

8/89

وزارة التعليم العالي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

CONCEPTION ET REALISATION
D'UN CAPTEUR DE POSITION
POUR UNE MACHINE
SYNCHRONNE AUTO-PILOTEE

Proposé par :

Mr A. MAZI

Etudié par :

Mr M. SERRADJ

Mr M. AMAR

Dirigé par :

Mr A. MAZI

Mr A. REKAB

PROMOTION : JUIN 1989

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

CONCEPTION ET REALISATION
D'UN CAPTEUR DE POSITION
POUR UNE MACHINE
SYNCHRONE AUTO-PILOTEE

Proposé par :
Mr. A. MAAZI

Etudié par :
Mr. M. SERRADJ
Mr. M. AMAR

Dirigé par :
Mr. A. MAAZI
Mr. A. REKAB

PROMOTION : JUIN 1989

REMERCIEMENTS

Nos plus vifs remerciements à messieurs A.MAAZI, A.REKAB, R.TAHMI pour leurs précieux conseils.

Nous remercions également Monsieur O.MOULOVA pour son aide matérielle.

DEDICACES

A nos parents,
A nos grand-mères,
A nos frères et soeurs,
A tous ceux qui nous sont chers,
Et surtout, à tous les copains

Mourad et Mohamed

Ministère de l'enseignement supérieur

Ecole nationale polytechnique

Département de génie électrique

الموضوع: تصور وإيجاز لاقط الموضع لمحرك متزامن ذو قيادة
ذاتية

ملخص: هدف هذا العمل هو دراسة وإيجاز لاقط الموضع مع دائرة
التحكم لمعاملة الإشارات وذلك لتحقيق قيادة ذاتية لمحرك متزامن

Sujet: Conception et réalisation d'un capteur de position pour une machine synchrone autopilotée.

Résumé: Le but de ce travail est de concevoir et réaliser un capteur de position et son circuit de traitement de l'information afin d'autopiloter un moteur synchrone.

Subject: Conception and realization of a position captor for a self guided synchronous motor.

Summary: The aim of the present work is to conceive and realize a position captor and a circuit for traiting his information. The final purpose is to obtain a self guided synchronous motor.

SOMMAIRE DES MATIERES

INTRODUCTION 10

CHAPITRE I : 11

PRINCIPE DE L'AUTOPILOTAGE

1/Analogies entre la machine synchrone et la machine à courant continu 12

2/Variateurs de vitesse des moteurs synchrones .. 14

 2.1/Convertisseurs directs 15

 2.2/Convertisseurs indirects 15

3/Principe de l'autopilotage 15

 3.1/Association redresseur -onduleur-machine synchrone .. 15

 3.2/Capteur de position 18

4/Etude des modes de commutation 20

 4.1/Commutation naturelle 20

 4.2/Commutation forcée (Fonctionnement au démarrage) 20

5/Reglage de l'angle ψ 23

6/Freinage et réversibilité du moteur synchrone autopiloté 24

CHAPITRE II: 25

ETUDE ,CHOIX ET DESCRIPTION MECANIQUE DES CAPTEURS

1/Conception générale des capteurs 26

 1.1/Partie fixe 26

 1.2/Partie mobile 26

2/Presentation des capteurs 27

 2.1/Présentation du premier capteur 27

 2.2/Présentation du deuxième capteur (capteur à décodage) 28

3/Forme des signaux délivrés par chaque capteur . 29

| | |
|---|----|
| <u>CHAPITRE III</u> : | 31 |
| CIRCUITS DE TRAITEMENT DE L'INFORMATION | |
| 1/Mise en forme des signaux | 32 |
| 2/Selectionneur-1- | 36 |
| 3/Selectionneur-2- | 37 |
| 4/Circuits de la commutation naturelle | 37 |
| 4.1/Cas du premier capteur | 37 |
| 4.2/Cas du deuxième capteur | 39 |
| 4.2.1/Décodage de l'horloge | 39 |
| a/Convertisseurs numériques analogiques (C.N.A) | 39 |
| b/Remise à zéro des compteurs(R.A.Z) .. | 42 |
| 4.2.2/Réglage de l'angle ψ | 45 |
| 4.2.3/Mise en ordre des signaux | 47 |
| 5/Circuits de la commutation forcée(demarrage) .. | 51 |
| 5.1/Circuit d'allumage des thyristors du pont-2- | 51 |
| 5.1.1/Cas du premier capteur | 52 |
| 5.1.2/Cas du deuxième capteur | 52 |
| 5.2/Circuit d'extinction du courant | 52 |
| 5.2.1/Circuit de déclenchement du monostable | 53 |
| 5.2.2/Le monostable | 54 |
| 5.2.3/Le comparateur de vitesse | 56 |
| 5.2.4/Le sommateur | 56 |
| 6/Differentiation et dédoubleage des impulsions .. | 57 |
| 7/Commande du sens de rotation | 61 |
| Conclusion | 63 |
| Annexes | 64 |
| Bibliographie | 73 |

SOMMAIRE DES FIGURES

Chapitre I :

- Figure (1-1): M.c.c à trois lames au collecteur ..13
- Figure (1-2): Equivalence entre le commutateur mécanique et le commutateur statique ..14
- Figure (3-1): Association Red-Ond-Machine synchrone ..16
- Figure (3-2): Forme des courants dans les trois phases ..17
- Figure (3-3): Correspondance entre les paires des thyristors et les positions et déplacements des flux statorique et rotorique19
- Figure (4) : Principe de la commutation forcée ...22
- a/Extinction du courant pour le fonctionnement en onduleur du pont 1 ..22
- b/Extinction du courant à l'aide d'un thyristor de " roue libre "22
- Figure (5) : Déphasage " ψ " en avant du courant sur la f.e.m correspondante23
- Figure (6) : Fonctionnement dans les quatre quadrants de la machine synchrone autopilotée24

Chapitre II:

- Figure (2-1) : Schéma du premier capteur27
- Figure(2-2-1): Positionnement des détecteurs optiques par rapport aux phases statoriques28
- Figure(2-2-2): Schéma du deuxième capteur29

Figure (3) : Visualisation des signaux30
 a/du premier capteur
 b/du deuxième capteur

Chapitre III:

Figure (1-1): Circuit de mise en forme et
 d'amplification33

Figure (1-2): Signaux obtenus après la mise en
 forme34
 a/pour le premier capteur
 b/pour le deuxième capteur

Figure (1.3): Visualisation des signaux après la
 mise en forme35
 a/du premier capteur
 b/du deuxième capteur

Figure (2) : Sélectionneur -1-36

Figure (3) : Sélectionneur -2-38

Figure (4-1): Schéma du C.N.A39

Figure(4-2.a): Les dents de scie correspondantes
 aux trois f.e.m40

Figure(4.2;b): Visualisation des trois signaux en
 dents de scie (déphasés l'un
 de l'autre de 120°)41

Figure(4.3) : Circuit des R.A.Z42

Figure(4.4.a): Signaux des trois R.A.Z43

Figure(4.4.b): Correspondance entre le signal
 en dents de scie et sa R.A.Z44

Figure(4.4.c): Visualisation des trois signaux de
 R.A.Z44

Figure(4.5.a): Circuit de réglage de l'angle ψ 45

Figure(4.5.b): Les trois crénaux obtenus par
 réglage de l'angle ψ 46

Figure(4.6) : Visualisation des parasites47

| | | |
|-----------------|--|----|
| Figure(4.7) | :Circuit de mise en ordre | 48 |
| Figure(4.8.a) | :Les six signaux obtenus après la mise en ordre | 49 |
| Figure(4.8.b) | :Visualisation des signaux après la mise en ordre | 50 |
| Figure(5.1) | :Circuit d'allumage des thyristors du pont -2- au démarrage..... | 52 |
| Figure(5.2.1) | :Circuit de déclenchement du monostable | 53 |
| Figure(5.2.2.a) | :Le monostable | 54 |
| Figure(5.2.2.b) | :Correspondance entre les signaux de déclenchement et les créneaux du monostable | 55 |
| Figure(5.2.3) | :Le comparateur de vitesse et la porte"ET" | 56 |
| Figure(5.2.4) | :Le sommateur | 57 |
| Figure (6-1) | : Circuits de différentiation et de dédoublage des impulsions | 58 |
| Figure(6.2.a) | :Les six signaux de commande du pont-2-..... | 59 |
| Figure(6.2.b) | :Visualisation des impulsions dédoublées pour la commande du pont-2- | 60 |
| Figure (7) | :Circuit de changement du sens de rotation | 61 |
| Figure (8) | :Signaux de sortie des monostables de la commande du pont-2- | 62 |

*****GLOSSAIRE*****

| <u>SYMBOLES</u> | <u>UNITES</u> | <u>SIGNIFICATIONS</u> |
|-----------------|---------------|--|
| f.e.m | V | Force électromotrice |
| T | ms | Periode de la f.e.m |
| Ic | A | Courant continu dans boucle intermédiaire |
| ψ | Degré | Déphasage entre la f.e.m et le courant statorique |
| ϕ_r | Wb | Flux rotorique |
| ϕ_s | Wb | Flux statorique |
| Vsat | V | Tension de saturation du comparateur de vitesse |
| Um | V | Tension de commande (en arccos) du pont-1- |
| U | V | Tension de commande de l'angle |
| Nn | trs/min | Vitesse nominale |
| Cm | N.m | Couple électromagnétique |
| α | Degré | Décalage des balais |
| θ_{mec} | Degré | Décalage géométrique lié à la construction |
| θ_{elec} | Degré | Décalage électrique |
| Ld | H | Self de lissage |

INTRODUCTION

Le moteur à courant continu utilisé le plus souvent pour les entraînements à vitesse variable ne peut satisfaire les besoins de tous les secteurs de l'industrie (traction électrique, robotique, machines outils...etc).

En effet le collecteur mécanique ne permet pas le fonctionnement à vitesse ou tension très élevées et limite même la gamme de puissances que peut supporter la machine.

Ces limites d'application ont motivé l'utilisation des machines à courant alternatif pour les entraînements à vitesse variable.

Le **moteur synchrone autopiloté** est tout indiqué pour une telle utilisation. Il offre des possibilités particulièrement intéressantes dans ce domaine d'application car il englobe la robustesse des machines à courant alternatif et la souplesse de commande des machines à courant continu.

Le but de ce travail est de concevoir une partie spécifique et déterminante dans la commande de la machine synchrone qui n'est autre que le capteur de position.

La présente étude est divisée en trois chapitres essentiels, couronnés à la fin par une conclusion.

Le premier chapitre porte sur l'analogie entre la machine synchrone et la machine à courant continu et définit les principes et les grandes lignes de l'autopilotage.

Le second chapitre présente la conception mécanique des capteurs ainsi que les fondements qui ont contribué à cette conception.

Le troisième chapitre expose les aspects de la commande et l'élaboration des signaux nécessaires à cette commande.

CHAPITRE I :

PRINCIPE DE L'AUTOPILOTAGE

Parmi les procédés permettant de faire varier la vitesse des moteurs à courant alternatif sans collecteur, l'un des plus séduisants est celui utilisant le moteur synchrone.

1./ ANALOGIES ENTRE LA MACHINE SYNCHRONE ET LA MACHINE à COURANT CONTINU

La machine synchrone est destinée à fournir, à recevoir des courants alternatifs. Dans la majorité des cas;

- l'induit est fixe (stator), l'inducteur tournant (roue polaire)
- l'induit est porteur d'un bobinage triphasé, parcouru par un système de courants alternatifs, ce qui engendre dans l'entrefer un champ tournant.
- l'inducteur, hétéropolaire, alimenté en courant continu, tourne à la vitesse de synchronisation qui est celle du champ tournant.

L'excitation de l'inducteur induit des f.e.m alternatives dans le bobinage statorique.

La machine à courant continu (à excitation séparée) est adaptée pour les entraînements à vitesse variable; elle est de structure inverse de celle de la machine synchrone.

Le bobinage de l'induit tournant dans le flux produit par l'inducteur est le siège de f.e.m alternatives.

L'artifice balais-collecteur assure à chaque instant :

- l'addition de toutes les f.e.m de même signe pour obtenir une f.e.m constante.
- la conversion de la fréquence du courant de la source en fréquences des courants d'induit.
- le changement de fréquence de manière à maintenir l'égalité des fréquences de rotation mécanique et des courants dans l'induit.

L'idée de la machine synchrone autopilotée vient de l'étude des propriétés du collecteur.

Considérons une machine à courant continu à deux pôles, qui ne comporterait que trois lames au collecteur. Voir figure (1.1).

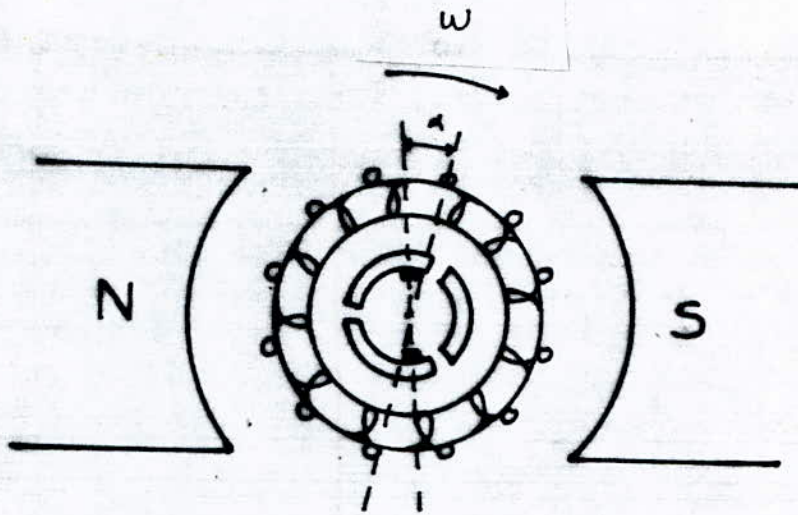


figure (1.1): Machine à courant continu
à trois lames au collecteur

Quand on entraîne cette machine à une vitesse $w=2 \pi N$, on constate que:

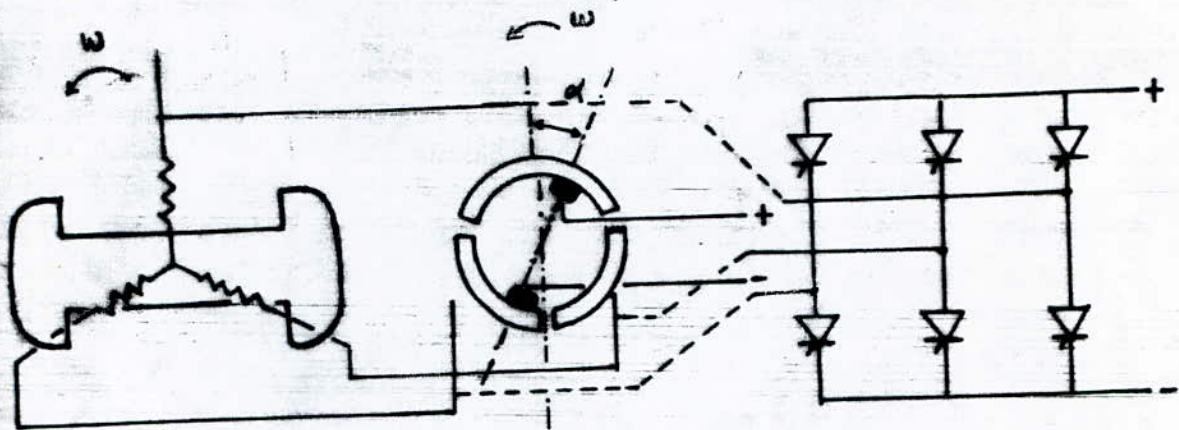
- la f.e.m induite est maximale quand les balais sont calés sur la ligne neutre.
- cette f.e.m diminue si on décale les balais d'un angle α par rapport à la ligne neutre .
- la tension recueillie entre les balais diminue pour un retard à la commutation α (décalage des balais).

La machine synchrone autopilotée fonctionne selon un principe similaire à celui de la machine à courant continu à excitation séparée.

Le système balais-collecteur est remplacé par un convertisseur statique de fréquence, voir figure (1.2).

La commutation n'est plus effectuée par le passage de lames de cuivre devant les balais, mais par des semi-conducteurs.

L'asservissement en fréquence est assuré à partir d'un signal de position du rotor ou de la phase de la tension de la machine.



figure(1.2): Equivalence entre le commutateur mécanique et le commutateur statique

L'utilisation des variateurs de vitesse permet de profiter des caractéristiques de la machine à courant continu pour l'entraînement à vitesse variable de la machine synchrone.

2./VARIATEURS DE VITESSE DU MOTEUR SYNCHRONE

La commande électronique des moteurs alternatifs à fréquence variable fait appel à de nombreux types de convertisseurs. On distinguera deux grandes familles :

- les convertisseurs directs
- les convertisseurs indirects

L'utilisation de ces convertisseurs dépend de plusieurs facteurs: le type du moteur, la nature de la source d'alimentation, le mode de réglage recherché.

Pour la commande à fréquence variable du moteur synchrone, on utilise des convertisseurs indirects, ceci peut être justifié par l'étude des propriétés de chaque type de convertisseur.

2.1/Convertisseurs directs:

Ce sont principalement des cycloconvertisseurs.

Le cycloconvertisseur a un meilleur rendement (conversion directe de la tension et la fréquence de la source), sa commutation est naturelle, il est réversible, de plus le cycloconvertisseur délivre une tension sinusoidale de bonne qualité.

Le principal inconvénient provient du fait que la fréquence de sortie est inférieure au tiers de celle du réseau ($f/3$), ceci limite la gamme de fréquences du moteur alimenté; ce qui se répercute sur la vitesse.

Les autres inconvénients de ces convertisseurs résident dans leur sensibilité aux perturbations du réseau et le nombre de thyristors utilisés est élevé (18 en triphasé), ce qui rend coûteuse leur réalisation.

De par ces inconvénients, on évite l'utilisation des cycloconvertisseurs pour la variation de la vitesse du moteur synchrone.

2.2/Convertisseurs indirects:

Ces convertisseurs comprennent essentiellement un redresseur en pont de GRAETZ triphasé tout thyristor, (à commutation par le réseau), un circuit intermédiaire à courant (ou tension) continu et un pont onduleur non autonome (ou autonome) qui assure le rôle de commutateur de courant (ou de tension) dans les phases de la machine.

Pour la commande du moteur synchrone, le pont côté machine doit opérer en onduleur non autonome.

Les commutations sont assurées par les f.e.m de la machine. Ce procédé simplifie les circuits de commandes auxiliaires de désamorçage des thyristors en cas d'un onduleur autonome (commutateur de tension).

3./PRINCIPE DE L'AUTOPILOTAGE

3.1/Association redresseur-onduleur-machine synchrone:

Le montage est constitué de deux ponts de GRAETZ triphasés tous thyristors (1) et (2) reliés par un étage intermédiaire à courant continu. Voir figure(3.1)

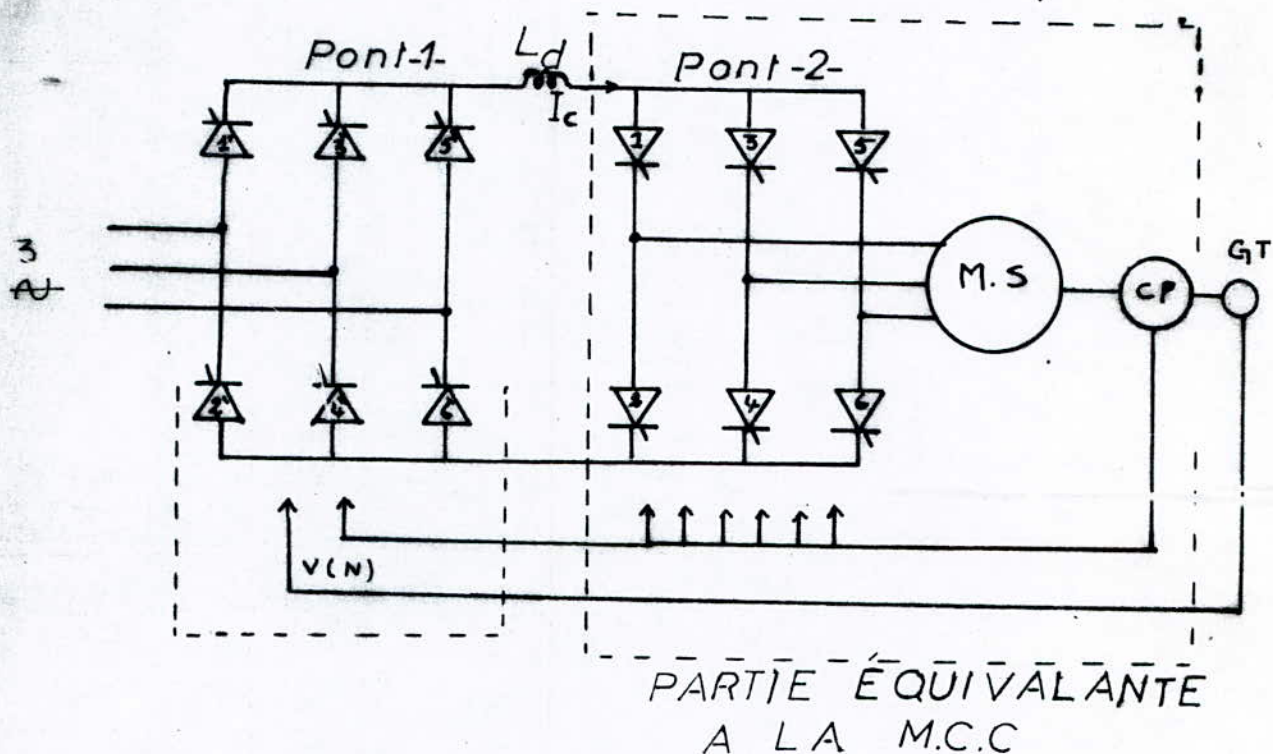
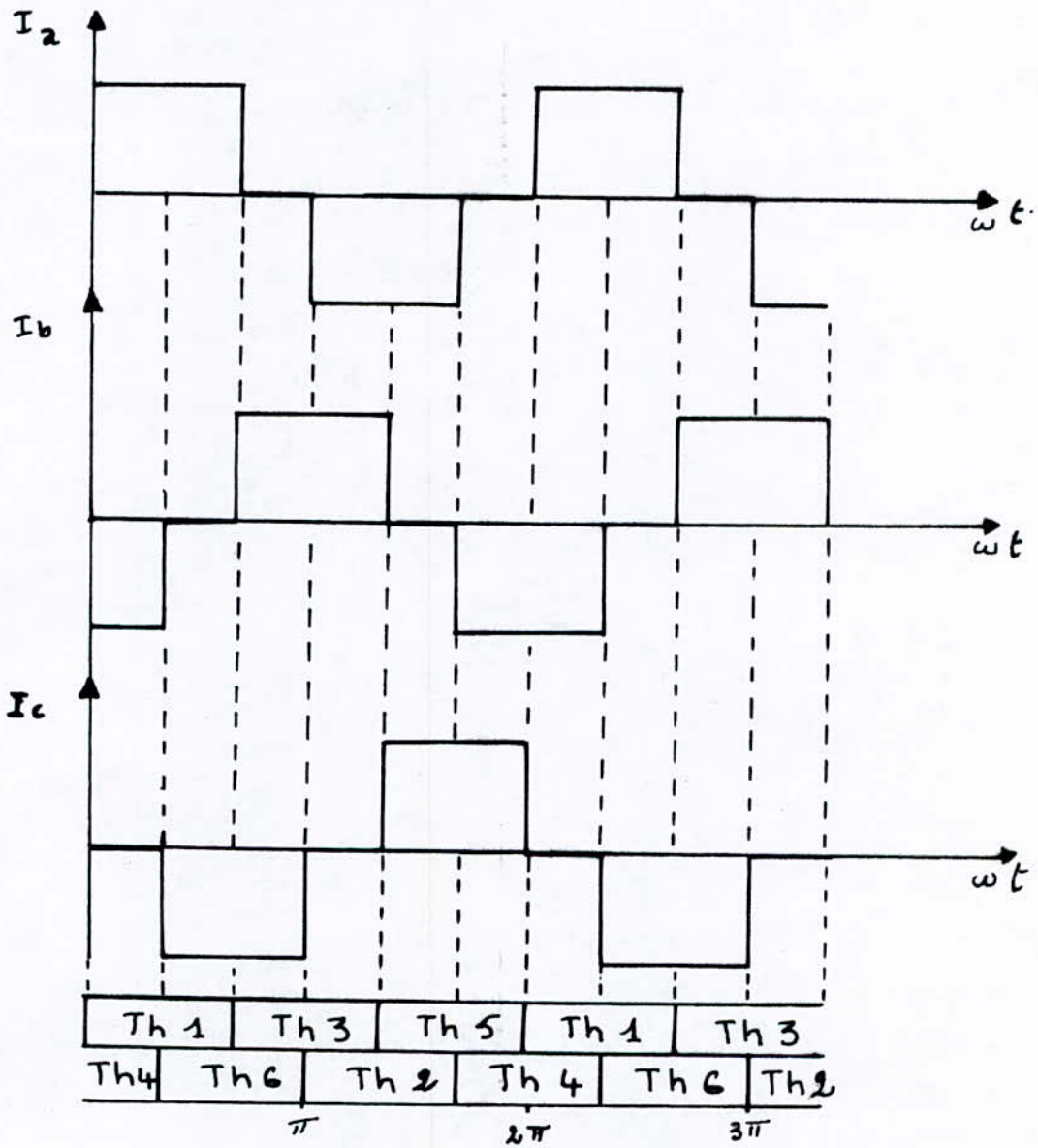


Figure (3.1): Association redresseur-onduleur-machine synchrone.

La machine synchrone autopilotée fonctionne principalement en moteur, dans ce cas le premier convertisseur opère en redresseur et le second en onduleur assisté par la machine.

Le courant continu est alors appliqué périodiquement d'une phase à une autre .

C'est un commutateur de courant (pont -2-) qui engendre des courants triphasés à fréquence "f" variable dont le fondamental est de forme rectangulaire de durée égale à 120° . Voir figure (3.2).



Figure(3.2): Forme des courants dans les trois phases

Les ordres de commutation du courant sont transmis par la machine aux thyristors du pont-2- dont le déclenchement successif est:

1-6 , 6-3 , 3-2 , 2-5 , 5-4 , 4-1 , 1-1

L'élaboration de cet ordre est obtenue à partir d'un capteur de position du rotor.

3.2/Capteur de position:

Il indique la position des pôles inducteurs par rapport aux phases statoriques.

Le traitement de l'information émise de ce capteur permet d'avoir les impulsions d'amorçage de chaque thyristor du pont-2-, assurant ainsi l'asservissement de la vitesse à la fréquence des courants d'alimentation.

Pour une machine bipolaire, un tour de l'arbre , donc du flux tournant, nécessite 6 étapes (6p étapes dans le cas de p paires de pôles).

La figure(3.3) donne une représentation de chacune de ces six étapes en indiquant , à la fois, les phases alimentées , la position du vecteur flux statorique et le déplacement du vecteur flux rotorique.

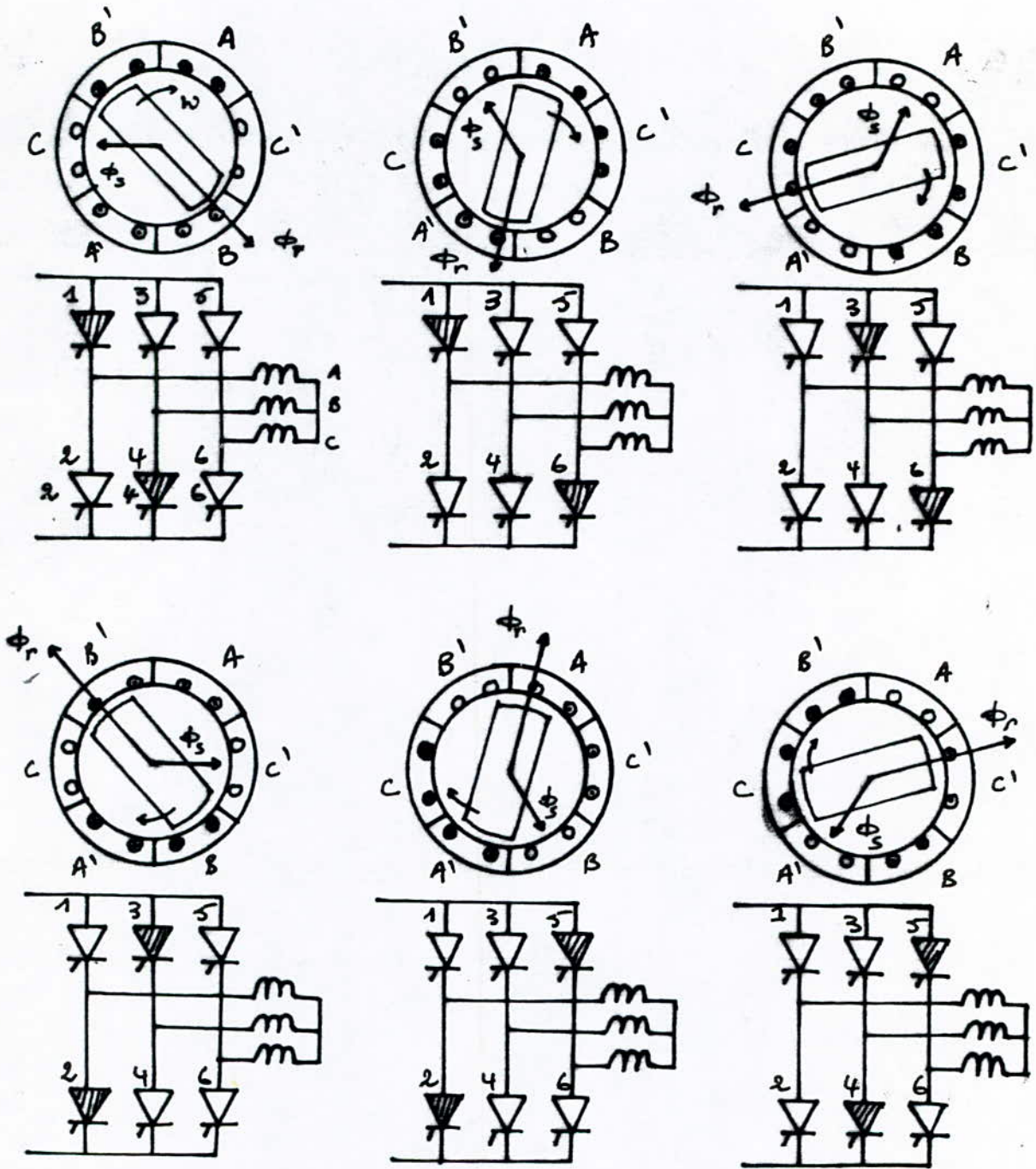


Figure (3.3):Correspondance entre les paires des thyristors en conduction et les positions et déplacements des flux statorique et rotorique.

4./ETUDE DES MODES DE COMMUTATION

Du démarrage jusqu'au fonctionnement à pleine charge , les thyristors du pont -2- ne subissent pas le même mode de commutation.

Suivant la valeur des f.e.m de la machine , donc suivant la valeur de la vitesse, on peut définir deux modes de commutation.

4.1/Commutation naturelle:

Dans ce régime de fonctionnement, le convertisseur-1- opère en redresseur.

Le convertisseur-2- est piloté par la machine et opère en onduleur non autonome.

Le fonctionnement en commutation naturelle de ce dernier n'est possible que si la machine possède des f.e.m suffisantes, quand sa vitesse de rotation est au dessus d'une certaine valeur (10% de la vitesse nominale "Nn").

4.2/Commutation forcée: (fonctionnement au démarrage)

A l'arrêt et à faibles vitesses, les f.e.m de la machine sont insuffisantes pour assurer les commutations. En général, pour des vitesses inférieures à 10% de la vitesse nominale "Nn", on procède à la commutation forcée, différentes solutions sont possibles

- soit en utilisant des circuits auxilliaires (condensateurs et thyristors secondaires) dimensionnés uniquement pour le démarrage.

Cette solution n'est pas intéressante , dans le sens où elle encombre le circuit de puissance et les circuits de commande.

- Soit par l'annulation du courant continu (dans la boucle intermédiaire), ce qui permet d'éteindre la paire de thyristors en conduction.

Par l'amorçage d'une nouvelle paire , on aiguille le courant rétabli vers une autre phase dans la machine.

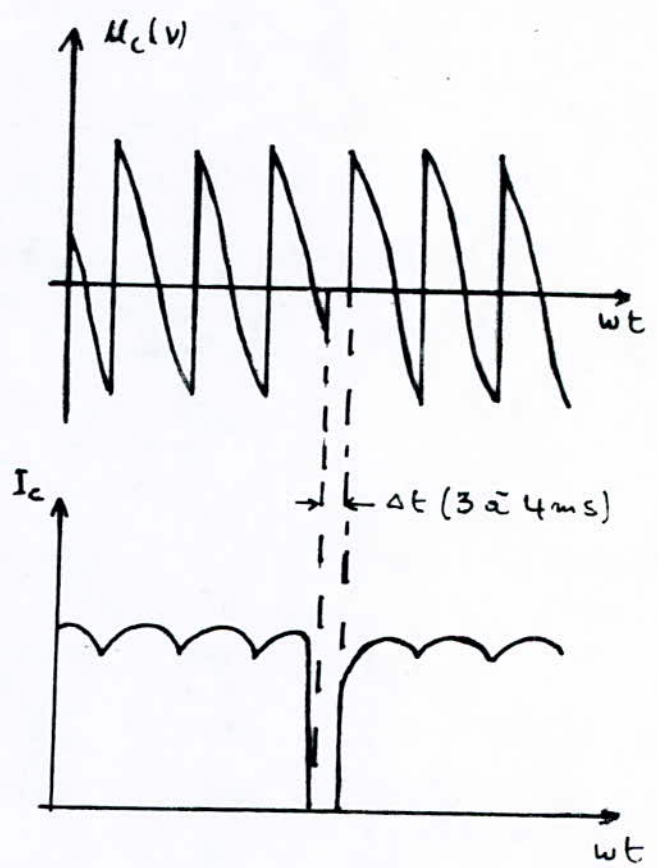
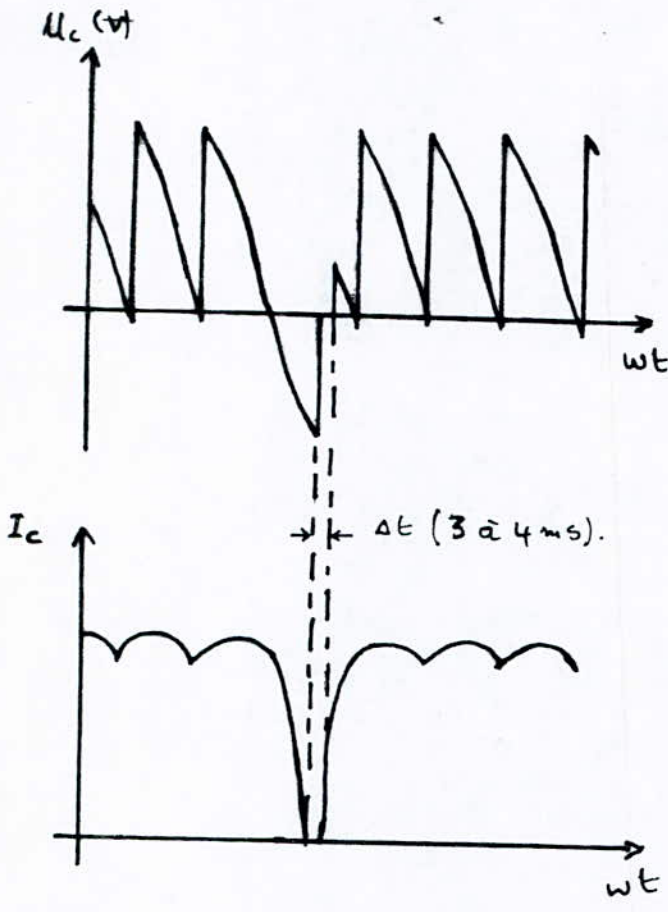
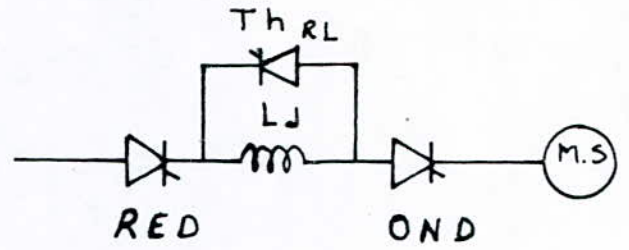
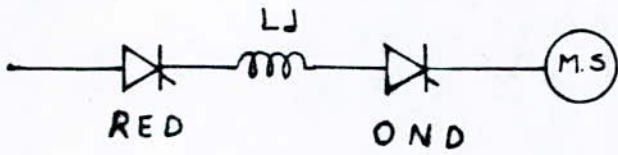
Cette dernière solution a l'avantage d'être plus économique et son fonctionnement s'obtient de plusieurs manières; nous en citerons deux:

La première méthode consiste en l'utilisation d'un thyristor de "roue libre" court-circuitant la self de lissage. Voir figure (4.a).

La deuxième méthode a pour principe, d'agir sur la commande du pont redresseur-1- à chaque commutation du courant dans les phases du stator.

Le pont-1- opère un court instant (3 à 4 ms) en onduleur, lorsque le courant continu s'annule, les thyristors du pont-2- se désamorcent. Voir figure (4.b).

L'amorçage d'une nouvelle paire de thyristors permet d'aiguiller le courant rétabli par le fonctionnement en redresseur du pont-1- vers la phase suivante de la machine.



(b): Extinction du courant par le fonctionnement en onduleur du pont-1-.

(a): Extinction du courant à l'aide d'un thyristor de "roue libre".

Figure(4): Principe de la commutation forcée.

5./REGLAGE DE L'ANGLE ψ :

L'angle ψ , est le déphasage entre la f.e.m et le courant dans la phase correspondante. Voir figure(5).

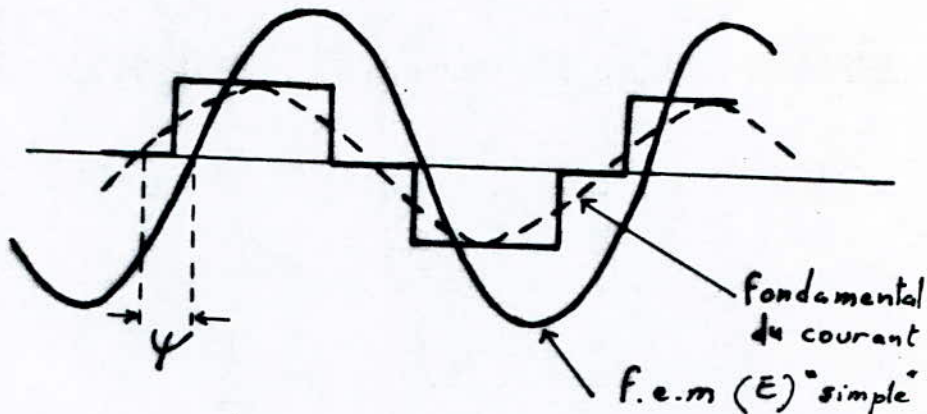


Figure (5) : Déphasage " ψ " en avant du courant sur la f.e.m correspondante

Le déphasage en avant du courant sur la f.e.m (fonctionnement en moteur) est fixé pour le choix de l'angle d'amorçage des thyristors du pont-2-(commutation de courant).

L'expression du couple moteur moyen en fonction de l'angle est donnée par :

$$C = K \cdot \phi_r \cdot \phi_s \cdot \cos \psi$$

avec K : constante de proportionnalité.

ϕ_r, ϕ_s : respectivement les flux rotorique et statorique.

Une fois, fixés le courant d'excitation et le courant statorique, le couple moteur moyen est maximal pour $\psi = 0$ (cas du démarrage) et diminue à mesure que l'angle ψ augmente.

Le fonctionnement normal (commutation naturelle) ne peut se faire que pour un angle ψ différent de zéro. Ceci est dû principalement à l'empiètement rencontré lors des commutations des thyristors d'où la nécessité de prévoir un angle de garde.

La valeur de l'angle ψ donc du couple moteur est obtenue par une comparaison des images des f.e.m des trois phases statoriques avec une tension de commande qui définit les instants où il faut commuter le courant dans deux phases du stator.

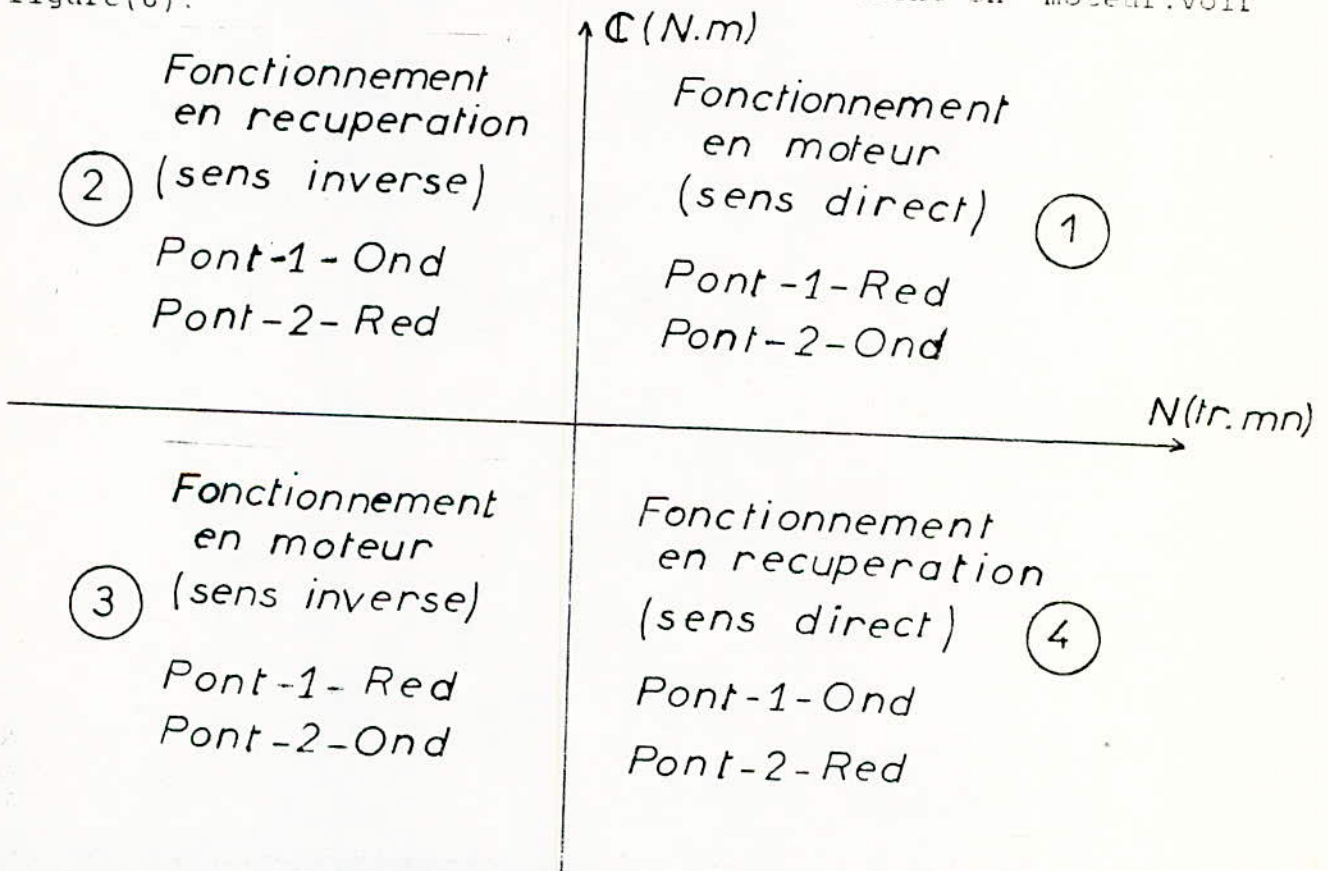
Les images des trois f.e.m sont obtenues par trois convertisseurs numériques analogiques à partir de la lecture d'une horloge.

6./FREINAGE ET REVERSIBILITE DU MOTEUR SYNCHROME AUTOPILOTE

- Le freinage s'effectue en renvoyant l'énergie provenant de la machine sur le réseau. Le convertisseur -2- fonctionne en redresseur et le convertisseur -1- fonctionne en onduleur non autonome assisté par les tensions du réseau.

- L'inversion du sens de rotation est effectuée en changeant le sens de distribution des ordres de commande des thyristors du convertisseur -2- ; ce qui inverse le champ tournant de la machine.

La machine synchrone autopilotée est donc capable de fonctionner dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse, ce qui permet le freinage par récupération lors du fonctionnement en moteur. Voir figure(6).



Figure(6): Fonctionnement dans les quatre quadrants de la machine synchrone autopilotée.

CHAPITRE II

ETUDE, CHOIX ET DESCRIPTION MECANIQUE DES CAPTEURS

L'élément de base pour l'autopilotage de la machine synchrone est le capteur de position.

Ce capteur permet d'indiquer instantanément la position des pôles rotoriques par rapport aux phases statoriques. Ce qui asservit la fréquence des courants d'alimentation à la vitesse de rotation de la machine et définit l'instant d'amorçage de chaque thyristor du pont -2-.

1./ CONCEPTION GENERALE DES CAPTEURS:

Pour des raisons de disponibilité et de simplicité, nous allons opter pour un détecteur (capteur) optique, bien qu'il en existe d'autres, du type magnétique.

Le capteur de position est calé sur l'arbre de la machine. Il est constitué de deux parties, l'une fixe et l'autre mobile.

1.1/Partie fixe:

Cette partie comprend deux disques disposés l'un en face de l'autre. Le premier disque est utilisé comme support des sources lumineuses (lampes), le deuxième est utilisé comme support des éléments optiques sensibles (photodiodes).

1.2/Partie mobile:

Elle comprend un seul disque, tournant entre les deux disques précédemment décrits.

Ce disque contient des fentes qui dépendent, en nombre et en position, du nombre de paires de pôles de la machine.

Pour pouvoir commander l'angle ψ , il faut équiper la partie mobile du capteur d'une horloge.

L'horloge est constituée d'un ensemble de trous répartis uniformément sur la périphérie du disque mobile.

Ces trous doivent correspondre, bien sûr, à une lampe et à une photodiode placées sur la partie fixe du capteur.

2./ PRESENTATION DES CAPTEURS

La machine utilisée est tétrapolaire ($p=2$). Un tour de l'arbre, correspond à deux périodes de la f.e.m statorique, par phase.

L'angle électrique (θ .élect.) vaut deux fois l'angle mécanique (θ .méc.) :

$$\theta.\text{élect.} = 2 \times \theta.\text{méc.}$$

On présente dans ce paragraphe la conception des deux capteurs réalisés et les fondements qui ont permis leurs conceptions.

2.1/Présentation du premier capteur:

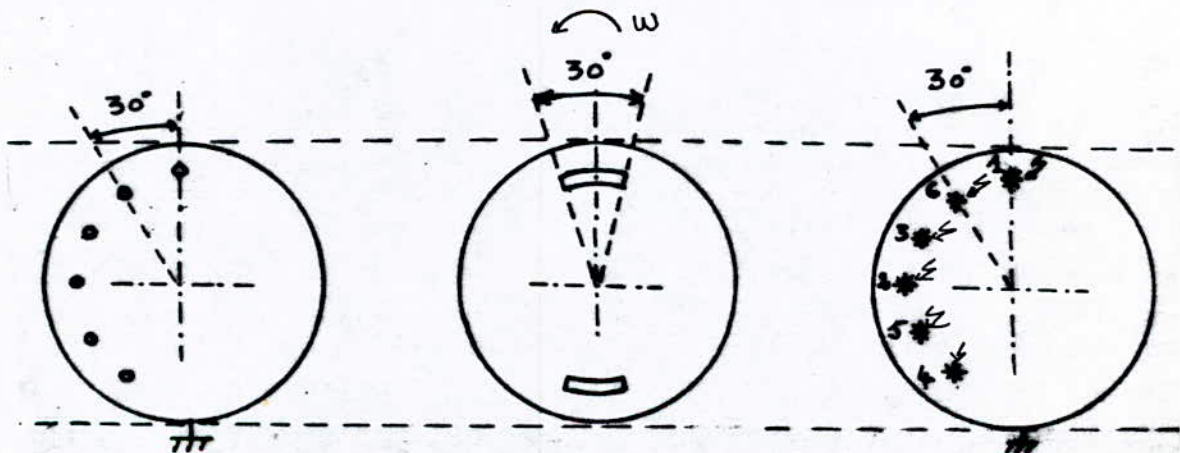
Le commutateur de courant est un pont de Graëtz triphasé.

En faisant correspondre un détecteur pour chaque thyristor, on aura six émetteurs (resp. récepteurs) optiques sur la partie fixe du capteur. Ils sont disposés sur un arc de 180° , décalés entre eux de 30° mécaniques.

Pour obtenir un tour complet de l'arbre de la machine, il faut pratiquer deux fentes de 30° chacune, diamétralement opposés sur le disque mobile du capteur.

Cette technique permet d'avoir les douze commutations des thyristors du pont-2-, nécessaires pour un tour de l'arbre (six commutations par période de f.e.m).

La figure(2.1) illustre le schéma du premier capteur.

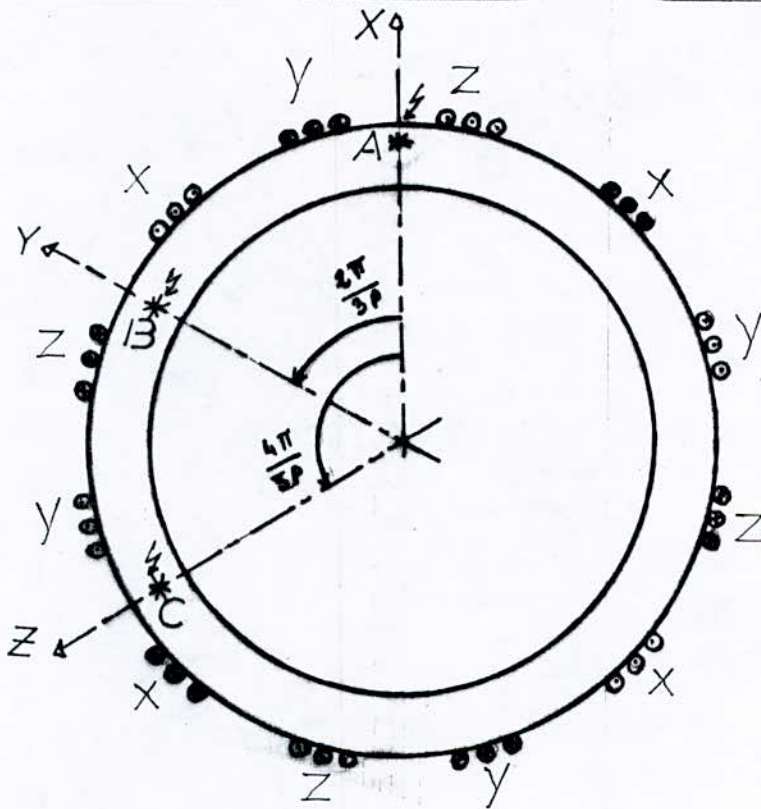


Figure(2.1): Schéma du premier capteur

2.2/Presentation du deuxième capteur:(capteur à décodage)

La machine étant triphasée, on fait correspondre à chacune des phases un détecteur. On aura ainsi trois émetteurs (resp. récepteurs) optiques disposés sur la partie fixe du capteur, décalés entre eux de 60° mécaniques.

La première lampe (resp. photodiode), notée A est placée suivant l'axe de la première phase. A 60° et à 120° de celle-ci on place les deux suivantes, notées respectivement B et C. Voir fig(2.2.1).



Figure(2.2.1):Positionnement des détecteurs optiques (par rapport aux phases statoriques)

Remarque: Si la machine est inversée, le premier détecteur (A) est placée suivant l'axe direct de la machine; les deux autres détecteurs(B et C) gardent le même déphasage mécanique par rapport au premier.

Pour un tour complet de l'arbre de la machine, il faut pratiquer deux fentes de 90° d'arc chacune, diamétralement opposés sur le disque mobile. Cette technique permet d'obtenir de chaque photodiode des creneaux de largeur égale à une demi-période des f.e.m statoriques.

Pour un auto-pilotage avec différentes valeurs de l'angle ψ , on équipe le disque mobile de ce capteur d'une horloge.

Celle-ci est obtenue en disposant sur la périphérie du disque 60 trous régulièrement réparties.

Cette horloge doit correspondre à une lampe et à une photodiode placées suivant le même rayon où se trouvent la lampe et la photodiode de la phase A (suivant l'axe de la première phase).

La figure(2.2.2) illustre le schéma du capteur à décodage.

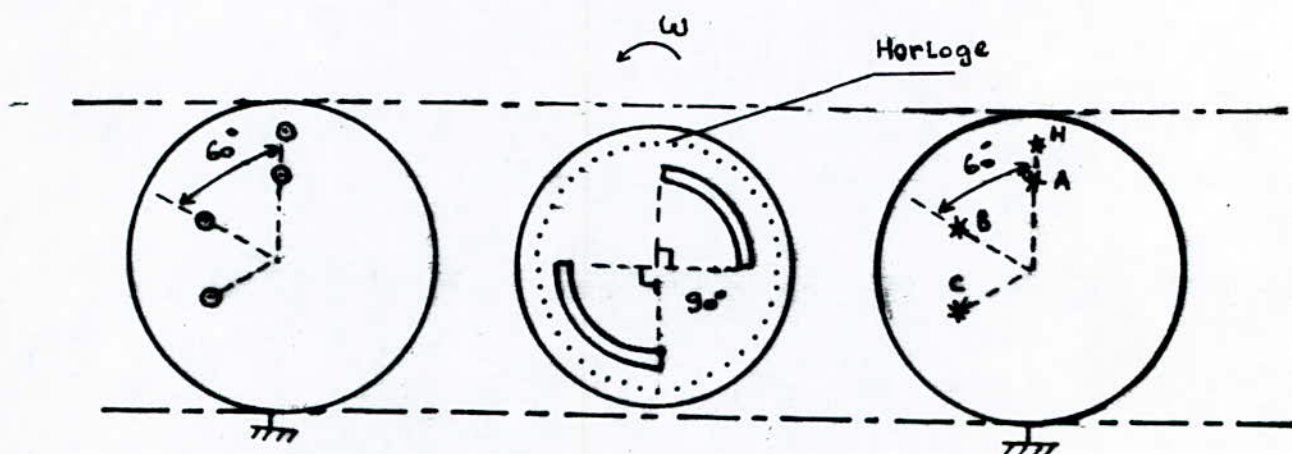
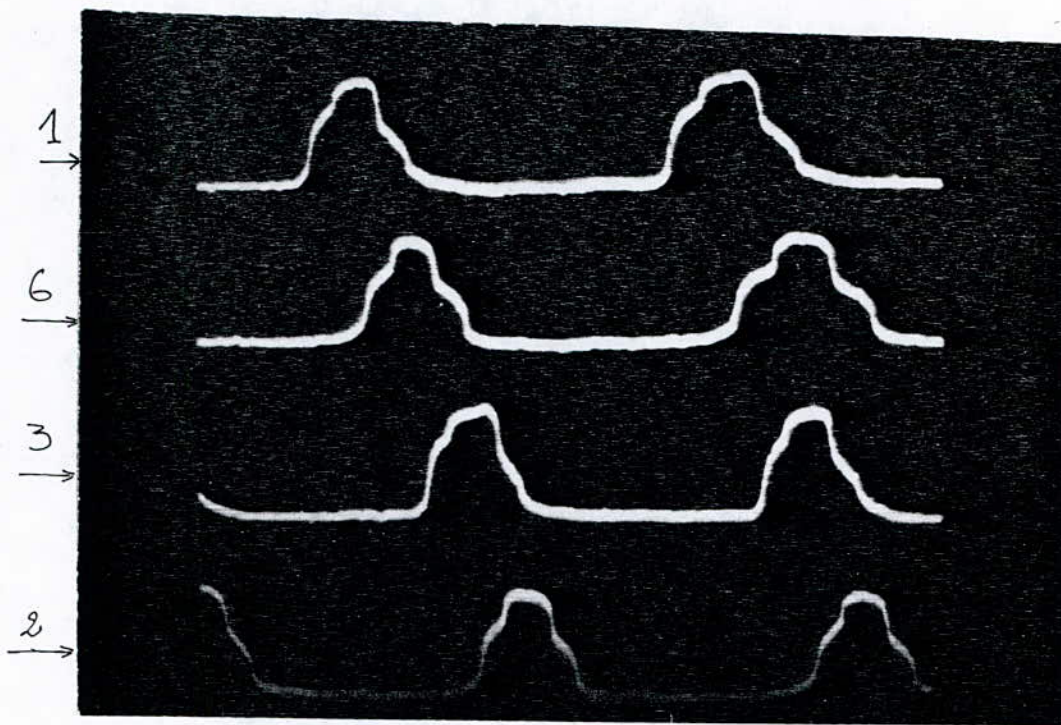


Figure (2.2.2): Schéma du deuxième capteur

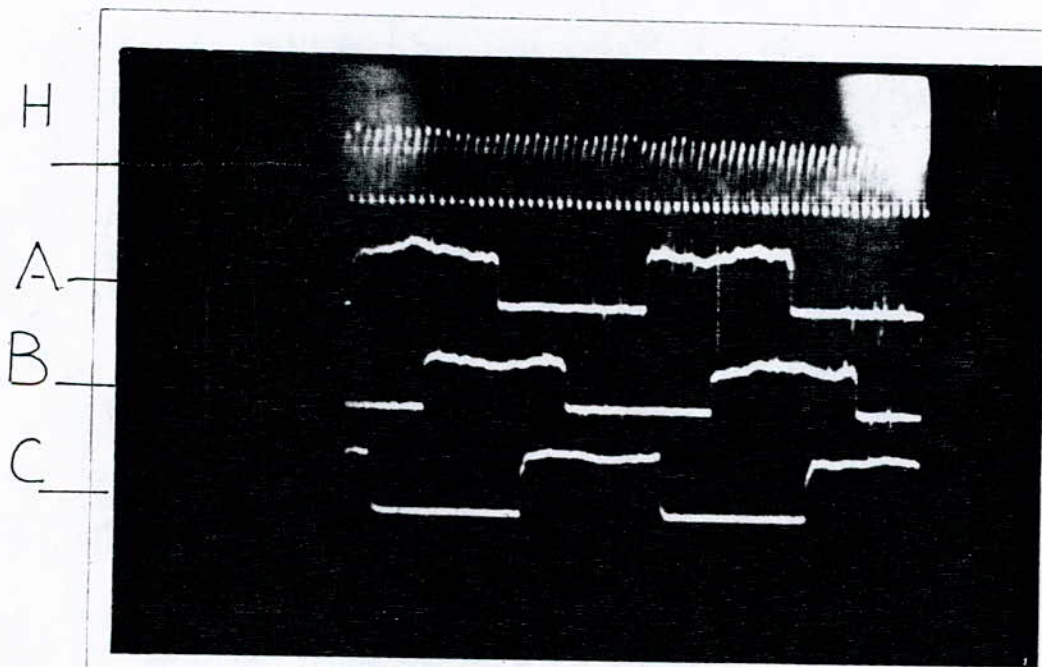
3./FORME DES SIGNAUX DELIVRES PAR CHAQUE CAPTEUR

Lorsqu'on entraîne la partie mobile de l'un ou l'autre des capteurs; les lampes étant allumées et les photodiodes à l'état saturé ou bloqué, selon la position des fentes.

On obtient ainsi des signaux représentés par la figure(3.a) pour le premier capteur et (3.b) pour le second.



a



b

Figure (3) : Visualisation des signaux obtenus
 (a): Premier capteur
 (b): Deuxieme capteur

CHAPITRE III

CIRCUITS DE TRAITEMENT DE L'INFORMATION

Les signaux (l'information) délivrés par l'un des deux capteurs en fonctionnement doivent être capables de piloter les thyristors du commutateur de courant.

La logique permettant la gestion de l'information est composée de deux parties :

- Circuit de la commutation naturelle, qui correspond au fonctionnement normal de la machine (au delà de 10% de la vitesse nominale N_n).
- Circuit de la commutation forcée, utilisé uniquement au démarrage et aux basses vitesses.

La mise en forme des signaux, la différentiation, le dédoubleage et la commande du sens de rotation sont communs aux circuits des deux capteurs et aux deux modes de fonctionnement.

En outre, pour utiliser l'un des deux capteurs et sélectionner l'un des deux modes de fonctionnement, nous avons conçu deux circuits sélectionneurs (l'un pour les capteurs, l'autre pour les commutations).

Remarque: Les deux ponts ainsi que leurs circuits de commande ont été réalisés antérieurement. Notre tâche consiste à concevoir le circuit de traitement de l'information.

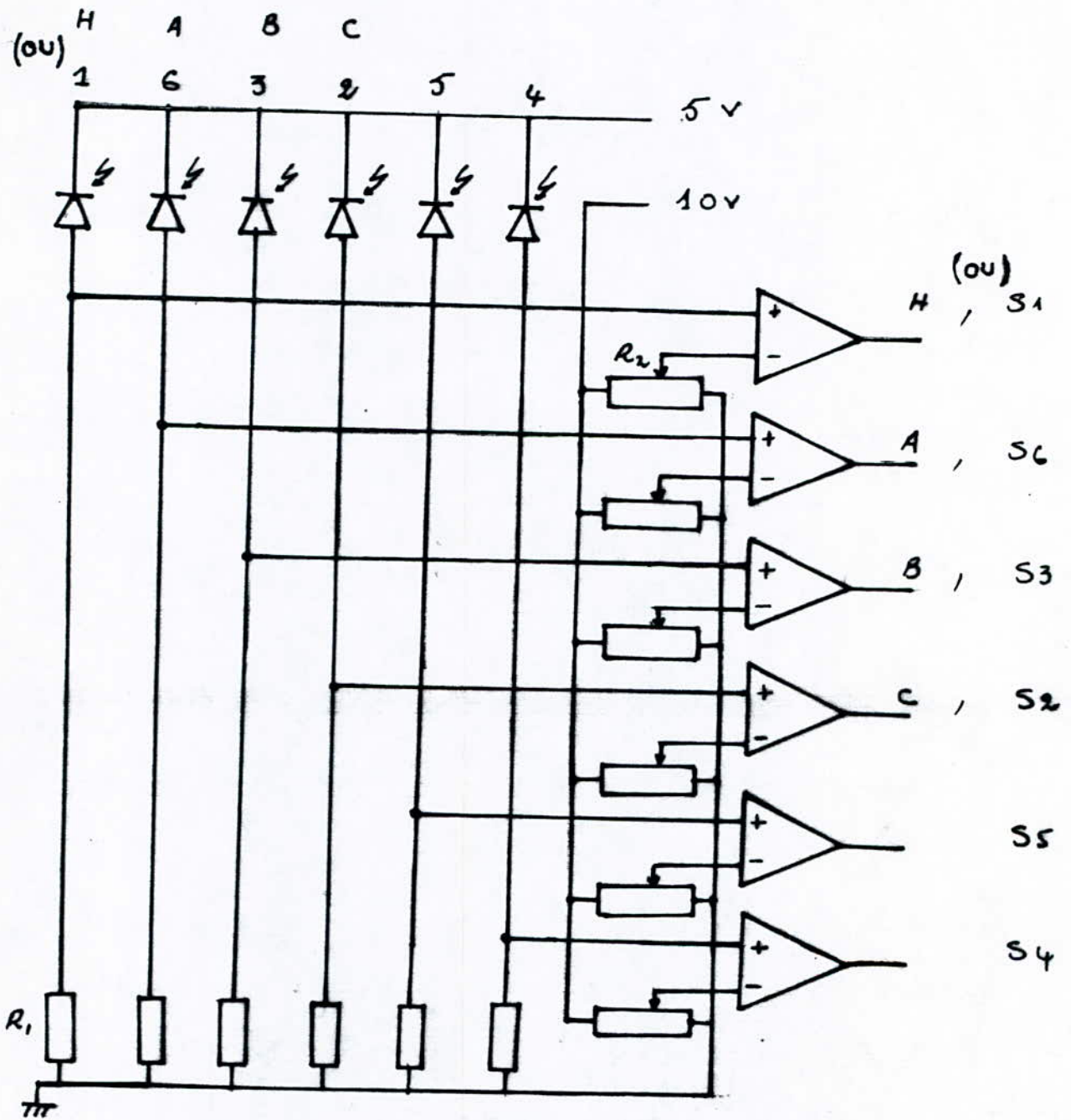
1./ MISE EN FORME DES SIGNAUX:

Le capteur délivre des signaux sous forme de créneaux déformés et de faible amplitude.

Un circuit de mise en forme et d'amplification est donc nécessaire, Figure(1.1).

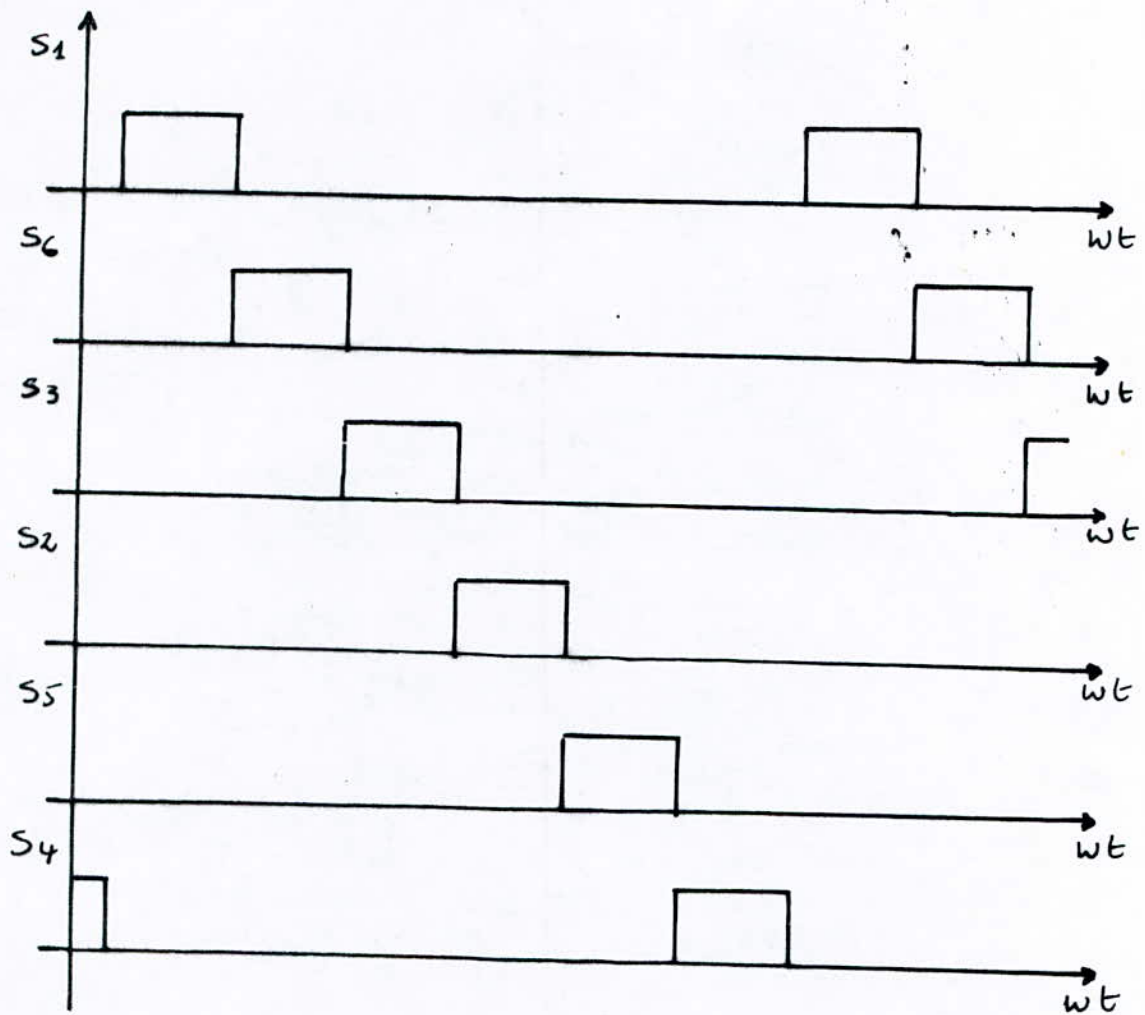
A la sortie de ce circuit, on aura les créneaux représentés par les figures (1.2.a) pour le premier capteur et (1.2.b) pour le second.

Les chiffres (1,6,3,2,5,4) sont spécifiques aux signaux du premier capteur et les lettres (H,A,B,C) à ceux du second.

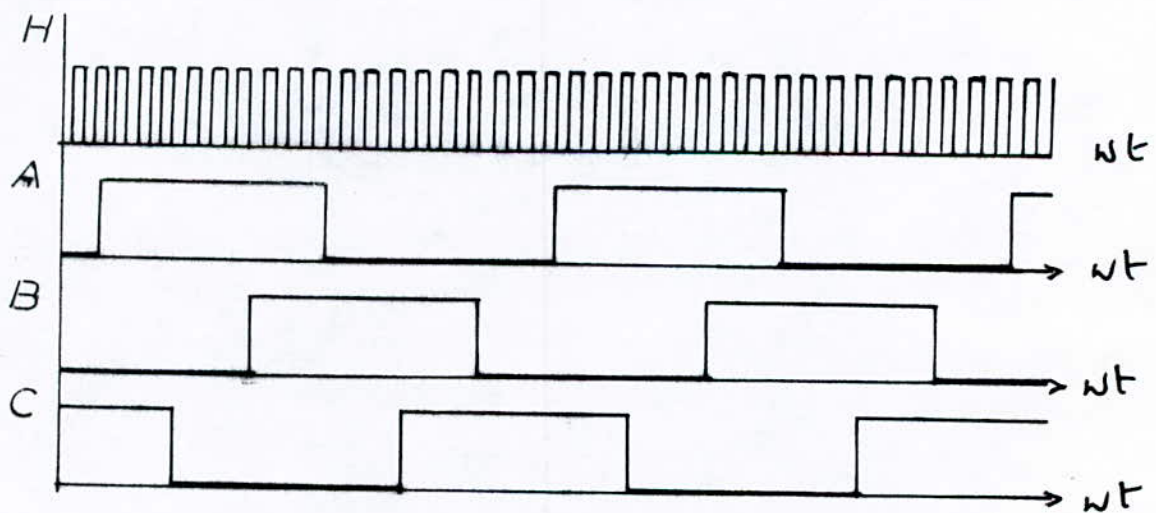


$R_1 = 47k\Omega$
 $R_2 = 10k\Omega$

Figure(1.1): Circuit de mise en forme et d'amplification .



(a)

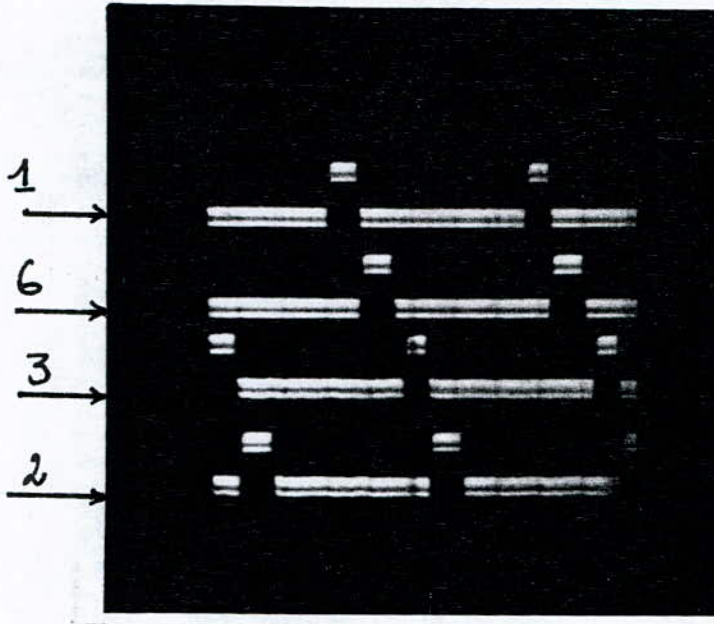


(b)

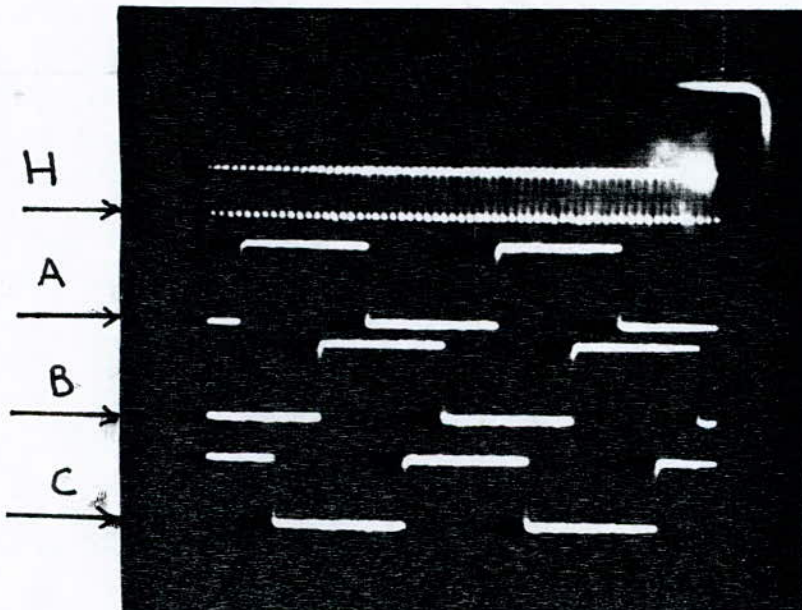
Figure (1.2): Signaux obtenus après mise en forme.

(a): Premier capteur

(b): Deuxième capteur



(a)



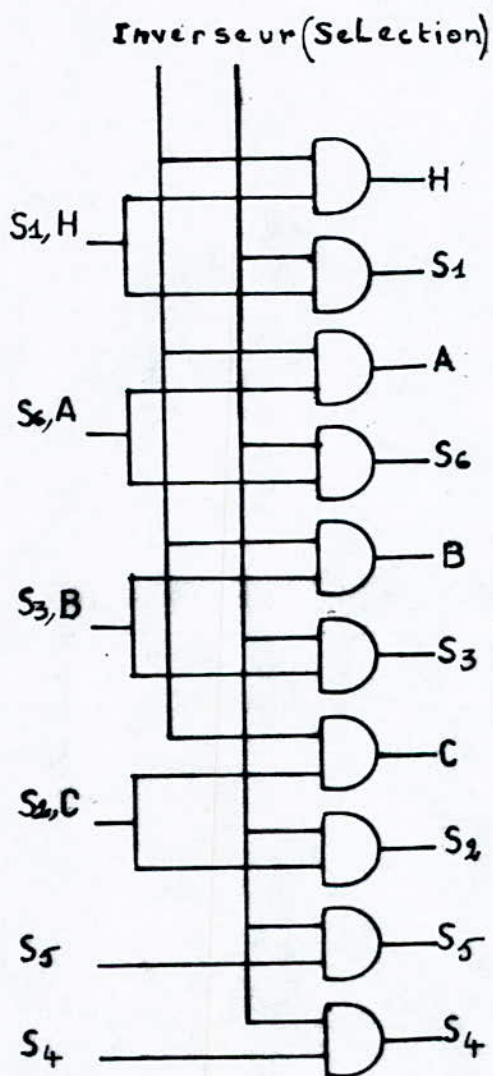
(b)

Figure (1.3) : Visualisation des signaux
après la mise en forme

- (a) : Premier capteur
- (b) : Deuxieme capteur

2./ SELECTIONNEUR-1-

Le selectionneur (Fig 2.) permet de bloquer les circuits du capteur non utilisé afin d'éviter tout chevauchement.



3 circuits intégrés:
4081

Figure (2) : Selectionneur -1-

3./ SELECTIONNEUR -2-

Ce sélectionneur (figure 3.) permet de passer d'un mode de commutation à un autre.

Autrement dit, il sélectionne des signaux de sortie de l'un des deux circuits de commutation, suivant la valeur de la vitesse.

Si la vitesse est inférieure à 10% de "Nn", la commutation est forcée, sinon elle est naturelle.

4./ CIRCUIT DE LA COMMUTATION NATURELLE

4.1/Cas du premier capteur:

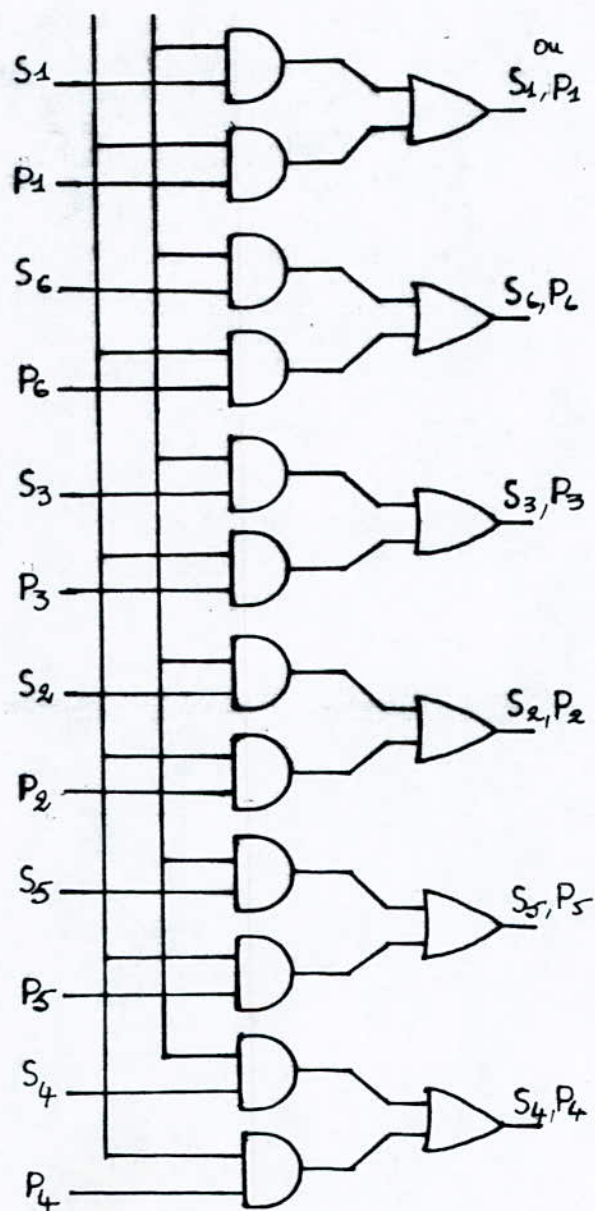
Dans ce cas, les signaux délivrés à la sortie du circuit de mise en forme (cf figure 1.2.a), sont "fin prêts".

Ils seront par la suite différentiés, dédoublés et aiguillés suivant le sens de rotation voulu, puis orientés vers les circuits de commande du pont -2-.

Cette étape sera traitée plus loin, puisqu'elle est commune aux deux capteurs et aux deux modes de fonctionnement.

Remarque: Le premier capteur ne permet pas un réglage électronique de l'angle ψ donc du couple électromagnétique.

Commande a partir du comparateur de vitesse.



2 Circuits intégrés:
4019

Figure (3): Selectionneur -2-

4.2/Le deuxième capteur:(capteur à décodage)

Il permet d'asservir la fréquence à la vitesse de rotation et de régler le couple électromagnétique (réglage de l'angle).

Ce réglage est obtenu en comparant une tension de commande avec les dents de scie correspondants aux trois f.e.m de la machine.

4.2.1/Décodage de l'horloge :

a/Convertisseurs numériques analogiques (C.N.A):

Un compteur (40193) équipé à ses 4 sorties par un réseau de résistances constitue un convertisseur numérique analogique (C.N.A), il permet de convertir la lecture de l'horloge à un signal en dents de scie. Voir figure (4.1)

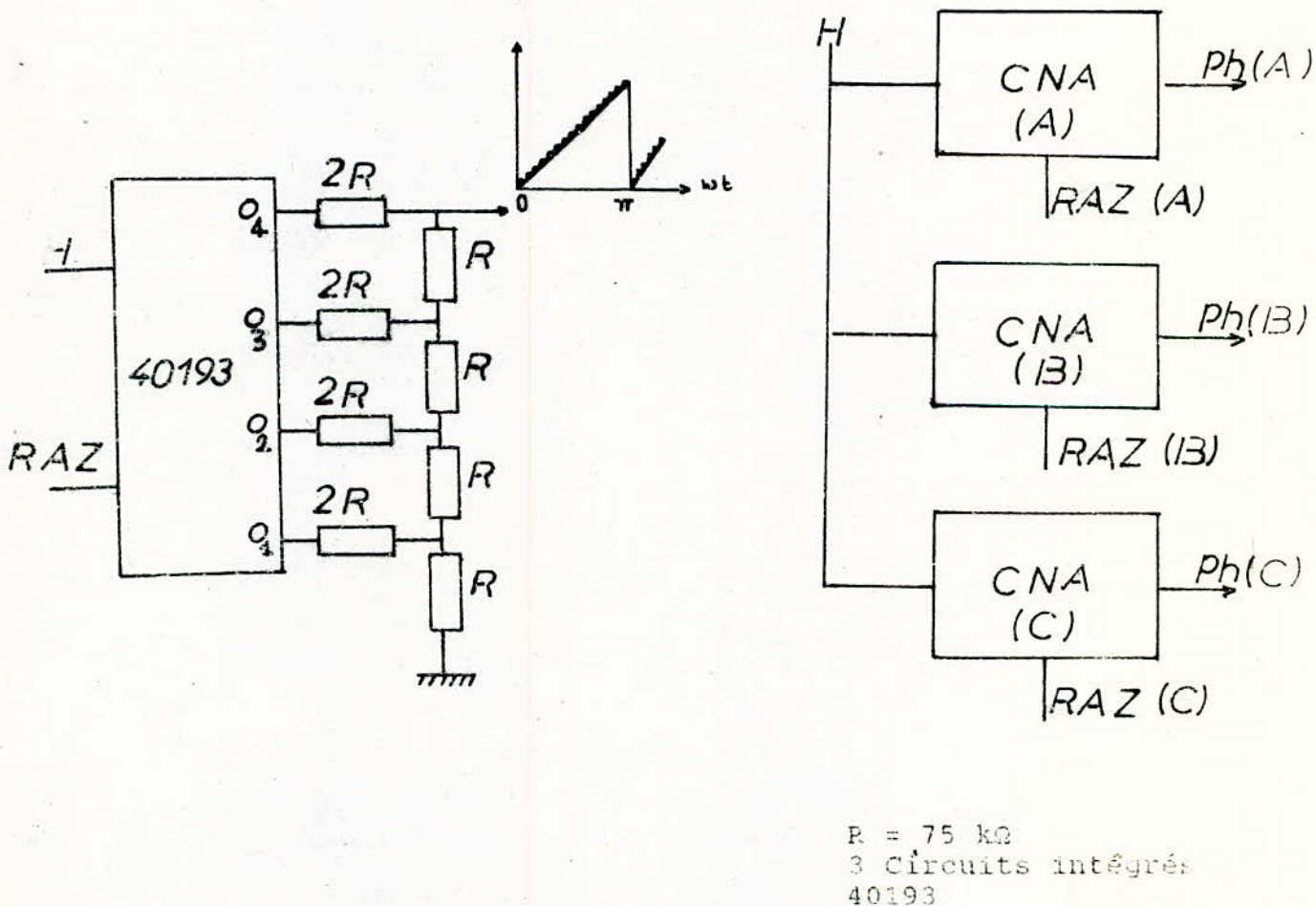


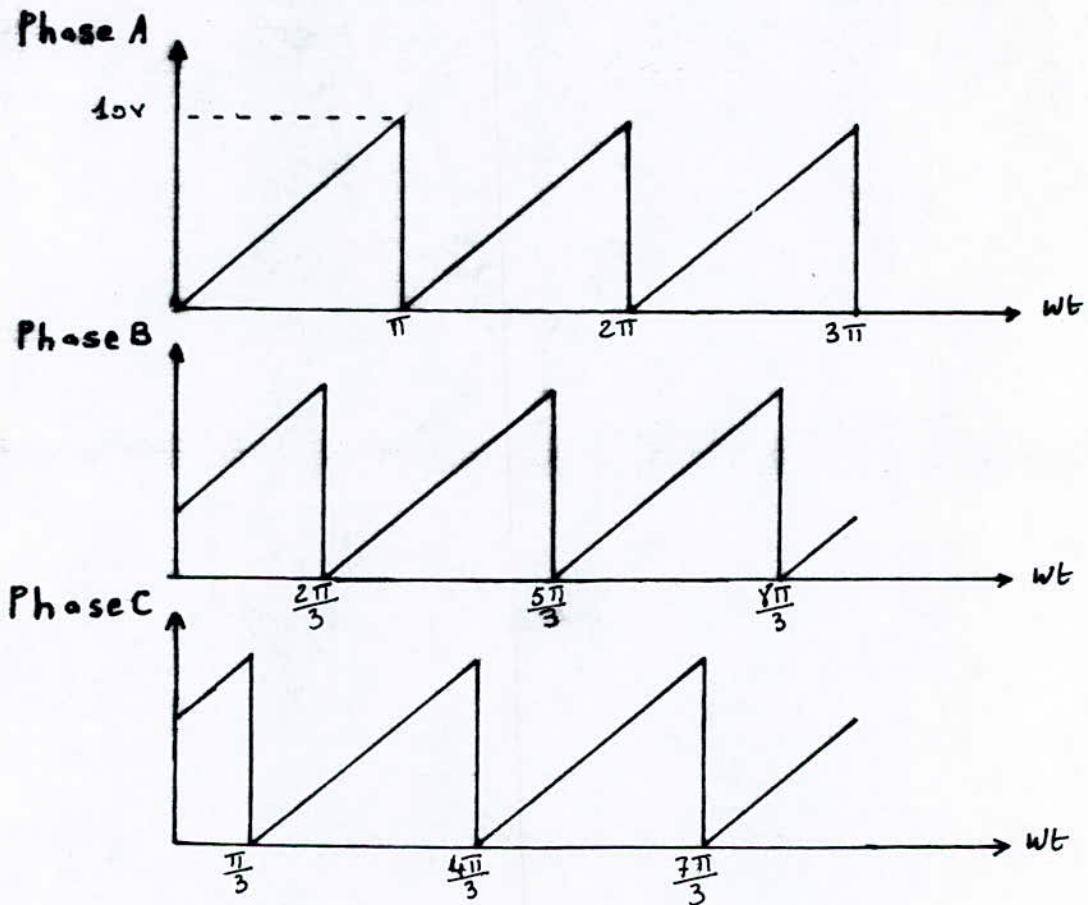
Figure (4.1):Schéma des C.N.A

L'utilisation de trois C.N.A est nécessaire pour avoir trois signaux en dents de scie correspondant aux f.e.m des trois phases. Voir figure (4.2.a.b)

Ces signaux doivent obéir à 2 conditions:

- Chaque dent de scie a une largeur égale celle d'une alternance d'une demi-période de la f.e.m correspondante.
- Chaque signal en dents de scie doit avoir le même déphasage que celui de la f.e.m qu'il représente.

Ceci peut être réalisé par trois remises à zéro.



Figure(4.2.a): Les dents de scie correspondant aux trois f.e.m

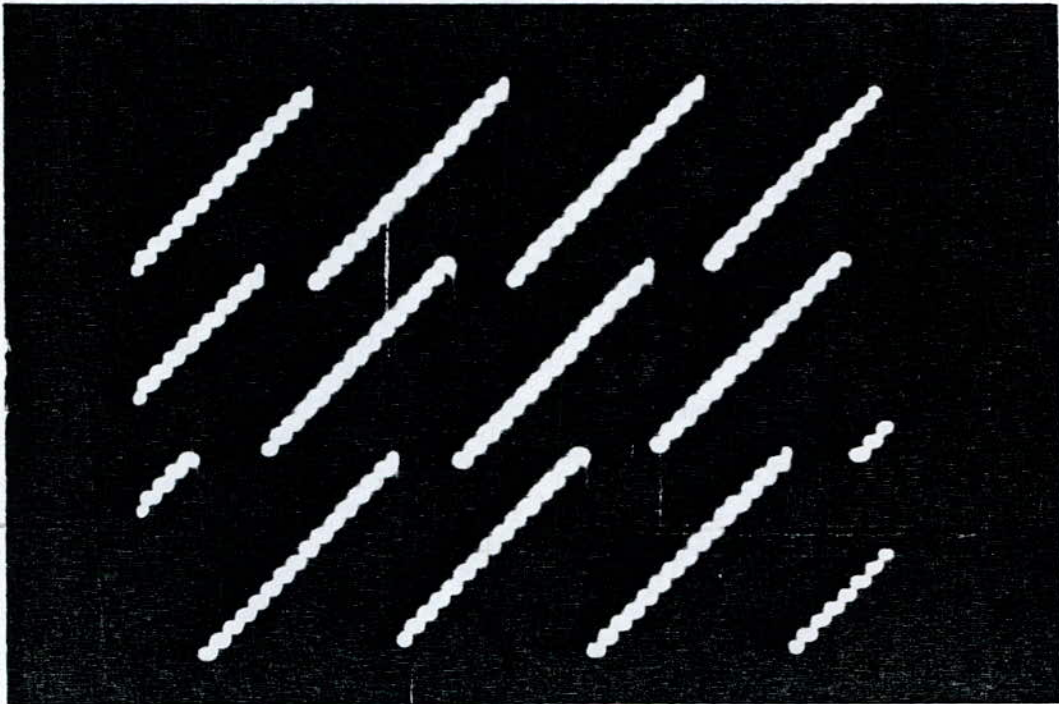


Figure (4.2.b) : Visualisation des trois signaux
en dents de scie
(dephasés de 120° l'un de l'autre)

b/Remise à zéro des compteurs (R.A.Z)

Ce sont les remises à zéro qui assurent la synchronisation entre les dents de scie et les f.e.m statoriques. Les trois signaux des R.A.Z déphasés l'un de l'autre de 120° doivent s'appliquer séparément aux trois compteurs des C.N.A.

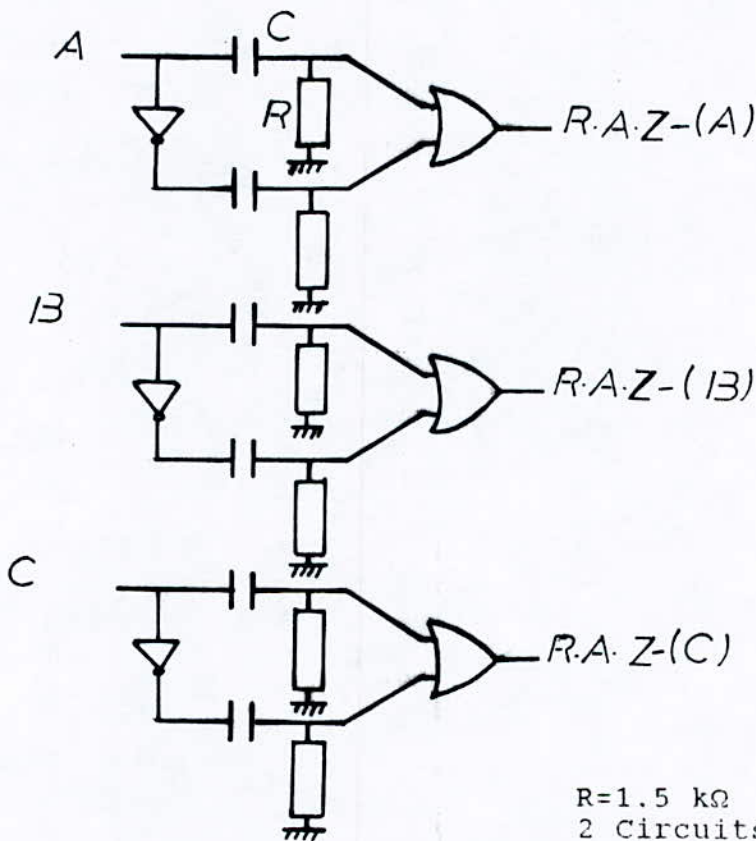
Le temps entre deux impulsions successives d'une même R.A.Z est égale à la demi-période de la f.e.m correspondante.

La procédure permettant d'avoir ces remises à zéro est la suivante:

- L'inversion logique des créneaux donne $A, B, C, \bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$.

- On différencie les six créneaux ainsi obtenus, puis on fait l'addition logique de ces signaux (deux à deux) à l'aide de trois portes "OU". Voir Figure (4.3).

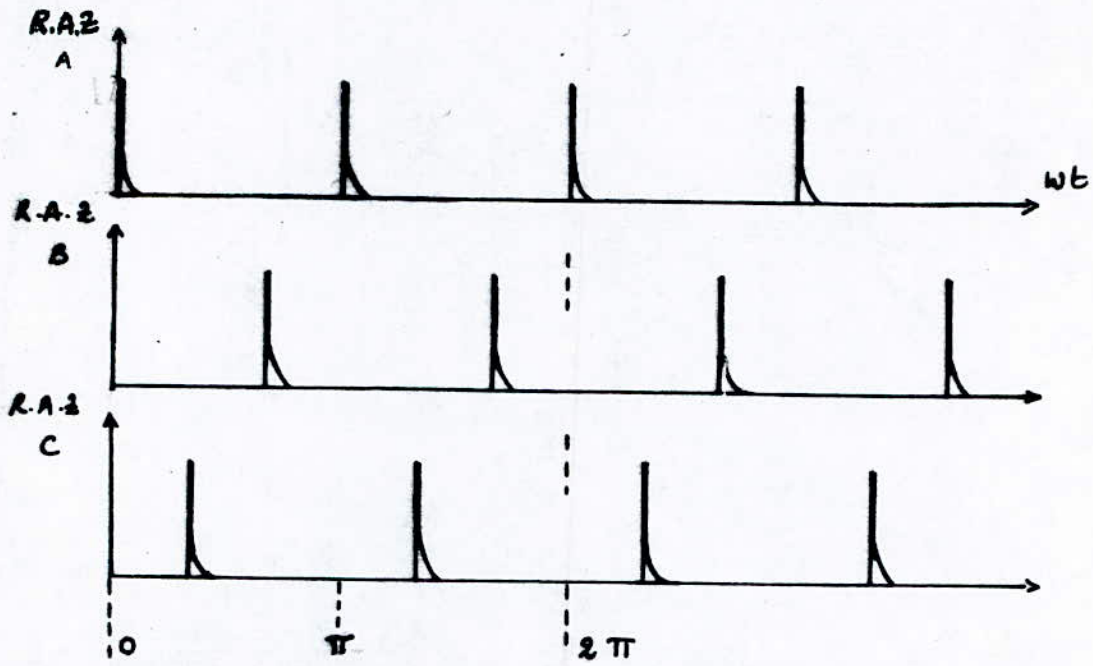
$$A+\bar{A} \quad , \quad B+\bar{B} \quad , \quad C+\bar{C}$$



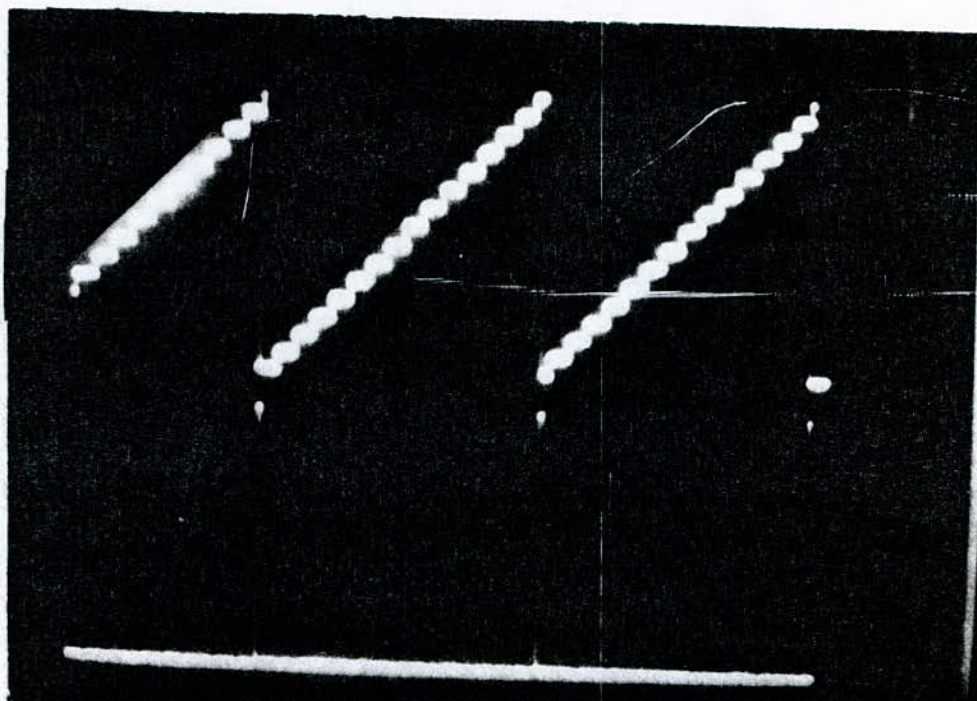
$R=1.5 \text{ k}\Omega$, $C=56 \text{ nF}$
2 Circuits intégrés:
4072

Figure(4.3):Circuit des R.A.Z

Les trois signaux des remises à zéro sont représentés par les figure(4.4.a,b,c) ci-dessous.



Figure(4.4,a) : Les trois remises à zéro



Figure(4.4.b) : Correspondance entre le signal en dent de scie et sa R.A.Z.

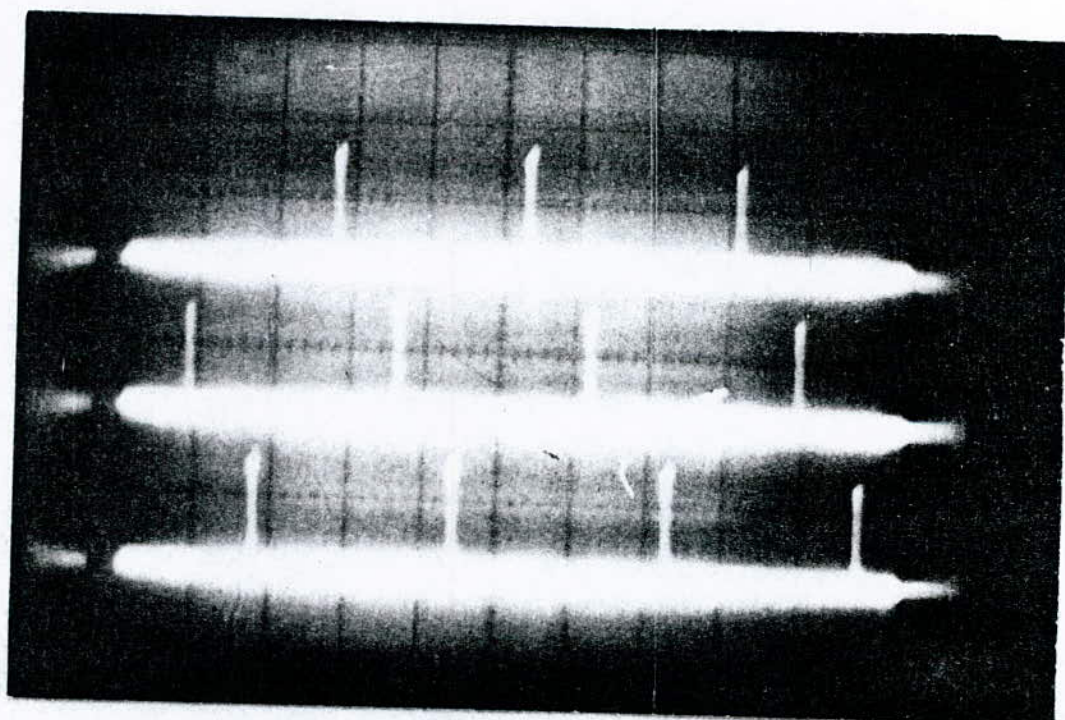
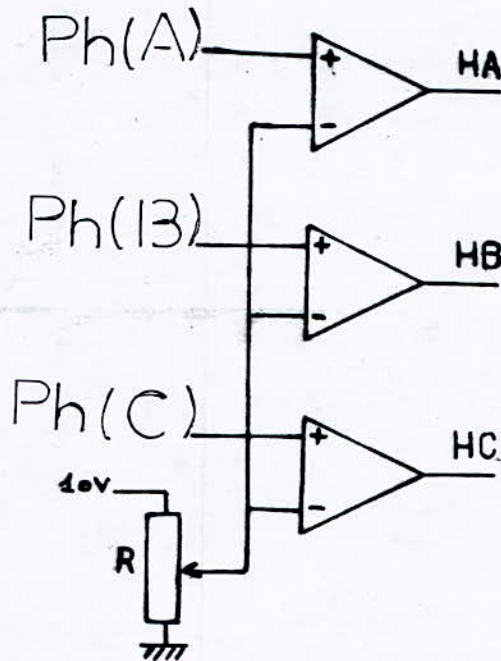


Figure (4.4.c) : Visualisation des R.A.Z

4.2.2/Réglage de l'angle ψ :

Ceci est possible par la comparaison d'une tension de commande avec les trois signaux en dents de scie représentés à la figure(4.2).

Cette comparaison permet d'avoir trois créneaux notés (HA,HB,HC) réglables en fonction de la tension de commande, suivant l'angle voulu. Voir figure (4.5.a).



R=4k Ω

Figure (4.5.a):Circuits de réglage de l'angle ψ .

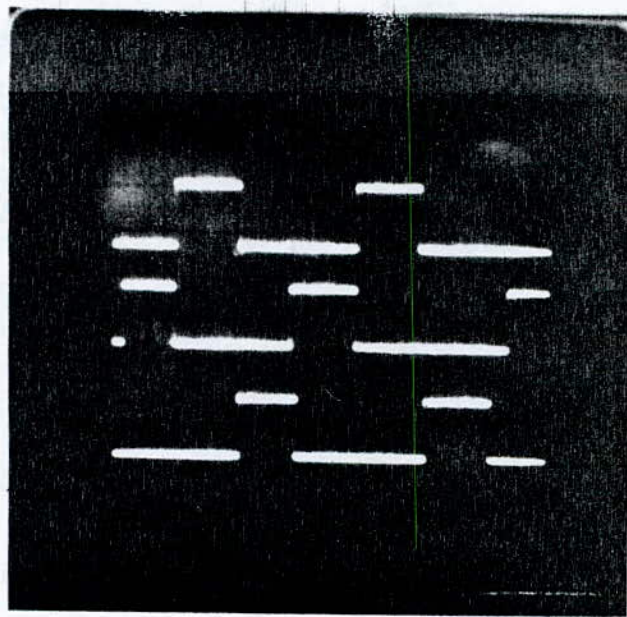
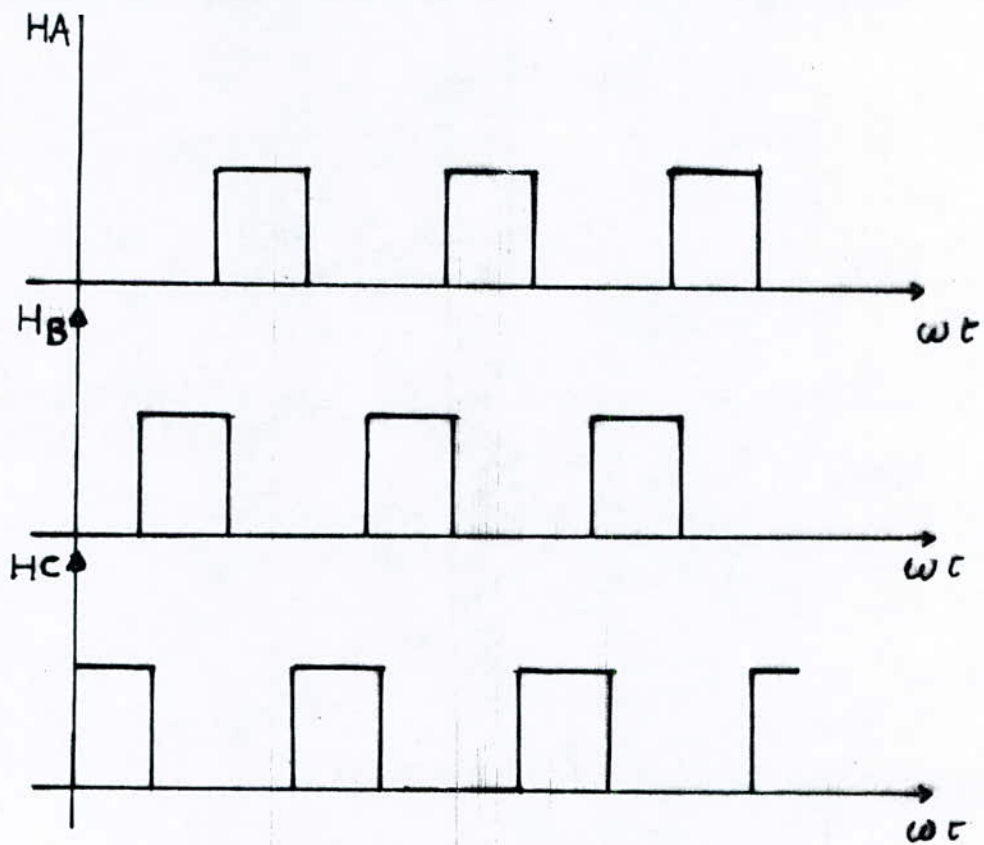


Figure (4.5.b) : Les trois creneaux obtenus par réglage de l'angle γ .

4.2.3/Mise en ordre des signaux:

Les trois signaux précédemment obtenus (H_A, H_B, H_C) ne peuvent pas commander les six thyristors du pont-2-.

Leur produit logique avec les signaux ($A, \bar{A}, B, \bar{B}, C, \bar{C}$) définit l'ordre convenable de déclenchement de ces thyristors.

En faisant un tel produit,

$$H_A.A, H_C.\bar{C}, H_B.B, H_A.\bar{A}, H_C.C, H_B.\bar{B}.$$

des parasites sont apparues au niveau de la coïncidence entre certains fronts montants et descendants des créneaux. Voir figure(4.6).

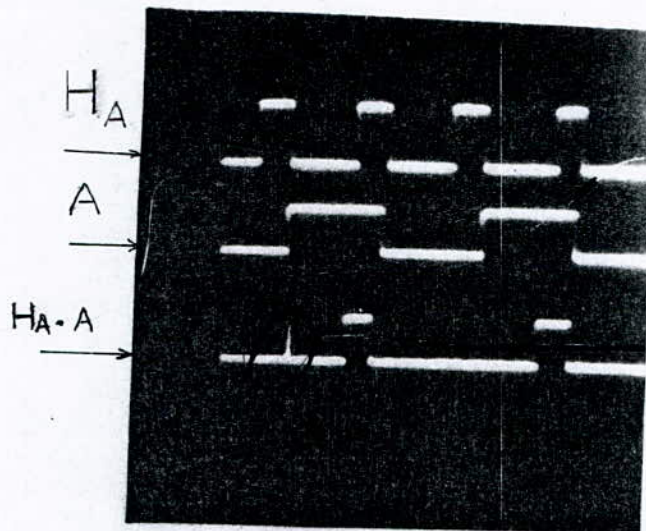
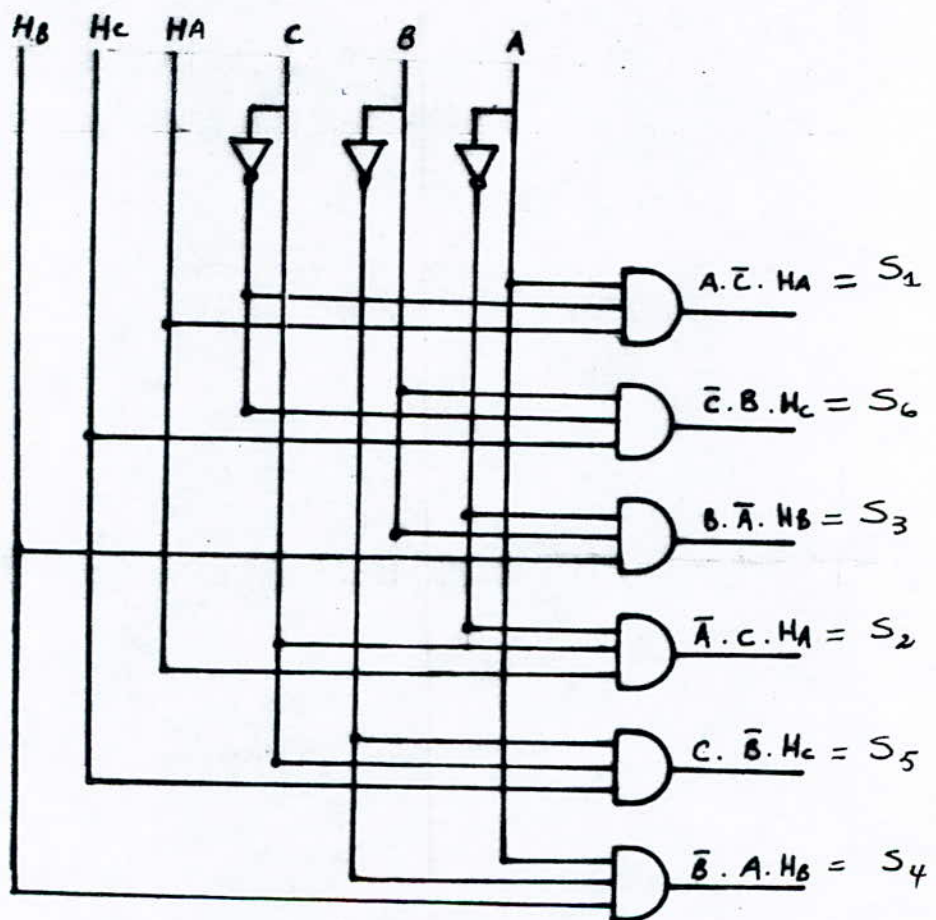


Figure (4.6):Visualisation des parasites

Pour remédier à cela i.e pour annuler ces parasites, nous avons fait une combinaison entre les créneaux précédemment cités pour obtenir les produits:

$$H_A.A.\bar{C}, H_C.\bar{C}.B, H_B.B.\bar{A}, H_A.\bar{A}.C, H_C.C.\bar{B}, H_B.\bar{B}.A$$

Le circuit et les signaux de sortie sont représentés respectivement par les figures (4.7) et (4.8.a,b)



2 Circuits intégrés:
4073

Figure (4.7): Circuit de mise en ordre

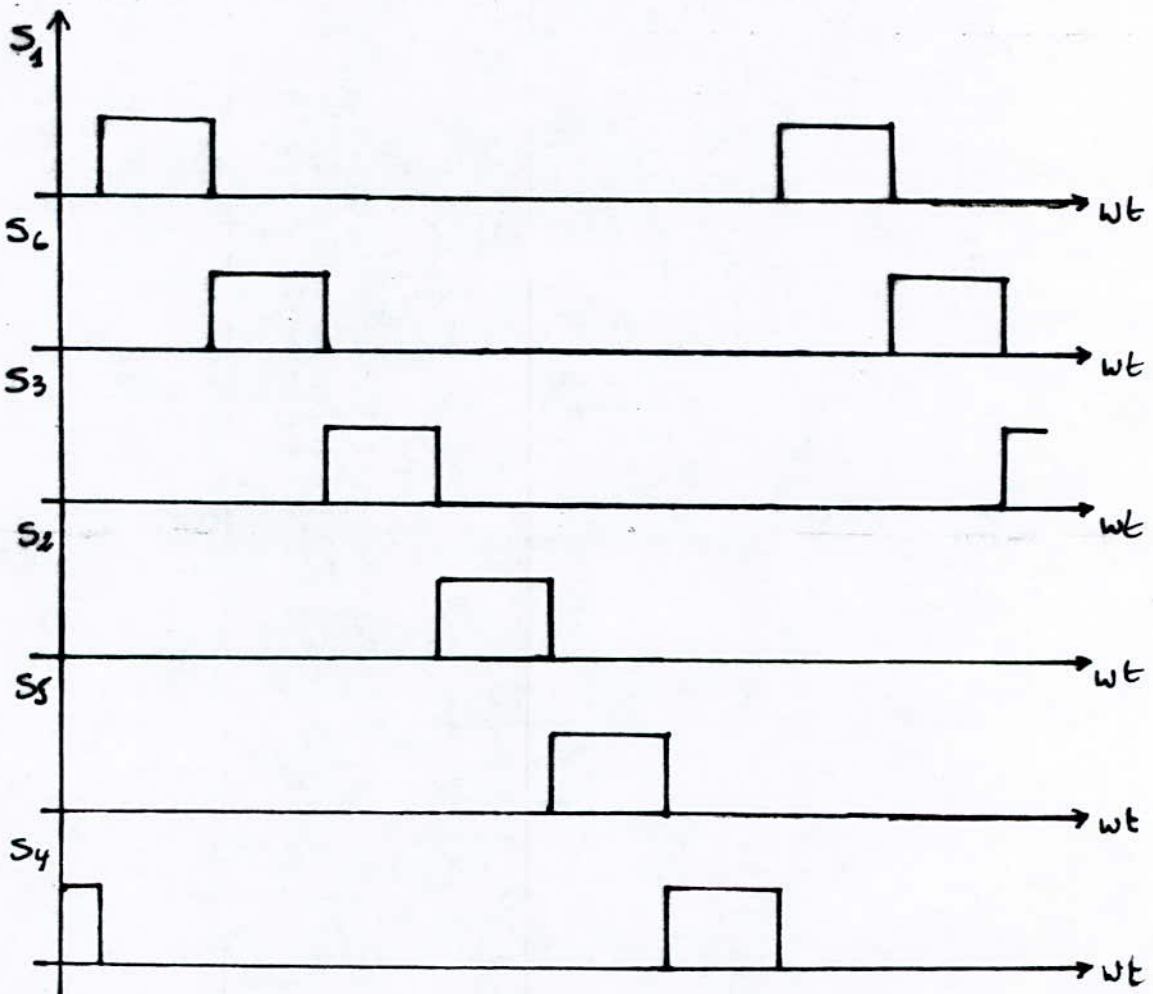


Figure (4.8.a): Les six signaux obtenus après mise en ordre

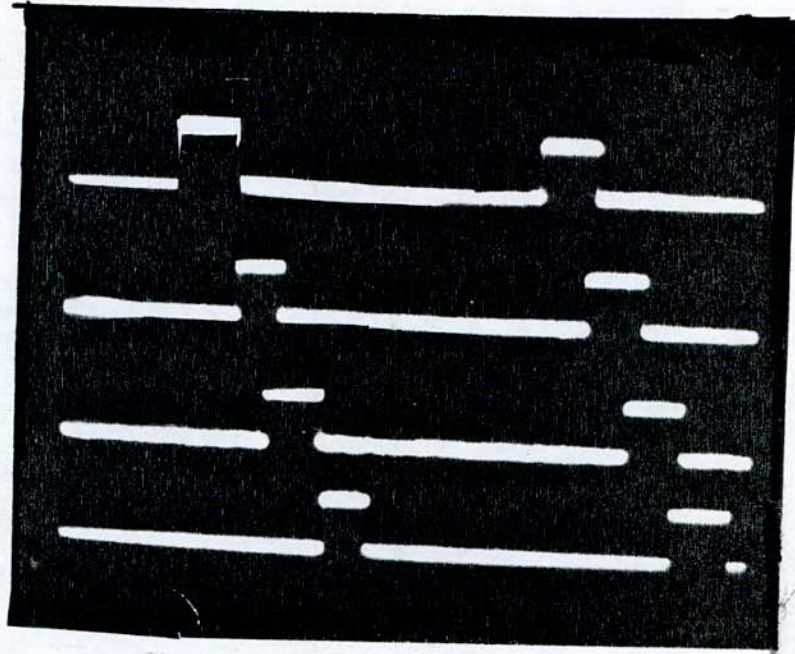


Figure (4.8.b) : Visualisation des signaux
après la mise en ordre

Remarque: Les six créneaux ainsi obtenus sont semblables à ceux délivrés par le premier capteur, à la seule différence, qu'ils sont réglables en fonction de la valeur du couple (donc de l'angle).

Nous pouvons maintenant les différentier, les dédoubler et les aiguiller.

5./ CIRCUIT DE LA COMMUTATION FORCEE(du démarrage)

Pour assurer la commutation au démarrage, la méthode retenue consiste à annuler le courant continu pendant un court instant.

Durant l'annulation de ce courant le pont -1- opère en onduleur (voir chapitre I).

L'idée est d'agir sur l'angle d'allumage du pont-1-, en ajoutant un créneau de tension(largeur 3 à 4 ms) à la tension de commande. Ainsi les circuits de commande de ce pont seaturent et interrompent le courant continu.

Le circuit de démarrage doit assurer:

- l'allumage des thyristors du pont-2-
- l'extinction du courant pour désamorcer ces thyristors

5.1/Circuit d'allumage des thyristors du pont-2- :

5.1.1 Cas du premier capteur:

Les six impulsions nécessaires pour assurer cette tâche sont directement obtenus à partir du capteur.

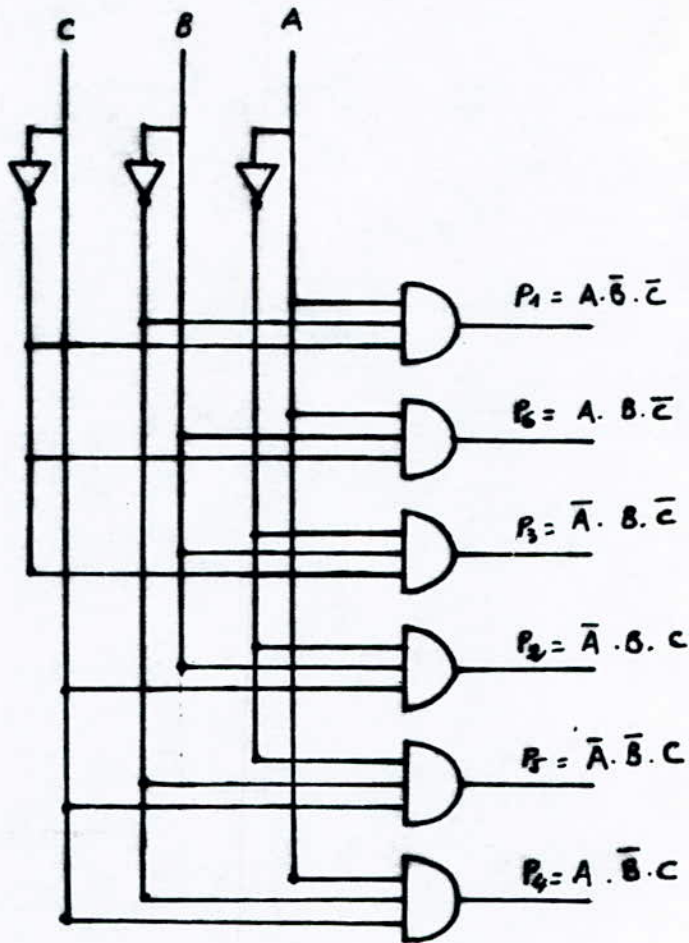
5.1.2 Cas du second capteur:

A l'arrêt, quelque soit la position du rotor, elle peut être détectée par les deux capteurs décrit dans le second chapitre.

L'information délivrée par les trois détecteurs A,B,C au niveau du second capteur permet d'avoir, par une combinaison convenable, les six impulsions nécessaires pour le déclenchement du pont-2-. Voir Figure (5.1).

$$P1=A.\bar{B}.\bar{C} \quad , \quad P6=A.B.\bar{C} \quad , \quad P3=\bar{A}.B.\bar{C}$$

$$P2=\bar{A}.B.C \quad , \quad P5=\bar{A}.\bar{B}.C \quad , \quad P4=A.\bar{B}.C$$



2 Circuits intégrés:
4073 ou 4025

Figure (5.1): Circuit d'allumage des thyristors
du pont-2- au démarrage

5.2/Circuit d'extinction du courant:

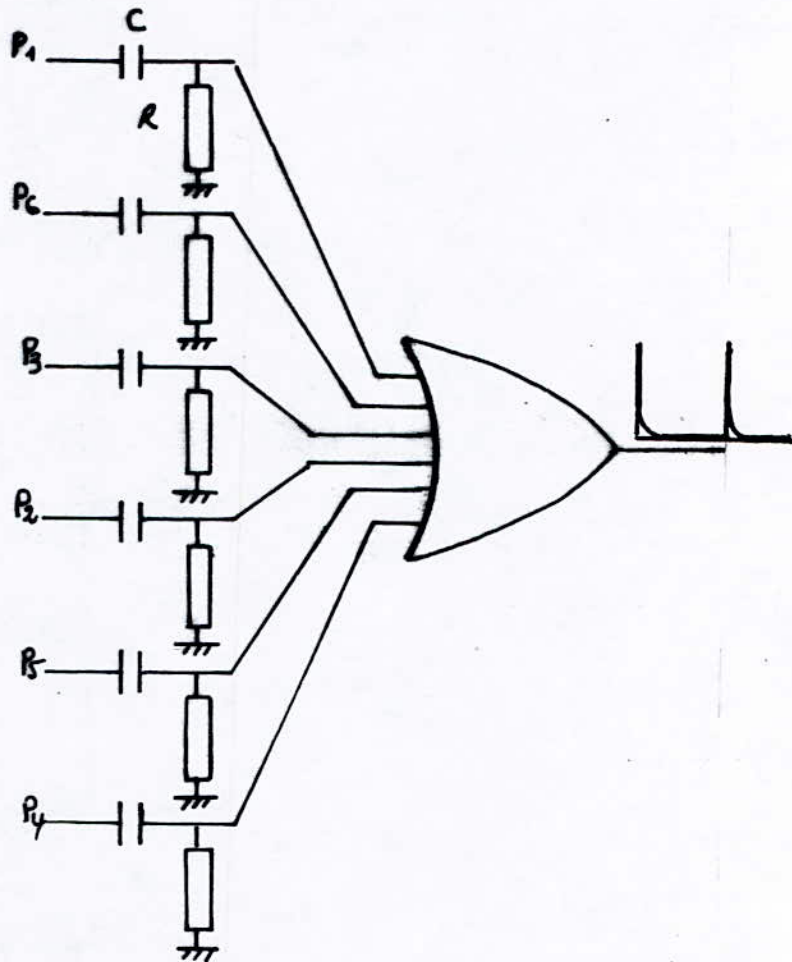
Il est conçu pour annuler le courant dans la boucle intermédiaire (extinction des thyristors du pont 2). Ceci est rendu possible par un circuit comprenant essentiellement un monostable et un comparateur de vitesse qui définissent les instants et la durée d'extinction du courant.

5.2.1/ Circuit de déclenchement du monostable :

Ce circuit est composé de différentiateurs qui à partir des créneaux précédemment décrits, nous donnent des impulsions; elles seront additionnées logiquement par une porte "OU" à six entrées.

La figure (5.2.1) met en évidence les entrées du circuit de déclenchement du monostable, (S1,S6,S3,S2,S5,S4) pour le premier capteur, (P1,P6,P3,P2,P5,P4) pour le second.

La sortie de cette porte "OU" sera appliquée à l'entrée du monostable.



1 Circuits intégrés: 4072
C=56 mF , R=1.5 kΩ

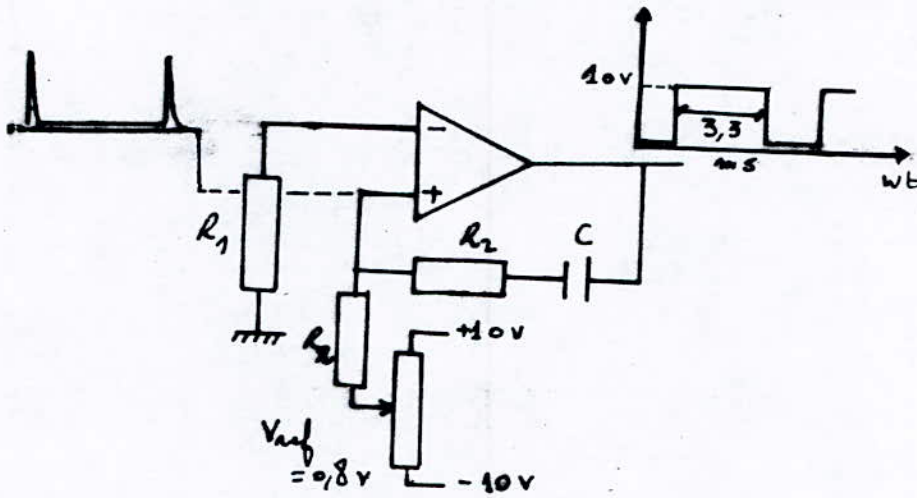
Figure (5.2.1): Circuit de déclenchement du monostable

5.2.2/Le monostable :

A chaque fois qu'une impulsion est appliquée à son entrée (positive), le monostable génère un créneau calibré dans le temps.

La largeur de ce créneau est de 3.3 ms, elle est nécessairement supérieure au temps de recouvrement des thyristors.

Afin d'assurer les six commutations par période de f.e.m, le monostable doit générer six crénaux de même largeur. Voir figure(5.2.2.a,b).



R1=150 kΩ
R2=56 kΩ
C=56nF
Vref=0.8V

Figure (5.2.2.a):Le monostable

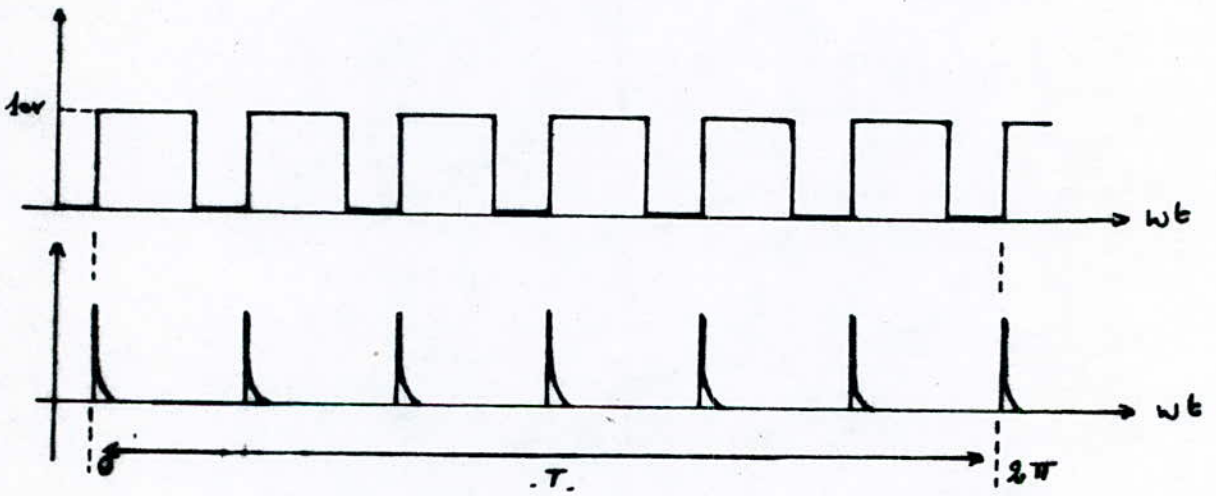
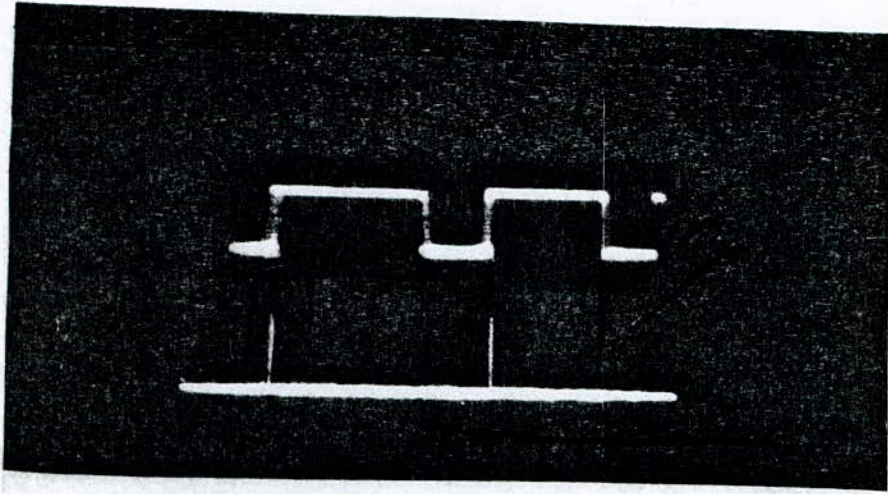


Figure (5.2.2.b) : Correspondance entre les signaux de déclenchement et les creneaux du monostable

5.2.3/Le comparateur de vitesse

Ce comparateur figure (5.2.3) a pour rôle de définir le mode de commutation. Ceci est possible en comparant une tension de référence ($V_{ref}=1V$) à une autre tension, image de la vitesse.

- si la vitesse est inférieure à 10% de "Nn", $V_s=+V_{sat}$.
- si la vitesse est supérieure à 10% de "Nn", $V_s=-V_{sat}$.

Le comparateur de vitesse assume deux fonctions, d'une part il commande la logique du sélectionneur-2-, d'autre part il indique si on doit procéder par annulation de courant ou non. Cette dernière fonction est assurée par une porte "ET" ayant à ses entrées, les crénaux générés par le monostable et le résultat de la comparaison.

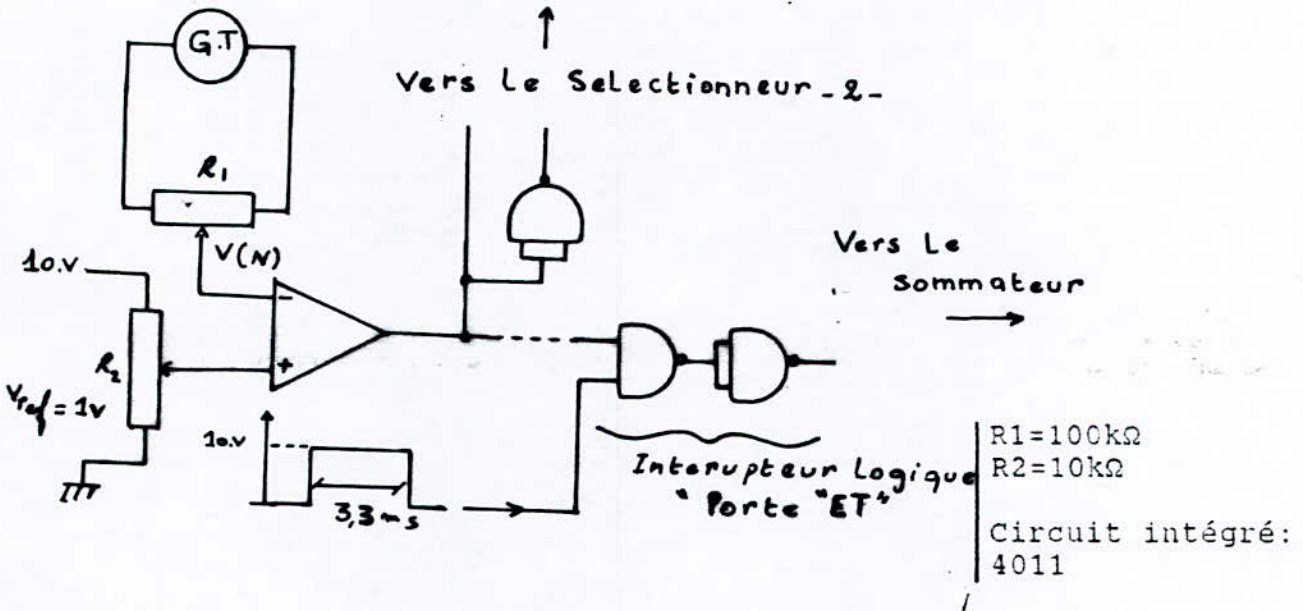
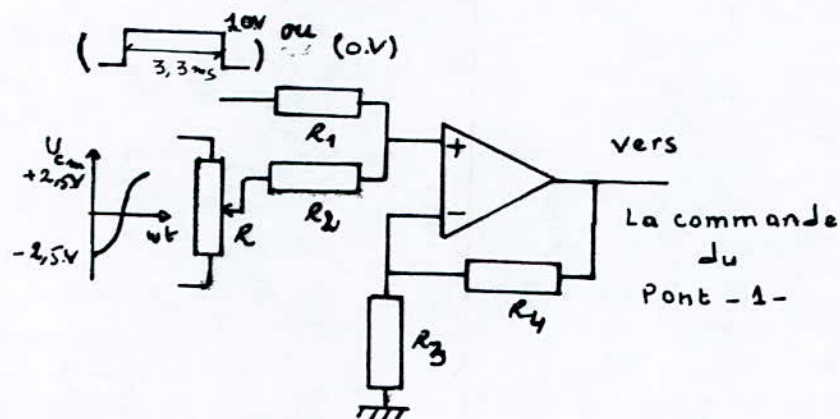


Figure (5.2.3) : Comparateur de vitesse et la porte "ET"

5.2.4/Le sommateur:

A chaque commutation, le sommateur figure(5.2.4) augmente la tension de commande du pont-1-, ce qui fait basculer l'angle d'amorçage au delà de 90° .

Cette augmentation est nécessaire pour faire saturer les circuits de commande du pont redresseur car; cela permet d'annuler le courant continu.



$R=10k\Omega$
 $R1=R2=3k\Omega$
 $R3=R4=150k\Omega$

Figure (5.2.4): Le sommateur

Le sommateur reçoit le créneau délivré par le monostable et une tension de commande en arc cosinus; la sortie attaque directement les circuits de commande du pont -1-.

Il est évident que si la vitesse dépasse les 10 % de N_n les créneaux du monostable n'arrivent plus au sommateur.

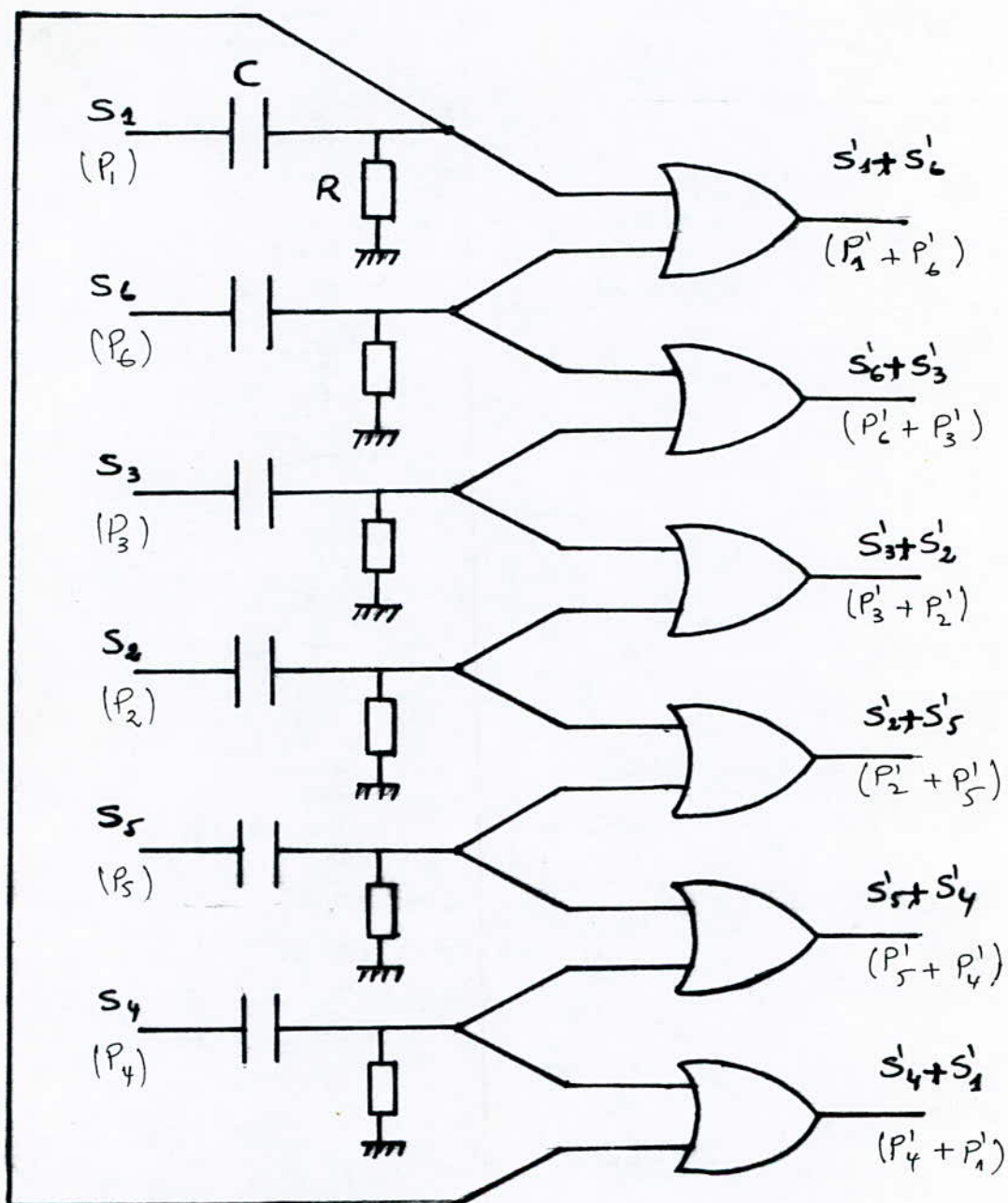
6/DIFFERENTIATION ET DEDOUBLAGE DES IMPULSIONS

Pour établir le courant dans deux phases de la machine, on doit amorcer simultanément deux thyristors, l'un de la série 1,3,5, l'autre de la série 2,4,6.

La différentiation et le dédoublement paraissent nécessaires pour la commande, en commutation naturelle et forcée.

La figure(6.1) illustre le schéma du circuit différentiateur-dédoubleur d'impulsion.

Les signaux de sortie sont présentés par la figure (6.2).



$C=56\text{nF}$
 $R=1.5\text{ k}\Omega$
 3 Circuits intégrés
 4072

Figure(6.1):Circuit de differentiation et dédoubleage des impulsions

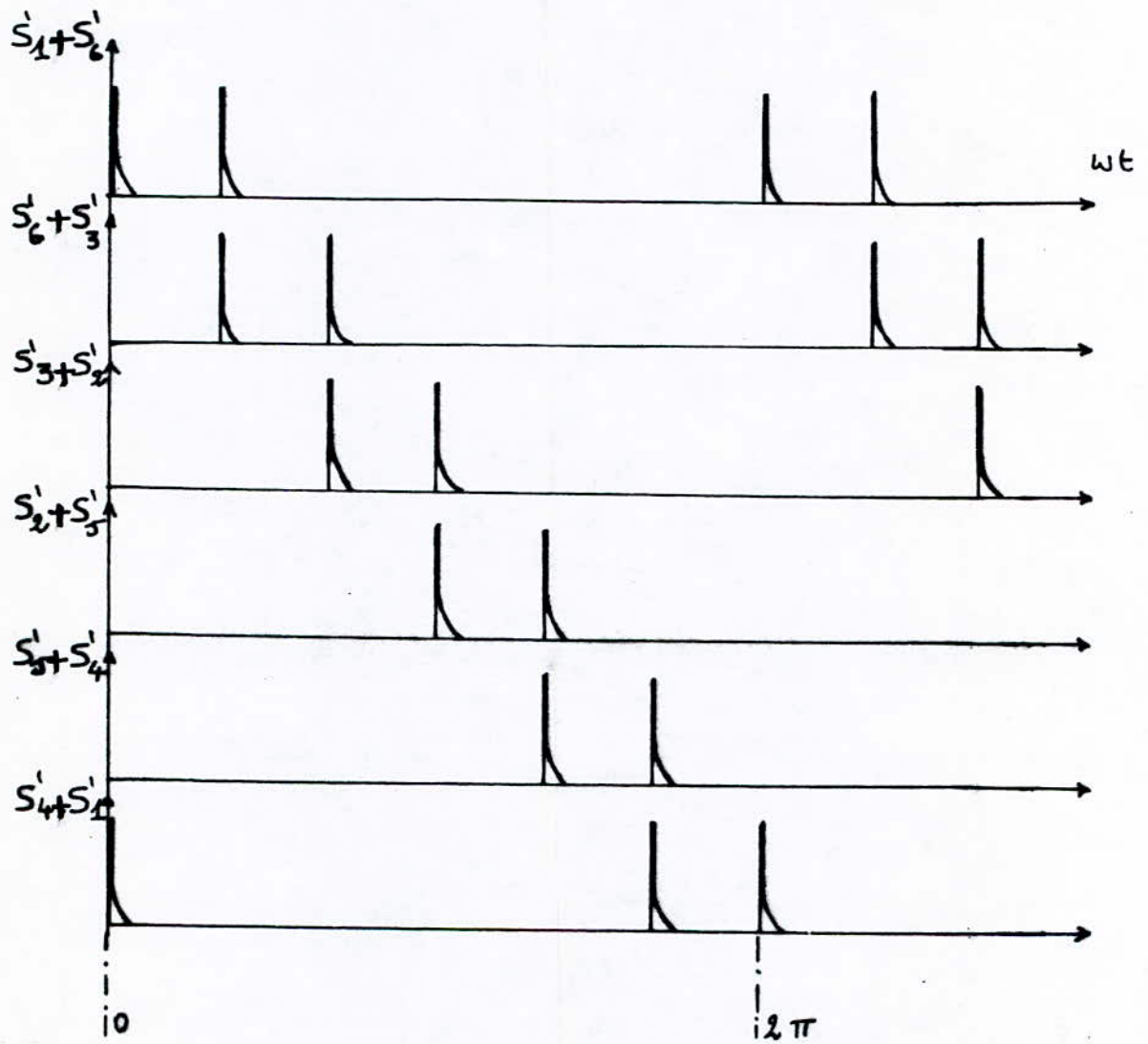


Figure (6.2.a) : Les six signaux de commande du pont-2-

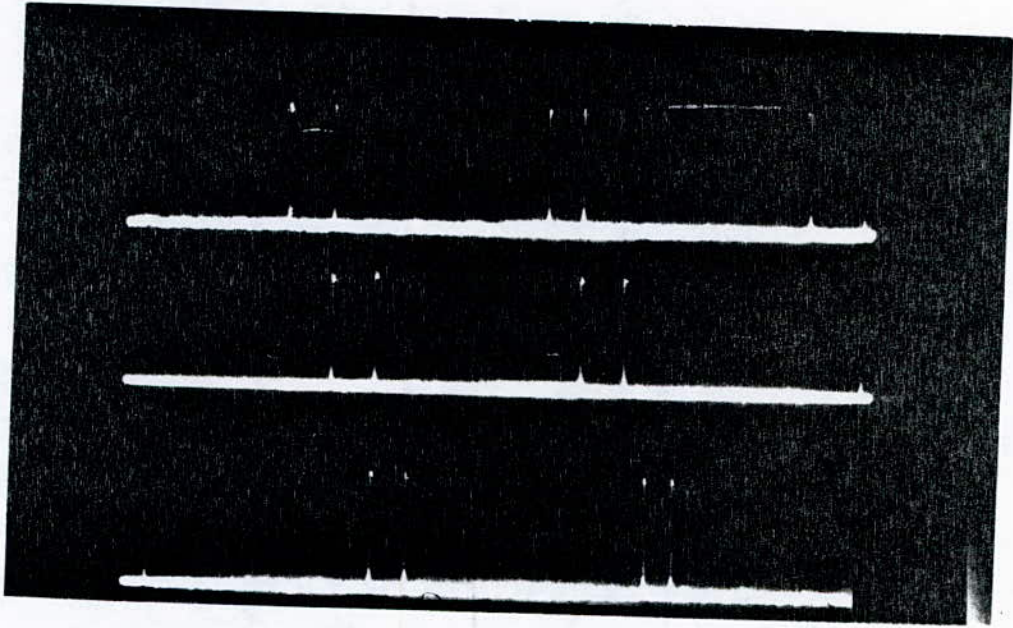


Figure (6.2.b) : Visualisation des impulsions
(dédoublées) pour la commande du
pont-2-

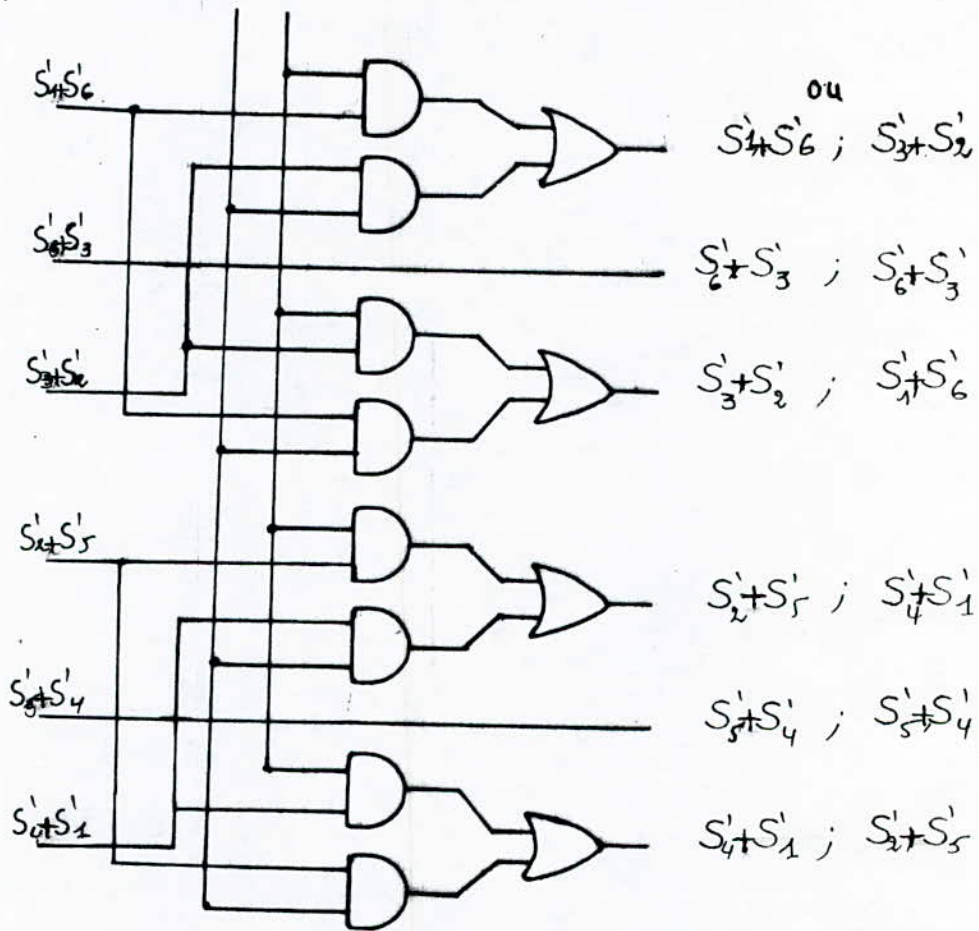
7./COMMANDE DU SENS DE ROTATION

L'ordre d'amorçage des rhyristors donné par le circuit précédent est:

1-6 , 6-3 , 3-2 , 2-5 , 5-4 , 4-1

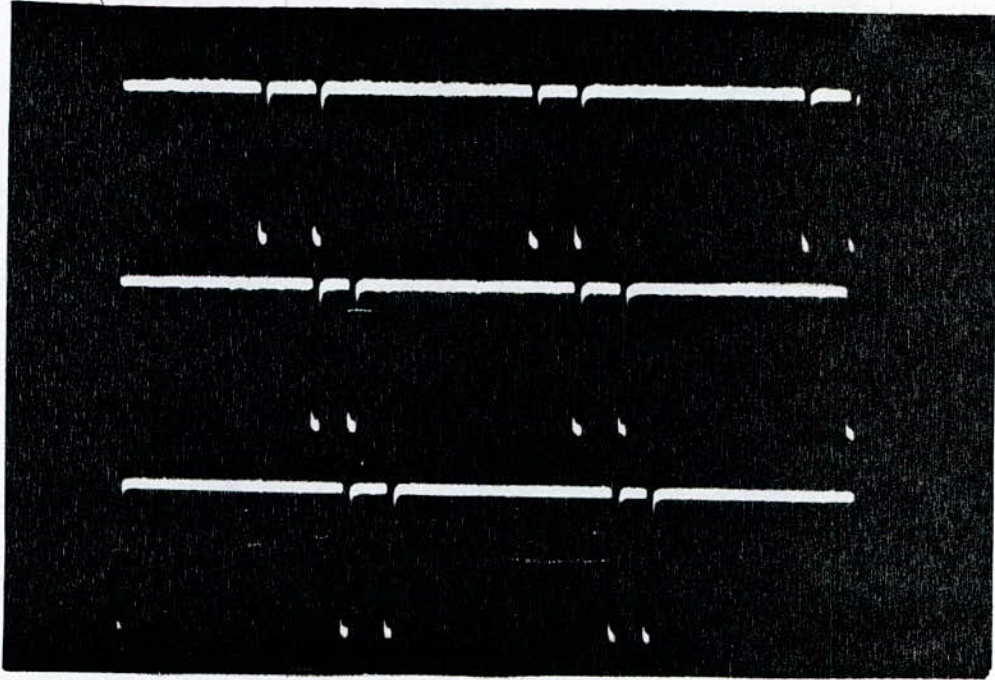
L'inversion de cet ordre, par permutation électronique de deux phases de la machine, assure le changement du sens de rotation. Voir figure (7).

- Inverseur (Commande du sens de rotation).

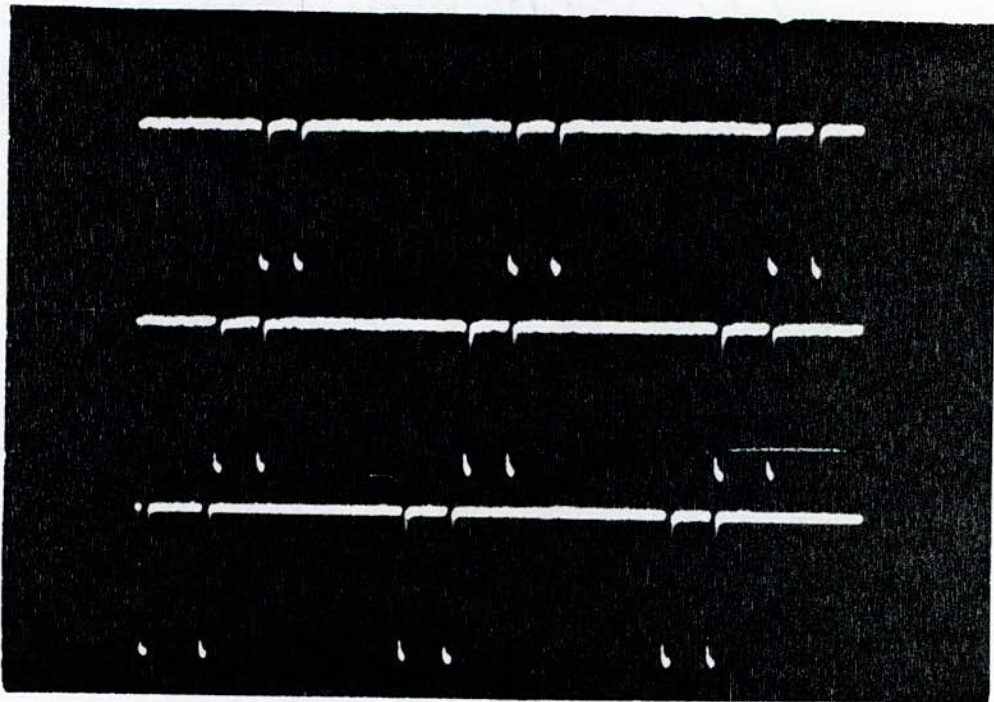


1 Circuit intégré:
4019

Figure (7): Circuit de changement du sens de rotation



(a)



(b)

Figure (8): Signaux de sortie des monostables
de la commande du pont-2-
a/sens direct de rotation
b/sens inverse de rotation

CONCLUSION

Les capteurs de position, réalisés dans ce présent travail, ont révélé leurs performances pour l'entraînement à vitesse variable du moteur synchrone autopiloté.

En effet, les impulsions obtenues à la sortie du circuit de traitement de l'information sont synchrones avec la vitesse de rotation de la machine; ce qui écarte tout risque de décrochage et asservit la fréquence des courants d'alimentation à la vitesse de rotation.

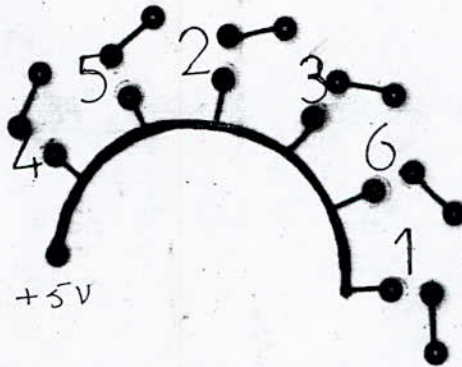
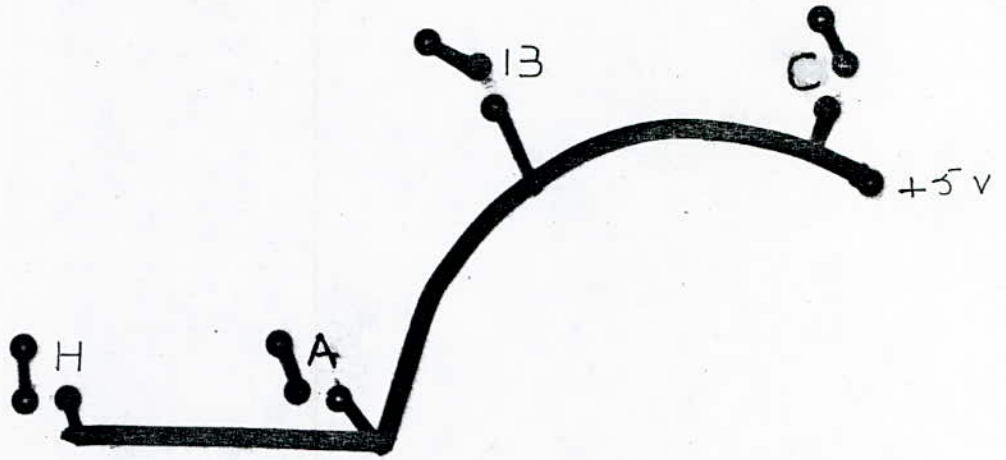
De plus, pour tout changement du sens des signaux, on inverse le sens de rotation. Ainsi, sans modifier la partie puissance, on peut obtenir le fonctionnement dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse.

Equipé d'une horloge, le second capteur permet, en outre, la commande du couple moteur à partir d'un ajustement approprié de l'angle ψ .

L'autopilotage analogique, ainsi obtenu, quelque soient ses performances reste limité en ce qui concerne la haute précision et la fiabilité.

Le développement des microprocesseurs permet de concevoir un autopilotage entièrement numérique, ce qui peut faire l'objet des futures études sur la machine synchrone.

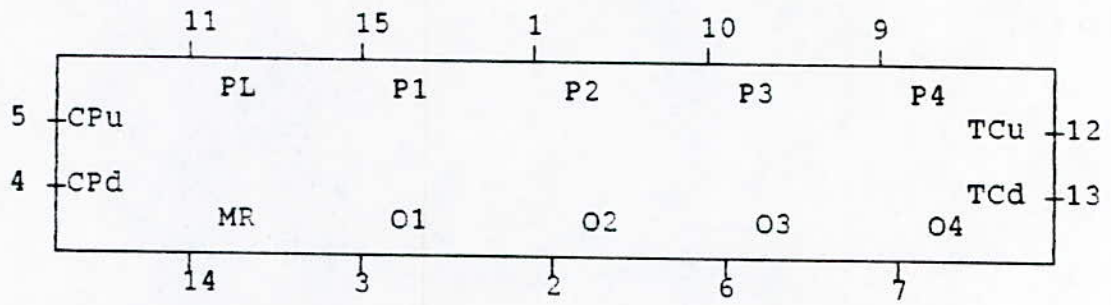
Annexe.1:



- Tension maximale (inverse) :30 V
- Courant inverse :3 mA
- Puissance maximale dissipée :30 mW
- Surface sensible :0.01 cm

Cartes imprimées et caractéristiques
des photodiodes

Annexe.2:



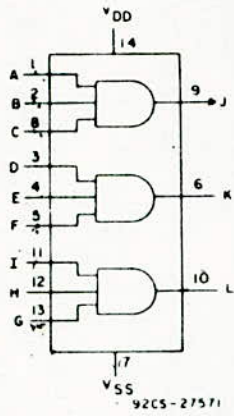
- 8 Vss ,16 Vdd
- PL Parallel load input (active L)
- P1 to P4 Parallel data inputs
- CPU Count-up clock pulse input (L to H, edge-triggered)
- CPd Count-down clock pulse input (L to H, edge-triggered)
- MR Master reset input (asynchronous)
- TCu Buffered terminal count-up (carry), output (active L)
- TCd Buffered terminal count-down (borrow), output (active L)
- O1 to O4 Buffered counters output

Table de vérité

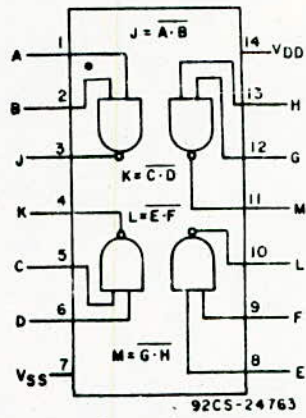
| MR | PL | CPu | CPd | Mode |
|----|----|-----|-----|------------------|
| H | — | — | — | Reset asynchrone |
| L | L | H | H | Parallel load |
| L | H | | H | No change |
| L | H | | H | Count-up |
| L | H | H | | Count-down |

Le compteur 40193

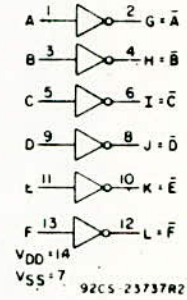
Annexe 3 :



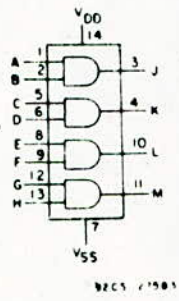
Triple 3-Input AND Gate
CD4073B (File No. 806)



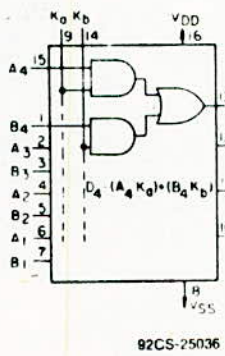
Quad 2-Input NAND Gate
CD4011A (File No. 946)
CD4011B (File No. 986)
CD4011UB (File No. 947)



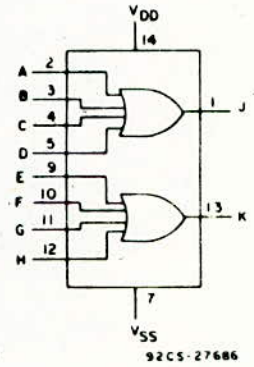
Hex Inverter
CD4069UB (File No. 804)



Quad 2-Input AND Gate
CD4081B (File No. 806)



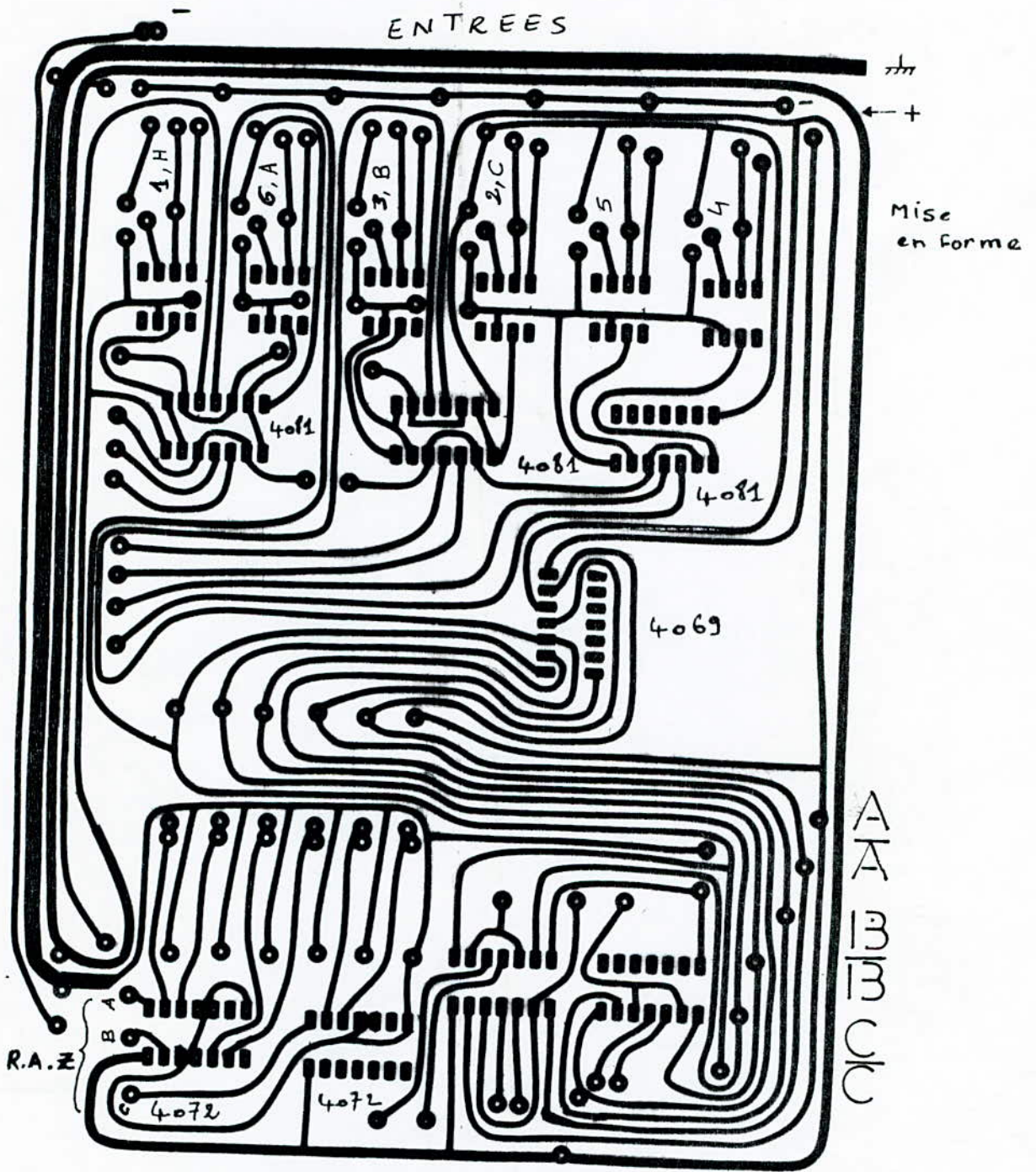
Quad AND/OR Select Gate
CD4019A (File No. 923)
CD4019B (File No. 1045)



Dual 4-Input OR Gate
CD4072B (File No. 807)

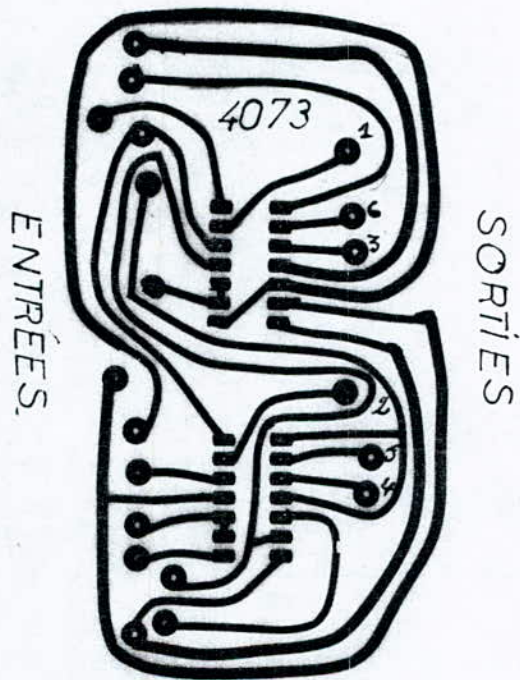
Schémas des fonctions logiques
utilisées (circuits intégrés C MOS)
Serie 4000

Annexe 4 :



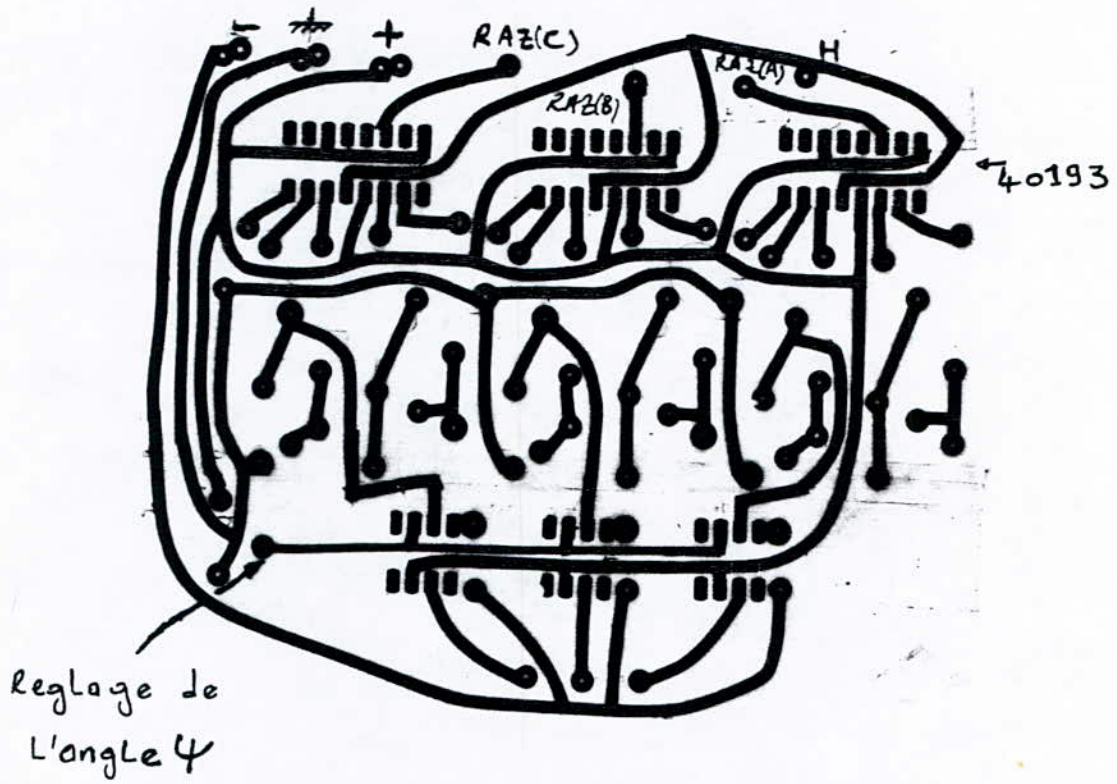
Carte imprimée comprenant les circuits
- De mise en forme
- Du selectionneur-1-
- Des R.A.Z

Annexe.5 :

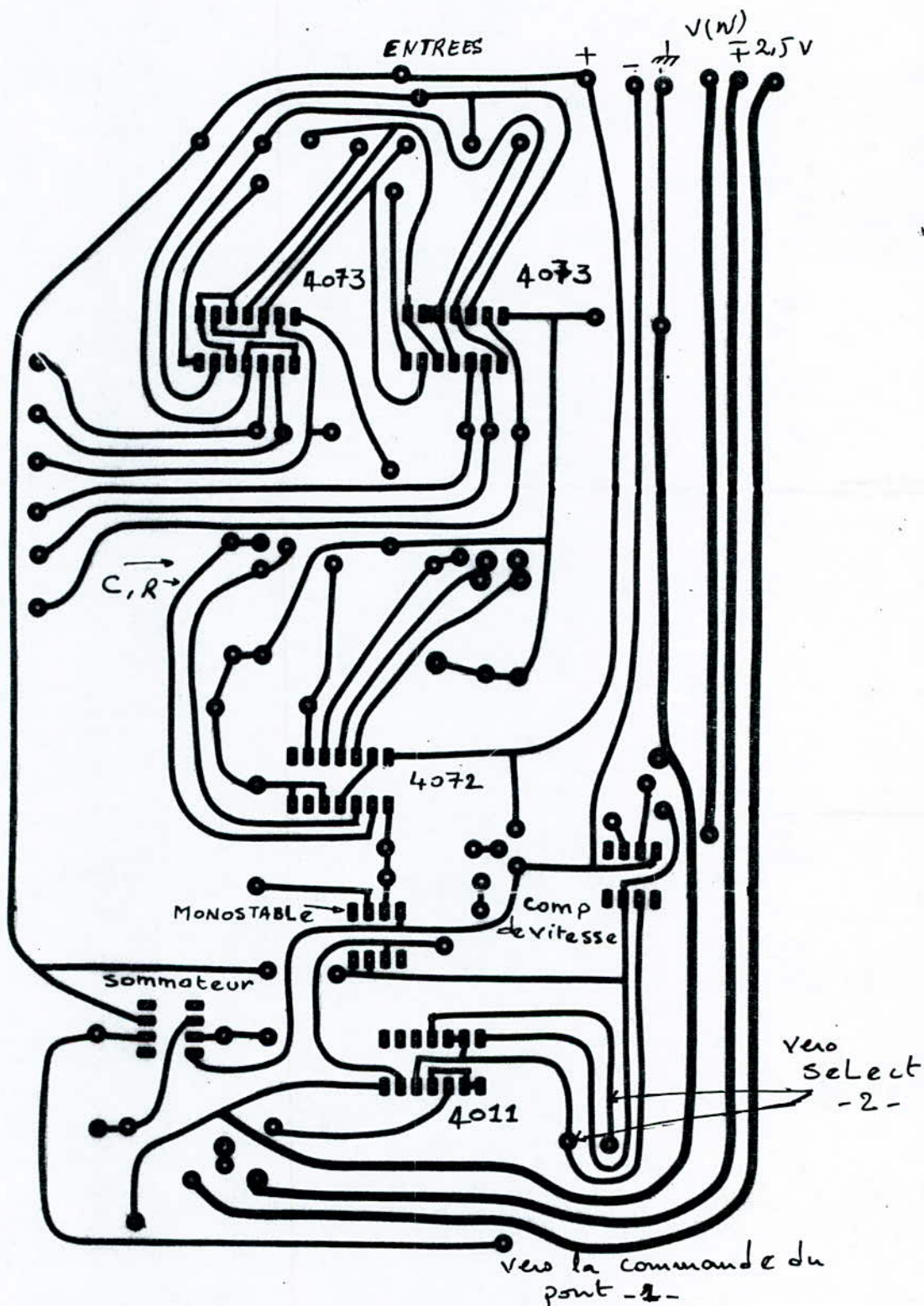


Carte imprimée de la mise en ordre

Annexe.6:

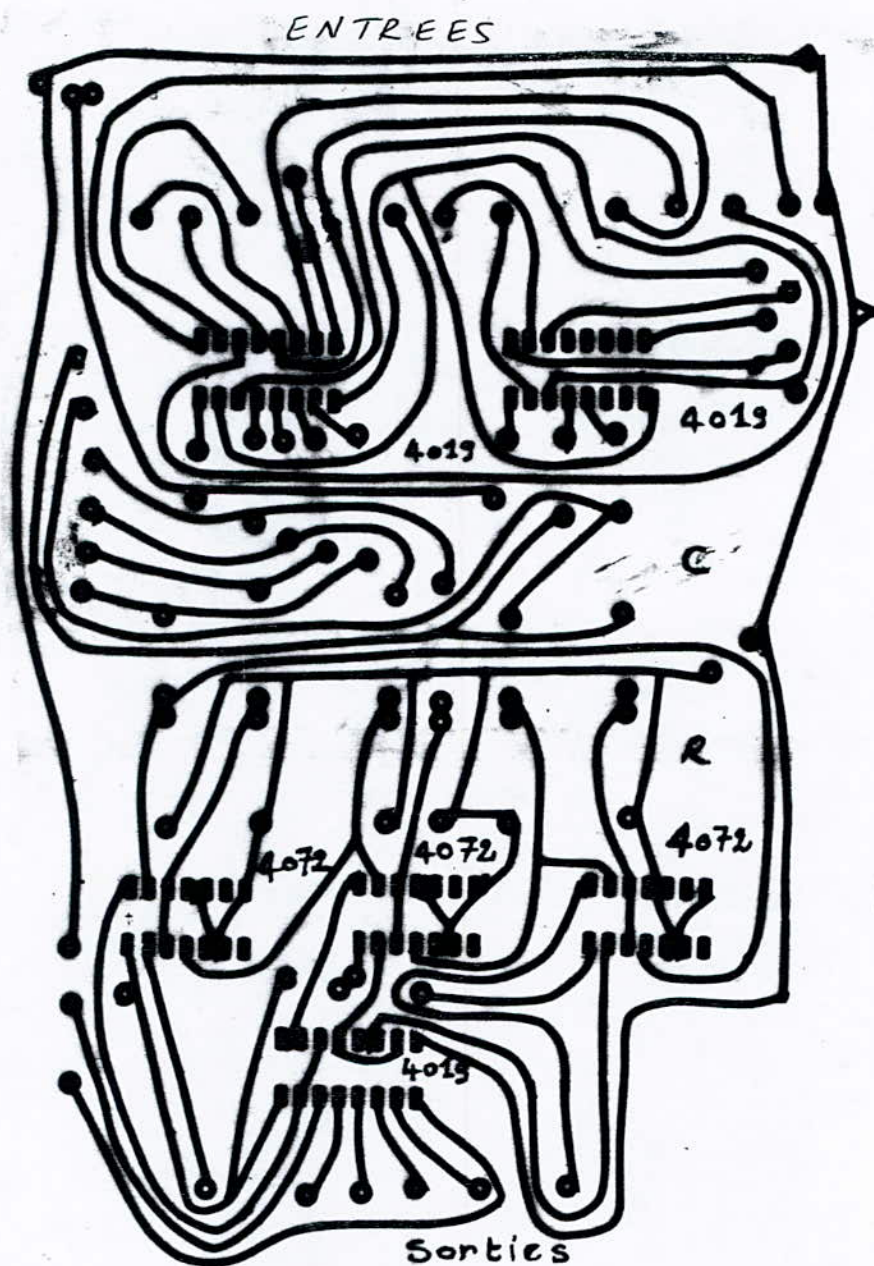


- Carte imprimée comprenant les circuits
- Des trois C.N.A.
 - De réglage de l'angle .

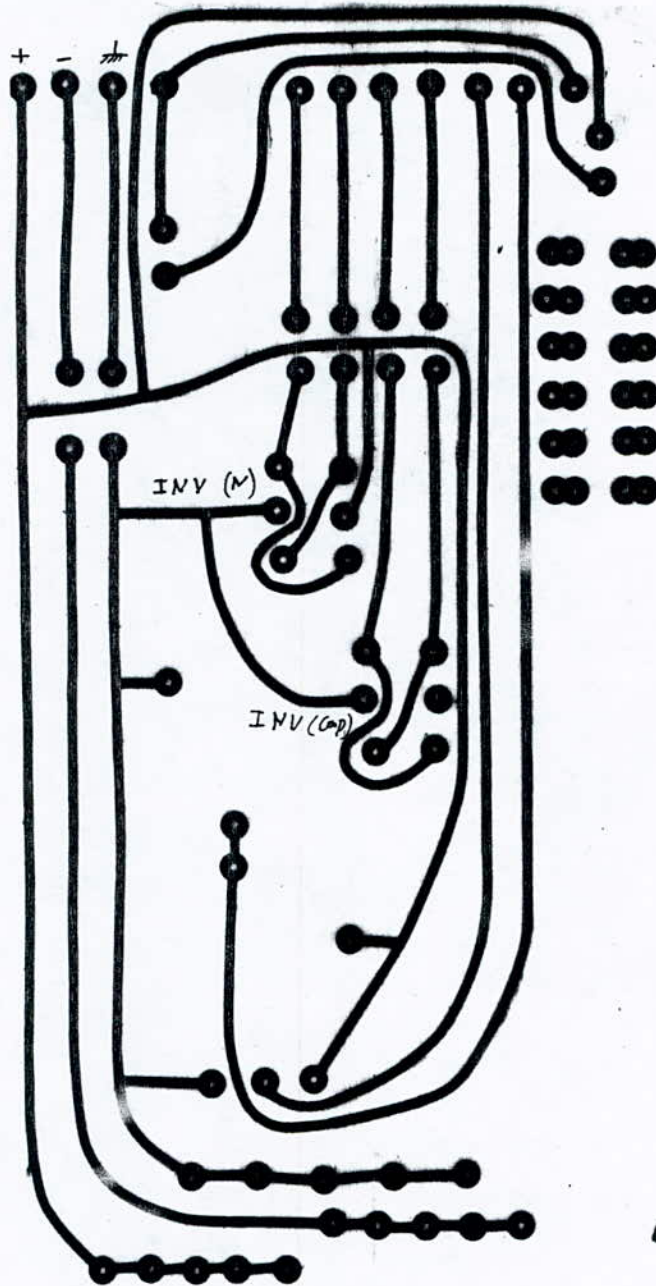


Carte imprimée comprenant le circuit de la commutation forcée

Annexe.8:



Carte imprimée comprenant les circuits du
- Selectionneur-2-, Differentiateurs
- Dédoubleur, Commande du sens de rotation



Carte imprimée de l'arrivée générale

- L'inverseur de commande du sens de rotation
- L'inverseur de commande du selectionneur-1-

*****BIBLIOGRAPHIE*****

- 1/Commande électronique des moteurs à courant alternatif.
A : R CHAUPRADE et F.MILSANT
Ed: EYROLLES-1980-
- 2/De la logique cablée aux microprocesseurs.Tomes 1 et 2
A :R.LE CORVEC ,J.M.Bernard
Ed:EYROLLES-1982-
- 3/La conversion analogique -numérique,numérique-analogique
A :B.LORIFERME
Ed:Compagnie française d'éditions -1976-
- 4/1300 schémas et circuits électroniques
A :R.BOURGERON
Ed:Editions radio
- 5/Thèse de magister:"Etude par simulation numérique du
fonctionnement d'une M.S.A".
A :L.NEZLI
Ed:E.N.P.A-1986-
- 6/Electronique de puissance
A :G.SEGIER
Ed:DUNOD -1979-
- 7/These "Projet de fin d'étude": "Contribution à l'étude et à
la réalisation d'une M.S.A"
A :A ABED et A BOUGARA

