourni par les Ets. JOHANNES.

Les seuls matériaux rencontrés par le liquide sont l'acier inoxydable et le téflon, et leur fonctionnement a été relativement satisfaisant avec toutefois des fuites que nous n'avons pas réussi à étancher.

2-2 DESHYDRATATION DU CYCOHEXANE

L'expérience a montré qu'en faisant barboter de l'azote sec dans du cyclohexane renfermant jusqu'à 50 p.p.m. d'eau, ce cyclohexane était complètement déshydraté.

Essai de théorie :

L'eau et le cyclohexane ont une certaine tension de vapeur à la température ambiante : 18 et 100 mm de mercure respectivement. On peut admettre que l'azote sec se saturerait alors du mélange azéotrope de vapeur d'eau et de cyclohexane. En renouvelant l'azote sec, on arrive ainsi à épuiser toute l'eau contenue dans un certain volume de mélange.

Description de l'installation : (fig. 27)

La déshydratation s'effectue dans une colonne remplie d'un garnissage en acier inoxydable, genre ameaux de Raschig, destinée à obtenir une grande surface de contact liquide gaz.

Le cyclohexane arrive à la partie supérieure, à débit constant. Le régulateur de débit est constitué par une cuve à niveau constant chargeant un tube capillaire.

Le débit est de l'ordre de 10 litres/heure.

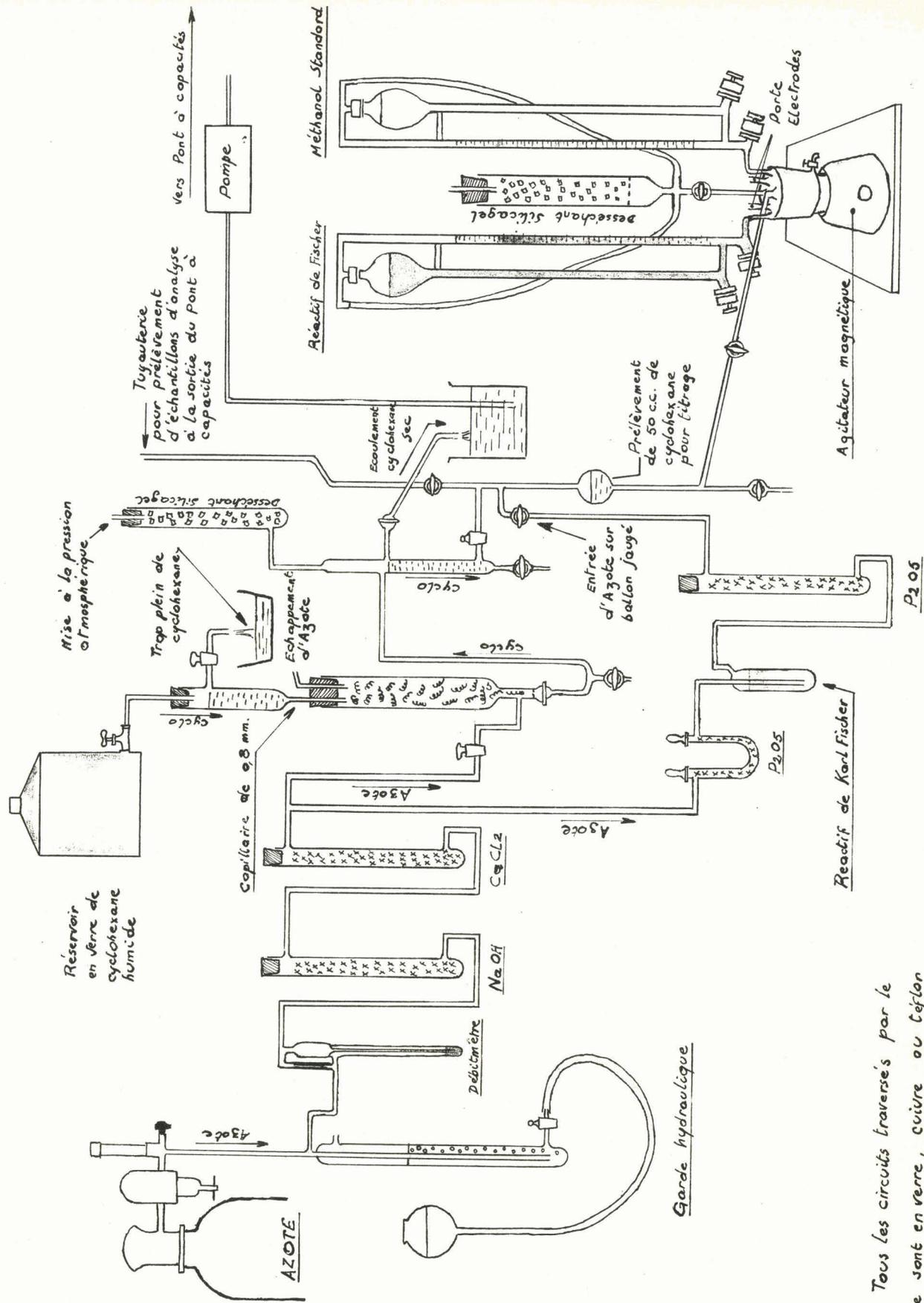
L'azote sec pénètre par la partie inférieure de la colonne :

Il est fourni à partir de bouteilles de 7 m<sup>3</sup>-150 kg/cm<sup>2</sup> en qualité R de l'Air Liquide, c'est-à-dire spécialement purifié.

Après traversée d'un détendeur classique à deux étages, sa pression est maintenue constante par une garde hydraulique à l'huile de silicone.

Son débit repéré par un débitmètre à capillaire, il traverse 2 colonnes de soude et de chlorure de calcium avant de pénétrer dans la colonne de déshydratation.

DESHYDRATATION DU CYCLOHEXANE



**Nota.**— Tous les circuits traversés par le cyclohexane sont en verre, cuivre ou téflon

Fig: 27

Son débit est de l'ordre de 50 litres/heure.

Le cyclohexane déshydraté est recueilli à la partie inférieure de la colonne et envoyé dans un petit réservoir tampon avant d'être repris par la pompe.

Un dispositif d'envoi d'échantillon, à l'abri de l'air, vers l'analyse Karl Fischer est prévu : une manoeuvre de robinetterie aiguille le liquide dans une fiole jaugée de 50 cc. L'installation d'analyse est balayée par de l'azote subissant des déshydratations supplémentaires par traversée de 2 colonnes d'anhydride phosphoreux et une colonne contenant du réactif Karl Fischer.

2-3 LA THERMOSTATISATION

Nous avons souligné précédemment l'importance de l'égalité des températures des 2 fractions de cyclohexane.

Le pont a été logé dans une enceinte à température soigneusement contrôlée et les 2 liquides ont été amenés à cette même température.

Thermostatisation du Pont de mesure.- (fig. 28)

Celle-ci concourt à la stabilité des indications.

L'enceinte à température constante a été réalisée sur le principe des "marmites norvégiennes". Un épais blindage en un matériau réfractaire à la chaleur (vermiculite) isole un volume intérieur ; celui-ci est bordé par une cuve à double paroi en cuivre rouge. A l'intérieur de celle-ci, une cloison hélicoïdale délimite un conduit en spirale montante pour un courant d'eau à température réglée. Imbriquées dans cette cloison, et léchées à contre-courant se trouvent les 2 tuyauteries amenant les cyclohexanes.

Une pompe GUINARD de débit  $1,4 \text{ m}^3/\text{h}$  assure le mouvement de cette eau. Le volume enclos dans la double paroi est de 14 litres. L'eau est ainsi renouvelée toutes les 36 secondes. Sa température est maintenue constante par un régulateur SECASI ; celui-ci comprend un thermomètre à contact VERTEX plongeant dans l'eau et commandant des résistances chauffantes.

Bien que fermés par un disque de Klégécell de 25 mm d'épaisseur, recouverts d'un disque de contreplaqué, des sondages à l'intérieur de la cuve ont montré des hétérogénéités de température. Pour les annuler, 2 petits ventilateurs brassent l'air à l'intérieur de la cuve ; les moteurs sont à l'extérieur pour que leur échauffement ne perturbe pas l'équilibre thermique de l'enceinte.

Homogénéisation des températures du cyclohexane brut et du cyclohexane déshydraté avant l'entrée dans le pont de mesure :

La température initiale du cyclohexane est supérieure à 65°C. On désire l'amener à  $35 \pm 0,01^\circ\text{C}$ .

Une première solution a consisté, suivant les principes des échangeurs de température à former les deux tuyauteries en serpentins, à les imbriquer étroitement et à les faire lécher à contre-courant par l'eau thermostatée à 35°C. des tubes.

Lors des premiers essais, cette opération se faisait en deux étapes :

Une préthermostatisation avait lieu en amont de l'appareil de mesure, dans un échangeur alimenté par l'eau quittant la "marmite norvégienne".

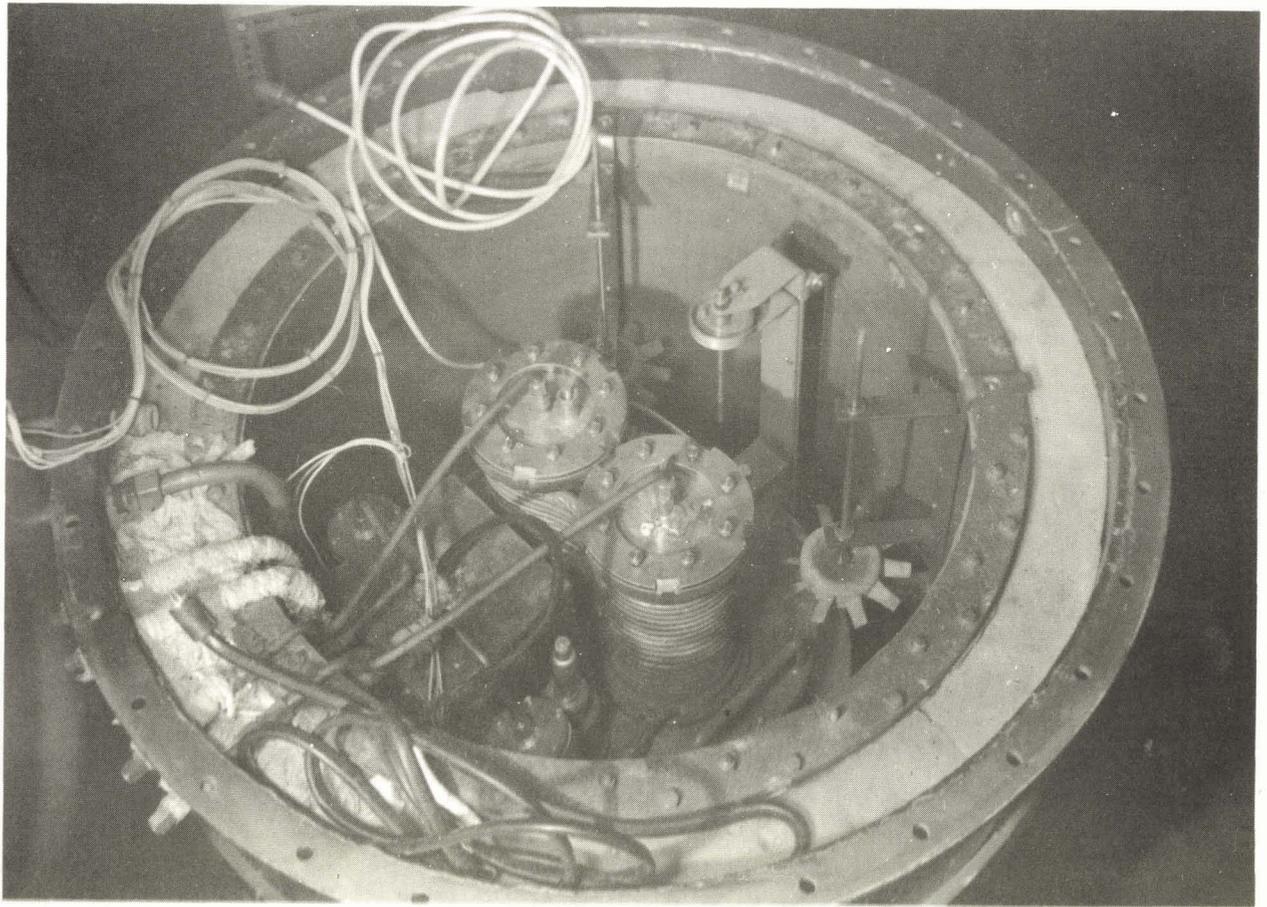
On s'est alors aperçu que même avec des tubes de cuivre de 2/4, des longueurs de tuyauteries de l'ordre de 30 à 50 mètres étaient nécessaires. Outre l'alourdissement de l'appareil, et l'accroissement de la perte de charge, le temps de réponse de l'appareil devenait prohibitif.

Il a donc fallu mettre au point un échangeur efficace et de volume réduit.

On sait que l'efficacité d'un échangeur est essentiellement fonction du rapport surface de contact au volume.

Des tubes à ailettes ont été essayés : amélioration insuffisante.

Monsieur NUEZ (3) a démontré l'intérêt d'échangeurs de températures constitués par des plaques très fines réalisées de la manière suivante : Deux rectangles de 100 x 50 mm de clinquant de cuivre sont soudées sur un cadre composé d'un fil de cuivre étamé de 0,5 mm de diamètre.



Dix plaques se sont révélées plus efficaces que 50 mètres de tuyauteries.

Malheureusement, leur réalisation est délicate et toute augmentation de pression leur est fatale.

Finalement, la solution définitive a été trouvée en aplatissant un tube rond de 40 mm de diamètre.

#### Contrôle des résultats de thermostatisation :

Les mesures de température ont été faites à l'aide de sondes à platine, 100 ohms à 0°C et de faibles dimensions. Les variations de résistance sont mesurées par un enregistreur MECI, du type pont de Wheastone automatique.

Le circuit de ce pont a été déterminé (figure 30) pour avoir une échelle totale de 34 à 36°C sur 250 mm ; soit une sensibilité de 0,008°C par mm de déviation.

Pour des mesures comparatives de température, un montage différentiel a été réalisé pour enregistrer les écarts de température entre 2 sondes. L'échelle totale couvrait  $\pm 1^\circ\text{C}$  d'écart entre deux sondes.

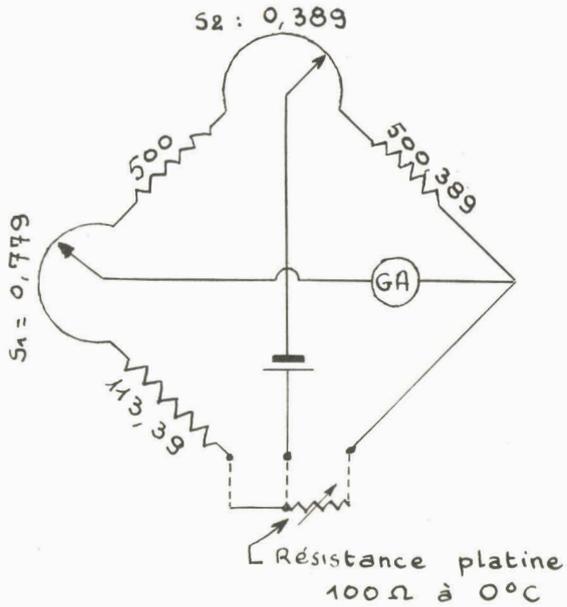
Ce dispositif est notamment utilisé pour comparer les températures des deux cyclohexanes. Une sonde de platine est immergée dans chaque conduite à l'entrée des condensateurs de mesure ; les fils de liaison traversent le tube par des jonctions à perles de verre soudées sur le métal.

Un calorifugeage réalisé par un manchon d'araldite moulé sur la perle de verre combat une éventuelle hétérogénéité thermique due à l'introduction des sondes à platine.

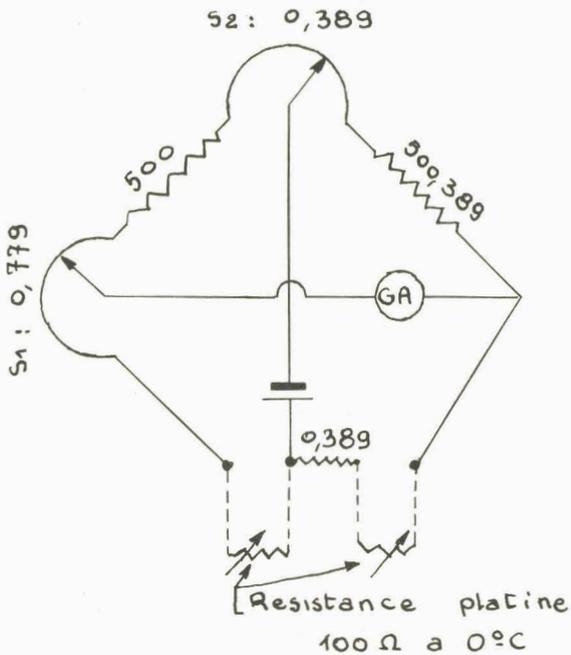
L'homogénéité des températures des cyclohexanes à  $\pm 0,01^\circ\text{C}$  a ainsi pu être vérifiée sur des mois de fonctionnement.

SCHEMA de PRINCIPE de L'ENREGISTREUR MECI TYPE SPEEDOMAX

ECHELLE de LECTURE : 2°C (34 à 36°C).



Echelle de lecture : 34 à 36°C



Echelle de lecture différentielle  
 $t_1 - t_0 = \pm 1^\circ\text{C}$   
 $34^\circ\text{C} \leq t_0, t_1 \leq 36^\circ\text{C}$

3 - RESULTATS D'ESSAIS

Cet appareil a été construit par des étapes successives.

Après avoir vérifié expérimentalement que la variation de teneur en eau du cyclohexane était décelable par une mesure de permittivité, notre première tâche a été la construction du pont et la vérification de la stabilité du zéro après symétrisation des cellules par réglage des condensateurs d'appoint ; nous avons vérifié ensuite la sensibilité et la fidélité des indications.

Nous sommes très gênés par l'absence de méthode de recoupement sérieux. Nous pensons que la seule méthode connue, celle de Karl Fischer est insuffisante pour ces faibles teneurs. Elle peut donner des indications mais son imprécision est trop grande pour permettre un étalonnage de l'appareil.

Le seul test valable est d'étudier la réponse de l'appareil en fonction de la marche du déshydrateur à barbotage d'azote et d'obtenir des résultats reproductibles en fonction du débit d'azote.

Nous allons expliciter les essais de stabilité de zéro et les essais d'étalonnage de l'appareil.

### 3 - 1 ESSAIS DE STABILITE DE ZERO :

Pour les raisons données ci-dessus, le montage utilisé est celui de la figure 12.

Le seuil de déséquilibre décelable a été de  $1/4 \cdot 10^{-6}$  de la tension d'alimentation du pont.

Les enregistrements de la tension de déséquilibre ont été poursuivis sur plusieurs mois et les résultats sont absolument probants.

#### - Symétrisation des cellules par réglage des condensateurs d'appoint :

La première condition imposée au pont est que le zéro ne doit pas varier lorsque les deux cellules de mesure contiennent le même fluide : air - benzène - cyclohexane. Le zéro doit rester stable avec un liquide au repos ou en circulation.

Les condensateurs  $C_1$  ,  $C_2$  ont été ajustés au montage à l'aide du pont 716C.

On a opéré de la manière suivante :

- Le condensateur de rééquilibrage  $C_6$  (figure 4) étant au zéro, les deux cellules  $C_3$  et  $C_4$  sont remplies du même cyclohexane.

Le zéro est établi en manoeuvrant  $C_7$  et  $C_8$  et est vérifié au moins sur 24 heures.

- Le liquide est évacué sous une pression d'azote R et on sèche ensuite très soigneusement par passage lent d'azote R. Cette opération peut être suivie en enregistrant la tension de déséquilibre, en général, l'arrêt de l'aiguille signale l'évacuation totale des cellules.

Pour plus de sûreté, l'azote sortant est analysé dans une cellule . . . E.V.W. construite par les Ets. KUHLMANN (on brûle l'hydrocarbure et on dose le gaz carbonique obtenu).

Cette opération de séchage peut durer 72 heures.

Les cellules vides, on réajuste le zéro en manoeuvrant cette fois, le condensateur micrométrique C<sub>5</sub>.

Et on répète ces deux opérations jusqu'à ce que le zéro reste immobile que les cellules soient vides ou pleines.

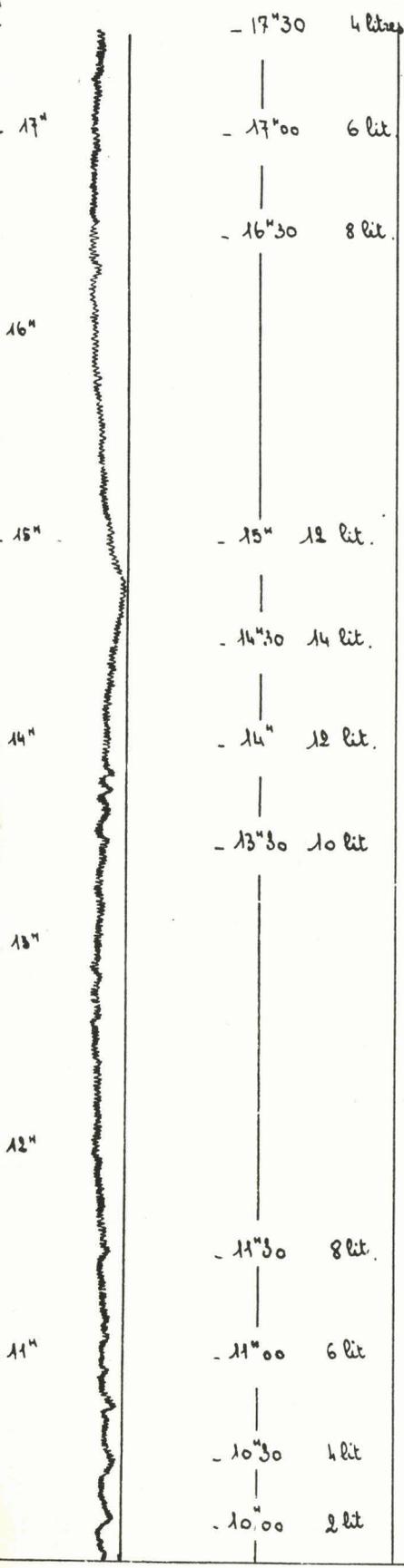
Le zéro est également vérifié avec les liquides en circulation.

- Influence du débit sur les indications de l'appareil :

L'enregistrement de la figure 30 représente les résultats obtenus en relevant la position du condensateur de rééquilibrage pour des débits d'alimentation des cellules variant entre 10 et 4 litres par heure.

Les variations maxima relevées sont de 1,5 division.

Les indications de l'appareil sont également insensibles à des différences de débit dans les deux cellules.



- Etude de stabilité  
en fonction des débits -

Cyclo. identique, avec débits égaux  
pour les 2 cellules

Fig:30

3-2 INDICATIONS DU PERMITTOR EN FONCTION  
DE LA TENEUR EN EAU DU CYCLOHEXANE

Les conditions rigoureuses de l'étalonnage auraient demandé :

a) que le débit d'azote du déshydrateur soit réglé à une valeur assez élevée pour enlever l'eau d'un cyclohexane saturé.

b) que l'on puisse disposer de cyclohexane avec des teneurs en eau connues et stables sur une période assez longue pour permettre des mesures répétées.

Si la réalisation de la première condition n'offre pas de difficultés, il n'en est pas de même de la seconde.

L'expérience nous a d'abord montré qu'il est difficile de saturer d'eau le cyclohexane ; nous procédons de la manière suivante :

On superpose l'eau et le cyclohexane dans un même récipient. Par l'intermédiaire d'un tube en verre terminé par une pastille de verre fritté, on envoie un fort courant d'azote. Le remous très violent disperse l'eau.

La teneur en eau, mesurée au Karl Fischer, peut atteindre dans ces conditions 30 p.p.m.

Mais, par suite du préchauffage, cette teneur évoluait et il était impossible de faire une mesure.

Des valeurs intermédiaires stables étaient encore plus difficiles à obtenir.

Aussi, avons-nous procédé différemment.

Le cyclohexane hydraté est d'abord admis dans les deux cellules et le zéro vérifié.

L'azote de déshydratation est coupé pendant cette opération.

Puis on augmente par paliers le débit d'azote, et on relève les indications.

La fidélité est vérifiée en examinant si on retrouve bien le zéro lorsqu'on coupe à nouveau l'azote.

Des mesures au Karl Fischer ont tenté de suivre la marche de la déshydratation.

Le cyclohexane ayant subi la déshydratation la plus forte, avec un débit d'azote de l'ordre de 35l/h pour un débit de liquide de 5 litres/heure, réagit dès la première goutte de réactif et indiquerait une teneur en eau nulle.

Mais les mesures faites sur les valeurs intermédiaires ont donné des dispersions de l'ordre de 50% avec une reproductibilité aléatoire.

D'autre part, des mesures faites à différents intervalles sur le cyclohexane humide ont mis en évidence l'évolution de celui-ci.

Dans ces conditions, une étude plus poussée et probablement d'autres aménagements sont nécessaires pour obtenir du cyclohexane stable.

Et par ailleurs, des améliorations doivent être apportées à la précision de la méthode de Karl Fischer pour ces teneurs.

Les courbes des figures 31 - 32 - 33 - sont des enregistrements des résultats obtenus pour différents débits d'azote.

En abscisse est portée la rotation du condensateur variable : 100 divisions correspondent à 340°C et occupent 250 mm de papier.

On peut noter sur ces courbes :

- la reproductibilité du zéro lorsque les deux cellules du pont sont traversées par le même liquide.
- la sensibilité obtenue
- l'appareil "réagit" à l'azote
- en gros, d'après la figure 33, la déviation du condensateur variable est de 50 divisions pour 30 p.p.m. soit environ 4 mm par p.p.m.

Essai de coulage de cyclohexane sec  
sous differents debits d'azote 22.1.60

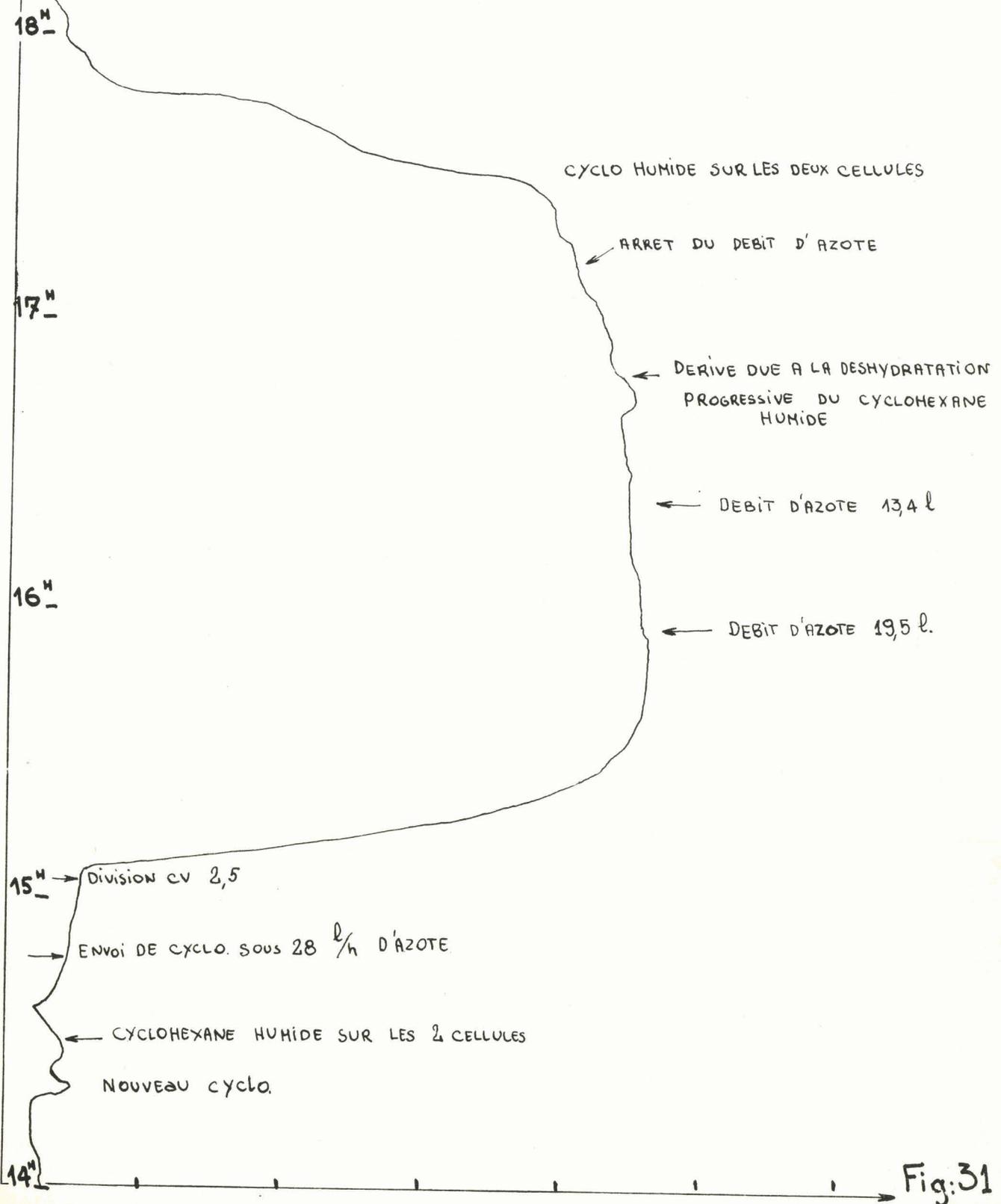


Fig:31

PERMITTOR.

CYCLO.HUMIDE SUR LES 2 CELLULES

DEBIT 6  $\frac{1}{R}$  D'AZOTE

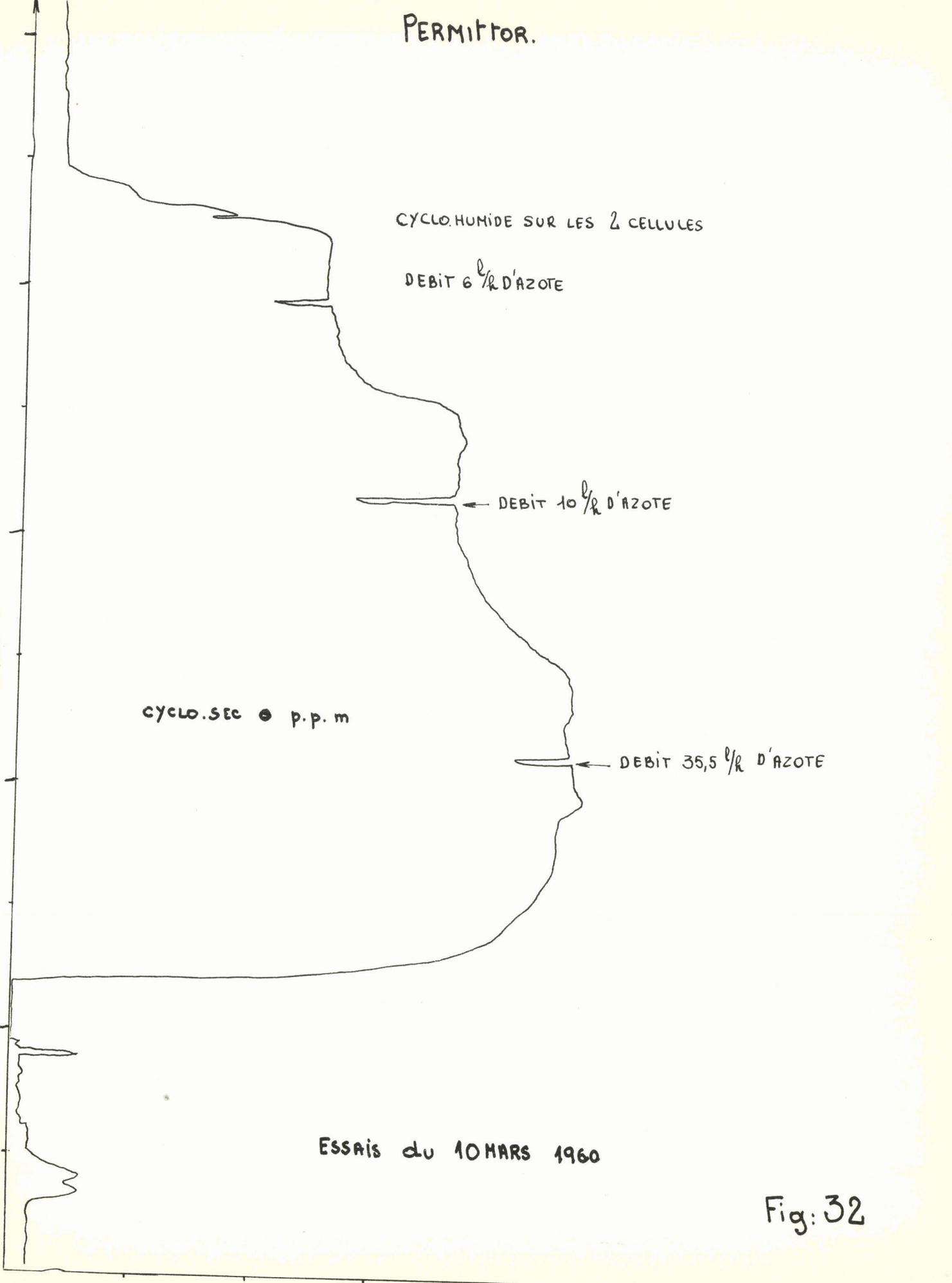
← DEBIT 10  $\frac{1}{R}$  D'AZOTE

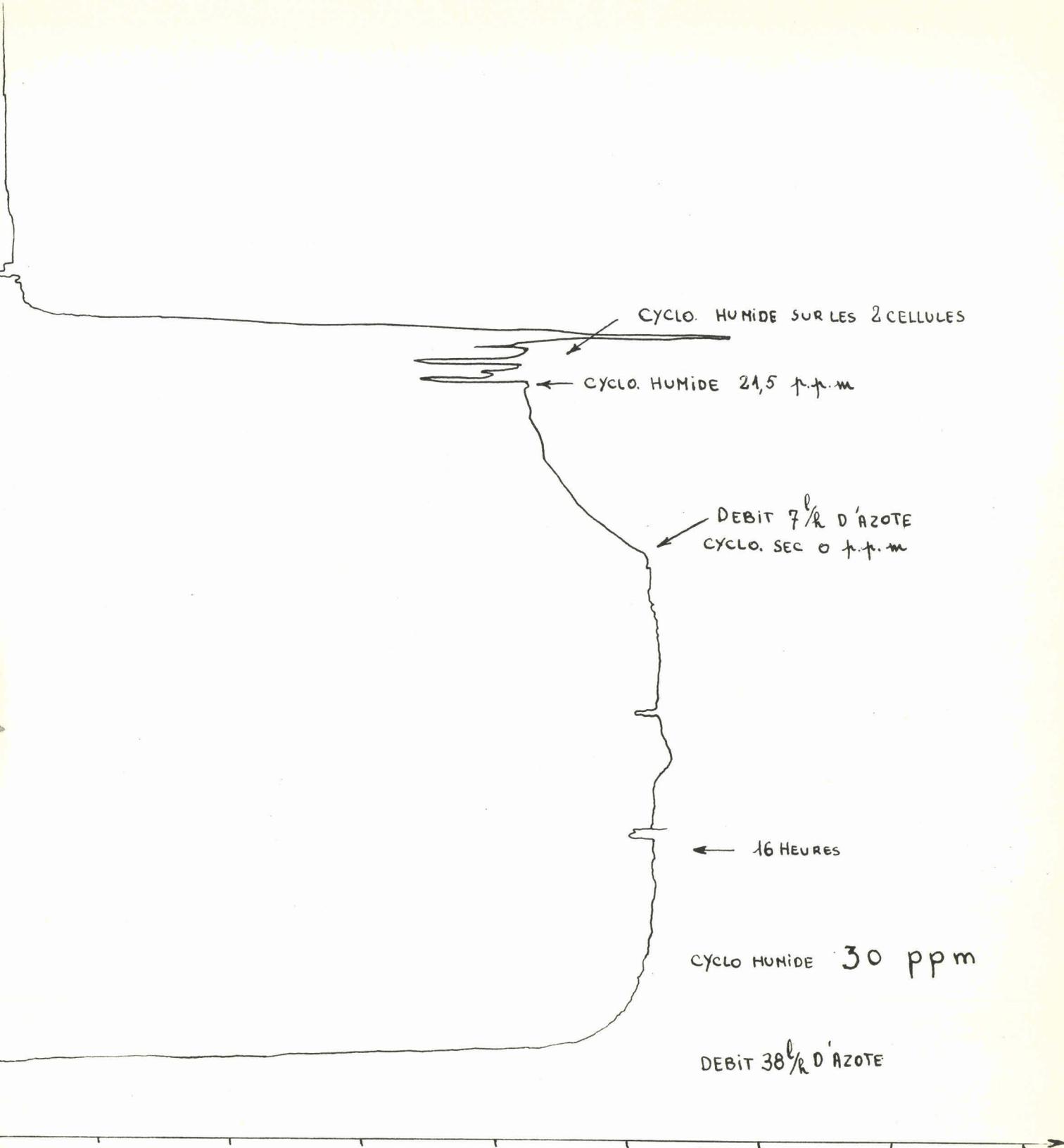
← DEBIT 35,5  $\frac{1}{R}$  D'AZOTE

CYCLO.SEC ● p.p.m

ESSAIS du 10 MARS 1960

Fig: 32





ESSAIS DU 11 MARS 1960

Fig:33

CONCLUSION :

Nous avons décrit la conception et l'exécution d'un appareil de dosage ultra-fin, devant déceler des variations de l'ordre du millionième d'une grandeur.

Au point de vue métrologie, cet appareil est équivalent à une balance de portée 1 kg et de sensibilité 1 mg ou un pied à coulisse d'envergure 1 mètre et de sensibilité un micron.

Les difficultés rencontrées qui sont dues essentiellement à la nécessité d'isoler la grandeur mesurée des interférences parasites, se retrouvent dans tous les appareils de haute précision.

C'est donc bien l'essence même de la mesure demandée qui a conduit à un ensemble relativement complexe.

Nous regrettons de n'avoir pu trouver de méthode de recouplement, mais sommes persuadés que celle-ci aurait justifié les indications de l'appareil.

D'autre part, les hypothèses de départ ont conduit à un ensemble prototype volumineux, qui porte la trace des retouches successives.

2ème PARTIE

---

---

---

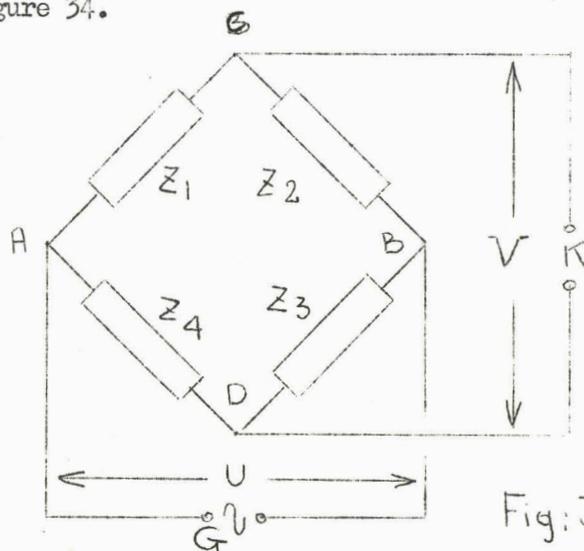
SUR L'EQUILIBRAGE AUTOMATIQUE  
DES PONTS D'IMPEDANCES.

---

EXPOSE DU PROBLEME

DEFINITION ET BUT :

Un pont d'impédances se présente souvent suivant le schéma de la figure 34.



$Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  sont des impédances complexes.

L'une figure l'impédance inconnue dont on recherche la partie active et la partie réactive.

Des éléments à réglages, à valeur connue, figurent parmi les autres.

Fig: 34

- U est la tension d'alimentation du pont fournie par une source G de fréquence f.
- K est le détecteur de zéro ; V la tension à ses bornes.

La manoeuvre des éléments de réglage permet d'annuler V. La lecture de la valeur de ceux-ci renseigne par l'intermédiaire des équations d'équilibre, sur la valeur de l'impédance inconnue.

EQUILIBRE DU PONT ET PARAMETRE DE REGLAGE : [ 4 ]

La condition d'équilibre du pont s'écrit :

(1)  $Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$

Ou, en faisant figurer les admittances complexes

$Y = 1 / Z$

(2)  $Y_1 Y_3 = Y_2 Y_4$

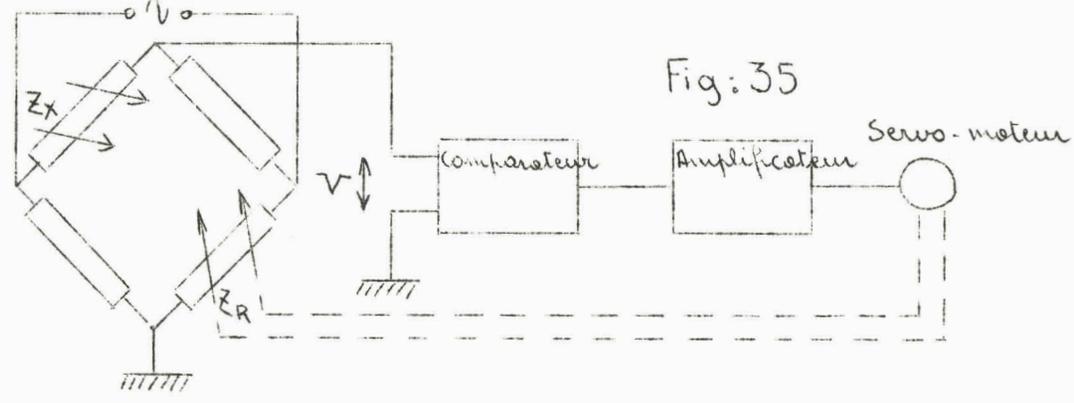
Comme les quantités  $Z_i$  ou  $Y_i$  sont des grandeurs complexes comportant un terme réel et un terme imaginaire, les conditions d'équilibre (1) ou (2) se décomposent en deux conditions d'égalité des termes réels et des termes imaginaires.

L'équilibre d'un pont en courant alternatif nécessite toujours et obligatoirement deux réglages indépendants permettant d'équilibrer :

- a) les termes actifs des impédances
- b) les termes réactifs.

EQUILIBRAGE DES PONTS :

Lorsque l'impédance inconnue  $Z_x$  est différente de  $\frac{Z_2 Z_4}{Z_3}$ , il apparaît une tension d'erreur  $V$  qui, après amplification convenable, commande un servo-moteur (figure 35). Celui-ci agit sur les paramètres de réglage  $Z_R$  de manière à annuler  $V$  et à équilibrer le pont.



En considérant un "opérateur" comme un maillon de système asservi assumant les fonctions d'amplificateur et de servo-moteur, le diagramme fonctionnel de la figure 2 représente l'équilibrage automatique des ponts dans tous les cas.

TENSION DE DESEQUILIBRE V :

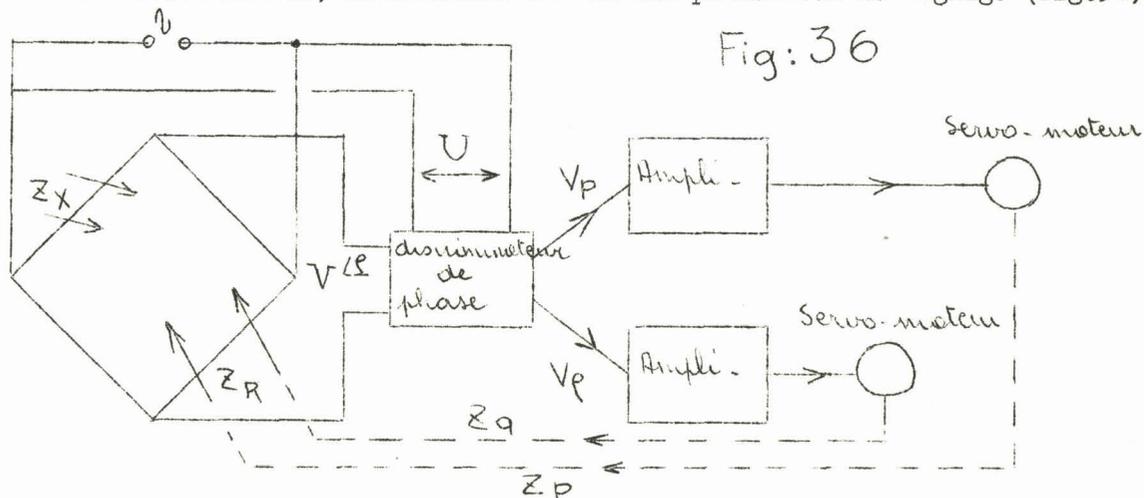
Elle possède deux caractéristiques : son amplitude et sa phase.

Or, avec un opérateur manuel, l'équilibrage s'obtient par actions successives sur les paramètres de réglage en cherchant des minima successifs de l'amplitude de V.

Il y a là un gaspillage certain de l'information apportée par la phase de V.

Une solution rationnelle consiste à exploiter les deux informations de la tension de déséquilibre : amplitude et phase. Ceci peut être obtenu le plus facilement en déterminant la composante en phase  $V_p$  et celle en quadrature  $V_q$  avec une tension de référence. Cette dernière est souvent la tension d'alimentation du pont, mais aussi parfois une tension judicieusement prélevée sur une des branches du pont.

$V_p$  et  $V_q$  commandent chacune une voie d'action distincte (amplificateur - servo-moteur) aboutissant à l'un des paramètres de réglage (fig.36).



Or, nous avons vu que ces paramètres agissent sur la partie active  $Z_p$  et la partie réactive  $Z_q$  d'une impédance de réglage  $Z_R$ . Il semble logique de coupler l'élément actif de réglage à la composante en phase et l'élément réactif à la composante en quadrature. Mais, ceci

dépend aussi de la structure des impédances inconnues : dipôles séries  
ou dipôles parallèles.

OBJET DE CETTE ETUDE

Nous nous proposons d'examiner les problèmes soulevés par la commande automatique de ponts à l'aide de servo-moteurs. La complexité de ce problème réside :

- a) Dans le grand nombre de schémas de ponts ayant chacun leurs propriétés intéressantes. Nous nous efforçons de rester aussi général que possible.
- b) Le diagramme fonctionnel est celui d'un système asservi à deux variables, couplées ainsi que nous l'établirons. Nous n'avons pas eu connaissance de théorie élaborée à ce jour.
- c) Les systèmes ne sont linéaires qu'au voisinage de l'équilibre.

HYPOTHESES ADOPTEES :

- a) L'impédance interne de la source d'alimentation est nulle.
- b) L'impédance du détecteur est infinie.
- c) Il n'y a pas de couplage entre les branches ; en particulier la mutuelle inductance est exclue.

1 : VARIATIONS DE LA TENSION DE DESEQUILIBRE EN FONCTION D'UNE IMPEDANCE :

Nous savons que la tension de déséquilibre  $V$  aux bornes d'un pont est donnée par la relation :

$$V = U \frac{Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)}$$

Pour simplifier nous considérerons  $V' = \frac{V}{U}$

Supposons que  $Z_3$  soit l'impédance variable, nous cherchons  $V' = f(Z_3)$

1. 1 : DANS LE CAS GENERAL, LOIN DE L'EQUILIBRE :

1.1.1 : Méthode analytique de SELETZKY (5)

Théorème : Si S est un vecteur issu de l'origine dont l'équation est une fonction homographique d'un scalaire

$$S = \frac{\alpha + \beta \rho}{\gamma + \delta \rho}$$

son extrémité décrit un cercle lorsque  $\rho$  varie de  $-\infty$  à  $+\infty$ .

La démonstration est dans (6).

Application aux ponts :

1°) Supposons que  $Z_3$  varie à déphasage constant.

Soit  $Z_3^!$  le vecteur unitaire de même phase que  $Z_3$

$\rho$  un scalaire

$$S = \frac{-Z_2 Z_4 + Z_1 Z_3^! \rho}{(Z_1 + Z_2) Z_3 + (Z_1 + Z_2) Z_3^! \rho}$$

L'extrémité de S parcourera un cercle dont les coefficients vaudront :

$$\alpha = -Z_2 Z_4 \quad \beta = Z_1 Z_3^! \quad \gamma = (Z_1 + Z_2) Z_3 \quad \delta = (Z_1 + Z_2) Z_3^!$$

2°) Si la partie résistive  $R_3$  de  $Z_3 = R_3 + jX_3$  varie :

$$S = \frac{-Z_2 Z_4 + jZ_1 X_3 + Z_1 R_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_4 + jX_3) + (Z_1 + Z_2) R_3}$$

S parcourera encore un cercle de coefficients :

$$\alpha = -Z_2 Z_4 + jZ_1 X_3 \quad \beta = Z_1 \quad \gamma = (Z_1 + Z_2) (Z_4 + jX_3)$$

$$\delta = +Z_1 + Z_2 \quad \rho = R_3$$

3°) Si  $X_3$  varie :

$$S = \frac{-Z_2 Z_4 + Z_1 R_3 + jZ_1 X_3}{(Z_1 + Z_2) (Z_4 + R_3) + j (Z_1 + Z_2) X_3}$$

Les coefficients du cercle parcourus par S sont :

$$\alpha = -Z_2 Z_4 + Z_1 R_3 \quad \beta = jZ_1 \quad \gamma = (Z_1 + Z_2) (Z_4 + R_3)$$

$$\delta = j(Z_1 + Z_2) \quad \rho = X_3$$

On voit ainsi que la tension de déséquilibre  $V' = S$  décrit un cercle lorsqu'on agit sur les paramètres de réglage d'un pont de l'une des trois manières suivantes :

- a) Variation d'une impédance à phase constante
- b) Variation de la partie active d'une impédance
- c) Variation de la partie réactive d'une impédance

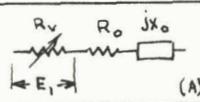
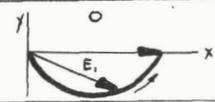
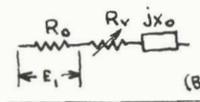
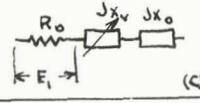
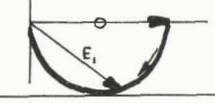
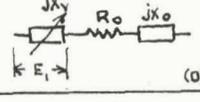
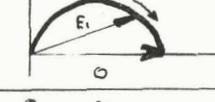
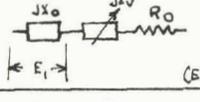
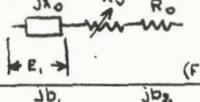
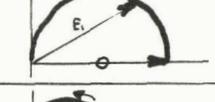
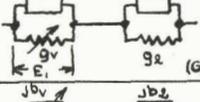
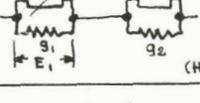
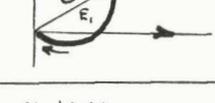
En pratique, les cas b) et c) sont les plus fréquents.

Le diagramme de la tension de déséquilibre d'un pont sera composé de deux faisceaux de cercles.

L'un donnant  $V' = f(R)$  pour différentes valeurs de X.

L'autre donnant  $V' = f(X)$  pour différentes valeurs de R.

On trouvera dans [ 4 ] d'autres considérations analytiques sur ces faisceaux de cercles.

CIRCUIT	E <sub>i</sub> LIEUX	COORDONNEES DU CENTRE	
		X <sub>c</sub>	Y <sub>c</sub>
 (A)		1/2	R <sub>o</sub> / 2X <sub>o</sub>
 (B)		0	-R <sub>o</sub> / 2X <sub>o</sub>
 (C)		1/2	0
 (D)		1/2	-X <sub>o</sub> / 2R <sub>o</sub>
 (E)		0	X <sub>o</sub> / 2R <sub>o</sub>
 (F)		1/2	0
 (G)		1/2 * b <sub>2</sub> / (b <sub>1</sub> + b <sub>2</sub> )	1/2 * -g <sub>2</sub> / (b <sub>1</sub> + b <sub>2</sub> )
 (H)		1/2 * g <sub>2</sub> / (g <sub>1</sub> + g <sub>2</sub> )	1/2 * b <sub>2</sub> / (g <sub>1</sub> + g <sub>2</sub> )

tension appliquée = (1+j0)Volts      v: element variable  
 tous les lieux passent par les points (0,0)      o: element fixe

- Dans les cas (B) et (C) où E<sub>i</sub> est sur R<sub>a</sub>, avec R<sub>o</sub> = R<sub>a</sub> + R<sub>b</sub>, multiplier les 2 coordonnées du centre par  $\frac{R_a}{R_o}$

- Si E<sub>i</sub> est sur X<sub>a</sub> (E) et (F) où X<sub>o</sub> = X<sub>a</sub> + X<sub>b</sub>, multiplier les 2 coordonnées par  $\frac{X_a}{X_o}$

- En (G) et (H) b est  $\frac{X_o}{R_o}$  la susceptance  
 g est la conductance

## Lieux de Graham

Fig: 37

Remarque 1 : Pour tracer pratiquement ces cercles, on peut a) soit utiliser les formules analytiques du rayon r vecteur  $\vec{a}$  joignant le centre à l'origine :

$$r = \frac{\alpha\delta - \beta\gamma}{\delta\gamma_c - \gamma\delta_c}$$

$$\vec{a} = \frac{\alpha\delta_c - \beta\gamma_c}{\gamma\delta_c - \delta\gamma_c}$$

L'indice c signifiant le conjugué de la grandeur à laquelle il est fixé.

b) soit déterminer 3 points facilement calculables du cercle, notamment pour  $\varphi = 0$  et  $\varphi = \infty$

On trouvera un exemple numérique traité dans [ 5 ] ainsi que la manière de graduer ces cercles en fonction de  $\varphi$ .

Hague [ 8 ] reprend tout cet exposé.

Remarque 2 :

Séletzky explicite en outre le tracé de ces diagrammes pour des ponts alimentés à fréquence variable.

2 : METHODE VECTORIELLE DE HOADLEY [ 9 ] ET GRAHAM [ 10 ]

Cette méthode consiste à déterminer séparément et vectoriellement le lieu du potentiel  $V_C$  et  $V_D$  de chaque extrémité C et D de la diagonale détecteur pour les variations des paramètres de réglage.

Ces lieux sont toujours des cercles passant par l'origine.

Graham donne, pour 8 dipôles différents renfermant un paramètre de réglage, les coordonnées des centres des cercles (figure 37)

Cas où le dipôle compte deux organes de réglage (figure 38)

Les vecteurs tension aux bornes de chaque élément d'un dipôle ont toujours le même déphasage entre eux puisque le même courant les parcourt.

On utilise le théorème suivant pour obtenir le lieu résultant.

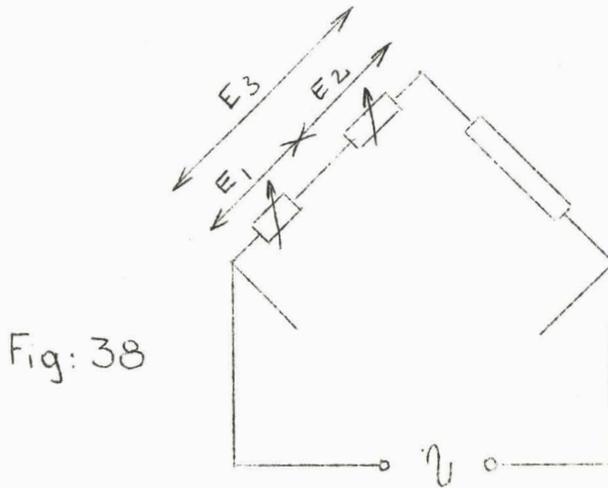


Fig: 38

Soient deux vecteurs  $E_1$  et  $E_2$ , ayant un déphasage  $\Psi$  constant, et dont les extrémités parcourent deux cercles passant par l'origine, les centres ayant pour coordonnées  $(x_1, y_1)$  et  $(x_2, y_2)$ .

L'addition de  $\vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \vec{E}_3$ , dont l'extrémité parcourt également un cercle passant par l'origine.

Le centre de ce cercle a pour coordonnées  $x_1 + x_2$   
 $y_1 + y_2$

et pour rayon :

$$R_3^2 = x_1^2 + y_1^2 + x_2^2 + y_2^2 + 2 \left[ \cos 2\Psi (x_1 x_2 + y_1 y_2) + \sin 2\Psi (y_1 x_2 - x_1 y_2) \right]$$

Deux cas particuliers sont importants car très fréquents en pratique :

a)  $\Psi = 0$       $R_2^2 = (x_1 + x_2)^2 + (y_1 + y_2)^2$

b)  $\Psi = 90^\circ$       $R_3^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2$

On trouvera dans la référence [ 10 ], cinq exemples numériques traités.

1-2 VARIATIONS DE LA TENSION DE DESEQUILIBRE PRES DE L'EQUILIBRE :

Nous avons vu que :

$$(3) \quad v' = \frac{Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)}$$

à l'équilibre  $v' = 0$  et  $Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4 = 0$  (4)

1er cas : Les 2 paramètres de réglage sont dans la même branche  $Z_3$  par exemple

Supposons que  $Z_3$  varie de  $Z_3$  ; d'où  $v'$

$$v' = \left( \frac{\partial v'}{\partial Z_3} \right) dZ_3$$

$$v' = \frac{Z_1 dZ_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} - \frac{Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} \frac{d}{dZ_3} (Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)$$

Or près de l'équilibre, la relation (4) permet d'écrire :

$$(5) \quad v' = \frac{Z_1 dZ_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)}$$

Posons  $A = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_4}{Z_3}$        $\sigma \frac{1}{3} = \frac{dZ_3}{Z_3}$

L'expression (5) devient

$$(6) \quad v' = \frac{A}{(1+A)^2} \sigma \frac{1}{3}$$

Remarque : L'exposé est celui, devenu classique, utilisé pour la discussion de la sensibilité des ponts (11)

...  $v'$  dépend donc de 2 facteurs indépendants :

a) le facteur  $A' = \frac{A}{(1+A)^2}$  qui ne dépend que du type de pont utilisé.

Il est abondamment discuté en (8)

b) le facteur de dérèglement  $\sigma \overset{\cdot}{Z}_3$

$$Z_3 = R_3 + jX_3$$

$$dZ_3 = dR_3 + jdX_3$$

$$\sigma \overset{\cdot}{Z}_3 = \frac{dZ_3}{Z_3} = \frac{dR_3}{R_3 + jX_3} + j \frac{dX_3}{R_3 + jX_3}$$

Posons  $\frac{dR_3}{R_3 + jX_3} = \sigma \overset{\cdot}{R}_3$                        $\frac{dX_3}{R_3 + jX_3} = \sigma \overset{\cdot}{X}_3$

$$\sigma \overset{\cdot}{Z}_3 = \sigma \overset{\cdot}{R}_3 + j \sigma \overset{\cdot}{X}_3$$

$$(7) \quad v^1 = A (\sigma \overset{\cdot}{R}_3 + j \sigma \overset{\cdot}{X}_3)$$

Or, on démontre (8) que le lieu de l'extrémité d'un vecteur issu de l'origine et d'équation :

$$(m_0 + m_1 \rho)$$

$m_0, m_1$  étant des nombres complexes,  $\rho$  un scalaire est une droite passant par  $m_0$  et dont la pente est donnée par l'argument de  $m_1$

Revenons à (7) et supposons :

1) que  $\sigma \overset{\cdot}{R}_3$  varie,  $\sigma \overset{\cdot}{X}_3$  étant fixe :

$v^1$  parcourera une droite de coefficients :

$$m_0 = jA \sigma \overset{\cdot}{X}_3 \quad m_1 = A \quad \rho = \sigma \overset{\cdot}{R}_3$$

2)  $\sigma \frac{1}{X_3}$  varie,  $\sigma \frac{1}{R_3}$  étant fix.

$v'$  parcourera encore une droite de coefficients :

$$m_0 = \Delta' \sigma \frac{1}{R_3} \quad m_1 = j\Delta' \quad = \sigma \frac{1}{X_3}$$

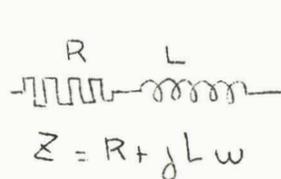
Remarque :

Séletzky et Zürchee calculent  $\sigma \frac{1}{R}$  et  $\sigma \frac{1}{X}$  pour 3 dipôles fréquemment rencontrés.

On pose  $\sigma_R = \frac{dR}{R}$        $\sigma_X = \frac{dX}{X}$

$\theta$  : angle de phase de  $Z_3$        $\operatorname{tg} \theta = \frac{X}{R}$

a) Résistance et inductance en série.



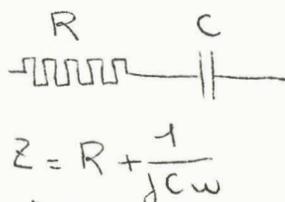
variation de R  
 $\sigma_R = \frac{dR}{R}$

variation de L  
 $\sigma_X = \frac{dL}{L}$

$\sigma'_R = |\sigma \cos \theta| \angle -\theta$

$\sigma'_X = |\sigma \sin \theta| \angle 90^\circ - \theta$

b) Résistance et capacitance en série



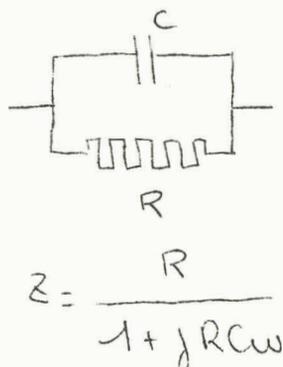
variation de R  
 $\sigma_R = \frac{dR}{R}$

variation de C  
 $\sigma_X = \frac{dC}{C}$

$\sigma'_R = |\sigma \cos \theta| \angle -\theta$

$\sigma'_X = |\sigma \sin \theta| \angle 90^\circ + \theta$

c) Résistance et capacitance en parallèle :



variation de R  
 $\sigma_R = \frac{dR}{R}$

variation de C  
 $\sigma_X = \frac{dC}{C}$

$\sigma'_X = |\sigma \cos \theta| \angle -\theta$

$\sigma'_R = |\sigma \sin \theta| \angle 90^\circ - \theta$

2ème cas : Les paramètres de réglage sont dans des branches différentes :

Supposons que l'on fasse varier la partie réelle de l'impédance  $Z_i$

et soit  $\sigma' R_i = \frac{dR_i}{Z_i}$

et la partie réactive de l'impédance  $Z_j$

et soit  $\sigma' X_j = \frac{dX_j}{X_j}$

Par un raisonnement analogue, on démontre que dans ce cas :

(8)  $v' = A (\sigma' R_i + j \sigma' X_j)$

Le lieu de  $v'$  pour des variations de  $\sigma' R_i$  et  $\sigma' X_j$  sera encore constitué par un faisceau de droites

REMARQUE : Pour un pont existant, ces lieux peuvent être relevés expérimentalement, en utilisant des voltmètres sensibles à la phase comme détecteurs de déséquilibre.

Conclusion de l'étude de la variation de la tension de déséquilibre :

Nous venons donc de démontrer que le lieu de la variation de la tension de déséquilibre en fonction de 2 paramètres de réglage est constitué :

1) Par un faisceau de cercles, dans le cas général où l'on tient compte de la variation du dénominateur de  $V' = \frac{Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)}$

2) Par un faisceau de droites, raccordé évidemment au faisceau de cercles ci-dessus, dans la région voisine de l'équilibre où il est légitime de considérer le dénominateur comme un invariant.

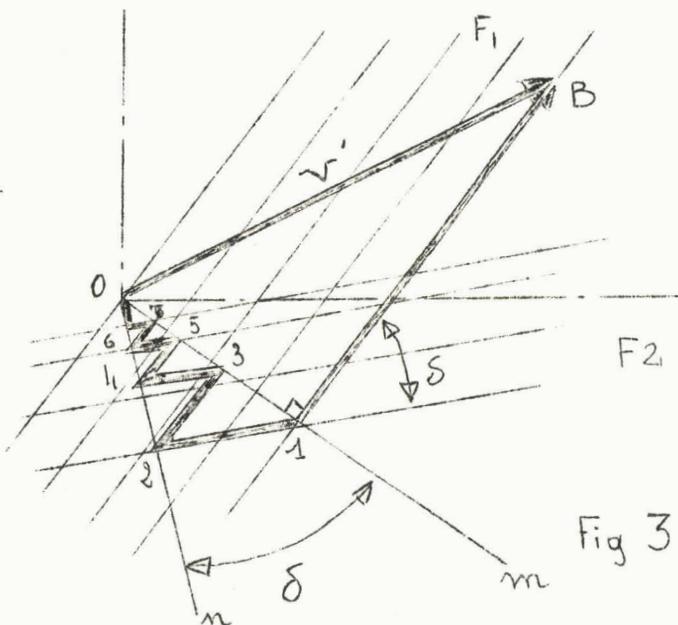
Nous avons, dans les 2 cas, explicité la méthode pratique de construction de ces lieux.

2 - CONVERGENCE VERS ZERO DE LA TENSION DE DESEQUILIBRE

2a - Par la recherche manuelle de minima successifs.

Cette question est traitée par KUPFMÜLLER (12) et HOADLEY (9) - HAGUE (8) a résumé leur travail.

Nous avons vu, que près de l'équilibre, le lieu de la tension de déséquilibre était constitué de 2 faisceaux de droites parallèles  $F_1$  et  $F_2$ . Une droite est parcourue lorsqu'on manoeuvre l'un des organes de réglage  $P_1$  ou  $P_2$ , l'autre restant fixe.



Chaque organe est manoeuvré jusqu'à obtenir un minimum de  $V'$

Supposons par exemple  $V'$  en  $\vec{OB}$  (fig. 39)

On manoeuvre alors  $P_1$  jusqu'à amener  $\vec{OB}$  en  $O1$  sur l'intersection avec la perpendiculaire  $Om$  au faisceau  $F_1$ .

Fig 39

Puis en manoeuvrant  $P_2$ , on parcourt  $F_2$  de  $O1$  à  $O2$  jusqu'à l'intersection avec la perpendiculaire  $On$  au faisceau  $F_2$ .

On reprend ensuite  $P_1$  jusqu'à  $O3$  et ainsi de suite jusqu'à annuler  $\vec{OB}$ , en passant par les points 4, 5, etc...

On peut choisir comme critère de convergence, le rapport

$$\eta = \frac{|\vec{O3}|}{|\vec{O2}|} = \frac{|\vec{O4}|}{|\vec{O3}|} = \frac{|\vec{O(i+1)}|}{|\vec{Oi}|}$$

On voit que

$$\eta = \cos \delta$$

$\delta$  étant l'angle entre les 2 faisceaux  $F_1$  et  $F_2$

DISCUSSION :

La convergence sera d'autant meilleure que  $\eta$  sera plus voisin de zéro.

$\eta = 0$  pour  $\delta = 90^\circ$  ; la convergence est immédiate si les deux faisceaux sont orthogonaux.

Par contre si  $\delta$  tend vers 0,  $\eta$  tend vers 1 et la convergence deviendra de plus en plus mauvaise.

On trouvera dans la bibliographie citée, une étude de l'incidence de ce fait sur le choix le plus approprié des paramètres de réglage des ponts.

REMARQUES :

1/ Il faudrait, en toute rigueur, tenir compte de l'incertitude, dans le réglage, produite par la sensibilité réduite du détecteur.

Nous renvoyons à la bibliographie.

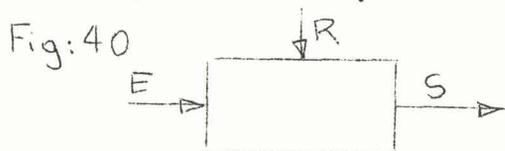
2/ Dans certains cas, notamment dans la réalisation de ponts universels, on n'est pas toujours libre de choisir les paramètres de réglage donnant des faisceaux  $F_1$  et  $F_2$  faisant des angles voisins de  $90^\circ$ . Général Radio (13) a réalisé pour son nouveau pont 1650A, un artifice "Orthonull" : un couplage mécanique entre les rhéostats de réglage permet de faire varier séparément l'impédance de réglage, donnant ainsi 2 faisceaux orthogonaux dans le cas de mesure des inductances à faible  $Q$ .

2b - Convergence avec emploi de détecteurs de phase.

A : AU VOISINAGE EQUILIBRE

Cette étude est traitée par POLECK (14)

Un détecteur de phase (fig. 40) est un dispositif de mesure qui a un signal d'entrée E, fait correspondre un signal de sortie S propor-



tionnel à :

$$(8) \quad S = K E \cos \Theta$$

$\Theta$  étant la phase de E par rapport à un signal de référence R

K : un coefficient

Un vecteur de plan complexe est positionné par ses projections sur deux axes de référence ; deux détecteurs de phase sont donc nécessaires.

Angle optimum entre les 2 axes de référence :

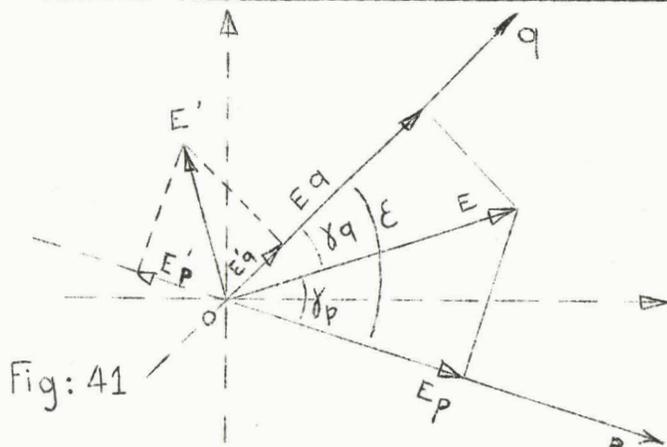


Fig: 41

Soient p et q les axes de référence, faisant entre eux l'angle  $\mathcal{E}$  (fig. 41)

Soient  $E_p = E \cos \gamma_p$

$E_q = E \cos \gamma_q$

les projections du vecteur  $\vec{E}$  sur ces 2 axes et par conséquent les signaux de

sortie émis par chacun de ces détecteurs de phase. On désire obtenir la précision optimum pour la définition dans le plan de  $\vec{E}$ .

Or a priori, ce vecteur issu de l'origine, peut occuper une position quelconque dans le plan. Il apparaît que sa position sera la plus malaisée à définir, lorsque  $\vec{E}$  se trouvera sur la bissectrice extérieure de l'angle  $\widehat{pOq}$ , en  $E'$ .

On aura alors :  $E'_p = E'_q = E'$  sur  $\frac{\mathcal{E}}{2}$

$E'_p$  et  $E'_q$  seront maxima lorsque  $\mathcal{E} = 90^\circ$  et vaudront  $E' \frac{\sqrt{2}}{2}$

La plus mauvaise condition serait obtenue avec  $\mathcal{E} = 0$

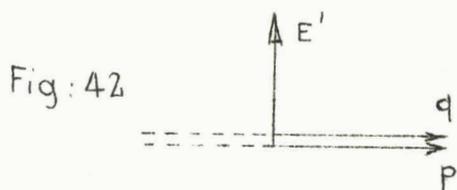


Fig: 42

$E'_p = E'_q = 0$  (fig. 42)

La direction de  $E'$  serait définie mais non son amplitude

- Processus de convergence -

Soit dans le plan complexe défini par les axes  $Oa$  et  $Ob$ , le vecteur  $\vec{V}' = \vec{OB}$  représentant la tension de déséquilibre du pont. Par action sur les organes de réglage, le point  $B$  peut se déplacer dans les directions  $Bu$  et  $Bv$ . Soit  $\delta$  leur angle,  $\alpha$  et  $\beta$  leurs angles par rapport aux axes de référence.

Soient  $p$  et  $q$  les vecteurs de référence des détecteurs de phase-  
 $\epsilon$  leur angle,  $\rho$  et  $\varphi$  leurs angles par rapport aux axes de référence-  
 $p'$  et  $q'$  sont des droites perpendiculaires respectivement à  $p$  et  $q$ .

Le mode opératoire d'un équilibrage à l'aide de deux détecteurs de phase consiste :

- a) à coupler la manoeuvre de l'un des organes de réglage à la projection sur  $Op$  et sur  $Oq$  du vecteur  $V'$ .
- b) à manoeuvrer cet organe de réglage jusqu'à rendre sa projection nulle sur l'axe de référence correspondant.

Supposons que :  $u$  soit couplé avec  $Op$

" "  $v$  " " avec  $Oq$

et que ces réglages soient manoeuvrés successivement.

# Convergence en "SPIRALE"

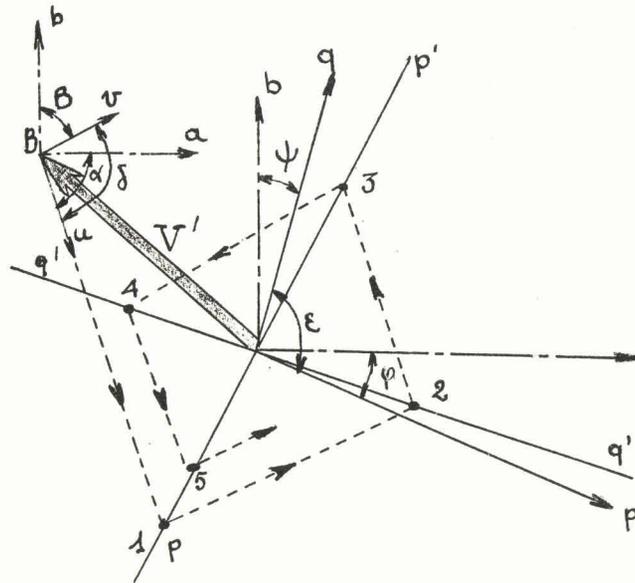


Fig: 43

TABLEAU I

Manceuvre N°	Detecteur Phase	Signal Emis	Paramètre Reglage	Zéro au point
1	q	$- \vec{O1}  \cos(\varphi - \psi)$	+v	2 sur q'
2	p	$+ \vec{O2}  \cos(\varphi - \psi)$	-u	3 sur p'
3	q	$+ \vec{O3}  \cos(\varphi - \psi)$	-v	4 sur q'
4	p	$- \vec{O4}  \cos(\varphi - \psi)$	+u	5 sur p'
5	q	$- \vec{O5}  \cos(\varphi - \psi)$	+v	6 sur q'
....	....	.....	.....	.....

# Convergence en "ZIG-ZAG"

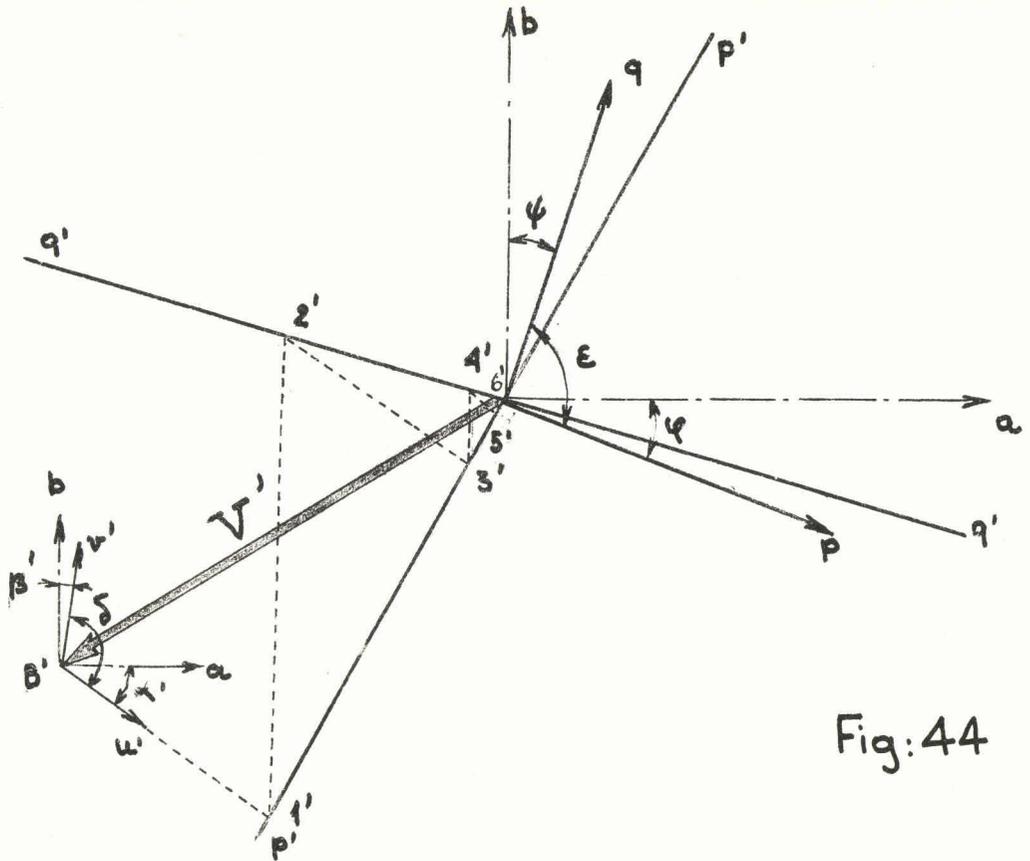


Fig:44

TABLEAU II

Manœuvre N°	Decteur Phase	Signal EMIS	Paramètre Reglage	Zéro au point
1	q	$-\left \vec{O1'}\right  \cos(\varphi - \psi)$	$+v'$	2' sur q'
2	p	$-\left \vec{O2'}\right  \cos(\varphi - \psi)$	$+u'$	3' sur p'
3	q	$-\left \vec{O3'}\right  \cos(\varphi - \psi)$	$+v'$	4' sur q'
4	p	$-\left \vec{O4'}\right  \cos(\varphi - \psi)$	$+u'$	5' sur p'
5	q	$-\left \vec{O5'}\right  \cos(\varphi - \psi)$	$+v'$	6' sur q'
...	...	...	...	...

Commençons par exemple par u -(fig. 43)

La projection de  $V'$  sur  $Op$  que nous écrirons  $V' / oP$  sera nulle quand B viendra en 1, sur  $p'$ .

Si on agit sur  $v$ , le signal émis du second détecteur de phase valant  $-|\vec{O1}| \cos(\varphi - \psi)$ ,  $V' / oQ = 0$  quand B viendra en 2. On peut donc établir le tableau I, à partir de 1

On a une convergence "en spirale" - Les paramètres de réglage sont manoeuvrés dans les 2 sens.

Autre cas (fig. 44) :  $V'$  est en  $OB'$ ,  $\vec{u}$  et  $\vec{v}'$  ont les directions  $u'$  et  $v'$  :

On obtient le tableau II à partir de 1'.

La convergence s'opère en "zig-zag" - Il n'y a pas d'inversion du sens de rotation des paramètres de réglage.

- Critères de la convergence -

On peut utiliser comme critère, le rapport  $x$  de 2 valeurs successives prises par la tension de déséquilibre après 2 manoeuvres du même organe de réglage, par exemple :

$$x = \left| \frac{\vec{o_2}}{\vec{o_1}} \right|$$

Par des considérations trigonométriques, on démontre que ce rapport est le même pour les 2 paramètres de réglage et vaut :

$$x = \frac{\sin(\beta - \varphi) \sin(\alpha - \psi)}{\cos(\beta - \psi) \cos(\alpha - \varphi)}$$

Il y aura convergence si  $x < 1$  et elle sera d'autant plus rapide que  $x$  se rapprochera de zéro. 2 cas sont à distinguer suivant que  $x > 0$  ou  $x < 0$ .

1°/  $x > 0$

$$\begin{array}{l} \text{On a donc } \beta > \varphi \quad \underline{\underline{\text{et}}} \quad \alpha > \psi \\ \text{ou } \beta < \varphi \quad \underline{\underline{\text{et}}} \quad \alpha < \psi \end{array}$$

Ce cas correspond à la convergence en spirale

2°/  $x < 0$   $\beta < \varphi \quad \underline{\underline{\text{ou}}} \quad \alpha < \psi$

Ce cas correspond à la convergence en zig-zag.

REMARQUE : Si  $x > 1$ , on peut encore obtenir une convergence en interchangeant un couplage entre 1 organe de réglage et un vecteur de référence.

- Influence des angles  $\mathcal{E}$  entre vecteurs de référence  $O_p, O_q$   
et des angles  $\delta$  entre paramètres de réglage  $u$  et  $v$

Supposons pour simplifier  $\alpha = 0$

$$\delta = 90^\circ - \beta$$

$$x = \frac{\cos(\delta + \varphi) \sin \psi}{\sin(\delta + \psi) \cos \varphi}$$

- Pour  $\delta$  tendant vers 0,  $x$  tend vers 1

La convergence devient de plus en plus difficile au fur et à mesure que l'un des 2 angles tend vers zéro.

- Par contre, pour  $\delta$  tendant vers  $90^\circ$ ,  $x$  décroît et tend vers  $\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \psi$

- Si en outre,  $\mathcal{E} = 90^\circ$ ,  $\varphi = \psi$

$$x = \operatorname{tg}^2 \varphi$$

et  $x = 0$  lorsque  $\varphi = 0$

EN CONCLUSION : Des angles de  $90^\circ$  entre vecteurs de référence et paramètres de réglage, ainsi que des vecteurs de référence confondus avec les axes de coordonnées, conduisent à des convergences immédiates. Nous allons généraliser ce résultat.

- Etude des cas de convergence immédiate :  $x = 0$

On peut distinguer 2 cas :

- a) convergence immédiate simple

$$\text{avec } \alpha = \psi \quad \underline{\underline{\text{ou}}} \quad \beta = \varphi$$

- b) convergence immédiate double

$$\text{avec } \alpha = \psi \quad \underline{\underline{\text{et}}} \quad \beta = \varphi$$

a) Convergence simple : (fig. 45)

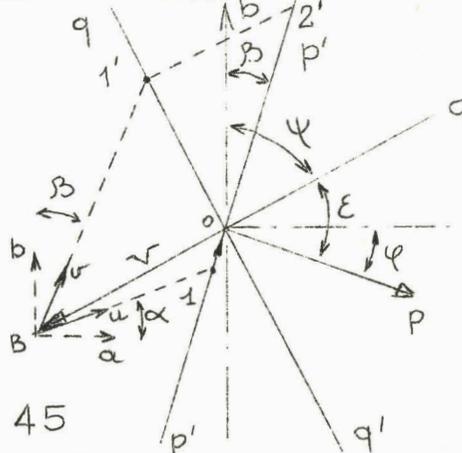


Fig: 45

Si on commence par  $v$ , une manoeuvre supplémentaire sera nécessaire.

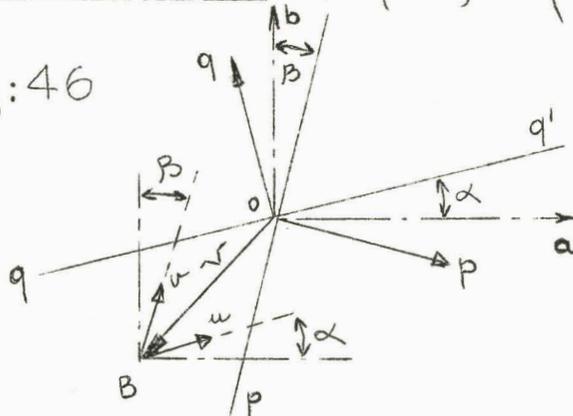
Remarquons que lors de la manoeuvre de  $v$  pour amener  $B$  en  $1'$ , le signal émis par le détecteur de référence  $Op$  reste constant ( $v // pp'$  donc  $\perp$  à  $Op$ ).

Supposons  $\beta = \psi$ , c'est-à-dire  $\vec{v}$  parallèle à  $pp'$

Si pour équilibrer, on commence par manoeuvrer  $u'$  pour venir en  $1$ , on voit que l'équilibre sera atteint lors de la manoeuvre suivante de  $v$ .

b) Convergence double :  $\alpha = \psi$  et  $\beta = \psi$  (Fig. 46)

Fig: 46



La convergence est immédiate quelque soit le chemin suivi.

Là encore le signal recueilli sur un détecteur de phase reste constant lors de la manoeuvre de l'autre.

**REMARQUE** : Cette propriété peut être utilisée expérimentalement pour se rapprocher des conditions de convergence immédiate.

Se fixant au départ des axes de référence arbitraires, on pourrait faire varier l'angle de ces axes, à l'aide de déphaseurs, de manière à obtenir une indépendance relative du signal émis par un détecteur lorsqu'on manoeuvre l'organe de couplage couplé à l'autre.

B : Convergence avec des détecteurs de phase loin de l'équilibre.

Nous avons vu que les lieux de déplacement du vecteur  $\vec{V}$  représentant la tension de déséquilibre étaient des cercles.

Le raisonnement développé dans le paragraphe précédent, est à transposer au cas où les vecteurs d'équilibrage  $\vec{u}$  et  $\vec{v}$  ne représenteraient plus que les tangentes aux lieux de  $\vec{V}$ .

La différence essentielle résidera dans le fait que les angles  $\alpha$  et  $\beta$  de ces vecteurs d'équilibrage avec les axes de coordonnées varieront lors des manoeuvres d'équilibrage, alors que le raisonnement précédent les supposait constants.

Poleck (14) et après lui White (15) proposent l'artifice suivant pour surmonter cette difficulté et ramener le problème au cas précédent.

Nous avons vu que la tension d'erreur  $V'$  est donnée par la relation :

$$V' = \frac{Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} = \frac{N}{D}$$

A la différence entre l'étude près de l'équilibre et celle loin de l'équilibre réside dans le fait que dans le premier cas, on suppose le dénominateur  $D$  constant alors qu'on tient compte de ses variations dans le second cas.

Appelons (Fig 47)  $\vec{V}'_0 / 0$  la tension de déséquilibre avec  $D = \text{constante}$

$\vec{V}'_1 / 1$  " " " "  $D = \text{variable}$

Soit  $\theta_{12}$  le déphasage du courant  $i_{12}$  dans  $Z_1$  et  $Z_2$  par rapport à  $U$

$\theta_{34}$  le déphasage de  $i_{34}$  dans  $Z_3$  et  $Z_4$

$$\theta_0 - \theta_1 = \theta_{12} + \theta_{34}$$

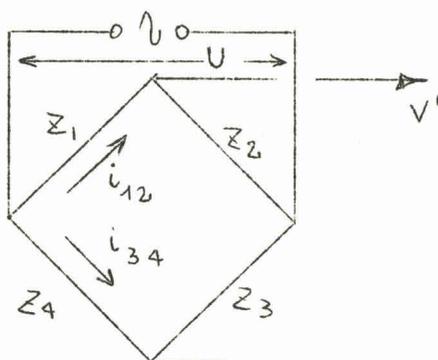


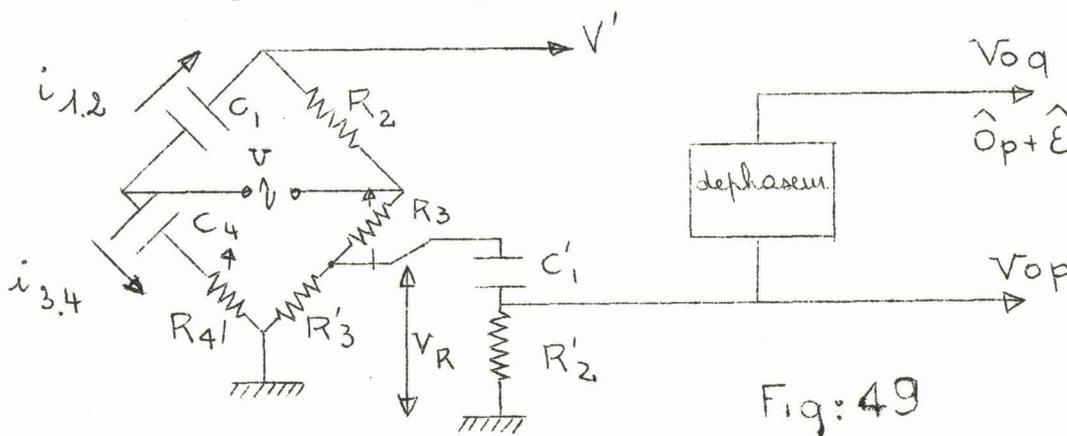
Fig: 47

Supposons qu'on choisisse les vecteurs de référence  $O_p$  et  $O_q$  des détecteurs de phase de telle sorte que leurs angles  $\varphi$  et  $\psi$  par rapport aux axes de coordonnées incorporent  $\theta_{12} + \theta_{34}$  et varient avec eux. Les angles relatifs des vecteurs de réglage  $\vec{u}$  et  $\vec{v}$  par rapport à  $O_p$  et  $O_q$  seront alors les mêmes que l'on soit près ou loin de l'équilibre. Le raisonnement précédent deviendrait général.

La réalisation pratique est un cas d'espèce et dépend du type du pont.

Par exemple :

Soit un pont d'Owen : fig. 49



La tension  $V_R$  recueillie deux bornes d'une petite résistance insérée dans la branche  $Z_3$ , est déphasée de  $\theta_{34}$  par rapport à la tension d'alimentation  $U$  et cette phase variera avec les manoeuvres de  $R_3$  et  $R_4$ .

A cette phase est ajoutée  $\theta_{12}$ , au moyen du dipôle  $C'_1 = C_1$  et  $R'_2 = R_2$

La tension  $V_{oP}$  jouira donc de la propriété cherchée ainsi que  $V_{oQ}$ , obtenue par déphasage de  $\hat{E}$  par rapport à  $V_{oP}$ .

REMARQUES : 1/ Il est bien évident qu'il s'agit là d'un schéma théorique et qu'il est nécessaire d'examiner les perturbations apportées par ces

impédances parasites à l'équilibre du pont.

2/ Kneller (16) dont nous parlerons au chapitre suivant) cite 2 références russes : KARANDEEV et CHVETZKI pour cette étude.

- 3 : Le pont automatique considéré comme un système asservi

Soit donc un pont d'impédances  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  - Fig. 49

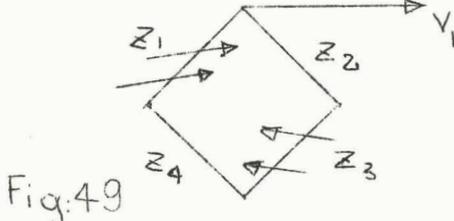


Fig. 49

L'impédance inconnue est en  $Z_1$

L'impédance de réglage est en  $Z_3$

L'objet du système asservi est, pour toute variation de  $Z_1$ , de manoeuvrer  $Z_3$  pour annuler la tension de déséquilibre  $V_1$ .

- Partons d'un état d'équilibre et soit une variation  $dZ_1$  de  $Z_1$  ; nous avons vu qu'elle va engendrer une tension de déséquilibre  $V_1'$ .

$$V_1' = \frac{\Lambda}{(1+\Lambda)^2} \sigma' \quad ; \quad \sigma' = \frac{dZ_1}{Z_1}$$

Il va y répondre une variation de  $Z_3, \sigma' \frac{1}{3} = \frac{dZ_3}{Z_3}$  qui seule aurait donné :

$$V_1' = \frac{\Lambda}{(1+\Lambda)^2} \sigma' \frac{1}{3} \quad (\text{le signe - car } V_3' \text{ tend à annuler } V_1')$$

La tension d'erreur résultante sera donc, à un instant donné :

$$(8) \quad V' = \frac{\Lambda}{(1+\Lambda)^2} (\sigma' \frac{1}{1} - \sigma' \frac{1}{3})$$

comme

$$\sigma' \frac{1}{1} = \sigma'_{R1} + j \sigma'_{X1}$$

$$\sigma' \frac{1}{3} = \sigma'_{R3} + j \sigma'_{X3}$$

$$(9) \quad v' = \frac{\Lambda}{(1+\Lambda)^2} \left[ (\sigma'_{R1} + j\sigma'_{X1}) - (\sigma'_{R3} + j\sigma'_{X3}) \right]$$

Cette tension est injectée à 2 détecteurs de phase de vecteur de référence  $O_p$  ( $\psi$  avec  $O_a$ ) et  $O_q$  ( $\psi'$  avec  $O_x$ ) Fig. 50

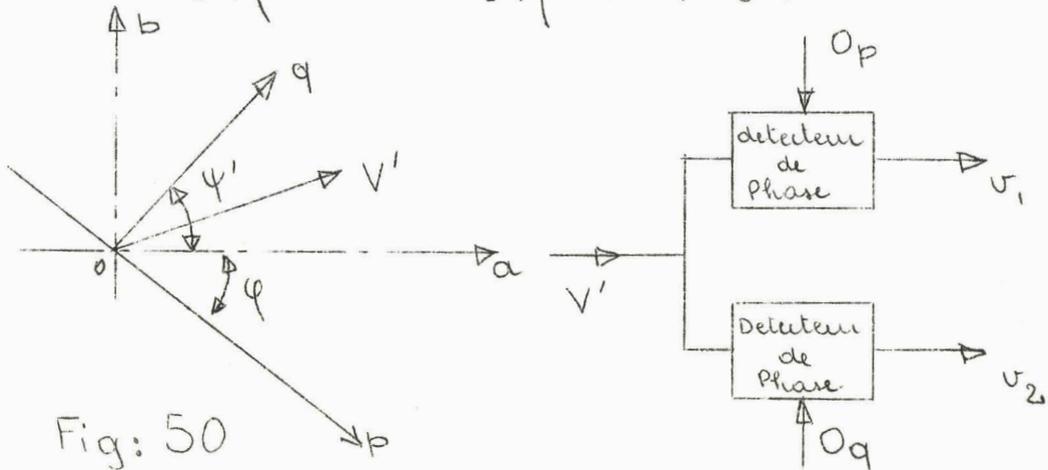


Fig: 50

On recueillera à la sortie des détecteurs de phase :

$$v_1 = K_1 \frac{\Lambda}{(1+\Lambda)^2} \left[ (\sigma'_{R1} - \sigma'_{R3}) \cos \psi - (\sigma'_{X1} - \sigma'_{X3}) \sin \psi \right]$$

$$v_2 = K_1 \frac{\Lambda}{(1+\Lambda)^2} \left[ (\sigma'_{R1} - \sigma'_{R3}) \cos \psi' - (\sigma'_{X1} - \sigma'_{X3}) \sin \psi' \right]$$

$K_1$  : facteur de proportionnalité identique pour les 2 détecteurs de phase.

$$\text{Posons : } K_1 \frac{\Lambda}{(1+\Lambda)^2} \cos \psi = a_1$$

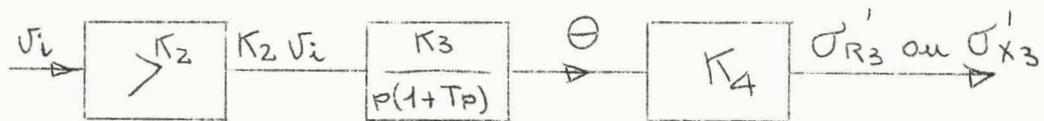
$$K_1 \frac{\Lambda}{(1+\Lambda)^2} \sin \psi = b_1$$

$$K_1 \frac{\Lambda}{(1+\Lambda)^2} \cos \psi' = a_2$$

$$K_1 \frac{\Lambda}{(1+\Lambda)^2} \sin \psi' = b_2$$

$$\begin{aligned}
 (10) \quad v_1 &= a_1 \sigma_{R1}' - b_1 \sigma_{X1}' - a_1 \sigma_{R3}' + b_1 \sigma_{X3}' \\
 (11) \quad v_2 &= a_2 \sigma_{R1}' - b_2 \sigma_{X1}' - a_2 \sigma_{R3}' + b_2 \sigma_{X3}'
 \end{aligned}$$

Chacune de ces tensions attaque ensuite un amplificateur de gain  $K_2$  et un servo-moteur couplé à un organe de réglage  $\sigma_{R3}'$  ou  $\sigma_{X3}'$  (fig. 51)



Soit  $\Gamma$  le couple du moteur par unité de tension

$J$  l'inertie du moteur

$f$  son coefficient de frottement

e  $K_2 v_i$

$$\Gamma e = J \frac{d^2 \Theta}{dt^2} + f \frac{d \Theta}{dt}$$

$$\Gamma \mathcal{E} = J p^2 \Theta + f p \Theta \quad \left. \begin{array}{l} \mathcal{E} \\ \Theta \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{transformées de} \\ \text{Laplace de } e \text{ et } \Theta \end{array}$$

$$\frac{\Theta}{\mathcal{E}} = \frac{\Gamma}{J p^2 + f p} = \frac{\Gamma}{p(f + J p)} = \frac{\Gamma/f}{p(1 + \frac{J}{f} p)}$$

Posant  $\Gamma/f = K_3$

$$\frac{J}{f} = T$$

La fraction de transfert du système amplificateur servo-moteur est :

$$\frac{K_2 K_3}{p(1+Tp)}$$

Supposons un couplage entre la rotation  $\Theta$  du servo-moteur et la variation du paramètre de réglage  $\sigma_{R3}$  ou  $\sigma_{X3}$  égal à  $K_4$

En considérant les transformées de Laplace des diverses variables (pour simplifier, nous conservons les mêmes notations), on a :

Si  $\sigma_{R3}$  est couplé à  $v_1$

et  $\sigma_{X3}$  " "  $v_2$

$$\sigma_{R3} = \frac{K_2 K_3}{p(1+Tp)} v_1$$

$$\sigma_{X3} = \frac{K_2 K_3}{p(1+Tp)} v_2 \quad \text{en posant } K = K_2 K_3$$

$$\sigma_{R3} = \frac{K}{p(1+Tp)} \left[ a_1 \sigma_{R1} - b_1 \sigma_{X1} - a_1 \sigma_{R3} + b_1 \sigma_{X3} \right]$$

$$\sigma_{X3} = \frac{K}{p(1+Tp)} \left[ a_2 \sigma_{R1} - b_2 \sigma_{X1} - a_2 \sigma_{R3} + b_2 \sigma_{X3} \right]$$

ou :

$$(12) \quad a_1 \sigma_{R1} - b_1 \sigma_{X1} = \sigma_{R3} \left[ \frac{p(1+Tp)}{K} + a_1 \right] - b_1 \sigma_{X3}$$

$$(13) \quad a_2 \sigma_{R1} - b_2 \sigma_{X1} = \sigma_{X3} \left[ \frac{p(1+Tp)}{K} - b_2 \right] + a_2 \sigma_{R3}$$

On peut tracer le diagramme fonctionnel de ce système asservi à 2 variables (fig. 53)

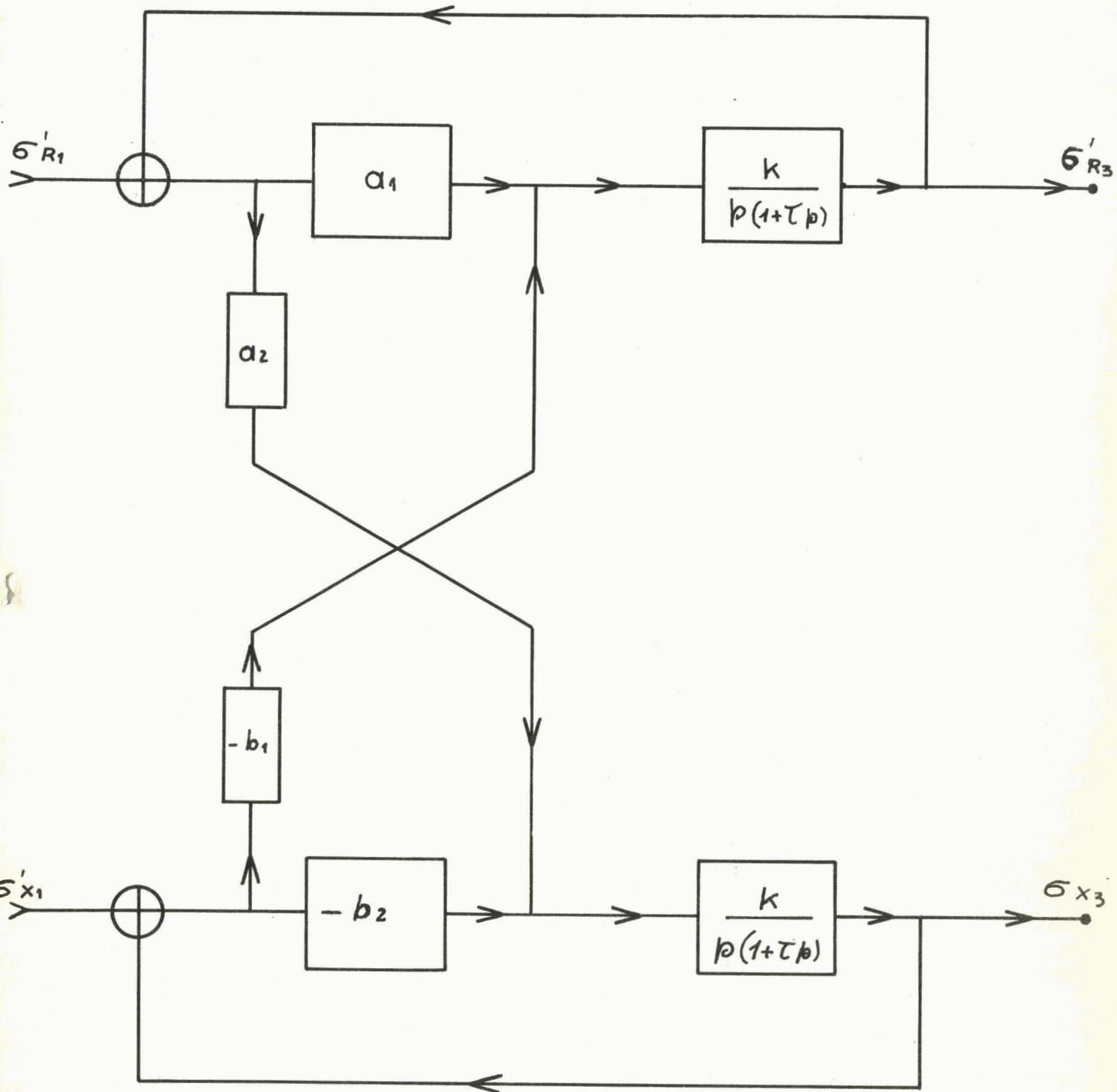


Diagramme fonctionnel du système asservi constitué par un pont d'impédance à 2 variables

Fig: 53

Le système (12) et (13) définit un système asservi à 2 variables avec couplage non symétrique entre les 2 voies.

Ce système n'est linéaire que tant que les coefficients  $a_1, a_2, b_1, b_2$  sont constants et ceci n'est vrai qu'à proximité de l'équilibre.

Loin de l'équilibre, ce système n'est pas linéaire sauf si on utilise les artifices de Poleck et White cités en page 107.

Matrice de transformation des grandeurs d'entrée et de sortie.

$$\sigma_{R1}^{\dot{}} = \sigma_{R3}^{\dot{}} \left[ \frac{b_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \left[ \frac{p(1+Tp)}{K} + a_1 \right] - \frac{a_2 b_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \right] - \sigma_{X3}^{\dot{}} \left[ \frac{p(1+Tp)}{K} - \frac{b_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \right]$$

$$\sigma_{X1}^{\dot{}} = \sigma_{R3}^{\dot{}} \left[ \frac{p(1+Tp)}{K} \frac{a_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \right] - \sigma_{X3}^{\dot{}} \left[ \frac{a_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \left[ \frac{p(1+Tp)}{K} - b_2 \right] - \frac{b_1 a_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \right]$$

La matrice reliant l'entrée à la sortie joue un rôle équivalent à la fonction de transfert reliant l'entrée et la sortie dans un système asservi à une variable. On peut de la même manière définir une fonction matricielle de transfert en boucle ouverte et discuter la précision sur cette dernière relation.

La stabilité est étudiée en recherchant si le déterminant a toutes ses racines ayant leurs parties réelles négatives.

Pour compléter, il faudrait exprimer la précision ou l'erreur  $V'$  en fonction de l'inconnue  $\sigma_{R1}^{\dot{}}$  et  $\sigma_{X1}^{\dot{}}$  à partir de (9).

Deux exemples d'étude se trouvent en (16) et (20).

Les quelques notions de théorie sur les asservissements à plusieurs variables sont puisées dans (17).

C O N C L U S I O N

Il est nécessaire de reprendre à partir de la matrice de transfert du système asservi, la discussion sur les dispositions à prendre pour obtenir la précision, la stabilité et la rapidité requises de ce système asservi à deux variables.

Il est bien évident que nous retrouverons les résultats mis en lumière par les auteurs classiques en utilisant d'autres méthodes. Ce qui permet de présager la complexité de cette discussion.

Aussi, pensons-nous, que pour le moment, le rappel des méthodes d'établissement des diagrammes de lieux, la discussion de la convergence, ne sont pas inutiles et permettent déjà de choisir les paramètres de réglage et les vecteurs de référence des détecteurs de phase.

La théorie générale ne peut que confirmer ces résultats. Et, même si elle les englobe, les méthodes anciennes conservent l'avantage des discussions sur graphiques, alors que la théorie générale sera purement mathématique.

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

---

- (1) "TECHNIQUES de l'INGENIEUR" Volumes Constantes  
K 256-6 n° 1282.
- (2) R. LIEBAERT "Sur une méthode de mesure précise de la permittivité de substances à très faibles pertes à 0,1MHz et 1MHz."  
Archives des Sciences Vol. 9 fascicule spécial 1956. P. 5 à 9
- (3) J. NUEZ "Notes 2630 et 2632" (internes aux Ets. KUHLMANN)
- (4) E. FROMY "Mesures en radiotechnique"  
Chapitre 2 - Circuits de mesures - DUNOD
- (5) A.C. SELETZKY "Cross Potential of a 4-arm Network"  
Electrical Engineering - December 1933 - p. 861-867.
- (6) F. CAHEN "Les circuits électriques"  
Techniques de l'Ingénieur - Volume Electricité-Electrotechnique -  
I-D 122-5 D 122-6.
- (7) P. BREANT "Représentation géométrique du déséquilibre des ponts et potentiomètres."  
"Mesures électriques" Eyrolles - Tome 2 - p. 73 et suivantes
- (8) B. HAGUE "A.C. Bridge Methods" Pitman
- (9) G.B. HOADLEY "The Science of Balancing an Impedance bridge"  
Journal Franklin Institute - December 1939 - p. 733 - 754.
- (10) J.F. GRAHAM "Automatic A.C. Bridges"  
Electronics February 1951 - p. 110-116.
- (11) A.C. SELETZKY & L.A. ZURCHER "Sensitivity of the four arm Bridge" Transactions A.I.E.E. Supplement 1939 - p. 723-728.  
Repris par F. Bedeau dans "Cours de mesures électriques à l'E.S.E." V p. 47.  
Résumé par FROMY (loc. cit.) p. 137 - 3ème édition. 1958 .

- (12) K. KUPFMULLER "Über die Konvergenz der Brückenmessverfahren"  
Elektrotechnik und Maschinenbau - Heft 14/15 2 April 1933  
p. 204-208.
- (13) H.P. HALL "Orthonull - A mechanical device to improve  
Bridge Balance Convergence".  
The General Radio Experimenter April 1959 p. 7-12.
- (14) H. POLEK "Mechanisiertes Abgleichverfahren für Wechselstrom-  
messbrücken bei Verwendung Phasenabhängiger Nullindikatoren"  
Archiv für Elektrotechnik vol. 28- 1934 p. 492-506.
- (15) W.E. WHITE "The optimal conditions of convergence in  
Alternating-Current Bridge Networks using Phase Selective  
Networks"  
Institute Radio Engineers (I.R.E.) Transactions - U.S.A.  
1957-6-N° 3 p. 205-209.
- (16) V.O. KNELLER "Sur un type de ponts à courant alternatif  
avec équilibrage automatique par 2 paramètres.  
Automatika y telemekhanika - 1958 - N° 2 p. 162-173  
( en russe )
- (17) GILLE - PELEGRIN - DECAULNE "Théorie et Technique des  
Asservissements" DUNOD - 1ère édition 1956 - Chapitre 19.
- (18) C.O. ANDERSSON-F. MOHL- E. STENHAGEN "Servocontrolled  
Wheastone Bridge Arrangements for the Simultaneous recording  
of Resistance and Capacitance".  
Acta Chemica Scandinavia 12 - 1958 - n° 3 p. 415-437.  
Quelques considérations théoriques sur 3 types de Pont Sauty -  
Sauty Série - Sauty parallèle.
- (19) E.B. BAKER "Automatic Measurement Computation and Recording  
of Dielectric Constant and Loss Factor against Temperature"  
The Review of Scientific Instruments. Vol 22 n° 6 June 1951  
p. 376-383.  
Description détaillée des circuits électroniques associés à  
un pont de Schering commandé automatiquement, avec une cal-  
culatrice analogique convertissant les rotations des paramètres  
de réglage en et .
- (20) REMY POLAERT "Etude et mise au point d'un admittancemètre auto-  
matique, à commande électronique".  
Thèse Ingénieur-Docteur présentée à la Faculté des Sciences  
de l'Université de Lille - le 27 Janvier 1961.



*Seconde Thèse :*

Propositions données par la Faculté

CHAINES ELECTRONIQUES DE REGULATION INDUSTRIELLE

Vu et approuvé,

Lille, le 3 juin 1961.

*Le Doyen de la Faculté des Sciences de Lille,*

H. LEFEBVRE.

Vu et permis d'imprimer,

Lille, le 6 juin 1961.

*Le Recteur de l'Académie de Lille,*

G. DEBEYRE.