

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

— SUJET —

PHASEMETRE
ELECTRONIQUE

PROPOSÉ Par

ETUDIÉ Par

DIRIGÉ Par

M^r MAAZI

HACHED - mahdjouba

M^r MAAZI

KHALECHE - nadia

PROMOTION - Janvier

« 1988 »

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

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

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

- SUJET -

PHASEMETRE
ELECTRONIQUE

PROPOSÉ Par

ETUDIÉ Par

DIRIGÉ Par

M^r MAAZI

HACHED - mahdjouba

M^r MAAZI

KHALECHE - nadia

PROMOTION - Janvier

1988

- INTRODUCTION / : 01

CHAPITRE I / : - MESURES DES DEPHASAGES / : 01

- 1 - GENERALITES / : 02

- 2 - MESURES AUX FREQUENCES INDUSTRIELLES / : 02

- 2.1. - UTILISATION D'UN VOLTMETRE, D'UN AMPEROMETRE ET WATTMETRE / : 02

- 2.2. - PHASEMETRE ELECTRODYNAMIQUE / : 03

- 2.3. - PHASEMETRE FERROMAGNETIQUE / : 07

- 2.4. - SYNCHRONOSCOPES / : 08

- 3 - MESURES AUX FREQUENCES ACOUSTIQUES ET RADIOELECTRIQUES / 09

- 3.1. - METHODE DU VOLTMETRE / : 09

- 3.2. - PHASEMETRE A THERMOCOUPLES / : 10

- 3.3. - MESURE SUR LES COURBES REPRESENTATIVES / : 11

- 3.4. - MESURE DU DEPHASAGE A L'AIDE DES FIGURES DE LISSAJOUS / : 11

- 3.5. - METHODE STROBOSCOPIQUE / : 13

CHAPITRE II / - REALISATION D'UN PHASEMETRE ELECTRONIQUE / : 14

- 1. . - REALISATION / : 15

- 2. - MONTAGE DU PHASEMETRE ELECTRONIQUE / :

- 3 - ESSAIS (ANNEXE) / :

CONCLUSION / : 40

ANNEXE / :

-0- D E D I C A C E

- A LA MEMOIRE DE MON PERE
- A MA MERE
- A MES SOEURS
- A MES FRERES
- A MA BELLE - SOEUR
- A MON COUSIN ACHOUR
- A MES BEAUX - FRERES
- A TOUS MES AMIS
- A MON BINOME

N. KHALECHE.

- A MA MERE
- A MON PERE
- A MES FRERES ET BELLES - SOEURS
- A TOUS MES AMIS
- A MON BINOME

M. HACHED.

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



Nos plus sincères remerciements s'adressent :

A Monsieur MAAZI (notre promoteur) pour nous avoir guidé et suivi durant notre travail, ainsi qu'aux enseignants qui nous ont aidés et conseillés.

A tous les Professeurs et Assistants qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.

A Messieurs les Membres du Jury qui ont bien voulu nous honorer de leur présence lors de la présentation de ce travail.

A ma soeur LOUIZA, mon cousin ACHOUR et KHALFAOUI qui nous ont aidés pour la frappe et le tirage de ce projet.

M. HACHED.

N. KHALECHE.

-0- I N T R O D U C T I O N -0-

La mesure du déphasage se fait pour deux gammes de fréquences :

- + Les fréquences industrielles
- + Les fréquences acoustiques et radioélectriques

Les méthodes usuelles utilisent :

- + Le phasemètre
- + La méthode de lissajous
- + Les mesures sur les courbes représentatives.

Notre réalisation a pour but la mesure du déphasage moyennant une méthode électronique de telle façon que le déphasage à mesurer soit proportionnel à une tension.

المدرسة الوطنية للتكنولوجيا
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

CHAPITRE / : I

MESURE DES DEPHASAGES

I. - MESURE DES DÉPHASAGES / :

- 1. - Généralités / :

La mesure du déphasage entre deux grandeurs électriques sinusoïdales de même fréquence se pose différemment selon qu'il s'agit du déphasage entre une tension et un courant ou du déphasage entre deux tensions.

- 1.1. - Déphasage Entre Une Tension et un Courant :

La mesure de ce déphasage se fait dans le domaine des fréquences industrielles car la puissance mise en jeu dans un circuit donné est :

$P = U_{eff} I_{eff} \cos \varphi$. Elle fait intervenir essentiellement le facteur de puissance $\cos \varphi$, que l'on cherche à rendre aussi voisin de 1 que possible.

- 1.2. - Déphasage Entre Deux Tensions :

On le mesure dans le domaine des très basses fréquences (< 1 Hz), dans le cas des servomécanismes dont la stabilité est liée au déphasage entre la grandeur d'entrée et la grandeur de sortie, ou bien dans le domaine des fréquences acoustiques et radioélectriques.

Longtemps, la mesure de ce déphasage a eu peu d'intérêt. Car l'oreille est peu sensible aux distorsions de phase apportées à la parole et à la musique au cours d'une transmission. Le développement de la télévision et des systèmes de radio-guidage donne actuellement un certain intérêt à ces mesures.

- 2 - Mesures aux Fréquences Industrielles / :

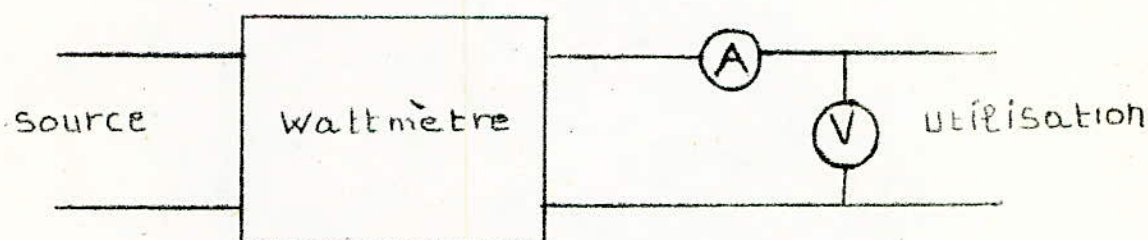
- 2.1. - Utilisation d'un Voltmètre, d'un Ampèremètre et d'un Wattmètre :

A la fréquence industrielle (50 Hz, 60 Hz), c'est la mesure du facteur de puissance $\cos \varphi$ qui nous intéresse.

Cette mesure se présente comme une suite de mesures élémentaires de la tension U , du courant I et de la puissance P et d'un calcul

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}$$

Cette méthode est peu précise, surtout pour des facteurs de puissance voisins de l'unité (1).



- Figure 1 -

L'ampèremètre et le voltmètre doivent indiquer la valeur efficace (Appareils à fer mobile par exemple), sinon une erreur importante s'introduit si le courant et la tension comportent des harmoniques.

- 2.2. - Phasemètre Électrodynamique :

L'utilisation d'un varmètre et d'un wattmètre permet la mesure de tangente φ ($\text{tg } \varphi$):

$$\begin{aligned} Q &= U_{eff} I_{eff} \sin \varphi \\ P &= U_{eff} I_{eff} \cos \varphi \end{aligned}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{Q}{P}$$

Ce calcul peut être effectué par l'appareil lui-même, si, le moteur est un logomètre.

Le phasemètre électrodynamique utilise un logomètre électrodynamique. La tension est appliquée à l'équipage mobile constitué par deux cadres en croix, l'un en série avec une résistance R et l'autre avec une réactance X . Un courant i traverse les bobines fixes. L'équipage mobile sur lequel ne s'exerce aucun couple de rappel est soumis à deux couples moteurs intervenant par leur valeur moyenne seulement :

$$\Gamma_1 = \frac{d M_1}{d \theta} I \frac{U}{R} \cos \varphi$$

$$\Gamma_2 = \frac{d M_2}{d \theta} I \frac{U}{X} \sin \varphi$$

comme : $M_1 = M_0 \cos \theta$

et : $M_2 = M_0 \sin \theta$

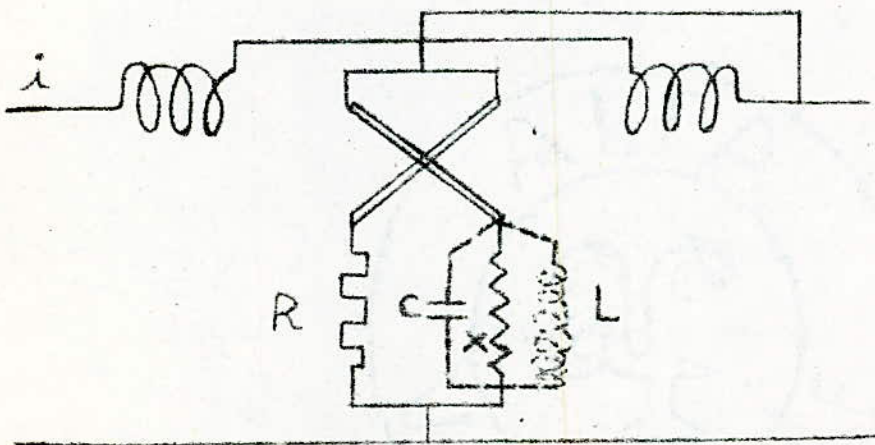
on a : $\Gamma_1 + \Gamma_2 = 0$

donc : $- M_0 \sin \theta \frac{UI}{R} \cos \varphi + M_0 \cos \theta \frac{UI}{X} \sin \varphi = 0$

$$\text{d'où : } \boxed{\tan \varphi = \frac{R}{X} \tan \theta}$$

φ : angle que font les deux cadres mobiles

θ : angle que fait la résultante des moments dus aux cadres mobiles avec l'axe des bobines fixes.



- Figure 2-

Pratiquement on s'arrange pour que $X = R$. Dans ce cas: $\theta = \varphi$. La valeur $X = R$ n'est réalisée que pour une seule fréquence. Hormis cette fréquence le phasemètre perd son étalonnage. Pour éviter cet inconvénient on divise le second cadre en deux demi-enroulements l'un en série avec une inductance, l'autre avec une capacité telles que $R = L\omega_0 = \frac{1}{C\omega_0}$, (ω_0 étant la pulsation nominale d'utilisation du phasemètre). On a alors :

$$\Gamma_2 = \frac{1}{2} \frac{dM_2}{d\theta} \frac{UI}{L} \sin \varphi + \frac{1}{2} \frac{dM_2}{d\theta} UI C\omega \sin \varphi$$

ou :

$$\Gamma_2 = M_0 \cos \theta UI \sin \varphi \frac{1}{2L\omega_0} \left(\frac{\omega_0}{\omega} + \frac{\omega}{\omega_0} \right)$$

$$\Gamma_1 + \Gamma_2 = 0 \Rightarrow \operatorname{tg} \theta = \frac{R}{2L\omega_0} \left(\frac{\omega_0}{\omega} + \frac{\omega}{\omega_0} \right) \operatorname{tg} \varphi.$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_0}{\omega} + \frac{\omega}{\omega_0} \right) \operatorname{tg} \varphi$$

Pour ω voisin de ω_0 l'expression $\frac{1}{2} \left(\frac{\omega_0}{\omega} + \frac{\omega}{\omega_0} \right)$ varie très peu autour de 1.

Pour le bon fonctionnement de cet appareil, il faut que les couples moteurs soient grands devant le couple de frottement, ce qui exige un courant et une tension suffisants.

Si ce phasemètre est utilisé pour des courants et des tensions susceptibles de varier dans de grandes limites, on doit prévoir des changements de calibres :

- + - Modification du groupement (série ou parallèle) des bobines d'intensité, ou utilisation d'un transformateur d'intensité.
- + - Modification des résistances et réactances sur le circuit de tension.

Ce phasemètre électrodynamique peut-être utilisé pour la mesure du déphasage dans un système triphase équilibré.

Les cadres en croix de l'équipage mobile en série avec des résistances égales sont branchés entre la phase qui alimente le circuit des bobines fixes et les deux autres phases.

avec : φ : déphasage entre le courant et la tension simple U_1

$\varphi - \frac{\pi}{6}$ et $\varphi + \frac{\pi}{6}$, sont les déphasages respectifs entre le courant et les tensions composées U_{12} et U_{13}

$$\text{ou a alors : } \Gamma_1 = \frac{dM_1}{d\theta} \cdot I \frac{U}{R} \cos \left(\varphi - \frac{\pi}{6} \right)$$

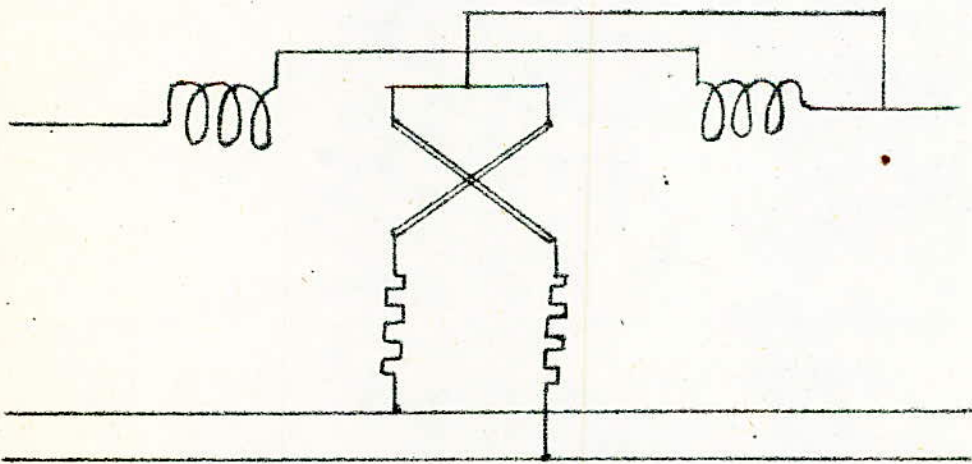
$$\Gamma_2 = \frac{dM_2}{d\theta} \cdot I \frac{U}{R} \cos \left(\varphi + \frac{\pi}{6} \right)$$

Pour : $\Gamma_1 + \Gamma_2 = 0$ - on a : $\text{tg } \theta = \frac{\cos \left(\varphi + \frac{\pi}{6} \right)}{\cos \left(\varphi - \frac{\pi}{6} \right)} = \frac{\sqrt{3} + \text{tg } \varphi}{\sqrt{3} - \text{tg } \varphi}$

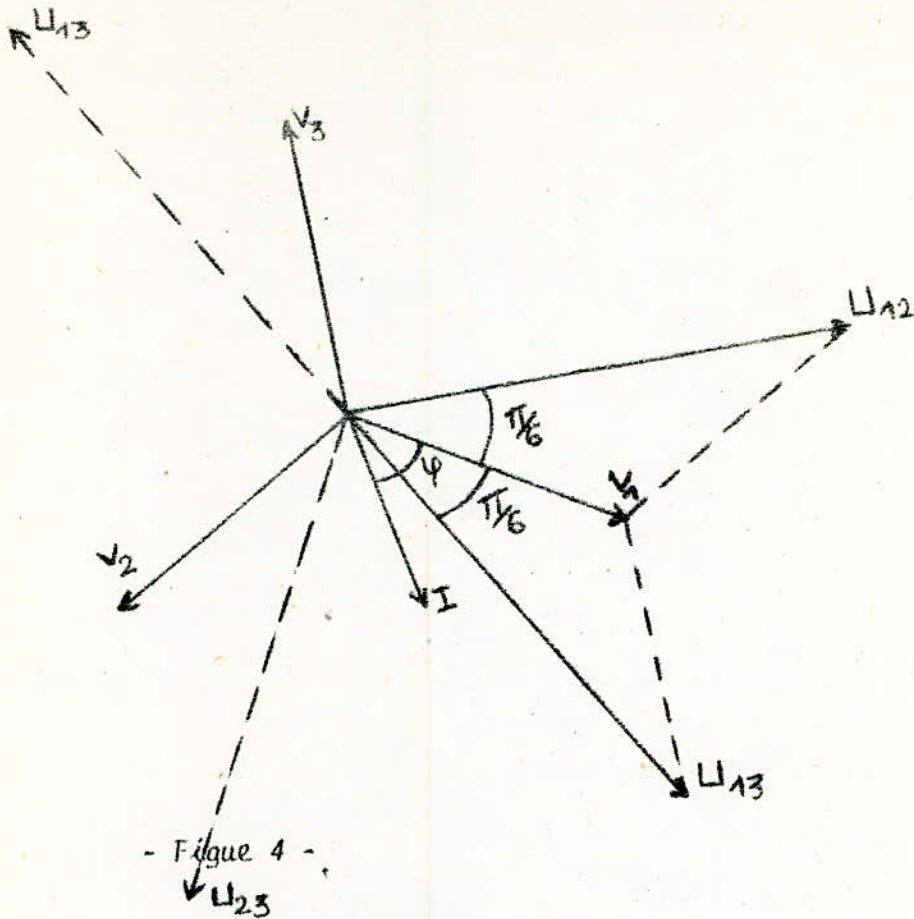
Où en déduit :

$$\boxed{\text{tg } \varphi = \sqrt{3} \frac{1 - \text{tg } \theta}{1 + \text{tg } \theta}}$$

ou : $\boxed{\text{tg } \varphi = \sqrt{3} \text{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \theta \right)}$



- Figure 3 -



- 2.3. - Phasemètre Ferromagnétique / :

Ce type de phasemètre utilise l'action d'un champ tournant sur une palette en fer doux. Elle a la forme indiquée sur la figure 5. La palette indiquée sur la figure 5 est aimantée par une bobine parcourue par le courant $i = I \cos(\omega t - \varphi)$ elle a un moment $M = M_0 \cos(\omega t - \varphi)$

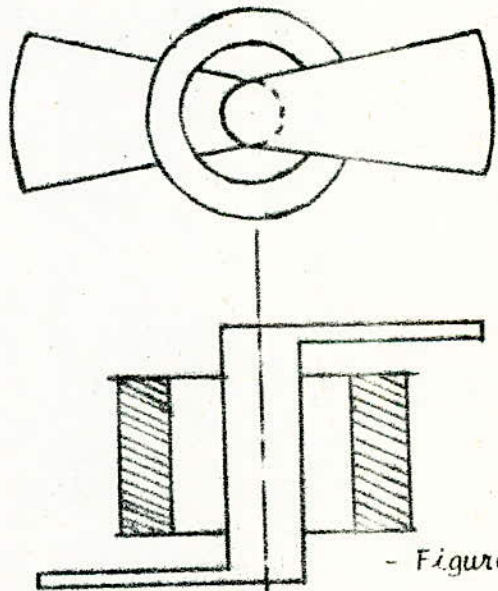
$u = U \cos \omega t$, u crée un champ d'induction tournant dont la direction fait à l'instant t l'angle ωt avec le repère fixe. Soit θ l'angle que fait la palette à cet instant avec le repère fixe.

soit : Γ le couple moteur qui agit sur la palette.

$$\Gamma = \vec{M} \wedge \vec{B} \Rightarrow \Gamma = MB \sin(\omega t - \theta)$$

$$\Gamma = M_0 B \cos(\omega t - \varphi) \sin(\omega t - \theta) = \frac{M_0 B}{2} [\sin(\varphi - \theta) + \sin(\omega t - \varphi - \theta)]$$

Seul le couple moyen $\frac{M_0 B}{2} \sin(\varphi - \theta)$ intervient par suite de l'inertie.



Donc 2 positions d'équilibre $\theta = \varphi$ et $\varphi = \theta + \pi$
dont seulement $\theta = \varphi$ est stable.

- 2.4. - Synchronoscopes / :

Les synchronoscopes sont des appareils utilisés pour coupler une machine synchrone sur un réseau industriel. On doit pour cela réaliser l'égalité instantanée des tensions, le réglage de l'amplitude ensuite l'ajustement de la fréquence et de la phase.

soient : $u = U \cos \omega t$

et : $u' = U \cos (\omega' t + \varphi)$

Deux tensions appliquées à un phasemètre. Ce dernier indique la différence de phase $(\omega' - \omega) t + \varphi$.

Si les pulsations sont différentes, l'aiguille tourne avec la vitesse angulaire $\omega - \omega'$.

Un synchronoscope est donc un phasemètre dont l'aiguille peut tourner d'un nombre de tours quelconques. Il porte trois indications : Accélérer - Coupler - Ralentir - . Le couplage se fait lorsque l'aiguille est immobile et que $\varphi = 0$

a) - Synchronoscope Electro-dynamique :

Il est conçu comme le phasemètre électrodynamique mais, pour faciliter la rotation continue de l'équipage mobile se sont les deux bobines en croix qui sont fixes, la bobine simple étant mobile (alimentée par des bagues).

b) - Synchronoscope Ferrromagnétique :

Il est semblable au phasemètre ferrromagnétique. Le champ tournant est produit par deux bobines décalées de $\frac{\pi}{2}$ et alimentées en quadrature, pour un appareil monophasé, par 3 bobines décalées de $\frac{2\pi}{3}$ pour un appareil triphasé.

- REMARQUE / :

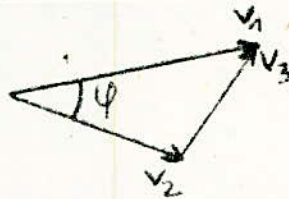
Avant couplage de la machine sur le réseau, il faut vérifier l'ordre des phases, d'où l'utilisation d'un indicateur d'ordre des phases.

- 3. - Mesures aux Fréquences Acoustiques et Radioélectriques / :- 3.1. - Méthode du voltmètre :

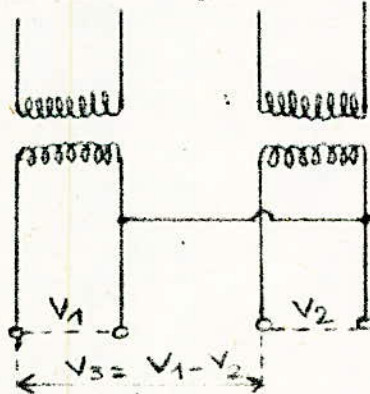
Pour déterminer le déphasage entre deux tensions sinusoïdales V_1 et V_2 on mesure avec un voltmètre ces deux tensions et leur différence V_3 (ou leur somme).

La construction du diagramme des vecteurs représentatifs montre que :

$$\cos \varphi = \frac{V_1^2 + V_2^2 - V_3^2}{2 V_1 V_2}$$

- REMARQUE / :

Dans le cas où les deux tensions n'ont pas de point commun, on passe par l'intermédiaire de transformateurs de rapport 1/1 (Figure 6)



- Figure 6 -

- Cas particulier -

Si $V_1 = V_2$

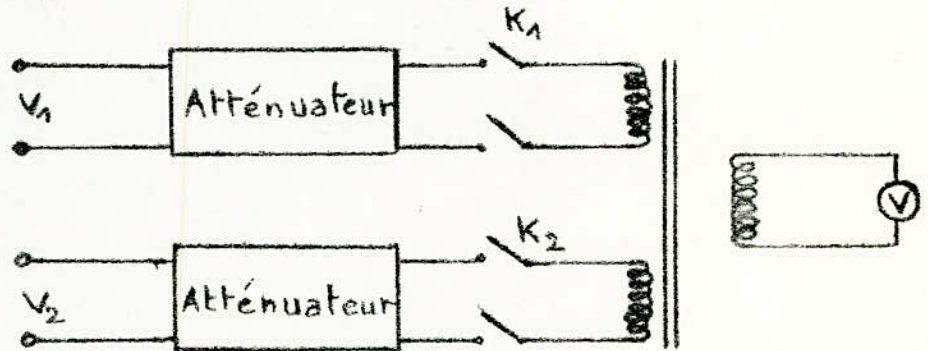
$$\cos \varphi = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{V_3}{V_1} \right)^2$$

$$\sin \frac{\varphi}{2} = \frac{V_3}{2 V_1}$$

En affaiblissant les tensions V_1 et V_2 de façon à les ramener à un niveau de tension V_0 , on peut alors graduer le voltmètre V_3 en valeur de déphasage.

La mesure d'un tel déphasage se fait entre 30 Hz et 100 kHz avec une précision de 5%.

On ferme successivement les interrupteurs K_1 et K_2 de la figure ci-dessous pour régler à l'aide des atténuateurs la tension du voltmètre V à la valeur V_0 . On ferme ensuite les deux interrupteurs pour faire la lecture du déphasage.



- Figure 7 -

- REMARQUE 1 :

Un inverseur permet de " retourner " l'une des tensions de façon à augmenter la précision si on se trouve sur une mauvaise partie de la graduation.

- 3.2. - Phasemètre à Thermocouples 1 :

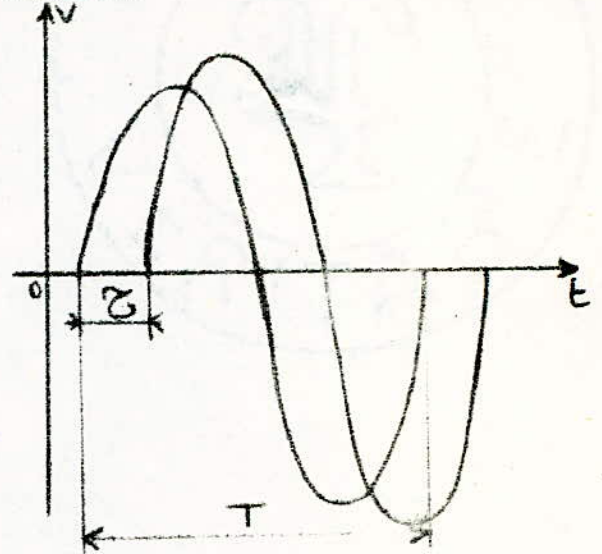
C'est un phasemètre électrodynamique repris aux fréquences acoustiques moyennant des wattmètres à thermocouples. A partir de la tension de référence V_1 on produit deux courants i_1 et i_1' d'amplitude fixe I_1 reprérée, l'un en phase avec V_1 l'autre en quadrature.

L'appareil donne $I_1 V_2 \cos \varphi$ et $I_1 V_2 \sin \varphi$, donc l'amplitude et la phase de V_2 est utilisé pour la détermination des fonctions de transfert dans l'analyse des réseaux (20 - 2.000 Hz) et des systèmes asservis (0,5 - 1.000 Hz) .

- 3.3. - Mesure sur les Courbes Représentatives / :

Dans les T.B.F. (Servomécanismes) on enregistre les deux courbes sur la même bande; on a alors :

$$\frac{\varphi}{360^\circ} = \frac{\tau}{T}$$

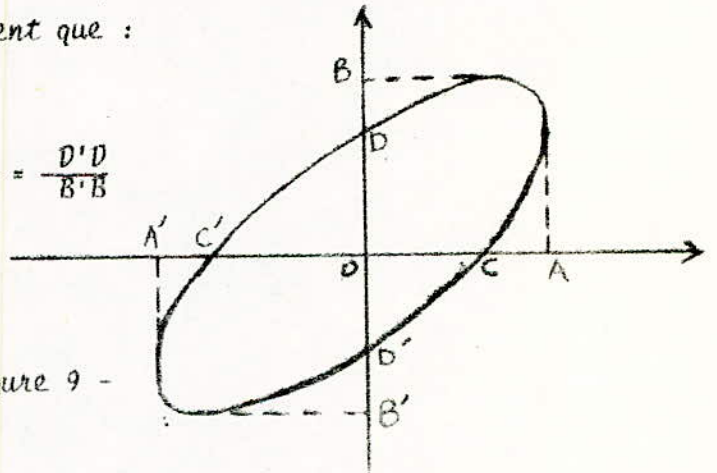


- Figure 8 -

- 3.4. - Mesure du Déphasage à l'Aide des Figures de Lissajous / :

Lorsqu'on applique deux tensions sinusoïdales de même fréquence mais déphasées l'une par rapport à l'autre, sur les deux axes d'un oscilloscope, on obtient une ellipse dont la disposition dépend du déphasage. On voit facilement que :

$$\sin \varphi = \frac{OC}{OA} = \frac{OD}{OB} = \frac{C'C}{A'A} = \frac{D'D}{B'B}$$

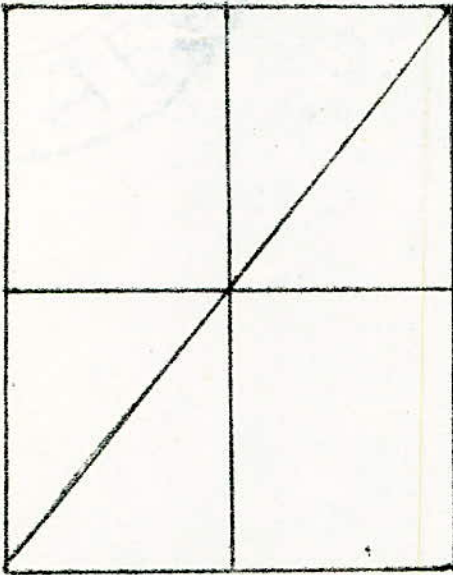


- Figure 9 -

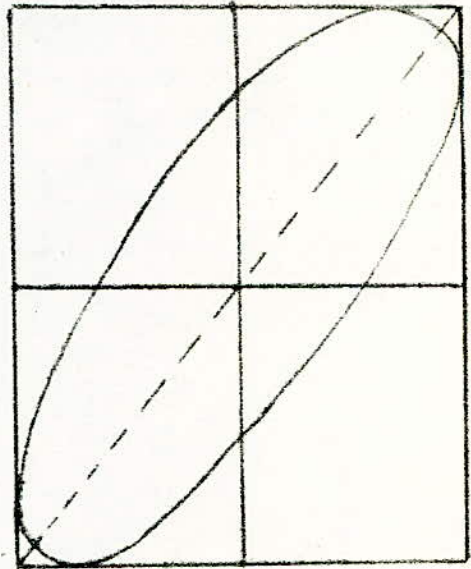
La suppression de l'un des balayages permet de fixer les axes de coordonnées et de mesurer les amplitudes AA' et BB'. Le rétablissement du balayage donne facilement C'C et D'D.

Les principaux aspects de l'ellipse sont alors ceux de la figure ci-dessous.

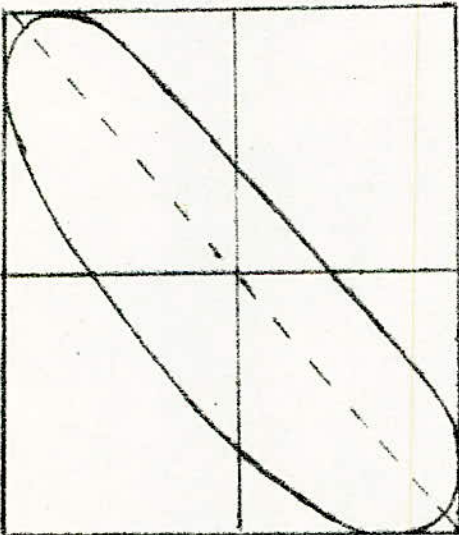
$$\varphi = 0$$



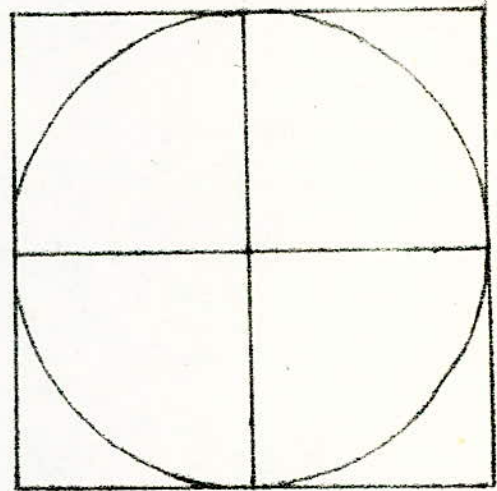
$$\varphi = \frac{\pi}{4}$$



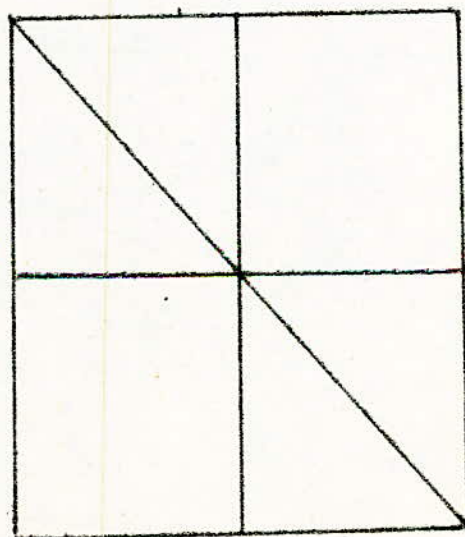
$$\varphi = \frac{3\pi}{4}$$



$$\varphi = \frac{\pi}{2}$$



$$\varphi = \pi$$



- Figure 10 -

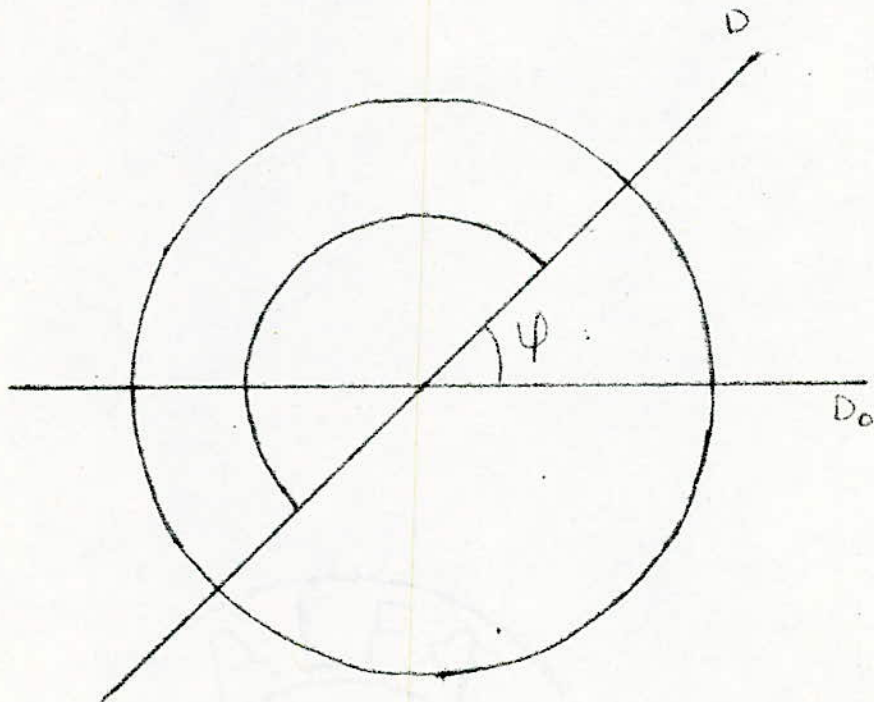
Eventuellement, il peut-être nécessaire de tenir compte du déphasage supplémentaire apporté par les amplifications de l'oscilloscope. Pour cela, on fait un tarage en appliquant des tensions en phase.

La précision de cette mesure est assez faible surtout pour les déphasages voisins de 90° . Elle laisse subsister une indétermination sur le signe de l'angle, indétermination qu'il faut lever par une autre méthode (méthode des courbes représentatives).

3.5. - Méthode Stroboscopique / :

Cette méthode consiste à faire tourner un disque portant un repère à l'aide d'un moteur synchrone bipolaire alimenté par l'une des tensions.

Le disque est éclairé par un stroboscope alimenté successivement par chacune des tensions dont on veut mesurer le déphasage. Le repère prend des positions apparentes décalées de l'angle.



- Figure 11 -

CHAPITRE / II

REALISATION D'UN PHASEMETRE

ELECTRONIQUE

II. - REALISATION D'UN PHASEMETRE ELECTRONIQUE /

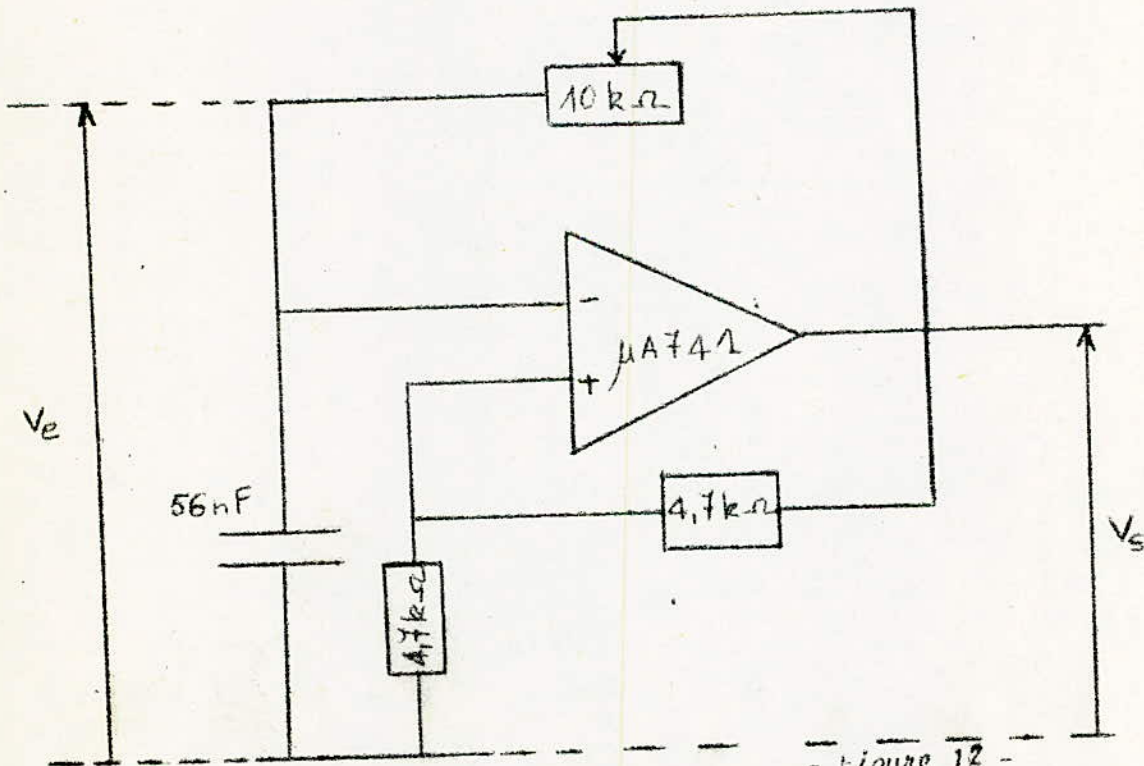
- 1 - Réalisation / :

Le but de la réalisation du phasemètre électronique est, la mesure d'un déphasage proportionnel à la tension

Pour réaliser cette proportionnalité, on conçoit un montage à base de compteur, de convertisseur numérique - analogique, d'amplificateurs opérationnels et d'afficheurs.

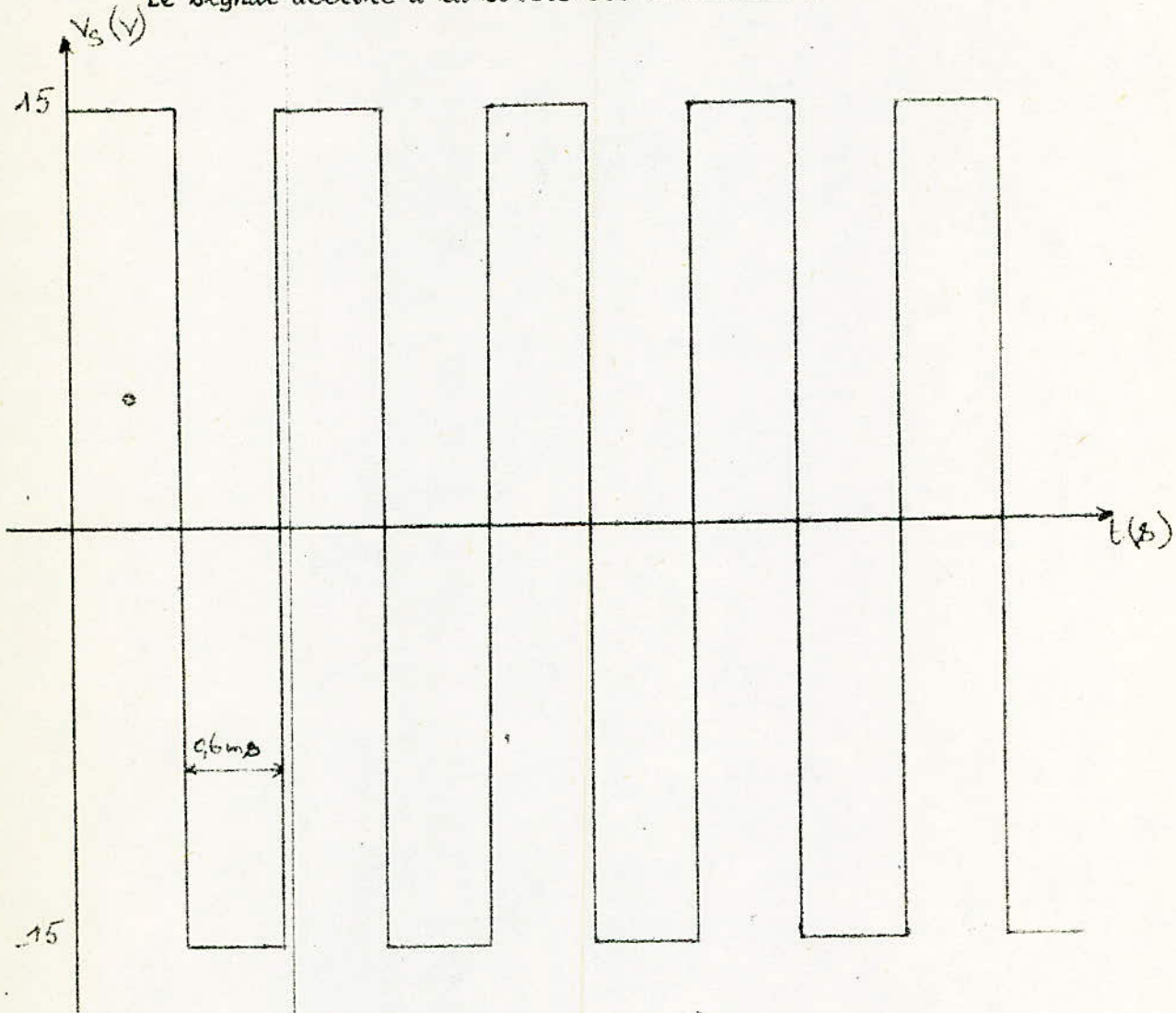
Pour avoir un signal d'horloge au niveau du compteur, on réalise un multivibrateur astable qui est par définition : Un oscillateur de relaxation délivrant en sortie une tension rectangulaire qui oscille librement et spontanément autour d'un équilibre instable.

Le montage est le suivant :



- Figure 12 -

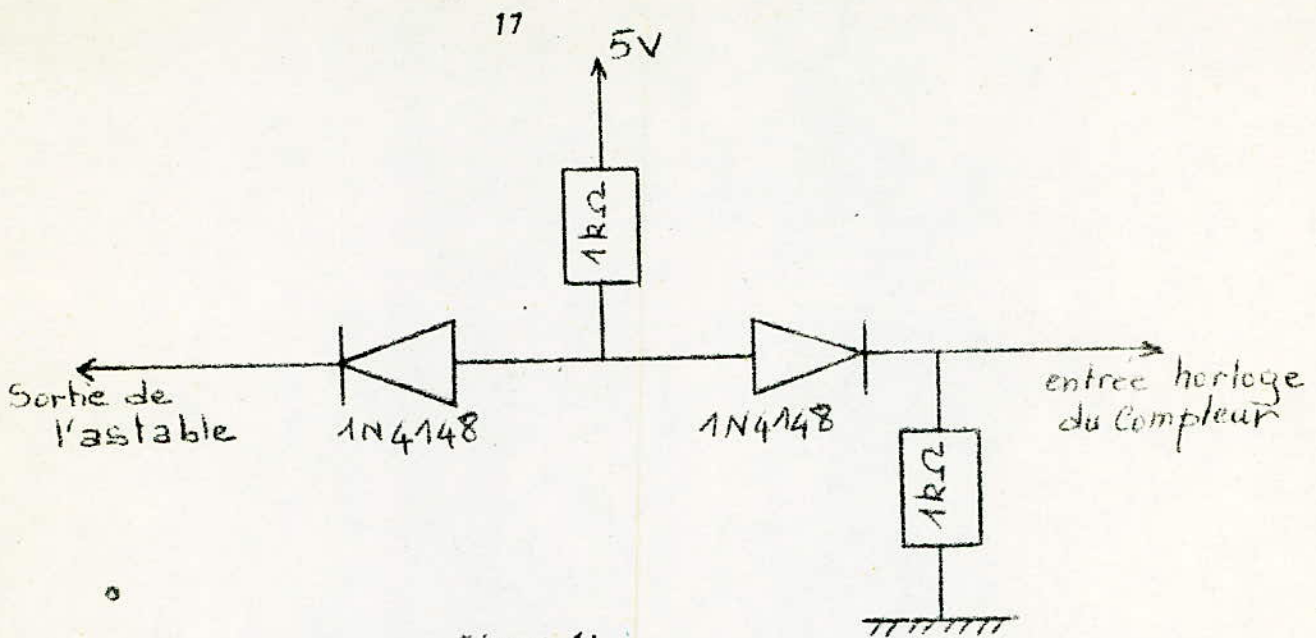
Le signal délivré à la sortie est le suivant :



- Figure 13 -

On fait varier la fréquence en agissant sur le potentiomètre. On le règle de telle façon à avoir une fréquence égale à 1,6 kHz (voir page 24). Avant d'attaquer l'entrée horloge du compteur, on réalise une interface moyennant deux diodes montées en tête bêche et de résistances; car il y a incompatibilité entre les deux familles CMOS et TTL.

Le montage est le suivant :

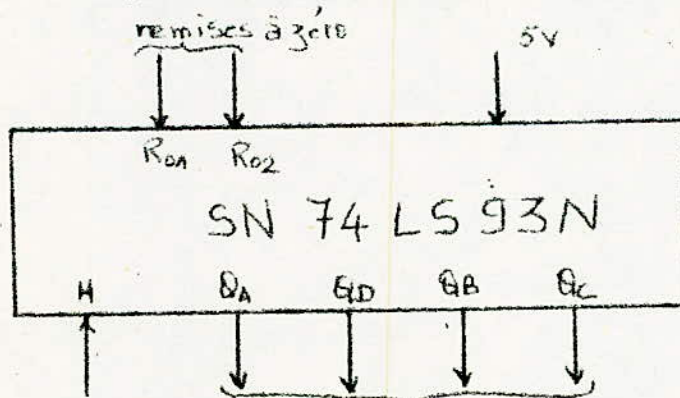


- Figure 14 -

Le signal obtenu est toujours à la même fréquence, mais, son amplitude se trouve atténuée jusqu'à 3V. Pour ce signal d'horloge, le compteur bascule.

Le compteur utilisé est un compteur binaire synchrone à 4bits (circuit intégré), dont l'impulsion de progression est reliée à l'entrée horloge.

La figure ci-dessous donne son schéma bloc :



Sorties du compteur
- Figure 15 -

- Il comprend :

- + Quatre étages Q_A , Q_B , Q_C , Q_D .
- + une entrée horloge H
- + Deux entrées de mise à zéro, Ro1 et Ro2, pour les quatre étages Q_A , Q_B , Q_C , et Q_D . Quand ces deux entrées sont simultanément reliées à la masse, les quatre sorties basculent.

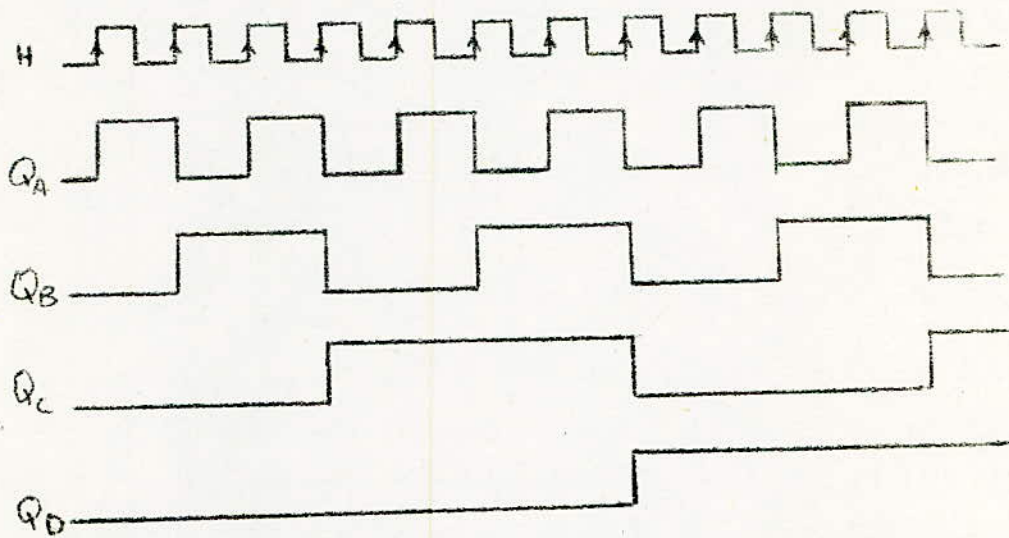
Le fonctionnement de ce compteur se résume dans le tableau ci-dessous :

VALEUR	Q_D	Q_C	Q_B	Q_A	HORLOGE
0	0	0	0	0	
1	0	0	0	1	Front
2	0	0	1	0	
3	0	0	1	1	Montant
4	0	1	0	0	
5	0	1	0	1	
6	0	1	1	0	
7	0	1	1	1	
8	1	0	0	0	
9	1	0	0	1	
10	1	0	1	0	
11	1	0	1	1	
12	1	1	0	0	
13	1	1	0	1	
14	1	1	1	0	
15	1	1	1	1	
16	0	0	0	0	

- Tableau 1 -

- Diagramme des temps du compteur -

Le chronogramme ci-dessous reproduit l'évolution dans le temps des sorties du compteur en fonction du signal d'horloge.



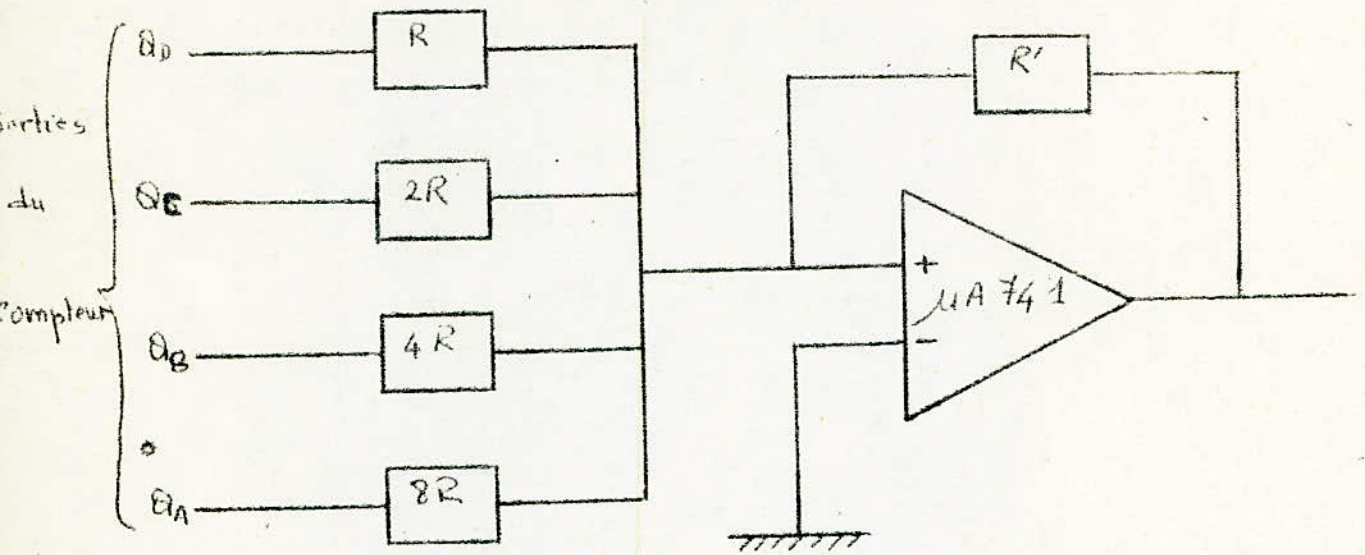
- Figure 16 -

- L'étage Q_A change d'état à chaque impulsion d'horloge.
- L'étage Q_B change d'état une fois sur deux impulsions d'horloge.
- L'étage Q_C change d'état une fois sur quatre impulsions d'horloge.
- L'étage Q_D change d'état une fois sur huit impulsions d'horloge.

La 16^{ème} impulsion remet le comptage à zéro. Ces étages basculent entre deux niveaux de tension 0 et 5V respectivement 0 et 1 logique.

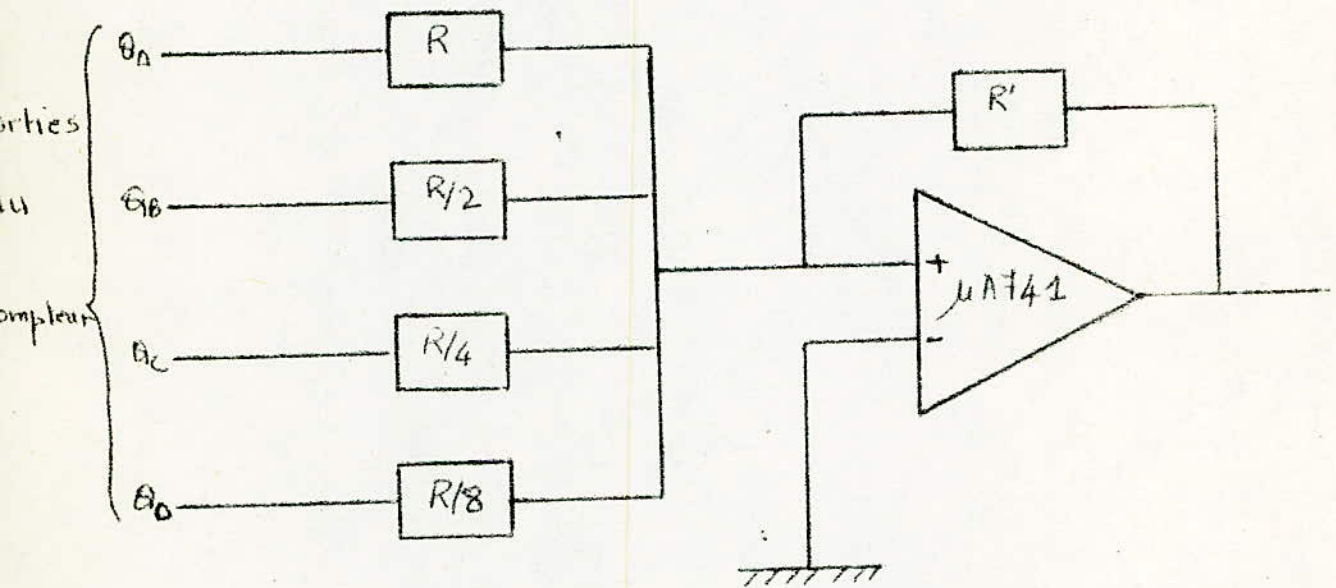
Une fois ces basculements obtenus, on relie les sorties du compteur à un convertisseur numérique - analogique. Ce convertisseur a pour rôle de transformer une information (chiffre binaire 0000 à 1111) numérique en un signal analogique (tension).

Ce convertisseur numérique - analogique utilise un amplificateur intégré linéaire (μ A 741) monté en sommateur et un réseau de résistances $R - 2R - 4R$ et $8R$, comme le montre les montages ci-dessous :



- Figure 17 - a -

1er cas de figure.



- Figure 17 - b -

2ème cas de figure.

Pour le deuxième cas de figure (fig. 17.b), le CNA utilise à l'entrée 4 résistances dont les valeurs sont R , $R/2$, $R/4$ et $R/8$. On dit qu'elles sont pondérées par les poids des bits du nombre binaire appliqué à l'entrée. Ce montage oblige à trouver 4 résistances de valeurs parfaitement ajustées.

Pour notre réalisation, on a choisi le premier montage qui est plus accessible. Dans ce cas, la tension de sortie V_{out} s'écrit :

$$V_{out} = \left[\frac{V_{in}}{R} + \frac{V_{in}}{2R} + \frac{V_{in}}{4R} + \frac{V_{in}}{8R} \right] R'$$

$$V_{out} = \frac{15}{8} V_{in} \frac{R'}{R}$$

• Pour $R = R'$ on a :

$$V_{out} = \frac{15}{8} V_{in} \quad (1)$$

Pour cette expression (1) l'information binaire d'entrée est 1111 (soit 15 en décimal). Par contre, si l'information d'entrée vaut 0001 (soit 1 en décimal) alors :

$$V_{out} = \frac{1}{8} V_{in}$$

C'est donc la plus petite valeur non nulle que peut transmettre le convertisseur.

- Caractéristiques du C.N.A. -

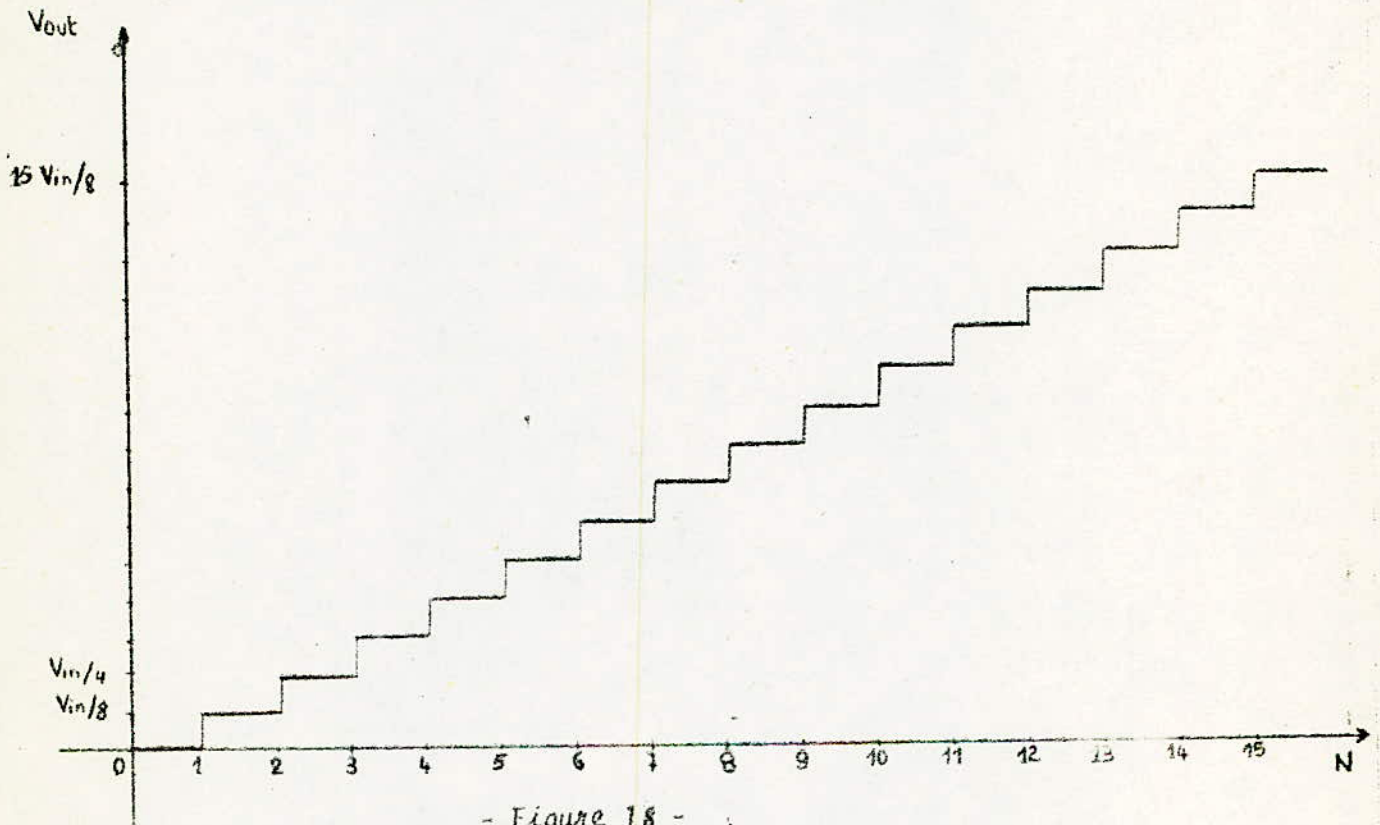
- a) - La résolution : elle est définie comme étant l'inverse du nombre de combinaisons binaires que le convertisseur est capable de convertir. Un convertisseur à 4 eb (notre cas) possède 16 combinaisons à l'entrée (de 0000 à 1111), sa résolution est $1/16$.

La résolution d'un convertisseur à 8 eb est de $1/256$. Donc plus le nombre d'eb augmente, plus la résolution est grande, et la précision meilleure.

b) - La linéarité : l'accroissement d'une unité du nombre d'entrée fournit, en principe un accroissement de la tension de sortie V_{out} .

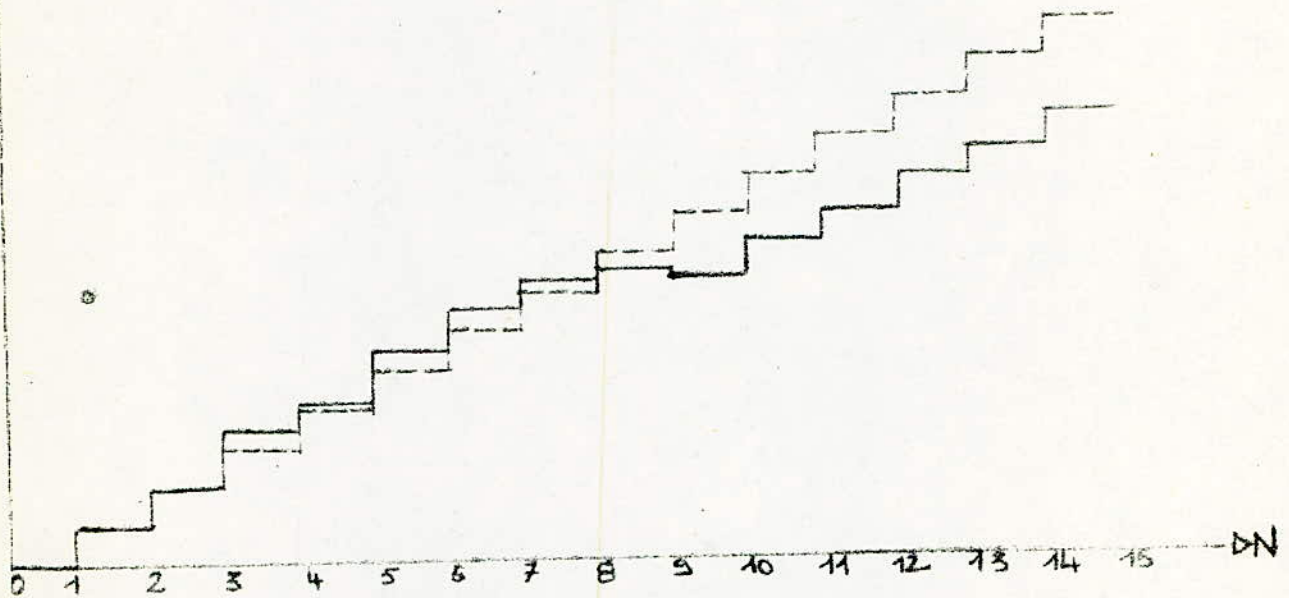
$$V_{out} = \frac{V_{in}}{8}$$

La caractéristique $V_{out} = F(N)$ du C.N.A. est donc théoriquement constituée de marches d'escaliers identiques



- Figure 18 -

En pratique, les quatre sorties du compteur reliées aux résistances du C.N.A. (fig. 17 -a-) ne sont pas parfaites. Les résistances placées à l'entrée de l'amplificateur opérationnel ne peuvent être rigoureusement dans les rapports 1 - 2 - 4 - 8. Il en résulte des dissymétries sur la caractéristique du C.N.A. qui caractérisent un léger défaut dans la linéarité du convertisseur : la courbe réelle en trait continu diffère de la courbe idéale qui est en pointillée. Voir la figure ci-dessous :



- Figure 19 -

La rampe obtenue est constituée de 16 paliers, dont le niveau de tension diffère légèrement d'un palier à un autre. En augmentant le nombre de bits par exemple à 8 bits, la rampe comprendra 256 marches d'escaliers plus précis en niveau de tension.

La rampe obtenue expérimentalement (16 paliers), couvrira la moitié d'une sinusoïde, c'est-à-dire, elle se répand le long d'une demi-période T' , qui correspond à un déphasage maximum de 180° . Il en découle l'étalonnage de la rampe en degré à savoir :

- 180° correspond à 16 paliers.
 donc : un (1) palier lui correspondra $11^\circ,25$.

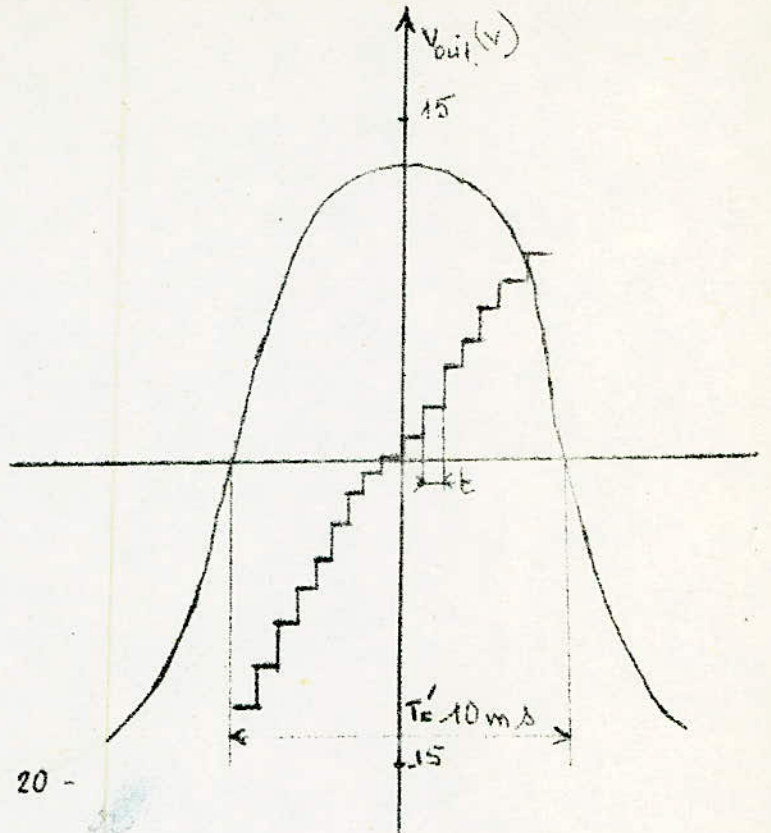
Il en est de même pour les niveaux de tension. La rampe obtenue est comprise entre deux niveaux de tensions - 12,5 V et + 13,8 V. Donc un palier lui correspondra un niveau de tension de 1,8 V.

On en a déduit aussi la fréquence de basculement de l'astable et du compteur. A savoir :

$$16 \times t = 10 \text{ mS}$$

$$\text{Donc : } t = \frac{10}{16} \text{ mS}$$

et une fréquence de 1,6 kHz

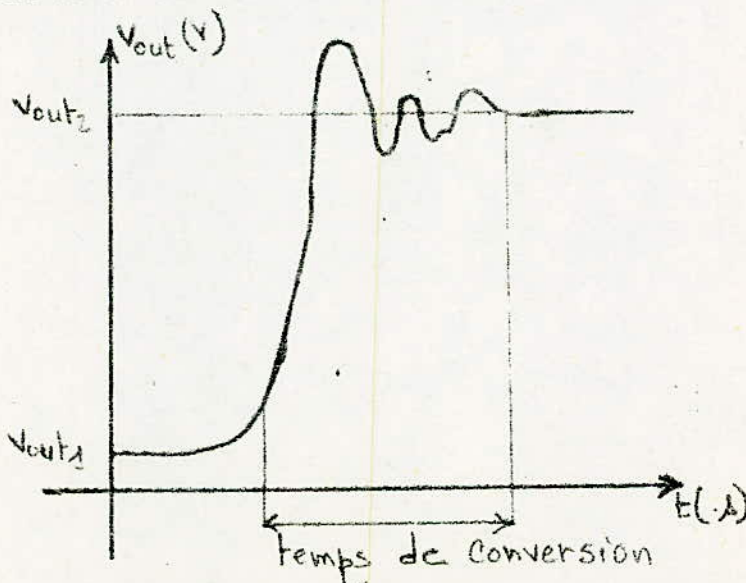


- Figure 20 -

- Le temps de Conversion -

C'est le maximum que peut atteindre la durée d'une conversion numérique - analogique. Le cas le plus défavorable correspond au passage de $N = 0000$ à $N = 1111$, puisque les 4 résistances ainsi montées doivent commuter.

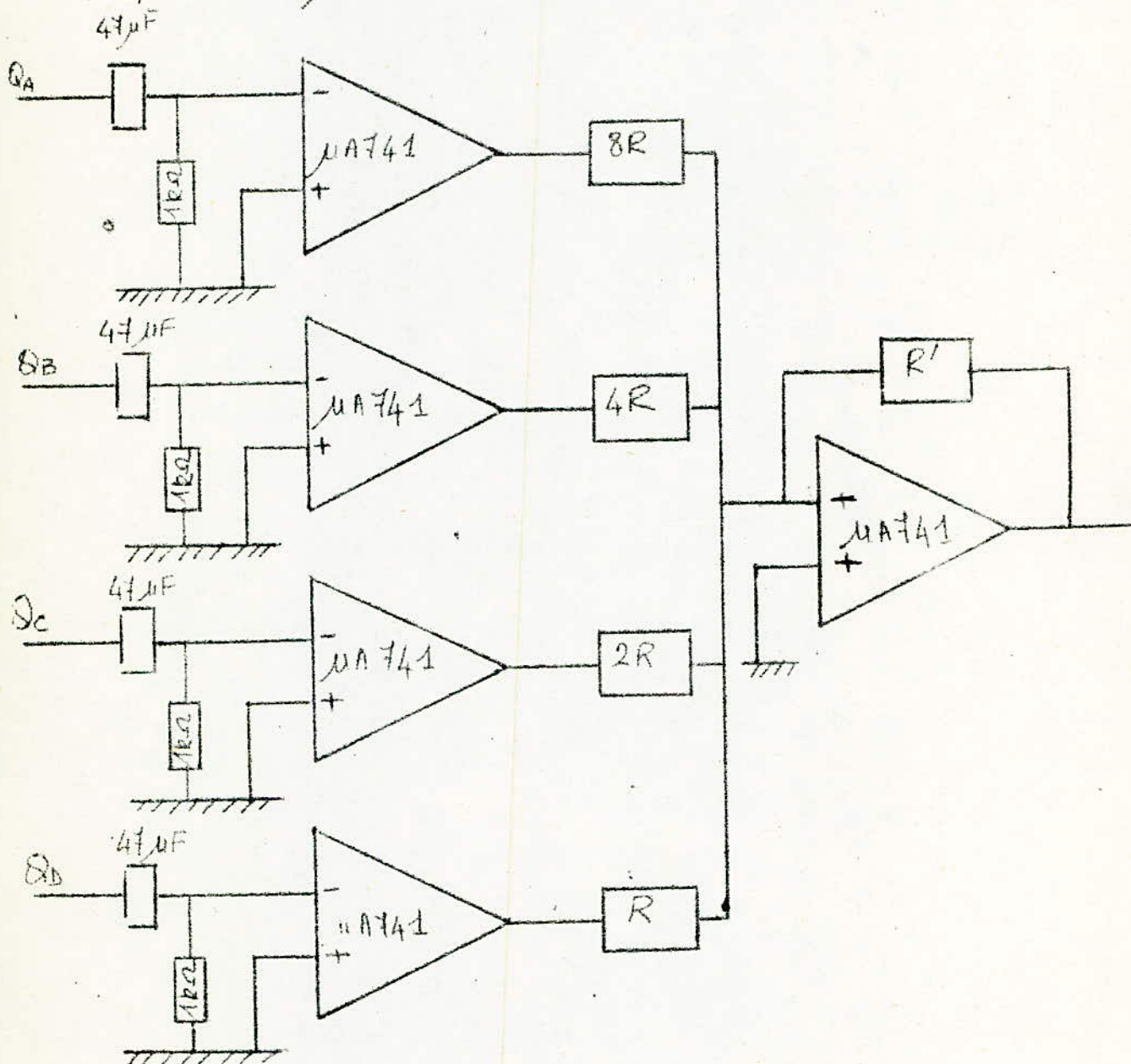
Les commutations ne sont pas nécessairement simultanées, des tensions parasites peuvent alors apparaître avant que la tension de sortie V_{out} ne se stabilise à sa valeur finale. Voir la figure ci-dessous :



- Figure 21 -

Ce temps de conversion intervient dans la stabilité des paliers obtenus.

Avant de réaliser la conversion numérique - analogique, on a dû concevoir une interface afin de relier les sorties du compteur Q_A , Q_B , Q_C , et Q_D à l'entrée du convertisseur C.N.A. Car il y a incompatibilité entre le compteur (TTL) et le convertisseur à base d'amplificateur opérationnel $\mu A741$ (CMOS). Le montage de l'interface est comme suit :



- Figure 22 -

A chaque sortie du compteur, on place une capacité de $47\mu F$ et une résistance de $1k\Omega$ à l'entrée inverseuse du comparateur (comme l'indique la figure ci-dessus). La comparaison se fait par rapport à la masse. La constante de temps $\tau = RC = 47ms$ est bien trop grande pour influencer sur le basculement du compteur.

La rampe obtenue précédemment permettra donc, la mesure du déphasage pour une charge donnée à savoir : résistive, selfique ou capacitive.

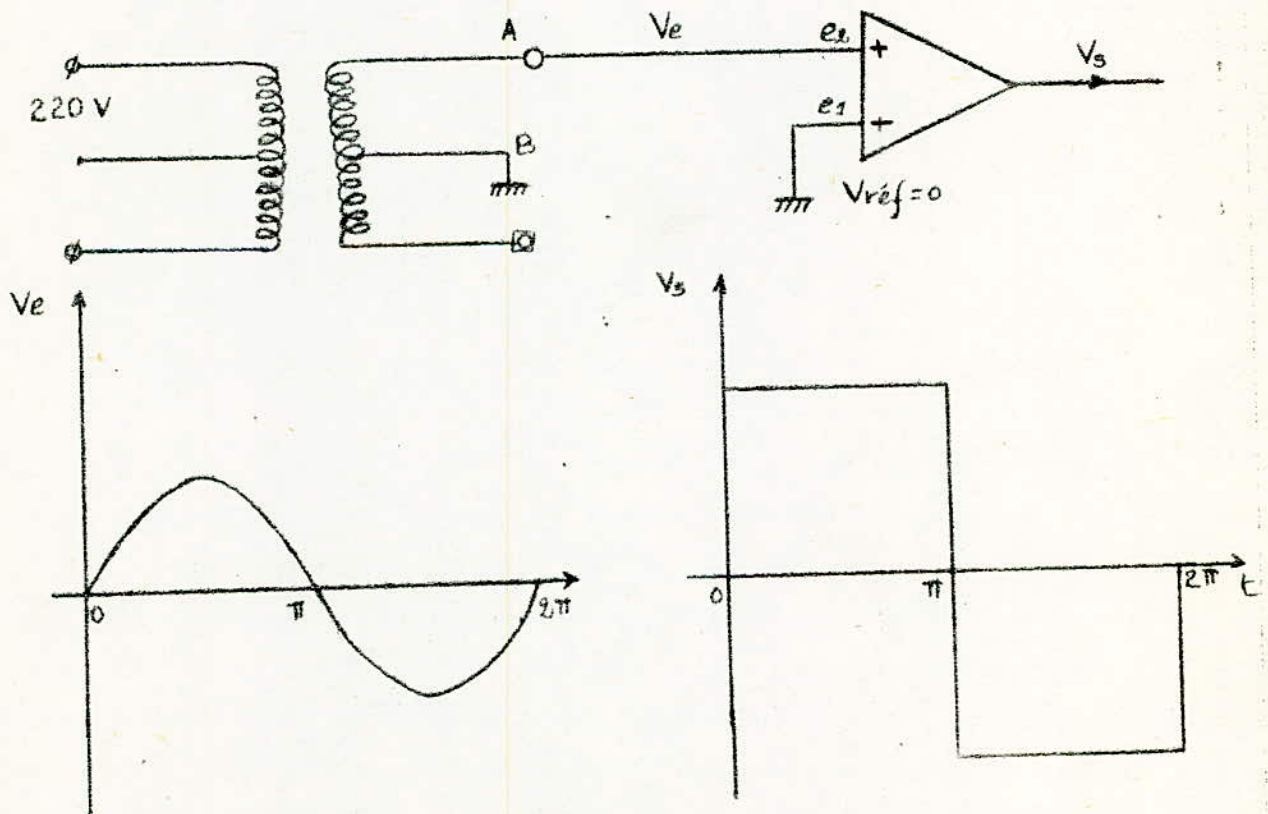
- Principe de la mesure -

Pour illustrer ce principe, on se basera sur l'étude d'une charge selfique (RL), ce qui restera valable pour les autres cas de charges.

Le déphasage φ à mesurer, sera entre deux signaux de même fréquence, courant i et tension V .

- Le signal tension -

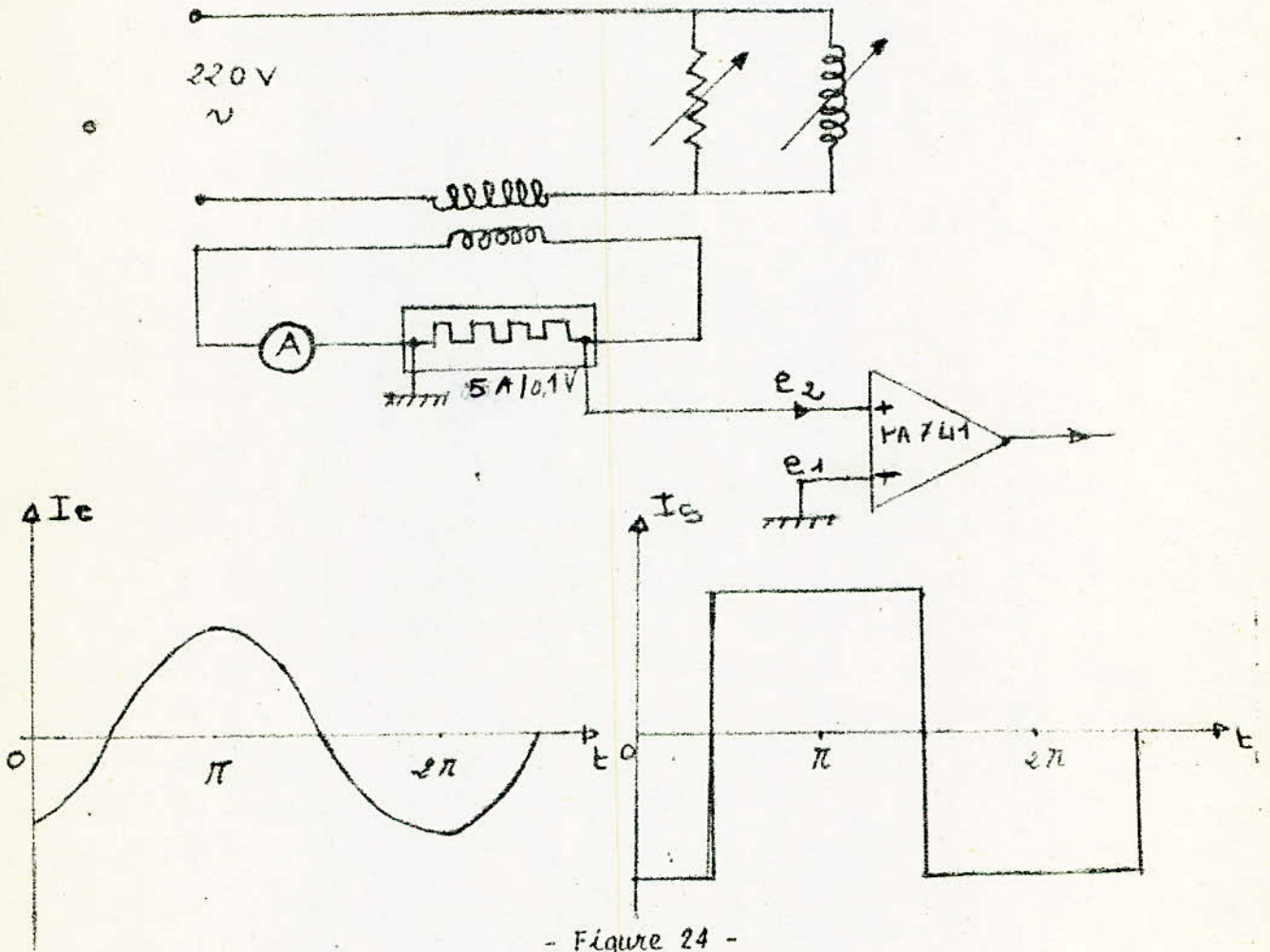
Il est sinusoïdal de période 2π délivré par le réseau à 50 Hz abaissé par un transformateur 220 V (9 V eff) puis transformé en un signal carré moyennant un amplificateur opérationnel en montage comparateur. Comme le montre la figure ci-dessous :



- Figure 23 -

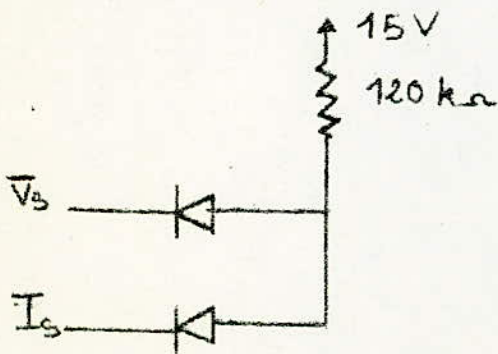
- Le signal courant -

Il est sinusoïdal de période 2π traversant une charge RL (en parallèle) alimentée par le réseau 220 V. En utilisant un shunt approprié (shunt 5A/0,1 V), l'image du courant sera transformée en un signal carré en procédant de la même manière que pour le signal tension. (Montage ci-dessous):



- Figure 24 -

Le produit entre ces deux signaux, sera réalisé à l'aide d'une porte A.N.D. à diode, dont le fonctionnement est comme suit :



V_S	I_S	S
0	1	0
0	0	0
1	0	0
1	1	1

- Figure 25 -

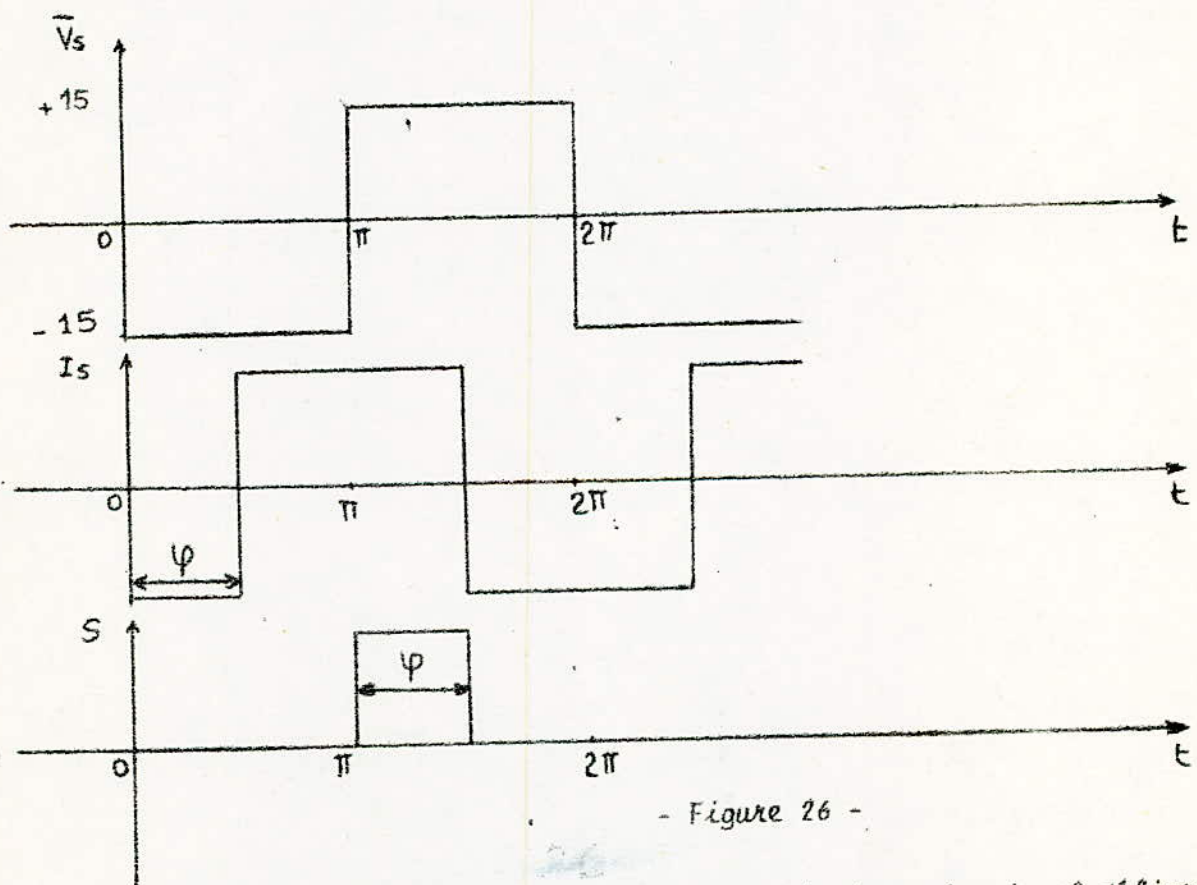
Si l'une des entrées est au niveau logique 0, ce qui signifie que l'une des deux diodes conduit, la sortie sera au niveau logique zéro.

Si les deux entrées sont au niveau logique 1, les deux diodes sont bloquées, la sortie est portée au niveau 1.

Il en ressort un train d'impulsion, dont la durée correspond exactement au décalage de temps existant entre les deux signaux $\overline{V_S}$ et I_S . En d'autre terme, on obtient le déphasage φ existant entre $\overline{V_S}$ et I_S .

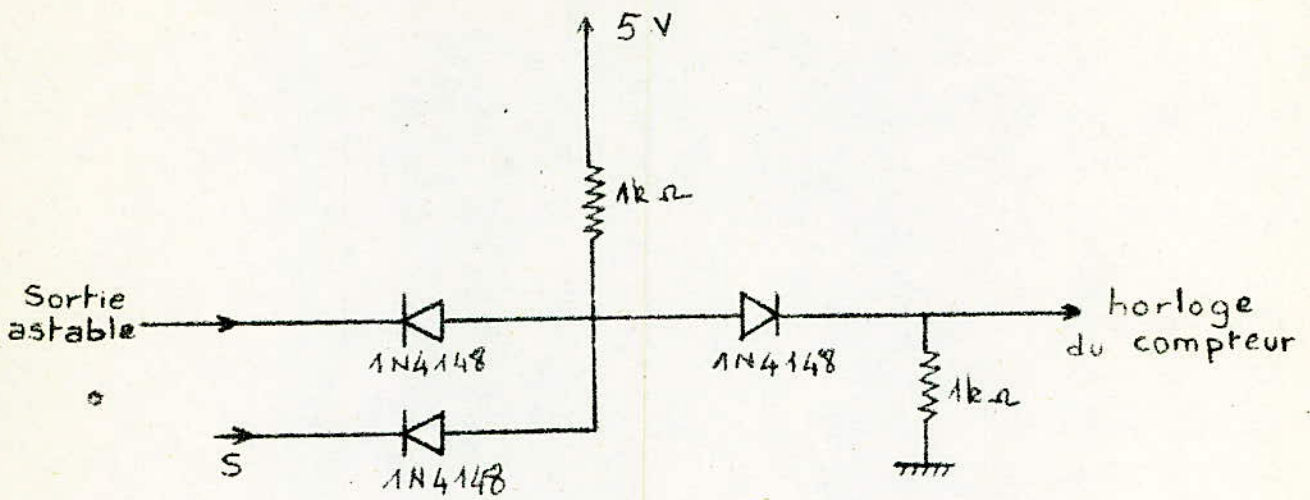
- REMARQUE -

La permutation des deux bornes A et B du secondaire du transformateur permettra l'inversion du signal $\overline{V_S}$.



- Figure 26 -

Moyennant ce signal produit, noté S, ainsi que le signal délivré par l'astable, on réalise un second produit (voir figure ci-dessous) dont, il résultera un train d'impulsion. Ce dernier attaque l'horloge du compteur. Le compteur bascule suivant un nombre d'impulsions correspondant au déphasage φ durant une période $T = 2\pi$.



- Figure 27 -

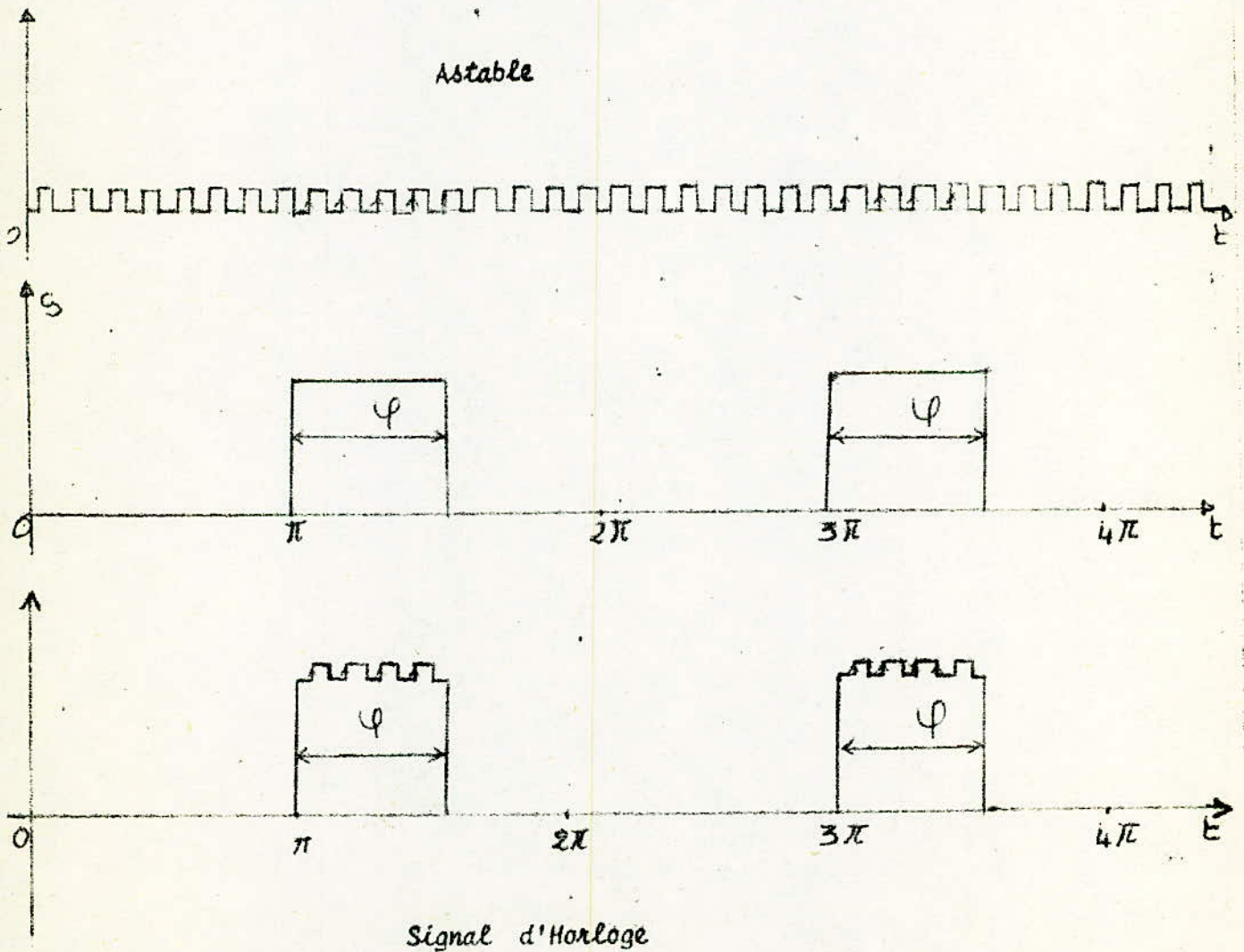
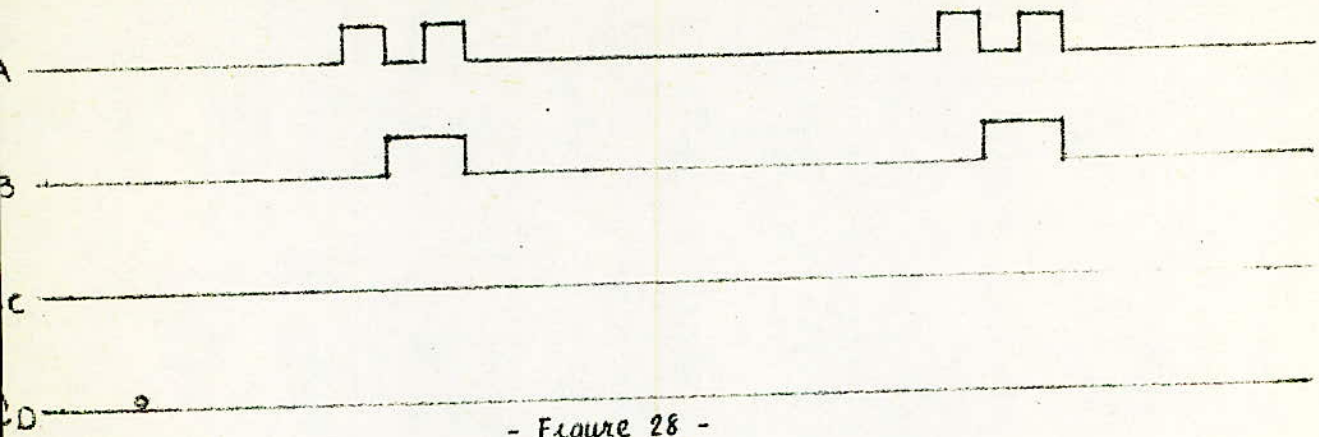
- Déphasage φ arrière quelconque -

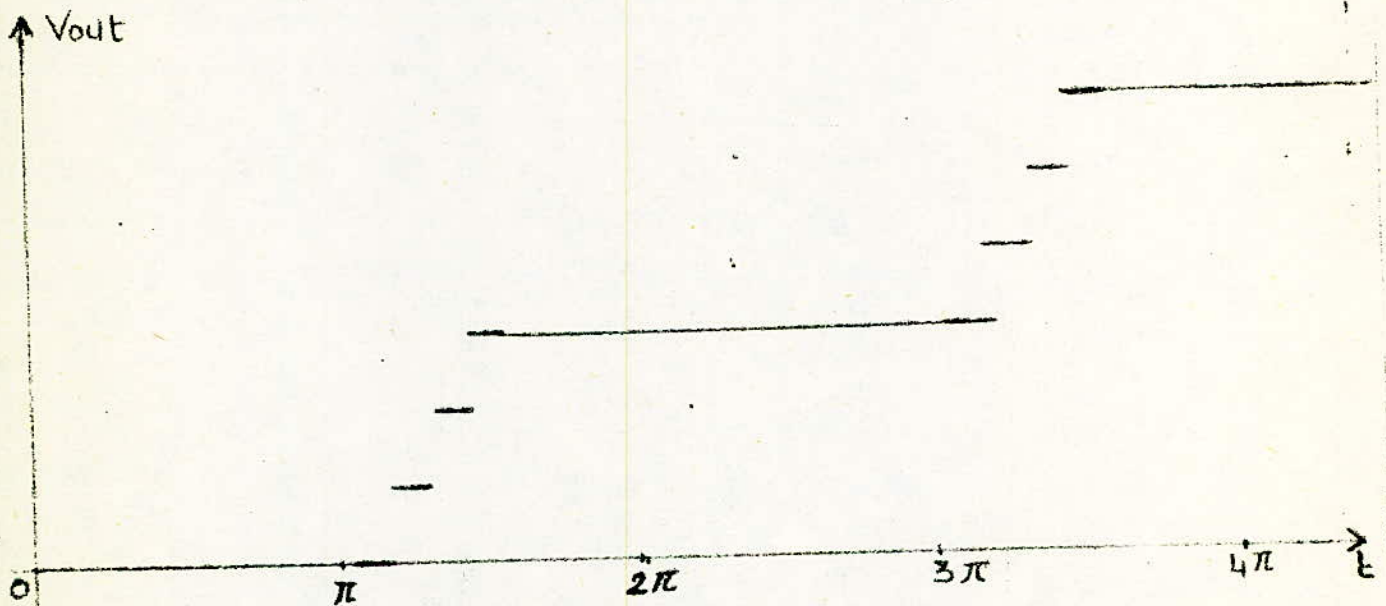
Diagramme de Temporisation du Compteur



- Figure 28 -

Q_D	Q_C	Q_B	Q_A	
0	0	0	0	1er palier de la rampe
0	0	0	1	2ème palier de la rampe
0	0	1	0	3ème palier de la rampe
0	0	1	1	4ème palier de la rampe

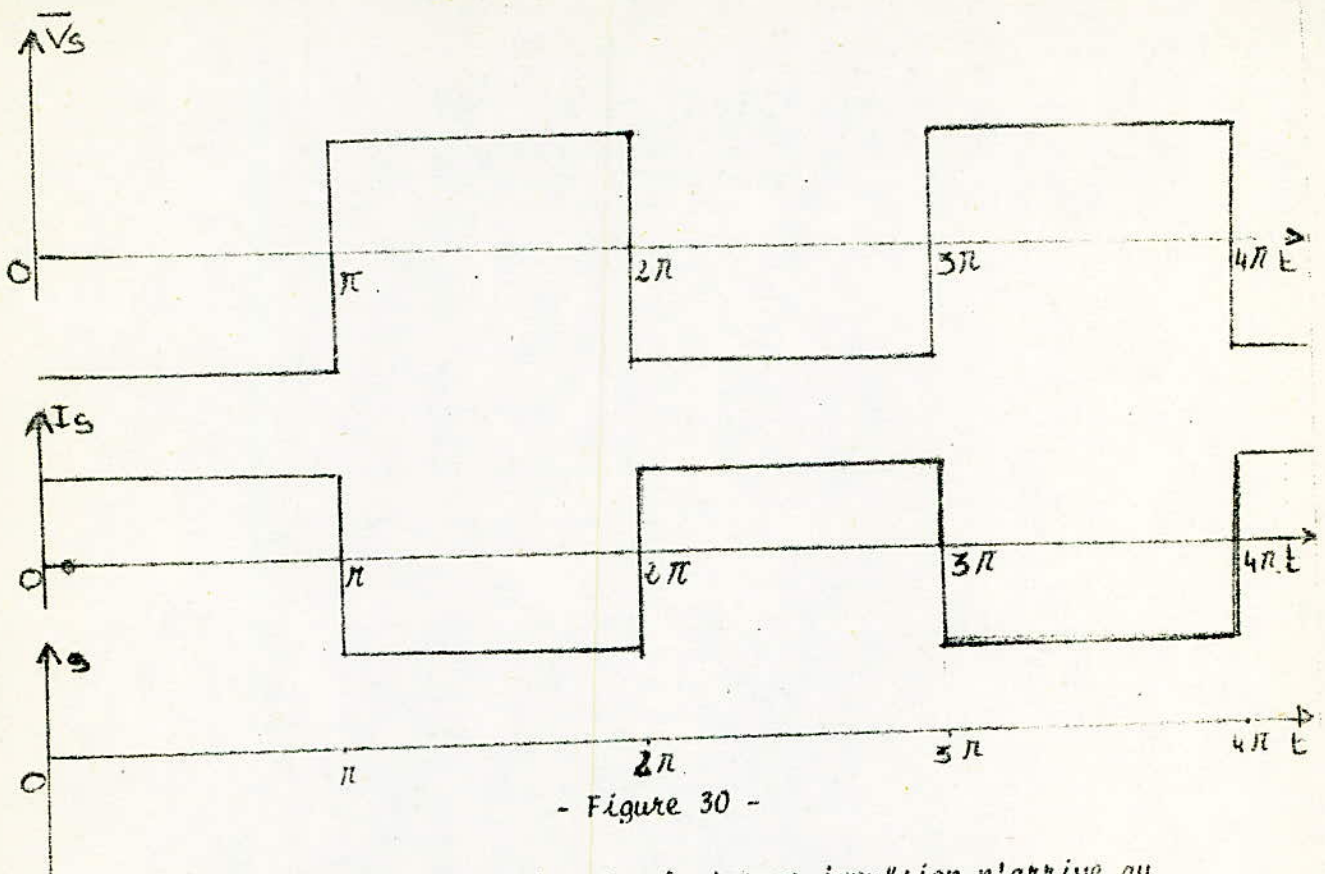
Pour ce cas de figure, la rampe sera bloquée au quatrième (4ème) palier.



- Figure 29 -

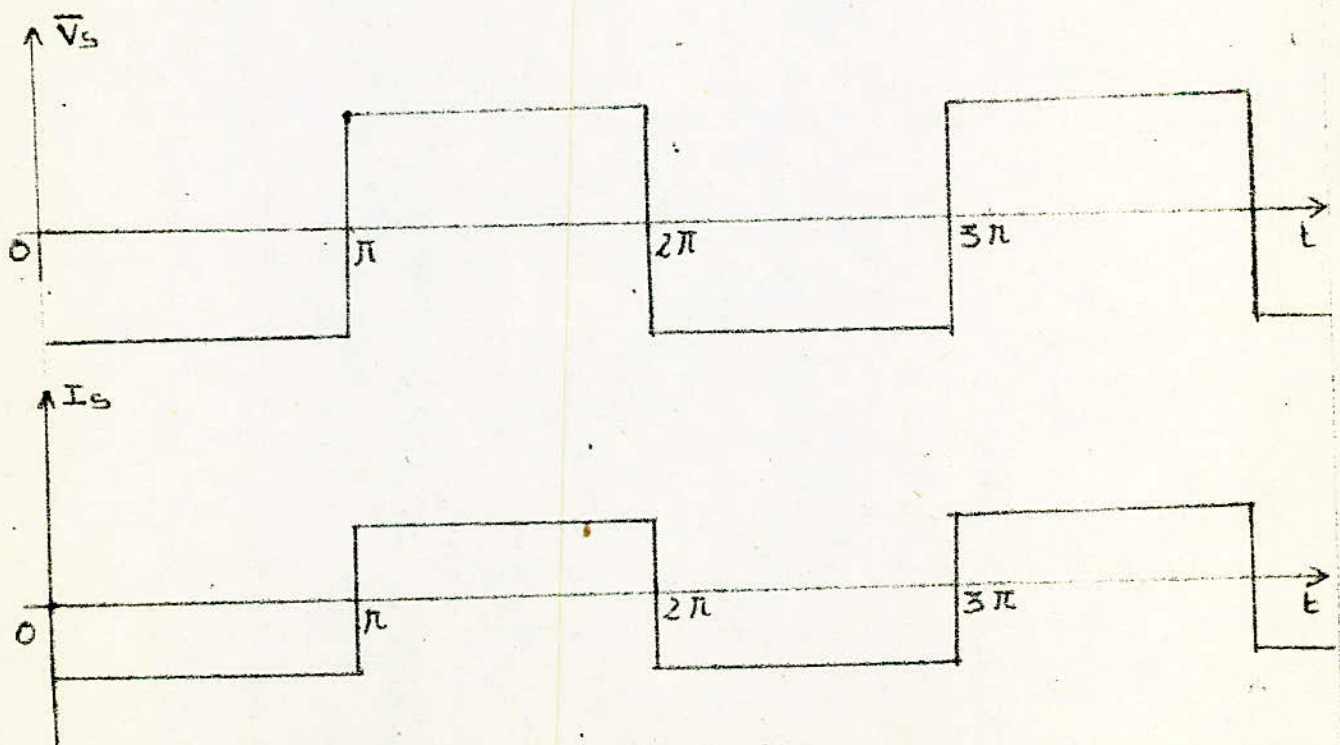
- Cas particulier -

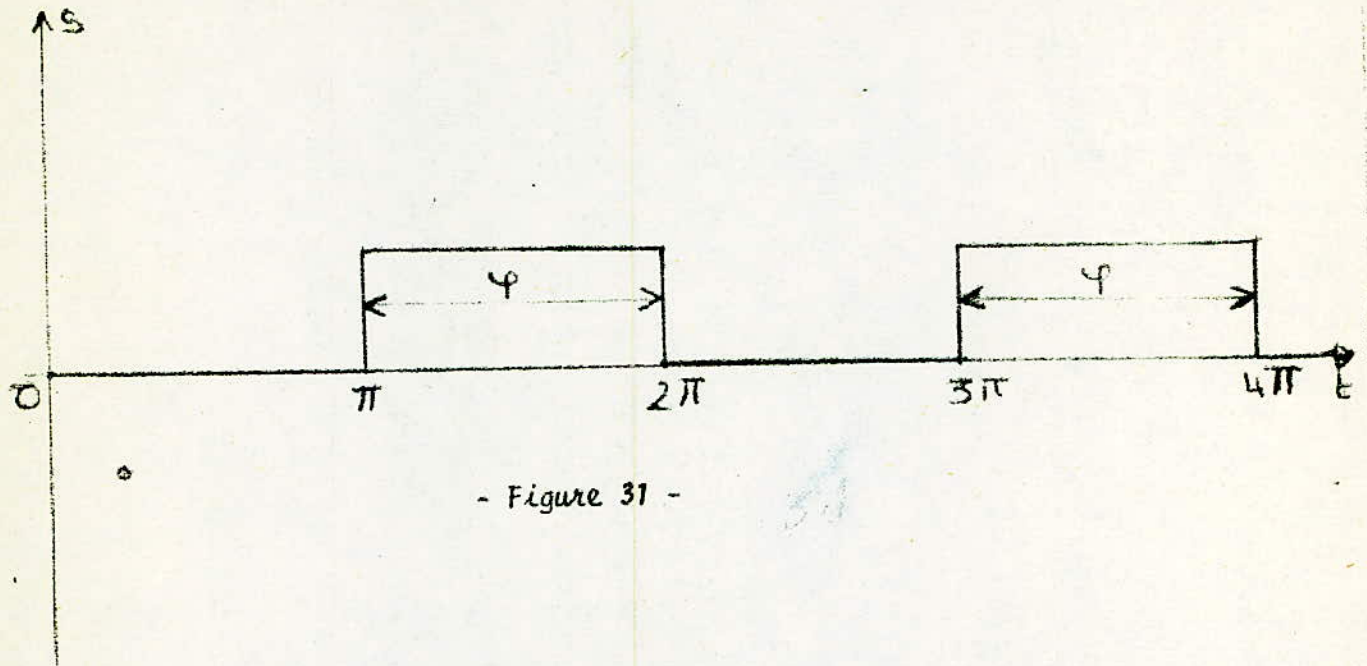
a) V_0 et I_0 en phase soit $\varphi = 0$:



Le signal produit S est nul. Aucune impulsion n'arrive au niveau de l'horloge du compteur. Ce dernier ne basculera pas. Donc, le niveau de la rampe est (0000), correspondant au 1er palier.

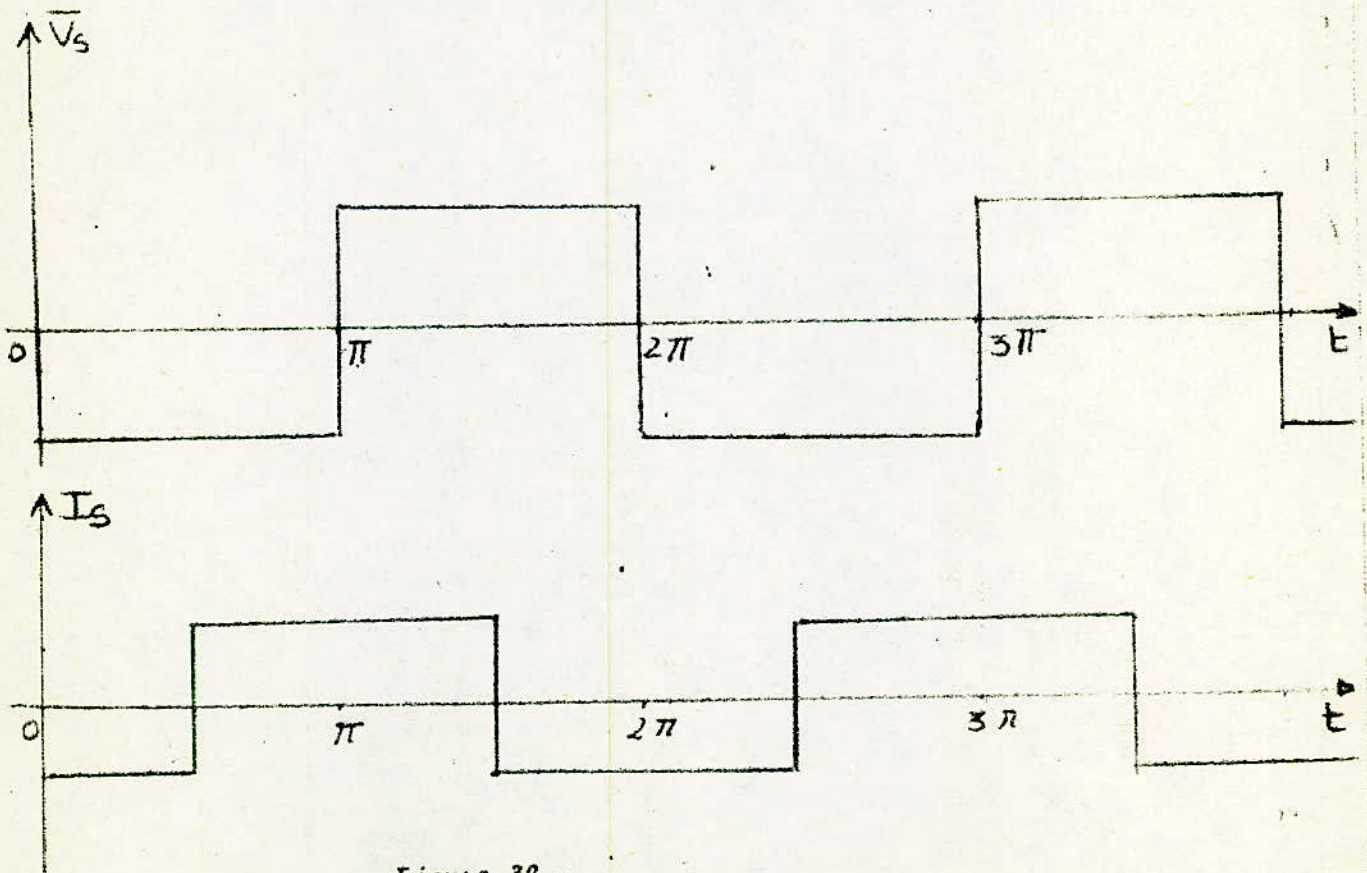
b) - V et I en opposition de phase ($\varphi = \pi$) :

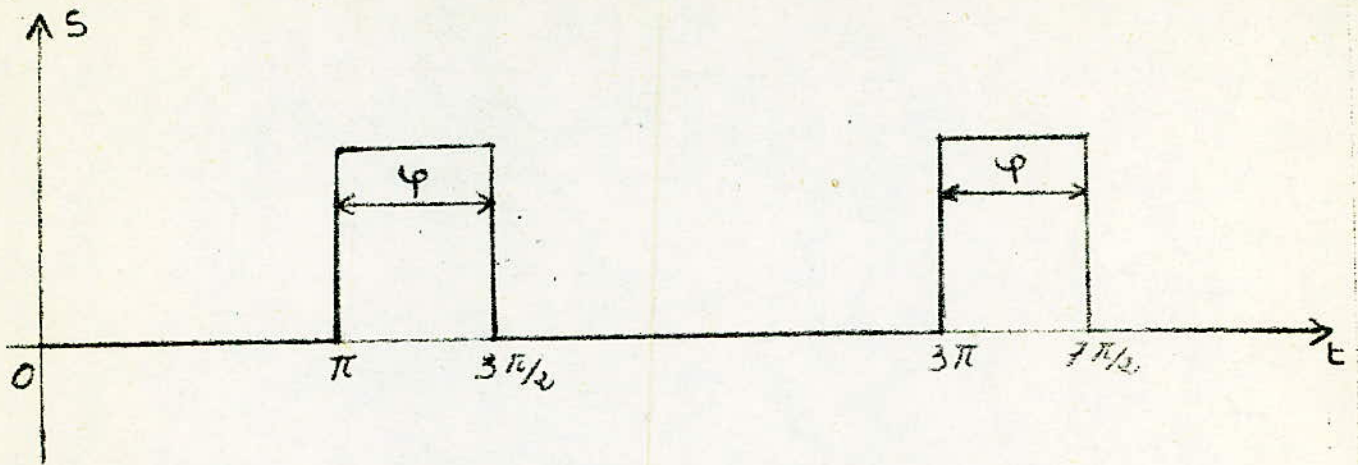




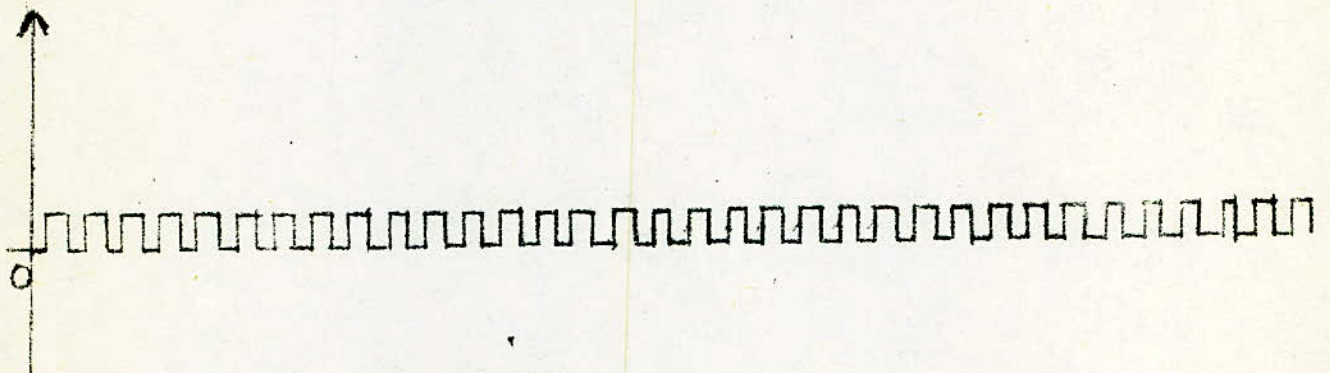
Dans ce cas, la rampe comportera les 16 paliers.

c) - V et I en quadrature $\varphi = \pi/2$:

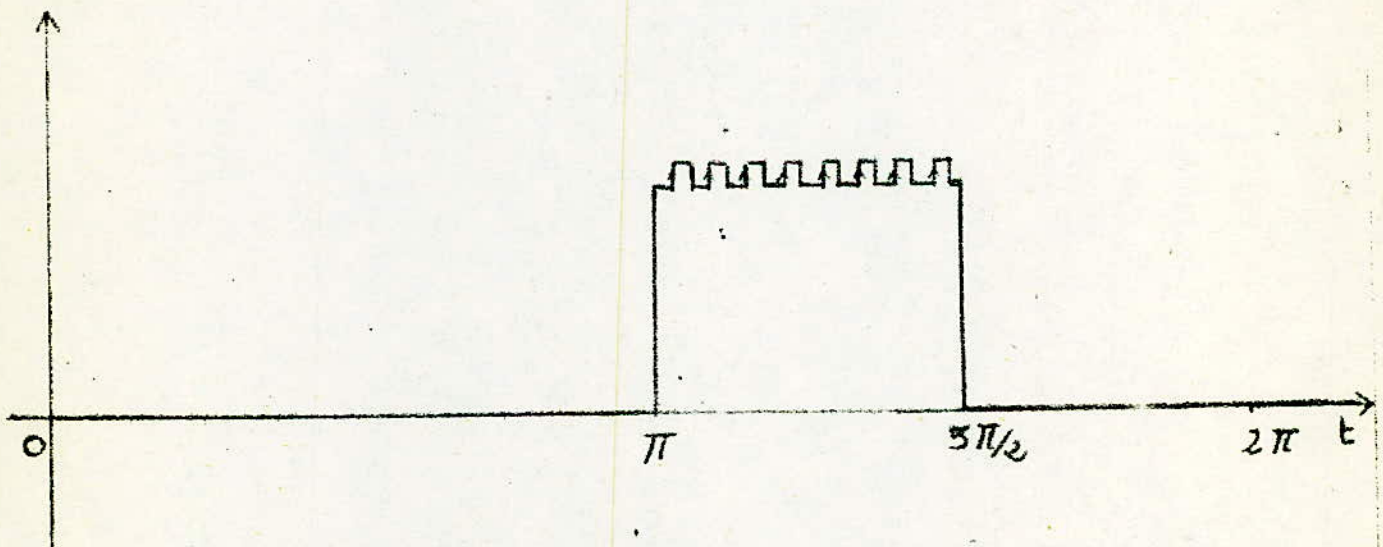




Signal Produit

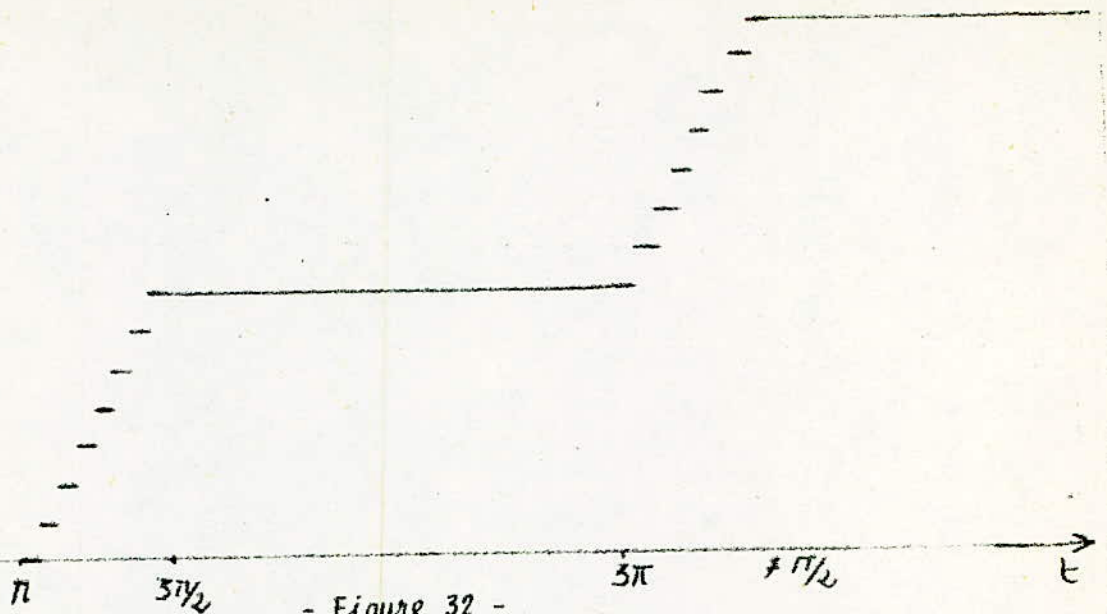


Astable



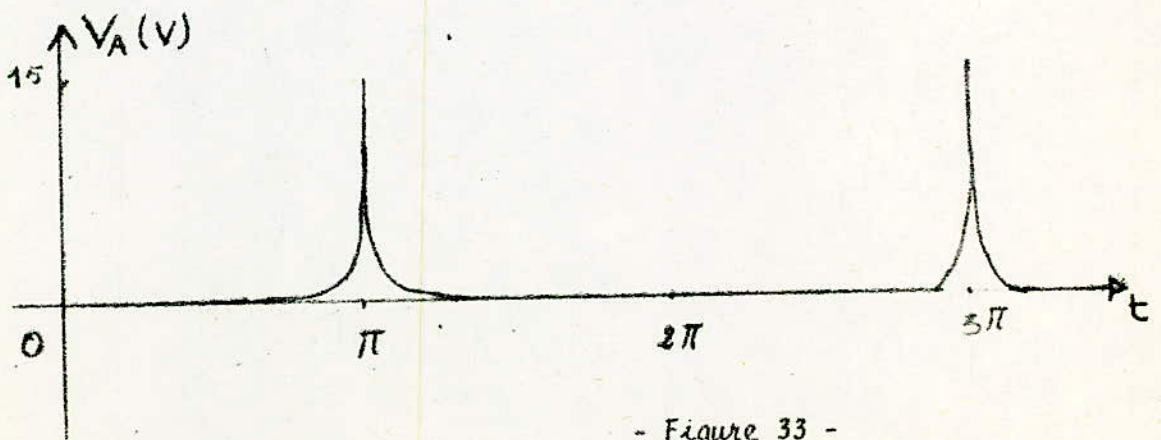
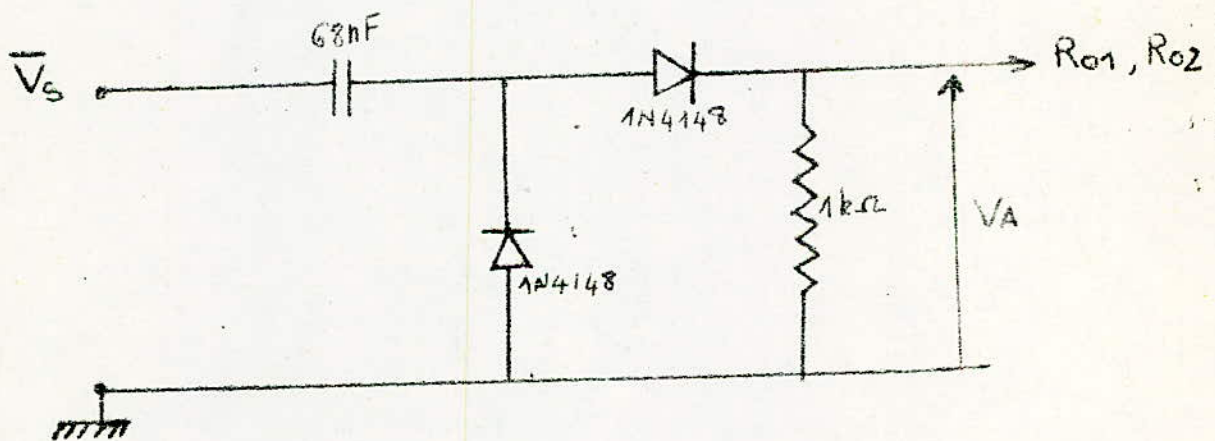
Signal d'Horloge

Vout



Le compteur basculera pour ces 8 impulsions, et la rampe comptabilisera 8 paliers.

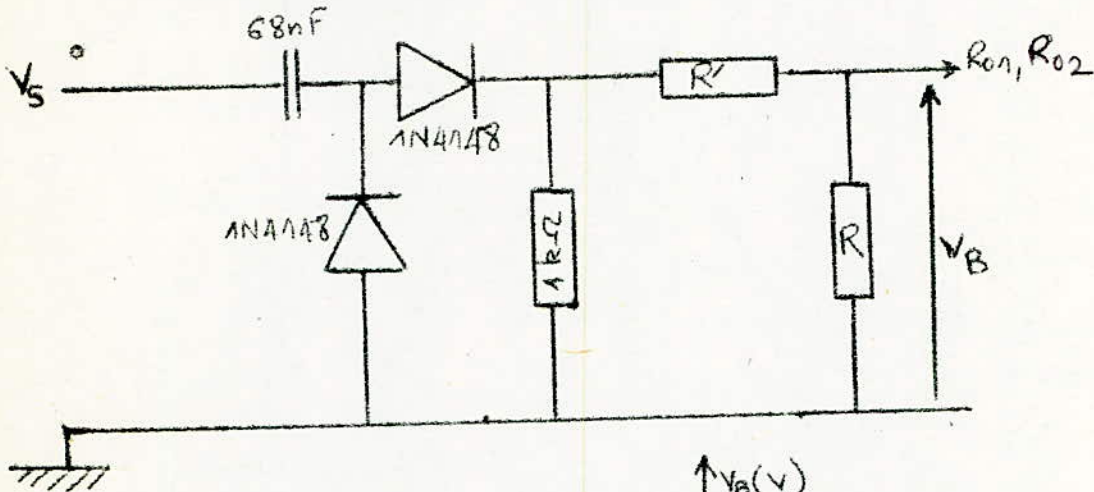
Afin de maintenir la rampe à un niveau constant, et de reprendre le comptage au moment désiré, on alimente la remise à zéro du compteur par la sortie d'un circuit dérivateur (voir montage ci-dessous) :



Ce circuit dérivateur est alimenté par la tension de sortie V_S , qui permettra de synchroniser les impulsions de sortie de ce dernier, avec chaque début de comptage du compteur.

- REMARQUE - :

On adjoint à ce circuit dérivateur un pont diviseur de tension afin d'atténuer l'amplitude des impulsions à 3V. Car la tension maximum du compteur est de 5V.

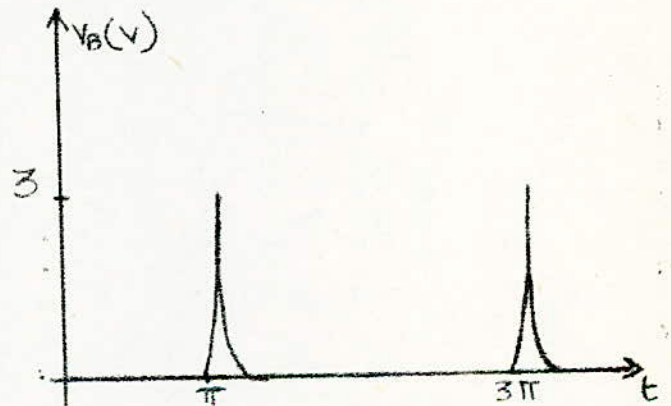


$$V_B = V_A \frac{R'}{R + R'}$$

$$R' = 1 \text{ k} \quad V_A = 15 \text{ V}$$

$$R = 4 \text{ k}$$

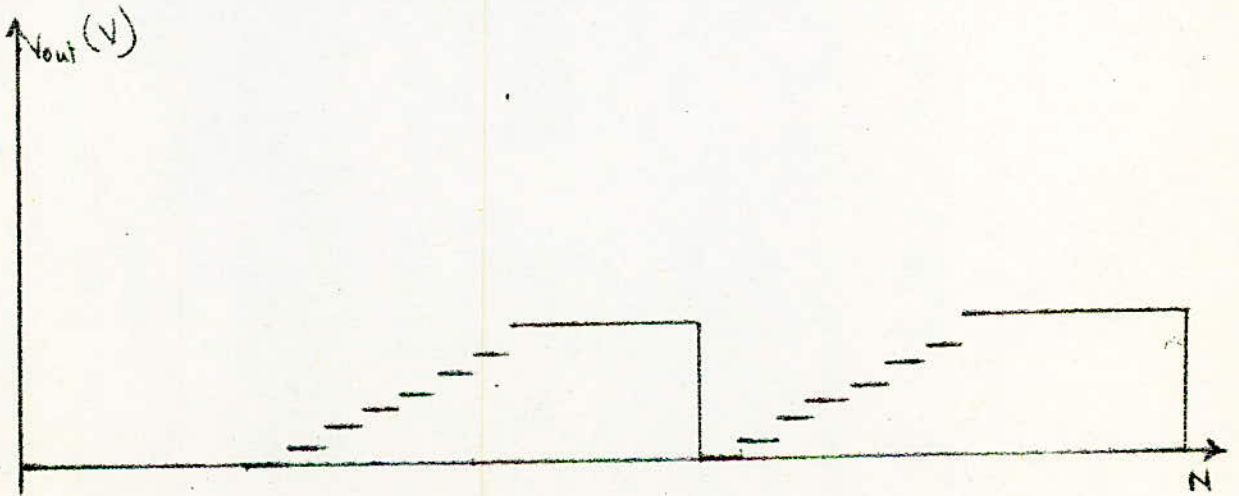
d'où : $V_B = 3 \text{ V}$



- Exemple :

- Figure 34 -

Cas V - 1, en quadrature en appliquant ce circuit ci-dessus pour la remise à zéro du compteur

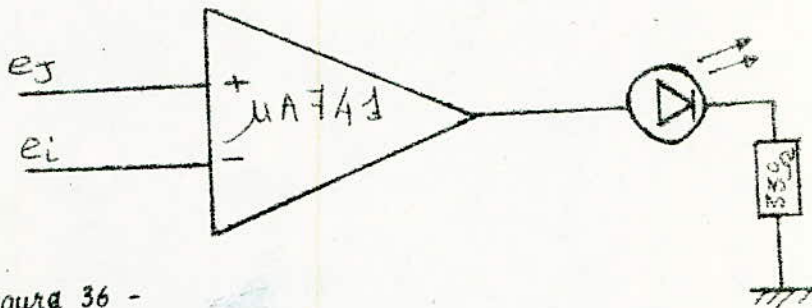


- Figure 35 -

Pour afficher le résultat, on a adopté un mode d'affichage facile à mettre en oeuvre. Il est basé sur l'utilisation des amplificateurs opérationnels montés en comparateur ainsi que de diodes photoémettrices courantes "LED".

- Principe d'affichage -

Pour chaque palier de la rampe, on utilisera le montage suivant :



- Figure 36 -

e_j : tension à la sortie du C.N.A. qui n'est autre que la rampe bloquée au palier J auquel correspond le déphasage φ_j .

e_i : tension du i ème palier.

$$V_S = e_j - e_i$$

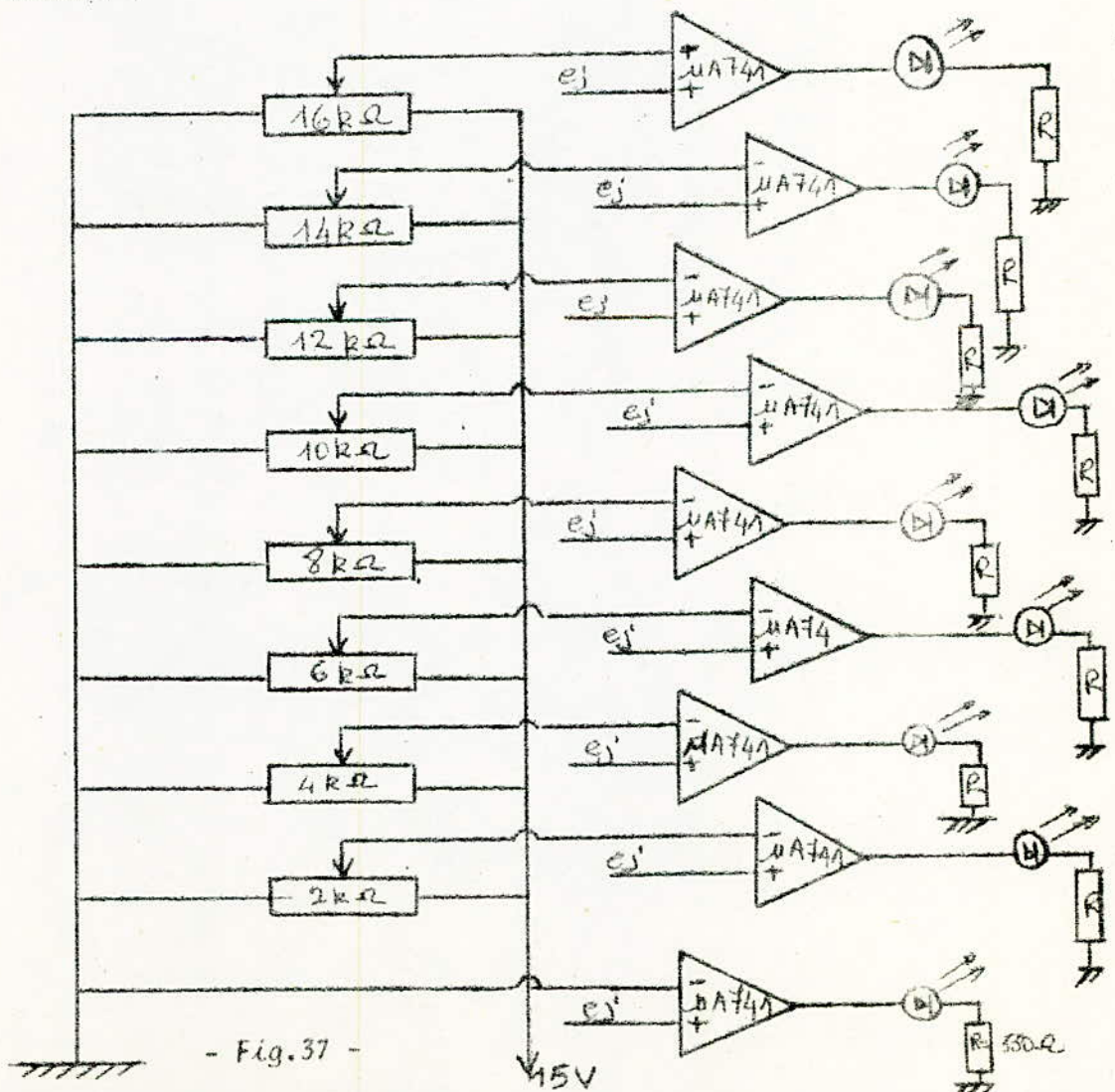
Si $V_S > 0$ c-a-d $e_j > e_i$ la "LED" utilisée pour le i ème palier s'allume.

Si $V_S < 0$ c-a-d $e_j < e_i$ la "LED" utilisée pour le i ème palier est éteinte.

Les cas particuliers étudiés précédemment, nous ont permis d'échelonner la rampe en angle de déphasage φ . Ainsi à chaque palier correspondra un niveau de tension, une valeur au déphasage φ , par conséquent, un facteur de puissance $\cos \varphi$ (voir tableau ci-dessous):

N	D	C	B	A	V_S (V)	φ ($^\circ$)	$\cos\varphi$
0	0	0	0	0	12,5	90	0
1	0	0	0	1	9,8	70,56	0,333
2	0	0	1	0	8	57,6	0,536
3	0	0	1	1	6,5	46,8	0,684
4	0	1	0	0	5	36	0,809
5	0	1	0	1	3	21,6	0,429
6	0	1	1	0	1,5	10,8	0,982
7	0	1	1	1	0	0	1
8	1	0	0	0	2	13,33	0,973
9	1	0	0	1	3,8	25,33	0,904
10	1	0	1	0	5,2	34,67	0,822
11	1	0	1	1	7	46,67	0,686
12	1	1	0	0	8,8	58,67	0,520
13	1	1	0	1	10	66,67	0,396
14	1	1	1	0	12	80	0,174
15	1	1	1	1	13,8	90	0

Comme les déphasages mesurés couramment n'excèdent pas la valeur de 90° , sachant qu'une charge purement selfique n'existe que théoriquement, ce qui nous permet d'économiser les composants en appliquant ce principe d'affichage aux 8 premières valeurs de la rampe seulement. (Voir montage ci-dessous) :



Les potentiomètres seront réglés aux valeurs des premiers paxiers du tableau ci-dessus.

Le nombre de LEV qui vont s'allumer, sera égal à $J - 1$, par contre, le déphasage à mesurer correspondra à la première "LED" éteinte après celles qui seront allumées.

Ceci fait, il reste à définir le sens du déphasage. Ce dernier est obtenu par un système indicateur à diodes photoémétriques (LED) commandées par les signaux d'une bascule D.

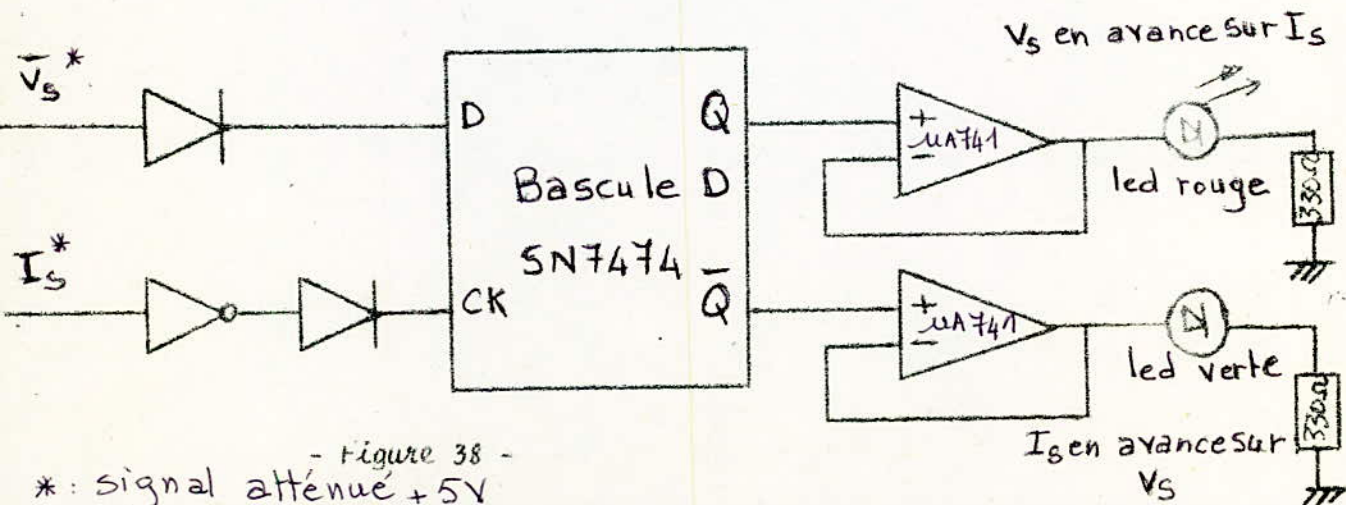
Rappelons que cette bascule a pour propriété de reproduire sur Q le niveau logique de D chaque fois que l'entrée horloge passe de 0 à 1 (front montant).

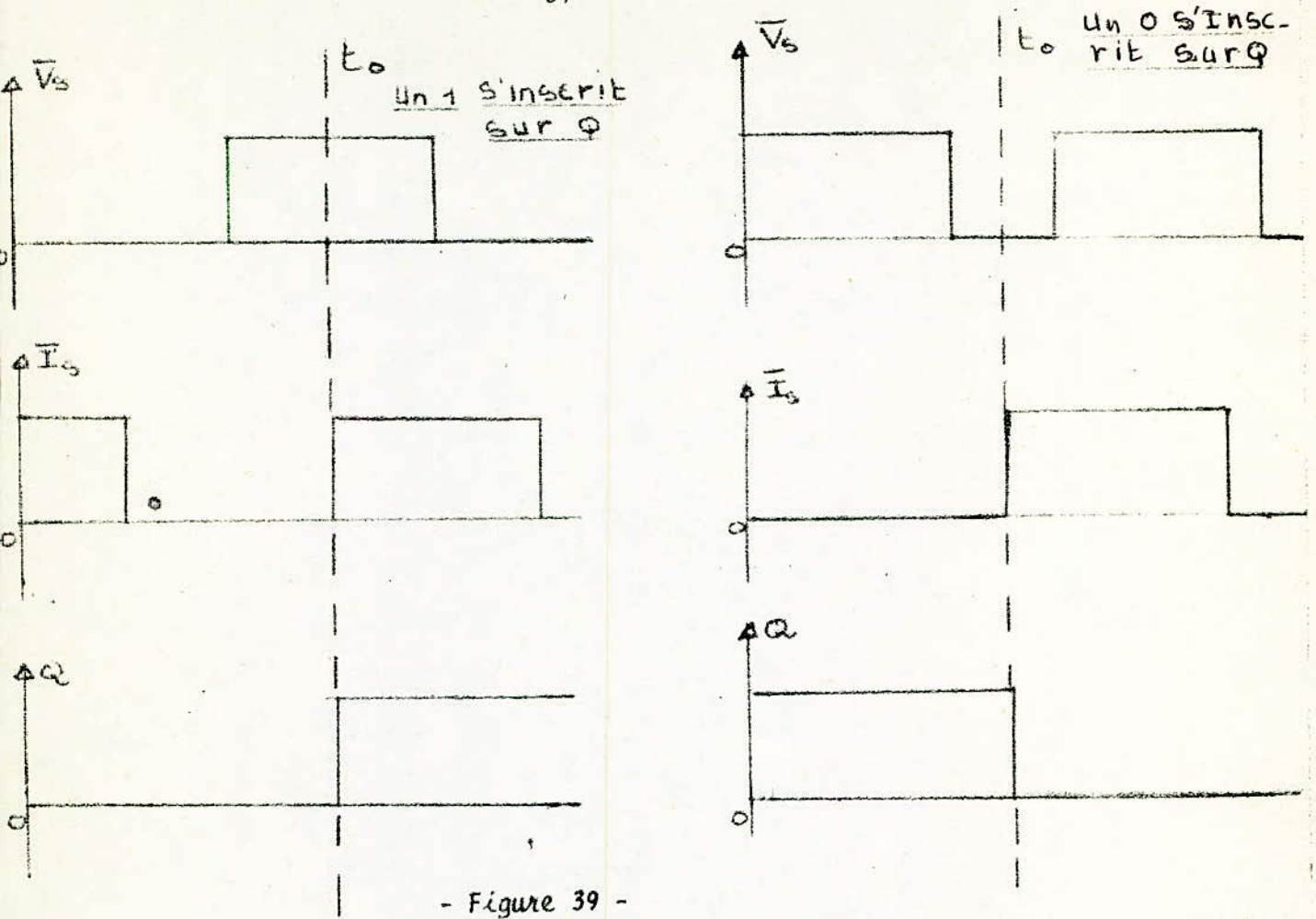
On utilise les signaux $\overline{V_S}$ et T_S écrêtés préalablement pour attaquer respectivement les entrées "D" et "CLOCK" de la bascule D. En se reportant à la figure 38 a- on voit que la sortie Q passe (ou reste) au niveau logique 1 quand $\overline{V_S}$ est en avance sur T_S (déphasage arrière), en effet, $\overline{V_S}$ est à 1 sur D quand T_S passe de 0 à 1 sur l'entrée "CLOCK" (horloge).

Par contre Q passe (ou reste) à 0 si le front de montée de T_S se fait quand $\overline{V_S}$ est à ce moment là au niveau "bas".

Dans le premier cas, Q étant au niveau 1 la "led" rouge s'allume, donc $\overline{V_S}$ est en avance sur T_S . Ceci témoigne du déphasage arrière.

Dans le second cas, Q étant niveau 1, la "led" verte s'allume, donc T_S est en avance sur $\overline{V_S}$. Ceci témoigne du déphasage avant.





- Figure 39 -

soient les tableaux de vérité et le diagramme des temps de fonctionnement de la bascule D.

D	CK	Q	Q+
0	0	0	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	1	0	0
1	1	1	1

- Tableau réduit -

D	CK	Q+	REMARQUES
X	0	Q	Maintenir
D	1	D	Affichage

C O N C L U S I O N

Le phasemètre réalisé est de conception simple et non encombrant.

Son avantage premier est, la mesure du déphasage quelque soit la forme des signaux à savoir : carré, triangulaire, rectangulaire ou en dents de scie; ceci, pour une large gamme de fréquence, (limité seulement par la bande passante des composants électroniques utilisés), pouvant aller de 0,1 Hz jusqu'à 1 MHz.

Son second avantage est, son utilisation dans une boucle de régulation de fréquence ou de phase, car en prévoyant un appareil basé sur ce principe, on peut mesurer une tension proportionnelle au déphasage, d'où : possibilité d'asservir cette phase.

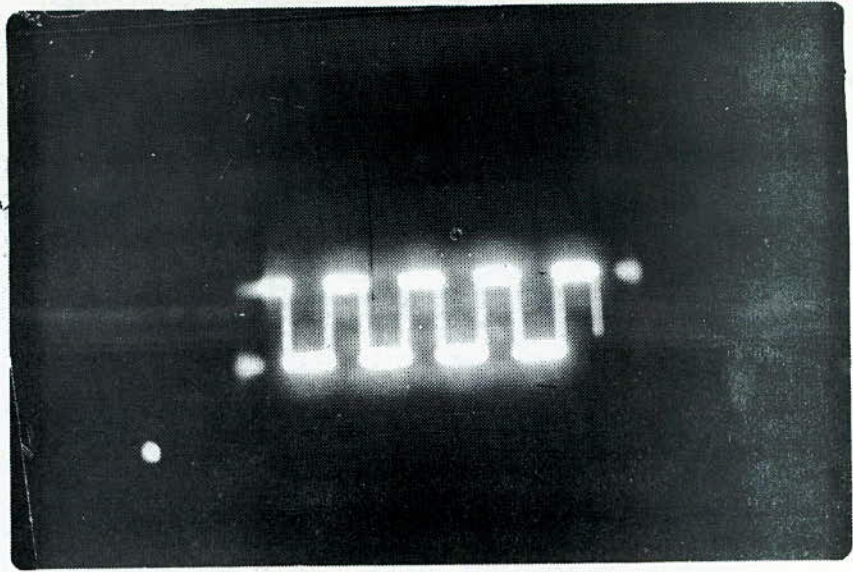
-0- B I B L I O G R A P H I E -0-

- J. BAURAND : - MESURES ELECTRIQUES - (CONTINU ET B.F.)
(MASSON - PARIS 1961)
- J.Mc. BERNARD ET J. HUGON : - PRATIQUE DES CIRCUITS LOGIQUES
(PARIS EYROLLES 1985 - 1986)
- J. THURIN : - MESURES ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUES
(PARIS EYROLLES 1967)
- BREANT : - MESURES ELECTRIQUES
(PARIS - EYROLLES 1957)
- LOUVE LORIFERNE : - CONVERSION ANALOGIQUE NUMERIQUE ET
CONVERSION NUMERIQUE - ANALOGIQUE
(COMPAGNIE FRANCAISE D'EDITION PARIS 1976)
- STEVE LEIBSON : - MANUEL DES INTERFACES
(MC GRAW HILL 1984)
- J.NIARD : ELECTRONIQUE - TERMINALE F -
(FERNAND NATHAN 1983)
- M. AUMIAUX : - LOGIQUE BINAIRE ET ORDINATEURS
(PARIS MASSON 1982)
- J. MORNAND : - SCHEMAS D'ELECTRONIQUE
(DUNOD - PARIS 1979)
- A. DORVAL : - TECHNIQUE DES IMPULSIONS
(MC GRAW HILL 1983)

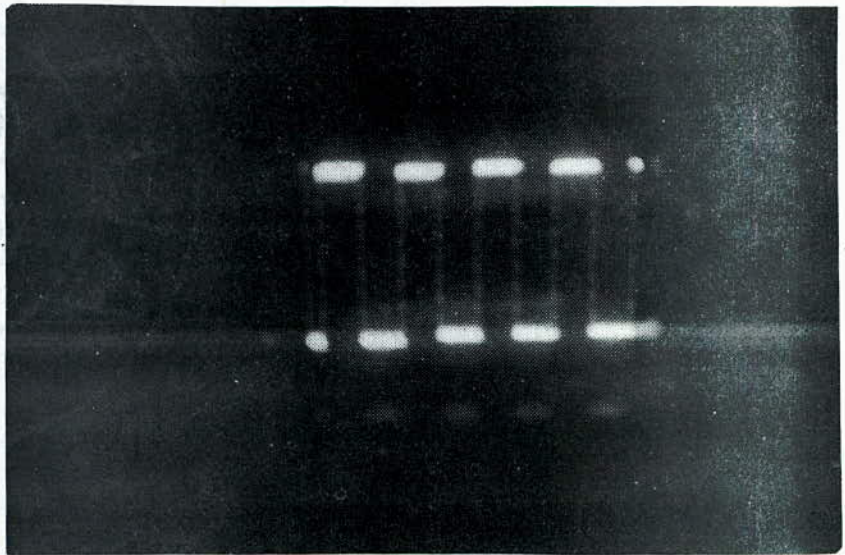
*

A N N E X E

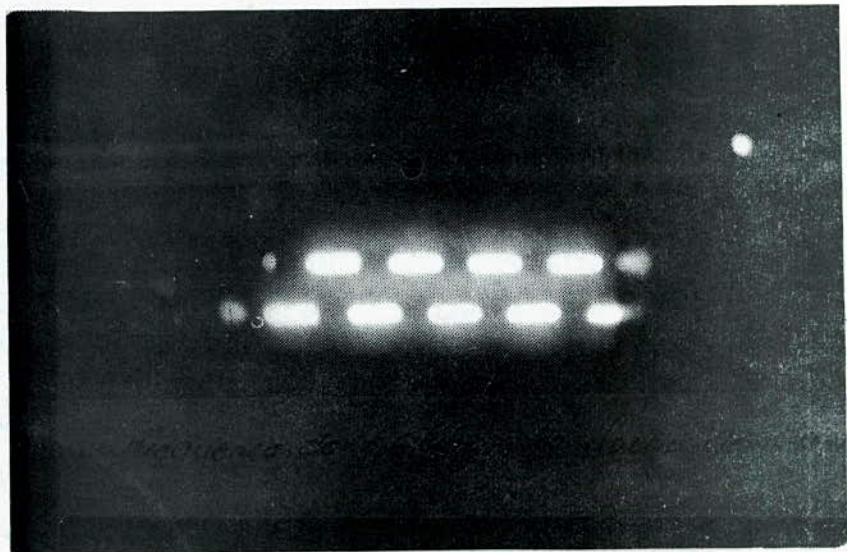
ASTABLE



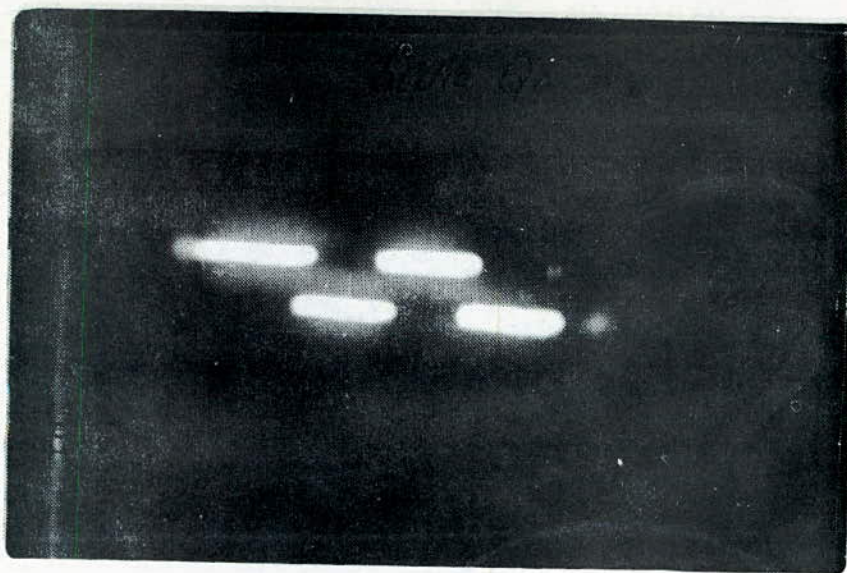
Frequence de 1,6 kHz à la Sortie de l'astable



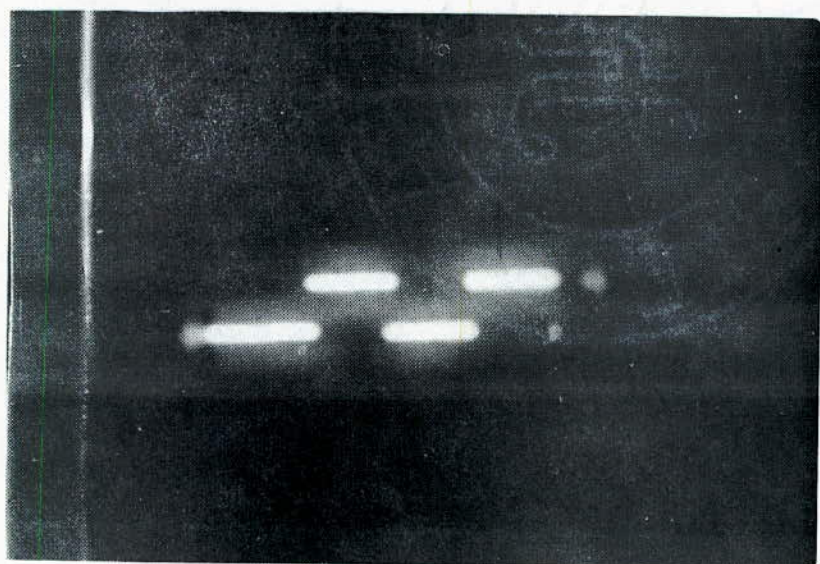
Signal d'horloge du Compteur
Differentes Sorties du Compteur



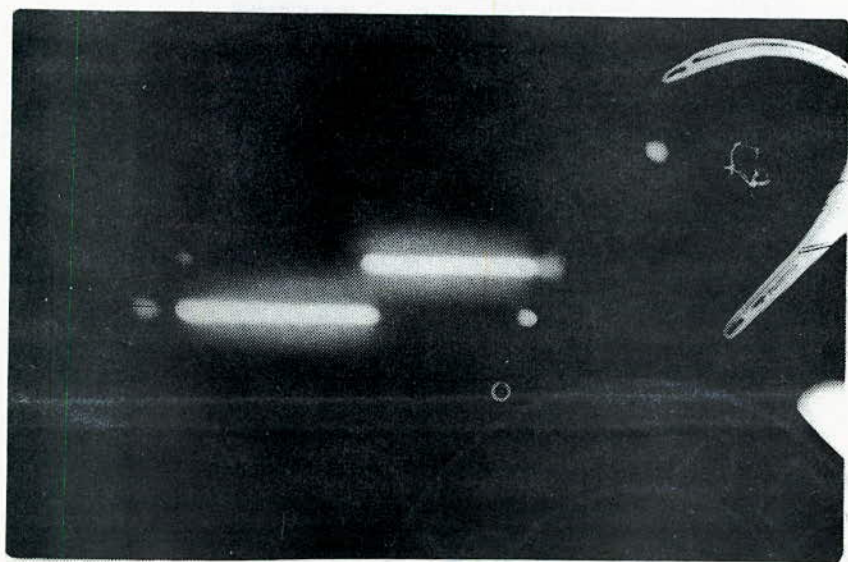
Sortie Q A.



Sortie Q_B

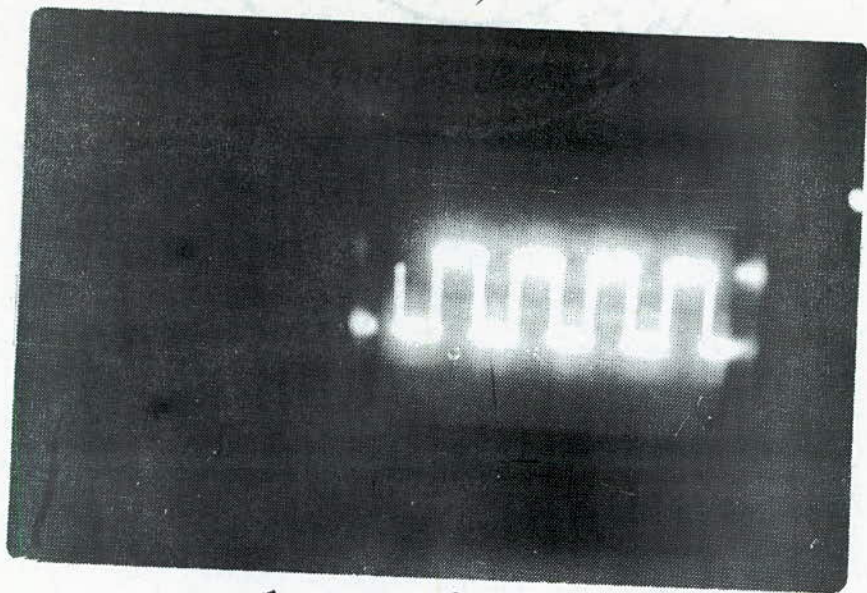


Sortie Q_C

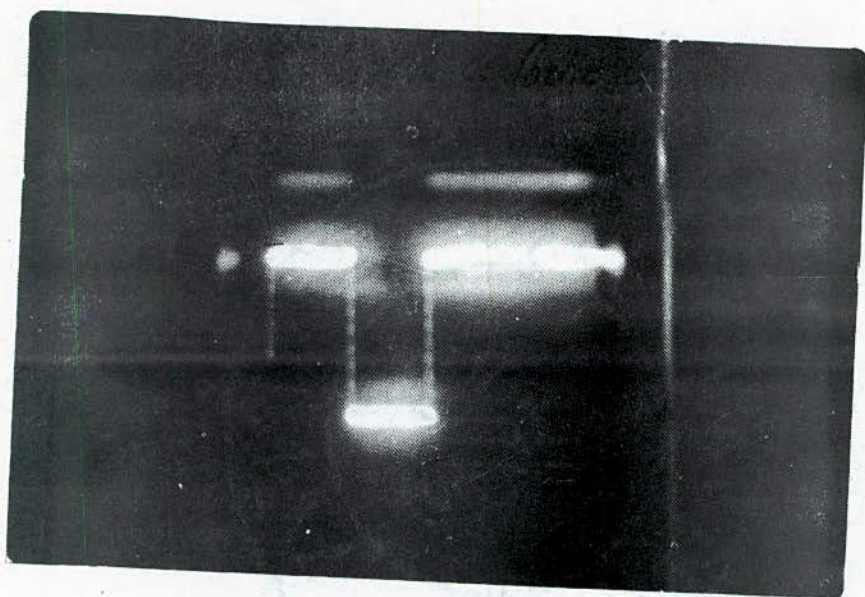


Sortie Q_D

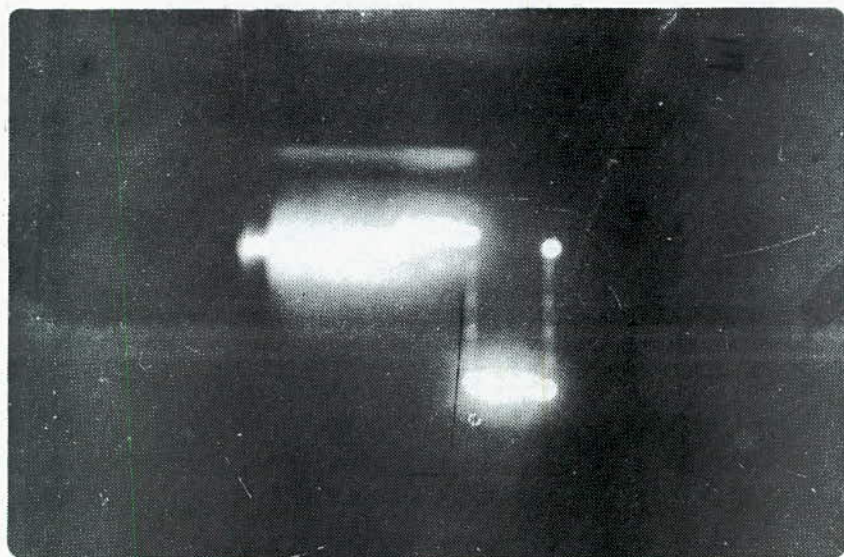
Signaux Obtenus Aux différentes Sorties
L'interface



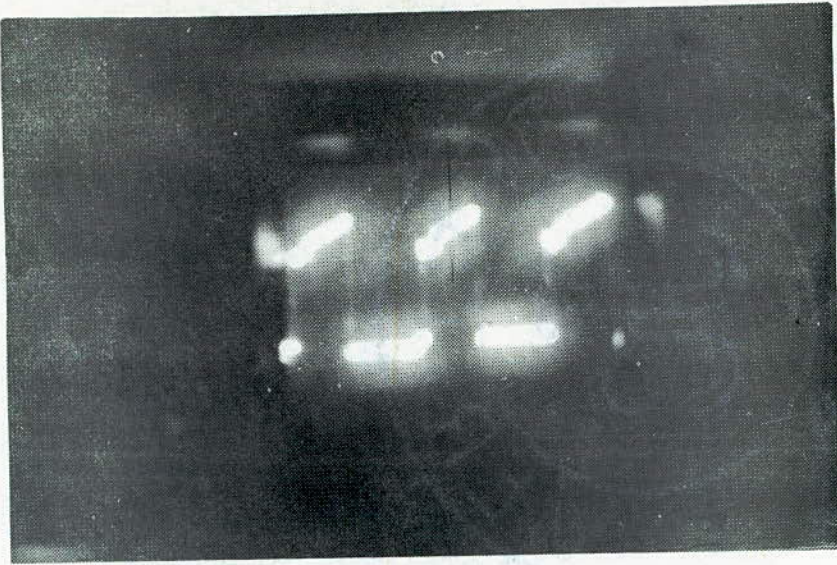
Signal de Sortie QA



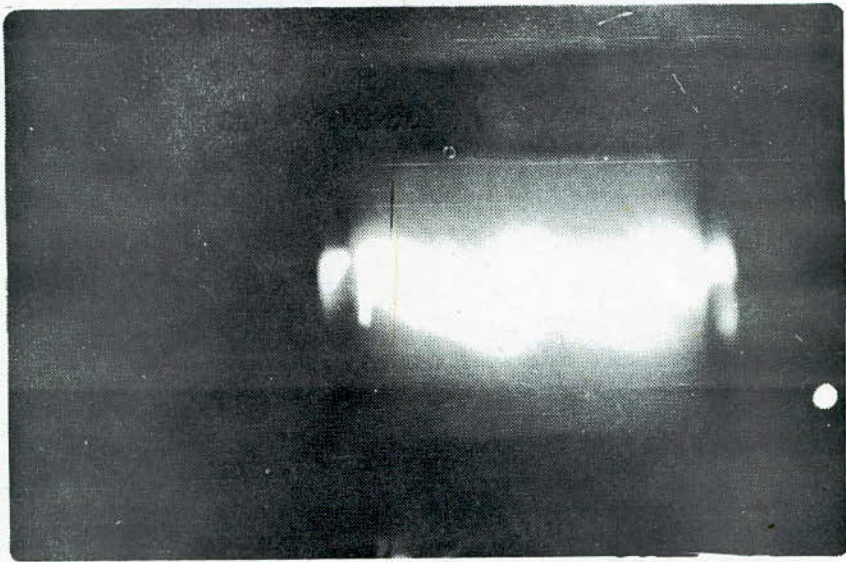
Signal de Sortie QB



Signal de Sortie QC

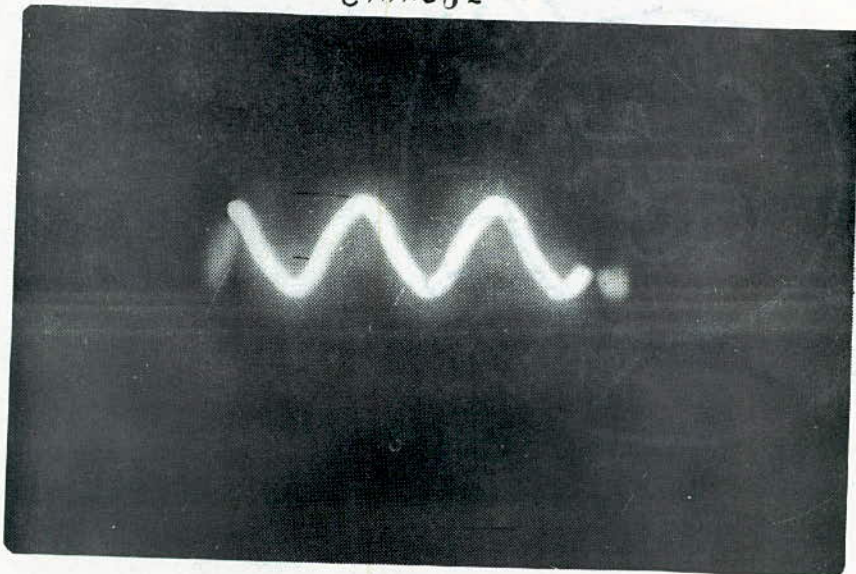


Signal de Sortie D0

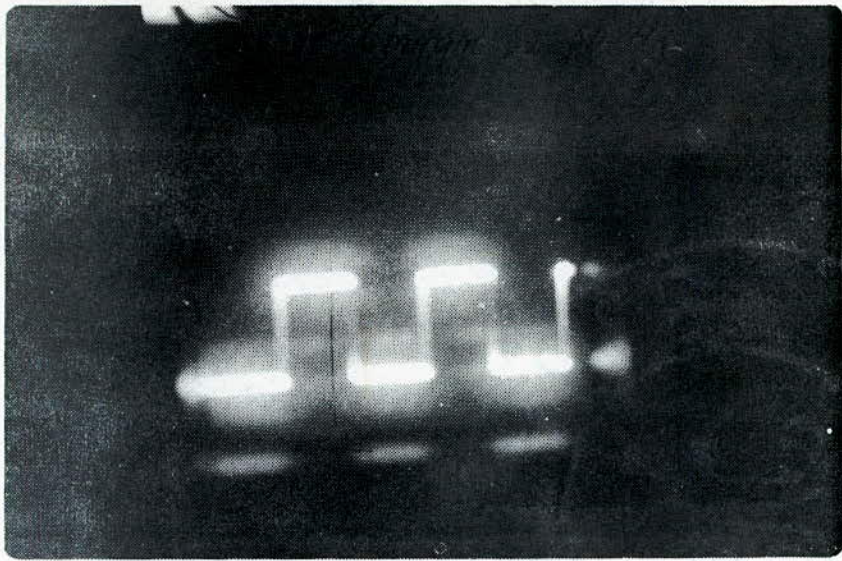


Sortie du Convertisseur numerique - Analogique

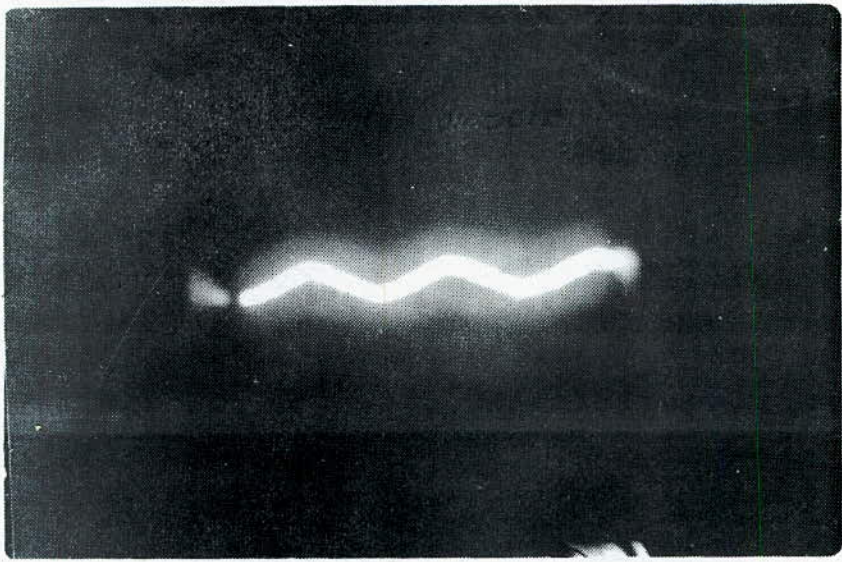
CHARGE



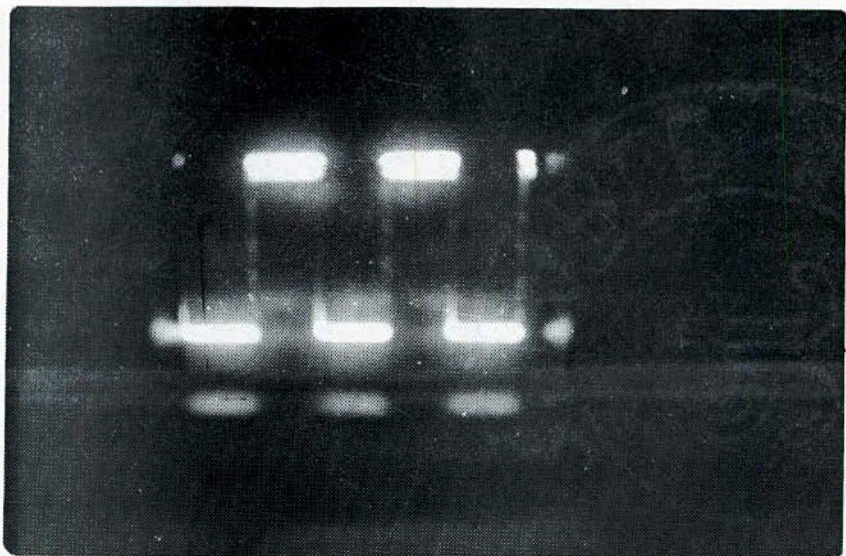
Signal Tension à 50 Hz



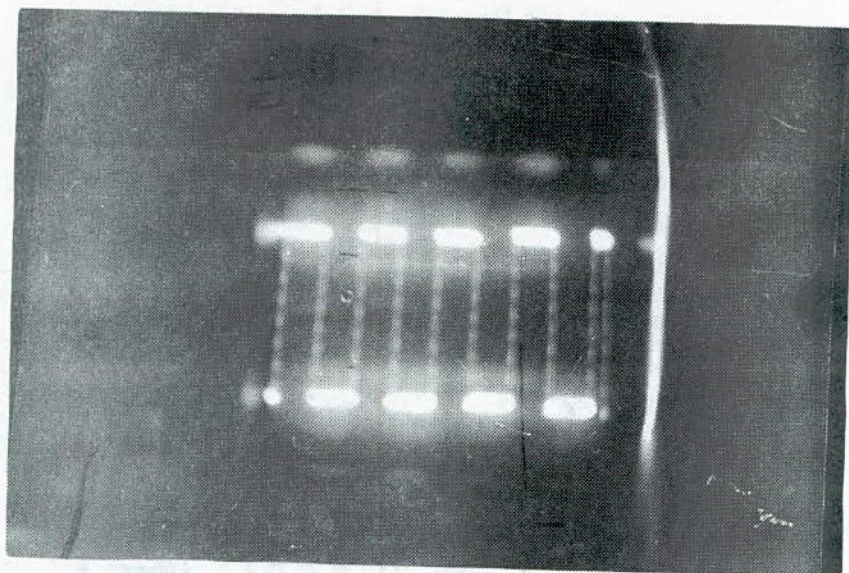
Signal Tension Comparé



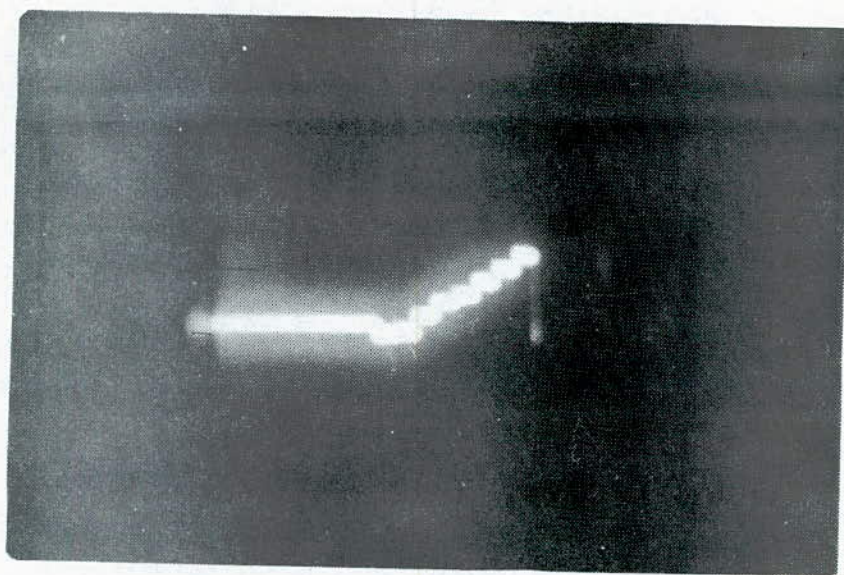
Signal Courant à 50 Hz



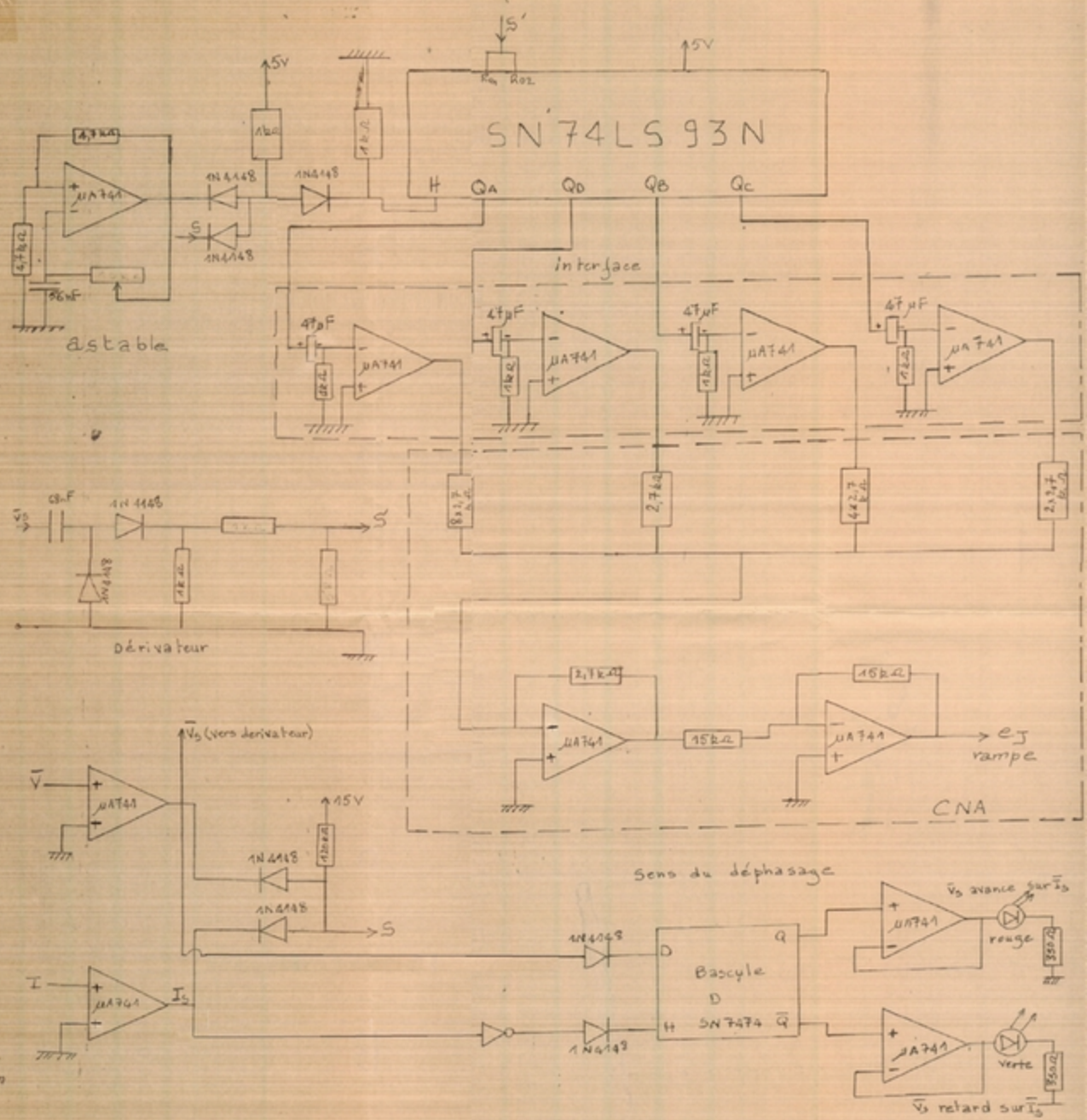
Signal Courant Comparé



Signal produit (Tension - Courant)



Rompe bloquée



MONTAGE DU PHASEMETRE ELECTRONIQUE

