

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

19/87

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

RESC

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

Realisation et Mesures
des caracteristiques des etages
d'un spectrometre R. M. N à impulsions

Proposé Par :

Etudié par :

Dirigé par :

Mr. R. ZERGUI

A. SEKKAI

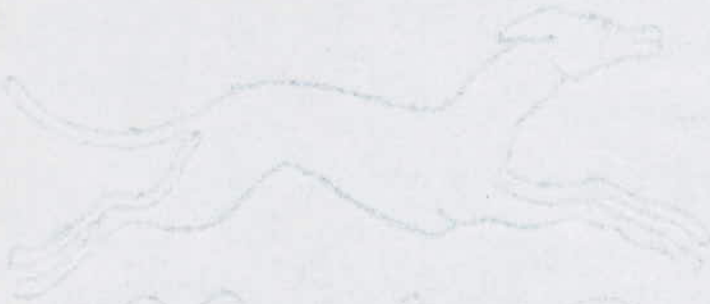
R. ZERGUI

K. MOKDAD

PROMOTION : Janvier 1987



سبحانك لا علم لنا الا ما علمتنا
لانك انت العليم الحكيم
هو الله العظيم



L. H. B.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Messieurs RAMESH PUVVADA et RACHID ZERGUI de l'aide apportée dans notre travail .

Que toutes les personnes qui ^{ont} contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet trouvent ici l'expression de nos vives remerciements .

Nos remerciements vont également à tous les professeurs de L'ENP ayant contribué à notre formation.

Nous tenons à remercier vivement et d'une manière particulière messieurs Mohamed GUETTACH et Abderrahmane DERUCHE A T S de la salle de tirage de L'institut de Physique de L'USTHB pour l'aide précieuse qu'ils nous ont apporté afin que le polycopé soit mis à jour .

PREAMBULE

Les premières expériences sur le phénomène de magnétisme nucléaire ont été faites en 1945. Au cours de cette année, deux physiciens le professeur Felix Bloch de l'université de Stanford et le professeur Edward Purcel de l'université de Harvard avaient obtenus le premier signal de résonance magnétique nucléaire.

La résonance magnétique nucléaire ou RMN est un phénomène physique produit par les noyaux de certains atomes: l'hydrogène, le carbone 13, le sodium 23, le phosphore 31.....

D'abord utilisée comme technique d'analyse chimique de substances purifiées, la RMN est appliquée depuis une dizaine d'années à l'imagerie médicale.

Elle fournit, sans aucun risque pour le patient des images de grande qualité, apportant une aide précieuse au diagnostic, en particulier en neurologie.

En effet l'imagerie par résonance magnétique nucléaire permet de distinguer entre eux des tissus mous non différenciés par d'autres méthodes telle la radiographie; de plus la spectroscopie de la RMN commence à être utilisée pour suivre dans le corps humain le devenir de certains éléments chimiques tels que le phosphore et le sodium.

SOMMAIRE

PREAMBULE

CHAPITRE 1: INTRODUCTION A LA RESONANCE MAGNETIQUE NUCLEAIRE

- 1) Rappels de physique atomique
 - a) Structure de l'atome Page-1-1-
 - b) Le rapport gyromagnétique Page-1-1-
 - c) Quantification spatiale
 - 1-c) Le nombre quantique magnétique Page-1-1-
 - 2-c) Le nombre quantique de spin Page-1-1-
- 2) Principe de la spectroscopie de la RMN Page-1-1-
- 3) Détection des signaux de la RMN
 - a) Expérience de Purcel Page-1-3-
 - b) Expérience de Bloch Page-1-3-
 - 1-b) Equation de Bloch Page-1-3-
- 4) Le phénomène de précession Page-1-4-
 - a) Précession de Larmor Page-1-5-
- 5) Energie d'interaction entre le moment magnétique M et le champ externe H_0 Page-1-5-
 - a) Distribution de Boltzman Page-1-7-
- 6) Processus de relaxation Page-1-7-
 - a) Mesure de la composante transverse M_x Page-1-8-
 - b) Précession libre après une impulsion radiofréquence Page-1-8-

CHAPITRE 2: LE SPECTROMETRE RMN A IMPULSION

- 1) Constitution du spectrometre RMN à impulsion Page-2-1-
 - a) L'instrumentation RMN Page-2-1-
 - b) Principe de fonctionnement général Page-2-2-
- 2) L'aimant
 - a) Aimant permanent Page-2-2-
 - b) L'électroaimant Page-2-2-
 - c) Aimant supraconducteur Page-2-2-
- 3) Le programmeur d'impulsion Page-2-3-
- 4) L'émetteur Page-2-3-
- 5) La bobine d'excitation Page-2-3-
- 6) Le récepteur Page-2-3-
- 7) Le système d'acquisition de donnée et l'ordinateur Page-2-3-

CHAPITRE 3: ETUDE ET REALISATION DU SPECTROMETRE RMN
 A IMPULSION

A) LE PROGRAMMEUR D'IMPULSION

- a) Rôle Page-3-1-
- b) Constitution du programmeur d'impulsion Page-3-1-
- c) Schéma synoptique Page-3-1-
- d) Principe de fonctionnement général Page-3-2-
- e) Chronogramme des signaux Page-3-3-

ETUDE DES DIFFERENTS CIRCUITS INTEGRES

- 1- La source de déclenchement
 - a) Présentation du NE555 Page-3-4-
 - b) Table de vérité de la bascule RS Page-3-4-
 - c) Principe de Fonctionnement Page-3-6-
 - d) Forme des signaux Page-3-7-
 - e) Période du signal de sortie Page-3-7-
- 2) Etude du circuit intégré SN74121
 - a) Présentation du SN74121 Page-3-8-
 - b) Table de vérité Page-3-8-
 - c) Principe de fonctionnement Page-3-9-
- 3) Etude du circuit intégré SN7402
 - a) Présentation et mode de fonctionnement Page-3-10-
- 4) Réalisation Pratique
 - a) Le circuit imprimé Page-3-11-
 - b) Implantation des composants Page-3-11-
 - c) Le boîtier Page-3-11-
 - e) Résultats expérimentaux Page-3-12-

B) LE SYSTEME EMETTEUR

- I) Introduction
- II) Etude théorique
 - 1) Schéma bloc Page-3-13-
 - 2) Principe de fonctionnement Page-3-14-
 - 3) Etude de l'oscillateur HF Page-3-14-
 - 4) Circuit de commande Page-3-18-
 - 5) Amplificateur de puissance Page-3-18-
 - 6) Résultats obtenus Page-3-21-
 - 7) Réalisation pratique Page-3-22-

C) LA BOBINE D'EXCITATION

- 1) Schéma électrique Page-3-23-
- 2) Principe de fonctionnement Page-3-23-

D) LE SYSTEME RECEPTEUR

- I) Introduction
- II) Système recepneur
 - 1) Rôle Page-3-24-
 - 2) Schéma de principe Page-3-24-
 - 3) Mesures
 - a) Préampli Page-3-24-
 - b) La bande passante Page-3-24-
 - c) L'ampli Page-3-25-

Chapitre 4: Applications

- a) Mesure du temps de relaxation T_1
- b) Application en biomedical.

CHAPITRE 1

Introduction a la RMN

1) RAPPELS DE PHYSIQUE ATOMIQUE:

a) STRUCTURE DE L'ATOME:

Si Z s'appelle le numéro atomique, et A désigne le nombre total de nucléons du noyau (A est aussi le nombre de masse), l'atome de structure X^A_Z renferme: Z électrons, Z protons, et $A-Z$ neutrons.

Les protons sont porteurs de charges positives, tandis que les neutrons sont de charges nulles.

Les propriétés chimiques d'un atome ne dépendent que du nombre Z de ses électrons.

b) LE RAPPORT GYROMAGNETIQUE:

L'électron anime d'un mouvement de rotation sur lui-même à la manière d'une toupie, possède un moment cinétique $\vec{\sigma}$ propre, et un moment magnétique $\vec{\mu}$.

On définit le rapport gyromagnétique comme le rapport du moment magnétique $\vec{\mu}$ sur le moment cinétique $\vec{\sigma}$: $\gamma = \vec{\mu}/\vec{\sigma}$.

Le rapport gyromagnétique γ est une constante de proportionnalité entre $\vec{\mu}$ et $\vec{\sigma}$.

c) QUANTIFICATION SPATIALE:

La quantification des moments cinétiques entraîne celles des moments magnétiques et réciproquement la quantification des moments magnétiques entraîne celles des moments cinétiques.

1-c) LE NOMBRE QUANTIQUE MAGNETIQUE:

En mécanique quantique, les diverses valeurs observables pour la composante $\vec{\sigma}_z$ du moment cinétique sur un axe diffèrent entre elles de la quantité \hbar ou d'un multiple de \hbar (\hbar constante de Planck modifiée).

Si une valeur est observable, la valeur opposée l'est aussi: on déduit que les valeurs observables de $\vec{\sigma}_z$ sont données par: $\vec{\sigma}_z = m_x \hbar$ où m_x est un nombre sans dimension, appelé le nombre quantique magnétique: il peut être entier, demi-entier, positif, négatif ou nul.

2-c) LE NOMBRE QUANTIQUE DE SPIN:

Pour chaque système atomique particulier, il existe une valeur maximum de la composante $\vec{\sigma}_z$, c'est à dire une valeur maximum du nombre quantique magnétique m_x .

On désigne par I le nombre quantique de spin, la valeur maximale de m_x .

La connaissance du nombre quantique de spin I , qui est une caractéristique du noyau suffit à déterminer complètement toutes les valeurs observables de la composante $\vec{\sigma}_z$ de son moment cinétique.

Le nombre de valeurs observables de la composante $\vec{\sigma}_z$ du moment cinétique est égal à $2I+1$; inversement la connaissance du nombre de valeurs de $\vec{\sigma}_z$ permet de connaître le nombre quantique de moment cinétique I .

2) PRINCIPE DE LA SPECTROSCOPIE DE LA RMN:

Un noyau ayant un moment magnétique, placé dans un champ magnétique uniforme prend un nombre d'orientations quantifiées par rapport à ce champ.

Chaque orientation nucléaire correspond à un niveau d'énergie: le plus petit niveau correspond à l'orientation ayant le moment magnétique le plus près du champ.

La spectroscopie de la RMN consiste à induire des transitions entre ces niveaux d'énergies (énergie de séparation ΔE) à l'aide de champ magnétique fluctuant à la fréquence correcte de résonance pour obéir à la relation de Bohr $\Delta E = h\nu$ (h constante de Planck).

Bien que le volume soit petit, un noyau magnétique donne lieu à une distribution de charges positives dans un espace limité: si en plus le noyau a un moment de spin angulaire, alors la rotation de ce noyau entraînera la rotation de cette distribution de charges et donnera lieu à un courant équivalent à cette distribution.

Ce courant ainsi obtenu produit à son tour un champ magnétique qui est parallèle à l'axe de spin et le noyau possèdera un moment magnétique $\vec{\mu}$.

L'expression de la mécanique quantique pour le moment cinétique est donnée par: $I(I+1)^{1/2} h/2\pi$.

Certains noyaux dont le nombre quantique I égal à zéro ($I=0$) ne possèdent pas des propriétés magnétiques donc pas de phénomène de RMN.

Les noyaux d'atomes dont le spin I est différent de zéro ($I \neq 0$), possèdent des propriétés magnétiques qui sont:

* Si le nombre de masse A du noyau est impaire, I est demi-entier.

* Si le numéro atomique Z du noyau, et le nombre de masse A sont pairs, I est nul ($I=0$).

* Si A est pair et Z impair, I est entier.

3) DETECTION DES SIGNAUX DE LA RMN:

a) EXPERIENCE DE PURCEL:

Une substance contenant des noyaux pourvus de magnétismes nucléaires (un corps hydrogéné par exemple) est placée dans un champ magnétique intense, est irradiée de façon continue par une onde électromagnétique dont la fréquence varie lentement. Edward Purcel observait alors que pour une fréquence particulière appelée fréquence de résonance, une partie de l'énergie transportée par l'onde électromagnétique est absorbée par le milieu. En fait la valeur de cette fréquence de résonance est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique appliqué, mais dépend aussi de l'environnement chimique dans lequel sont placés les atomes ayant un magnétisme nucléaire. Le phénomène d'absorption résonante de l'énergie incidente a donné naissance à une méthode d'analyse non destructive.

b) EXPERIENCE DE BLOCH:

L'énergie transmise au milieu que l'on doit étudier par l'absorption résonante de l'onde électromagnétique produit des perturbations: le retour à l'état d'équilibre s'accompagne de la réémission d'une partie de cette énergie. Ce phénomène fut mis en évidence par Felix Bloch qui au lieu d'utiliser une irradiation continue, en envoyait sur l'échantillon de substances des impulsions successives d'ondes électromagnétiques. Entre ces impulsions, il était possible de détecter le rayonnement réémis par le milieu.

L'amplitude du signal obtenu est proportionnelle à la densité des noyaux, les protons présents dans le milieu.

1-3) EQUATION DE BLOCH:

La rotation d'un noyau placé dans un champ magnétique uniforme, crée un moment magnétique $\vec{\mu}$; celui-ci est soumis à des forces d'interactions dont le couple résultant a pour expression:

$$\vec{\Gamma} = \vec{\mu} \wedge \vec{H}_0$$

Si O est le centre de gravité du noyau pris comme origine, le théorème du moment cinétique s'écrit:

$$\vec{\Gamma} = \frac{d\vec{\sigma}}{dt} = \vec{\mu} \wedge \vec{H}_0 \quad \text{or } \gamma = \frac{\mu}{\sigma} \text{ d'où } \frac{d(\vec{\mu})}{dt} = \gamma \vec{\mu} \wedge \vec{H}_0 \quad (1)$$

En utilisant une propriété du produit vectoriel, l'équation (1) devient:

$$\frac{d\vec{\mu}}{dt} = -\gamma \vec{H}_0 \wedge \vec{\mu} \quad (2)$$

on pose : $\vec{\omega}_0 = -\gamma \vec{H}_0$

L'équation de Bloch obtenue à partir de la relation (2) s'écrit :

$$\frac{d\vec{\mu}}{dt} = \vec{\omega}_0 \wedge \vec{\mu} \quad (3)$$

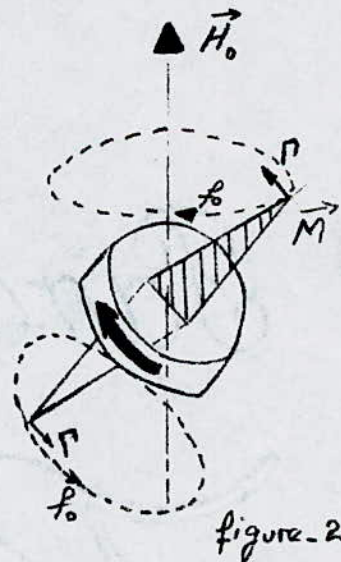
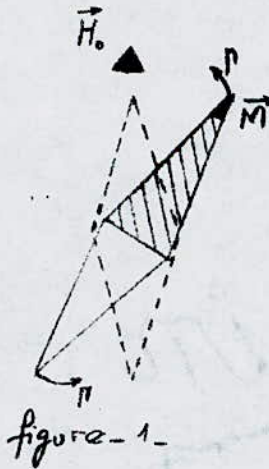
En général, nous avons un grand nombre de noyaux. Soit \vec{M} , le vecteur aimantation résultant de la somme des moments magnétiques de tous les noyaux par unité de volume. L'équation (3) s'écrit :

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \vec{\omega}_0 \wedge \vec{M}$$

4) LE PHENOMENE DE PRECESSION :

Dans le cas d'un noyau isolé, suit les lois de la mécanique quantique, un échantillon contenant un grand nombre de protons est placé dans un champ magnétique intense, a un comportement d'ensemble qui autorise l'utilisation des lois de la mécanique classique.

Cet échantillon peut être schématisé comme une toupie (équivalent du spin nucléaire) figure-2-, portant le long de son axe de rotation un petit aimant (équivalent des moments magnétiques) figure-2- .



A l'équilibre, la toupie tourne autour de son axe qui est parallèle au champ magnétique appliqué, initialement vertical. Si nous appliquons par une impulsion électromagnétique, un second champ magnétique perpendiculaire au précédent, la toupie bascule et se comporte alors comme un gyroscope: elle tourne sur elle-même, mais simultanément son axe de rotation tourne autour de la vertical avec la fréquence f_0 de Larmor: c'est le phénomène de précession.

L'angle de basculement de la toupie est de plus proportionnel à la durée de l'impulsion électromagnétique provoquant le basculement.

Quand cette impulsion cesse, la toupie se redresse lentement tout en continuant son mouvement de précession.

a) PRECESSION DE LARMOR:

Le champ magnétique \vec{H}_0 fait subir à l'aimantation totale \vec{M} , un mouvement de rotation défini par le vecteur $\vec{\omega}_0 = -\gamma \vec{H}_0$, or $\omega_0 = 2\pi f_0$. f_0 est appelé fréquence de Larmor.

b) ENERGIE D'INTERACTION ENTRE LE MOMENT MAGNETIQUE \vec{M} ET LE CHAMP MAGNETIQUE EXTERNE \vec{H}_0 :

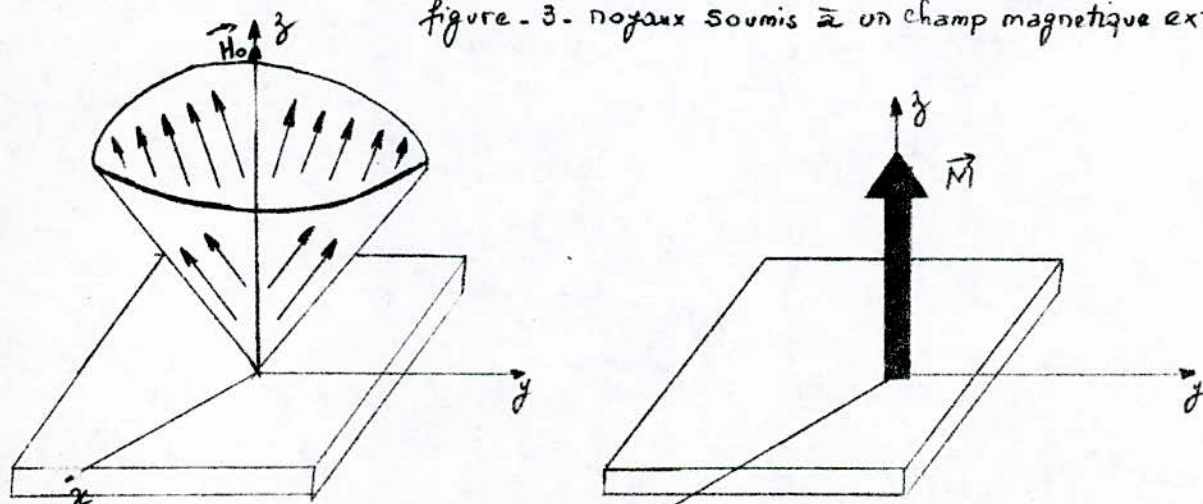
Chaque échantillon étudié contient un grand nombre de noyaux: placé dans un champ magnétique externe, ces noyaux vont avoir des propriétés magnétiques similaires à celles des protons et pourront occuper des états d'énergie stables et bas, ou des états excités correspondant à une énergie plus élevée.

La différence d'énergie entre les deux états est tellement petite que le nombre de noyaux occupant chacun de ces états est presque identique.

Le signal RMN dépend fortement de la différence des populations entre les deux états.

Un ensemble de noyaux précessionnant autour de la direction \vec{H}_0 (Figure-3-), est équivalent à un moment magnétique \vec{M} , résultant de la somme vectorielle de toutes les composantes individuelles de chaque noyau et ayant la même direction que ce champ \vec{H}_0 .

Figure - 3. noyaux soumis à un champ magnétique externe

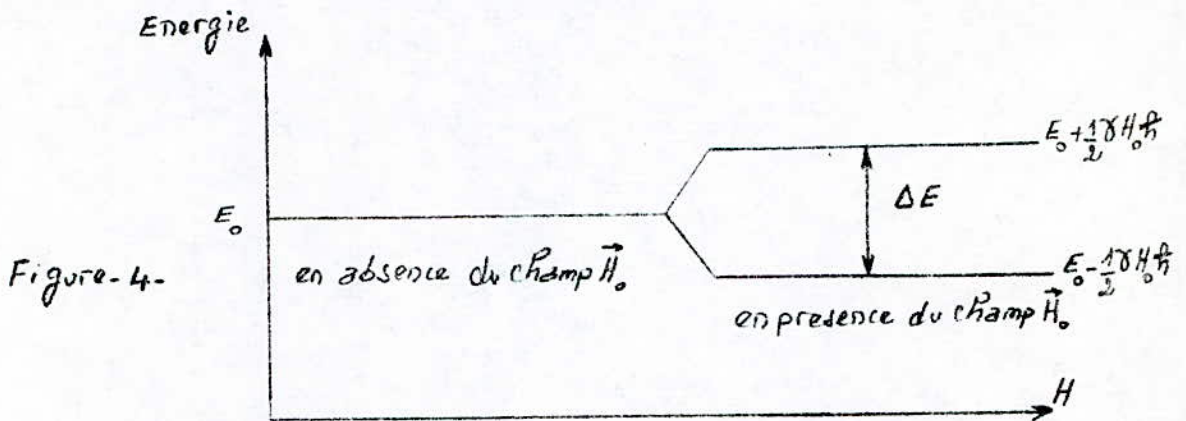


(a) à l'équilibre un excès léger de spins précessionnant autour de la direction du champ externe \vec{H}_0

(b) Ceci est équivalent à un moment magnétique stationnaire \vec{M} dirigé le long de \vec{H}_0

L'énergie d'un système ayant un moment magnétique \vec{M} dans un champ magnétique H_0 a pour expression: $W = -\vec{M} \cdot \vec{H}_0 + E_0$, ou E_0 est l'énergie initiale du noyau en absence de \vec{H}_0 ; or $M = \gamma I$ d'où $W = E_0 - \gamma H_0 I_z$.
 En présence du champ magnétique H_0 , l'aimantation \vec{M} est dirigée suivant z ; soit I_z la projection de I sur \vec{H}_0 . D'après la mécanique quantique I_z peut prendre $2I+1$ valeurs possibles: $-IK < I_z < IK$. L'énergie W peut prendre les valeurs suivantes: $E_0 - \gamma H_0 IK$
 $E_0 - \gamma H_0 (I-1)K$
 \vdots
 $E_0 + \gamma H_0 IK$

Pour simplifier les calculs on prendra comme exemple le noyau d'hydrogène dont le spin $I = \pm 1/2$.



$E_0 - 1/2 \gamma H_0 \hbar$ correspond au niveau d'énergie le plus stable.

$E_0 + 1/2 \gamma H_0 \hbar$ " " " " " moins stable.

La différence d'énergie entre les deux niveaux s'écrit:

$$\Delta E = E_0 + 1/2 \gamma H_0 \hbar - (E_0 - 1/2 \gamma H_0 \hbar)$$

$$\text{d'où } \Delta E = \frac{\hbar}{2\pi} \gamma H_0 \quad (\hbar = h/2\pi)$$

Cette différence d'énergie correspond au travail qu'il faut fournir à un proton pour le retourner dans un champ magnétique. Si le proton absorbe un quantum d'énergie $\Delta E = h\nu$, la condition de résonance sera réalisée si on a:

$$\Delta E = \Delta E^* = \frac{\hbar}{2\pi} \gamma H_0 = h\nu_0 \quad \text{d'où } \nu_0 = \frac{\gamma}{2\pi} H_0$$

ν_0 : fréquence propre de résonance

a) DISTRIBUTION DE BOLTZMAN:

Un système de noyau ayant deux niveaux d'énergies discrets, présente une probabilité de le trouver dans le niveau bas ou dans le niveau haut; si nous appelons le nombre de noyaux dans le niveau haut N_u , et le nombre de noyaux dans le niveau bas N_l (qui est le plus stable), alors la distribution entre ces deux niveaux est donnée par la relation:

$$N_u/N_l = \exp(\Delta E/KT) \quad (1) \quad \text{où } \Delta E = \frac{h}{2\pi} \gamma H_0$$

K: constante de Boltzman.

T: température absolue du réseau.

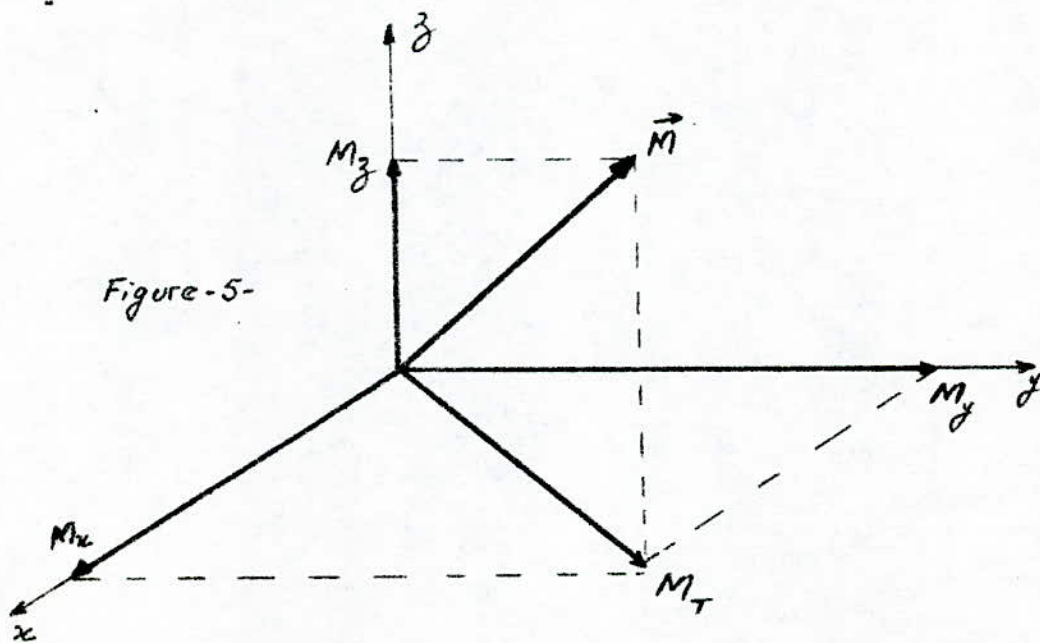
A partir de la relation (1) on peut remarquer que plus grande est la différence d'énergie, plus la population de cette différence est grande.

La différence entre ces deux niveaux d'énergie dépend de l'intensité du champ externe H_0 , alors que l'intensité du signal RMN dépend de la population de cette différence.

b) PROCESSUS DE RELAXATION:

Initialement, le moment magnétique \vec{M} est aligné avec la direction du champ magnétique H_0 . Pour l'écarter de sa position d'équilibre, on crée une excitation en appliquant une onde électromagnétique dont la fréquence est égale à la fréquence de Larmor f . Par l'intermédiaire de la bobine d'excitation, un champ magnétique H_1 perpendiculaire à H_0 est créé tournant lui aussi à la fréquence de Larmor.

Tant que dure l'impulsion électromagnétique, le moment magnétique \vec{M} continue à s'écarter de la direction du champ H_0 ; la valeur de la composante M_z diminue, tandis que celle de sa composante M_T dans le plan transverse augmente (figure-5).



Cette composante M_T atteindra sa valeur maximale pour un basculement de $\pi/2$. L'impulsion électromagnétique dont la durée provoque un tel basculement est dite impulsion $\pi/2$.

Une impulsion π , ou impulsion d'inversion aura une durée double de la précédente et amènera le moment magnétique \vec{M} dans une direction opposée de sa direction d'équilibre.

Quand l'impulsion électromagnétique d'excitation est supprimée, les noyaux qui avaient basculés vont revenir dans leur position d'origine, c'est à dire que leur moment magnétique va de nouveau s'aligner avec la direction du champ magnétique H_0 . Ce retour à la normale va s'accompagner d'une faible émission d'énergie à la fréquence propre de précession. Mais toute l'énergie qui avait été absorbée par la matière lors du processus d'excitation n'est pas restituée en une seule fois, c'est à dire que tous les noyaux ne rebasculent pas ensemble: on observe une relaxation: ceci est dû à deux processus: d'une part quand un noyau bascule, l'énergie qu'il émet peut être absorbée immédiatement par un noyau voisin, qui bascule en sens inverse: c'est la relaxation spin-spin, caractérisée par une constante de temps T_2 . D'autre part l'énergie libérée par un noyau revenant en position normale peut être absorbée par le réseau dans lequel le noyau se trouve lié, provoquant une excitation de ce réseau qui retarde l'émission de cette énergie: c'est la relaxation spin réseau caractérisée par une constante de temps T_1 .

a) MESURE DE LA VARIATION DE LA COMPOSANTE TRANSVERSE M_T :

Pour mesurer la variation de la composante transverse M_T , on utilise le fait que sa rotation à la fréquence f_0 génère aux bornes de la bobine d'axe perpendiculaire au champ H_0 un signal électrique sinusoïdal d'amplitude mesurable.

c'est d'ailleurs cette même bobine appelée aussi antenne, qui sert à l'émission de l'onde électromagnétique provoquant le basculement de l'aimantation \vec{M} .

L'amplitude du signal électrique sinusoïdal est proportionnelle à la valeur de la composante transverse: elle décroît au cours du temps suivant une loi exponentielle caractérisée par le temps de relaxation T_2 .

A titre indicatif, la théorie de Bloch pour un liquide donne:

$$dM_z/dt = -(M_z - M) / T_1$$

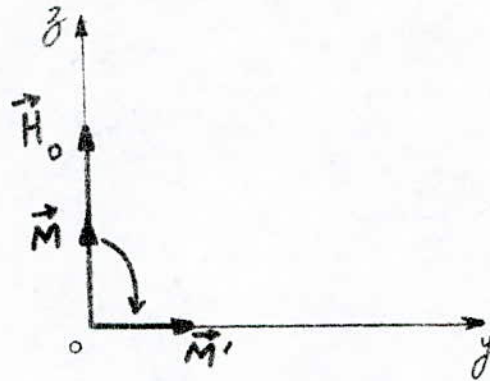
$$dM_x/dt = -M_x / T_2$$

$$dM_y/dt = -M_y / T_2$$

b) PRECESSION LIBRE APRES UNE IMPULSION RADIFREQUENCE:

Lors du processus d'excitation, le champ magnétique H_1 dirigé suivant l'axe ox , tourne autour de H_0 à la vitesse $\vec{\omega} = -\gamma H_1$. Dans le plan yo_z , l'aimantation \vec{M} précessionnant autour du champ magnétique H_1 , tourne avec une vitesse angulaire $\vec{\omega} = -\gamma H_1$. Si l'on désire que l'aimantation \vec{M} bascule d'un angle égal à $\pi/2$ (figure-6-) dans le plan yo_z , on applique une impulsion d'excitation telle que: $\omega_1 t_1 = \gamma H_1 t_1 = \pi/2$ d'où $t_1 = \frac{\pi}{2\gamma} \cdot \frac{1}{H_1}$

figure - 6 -



A la fin de l'impulsion, le champ magnétique \vec{H}_1 est coupé et l'aimantation \vec{M} tend vers sa position d'équilibre sur l'axe oz suivant un mouvement de précession à la fréquence: $\nu_p = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\gamma H_1}{2\pi}$. cette précession libre de l'aimantation est décrite par les équations de Bloch avec les conditions initiales:

$$\begin{aligned} M_z &= M_x = 0 \\ M_y &= M \end{aligned}$$

les solutions des équations de Bloch (Chapitre 1 paragraphe 6-a) sont:

$$M_z(t) = M(1 - \exp[-t/T_1])$$

$$M_T(t) = M \exp(-t/T_2) \cos(\omega t)$$

Dans le cas où l'aimantation \vec{M} bascule d'un angle égal à π , la durée de l'impulsion provoquant ce basculement sera le double du temps t_1 , ce qui donne:

$$\omega_1 t_2 = \gamma H_1 t_2 = \pi; \quad t_2 = \frac{\pi}{\gamma} \cdot \frac{1}{H_1} \quad \text{d'où} \quad t_2 = 2t_1$$

CHAPITRE 2

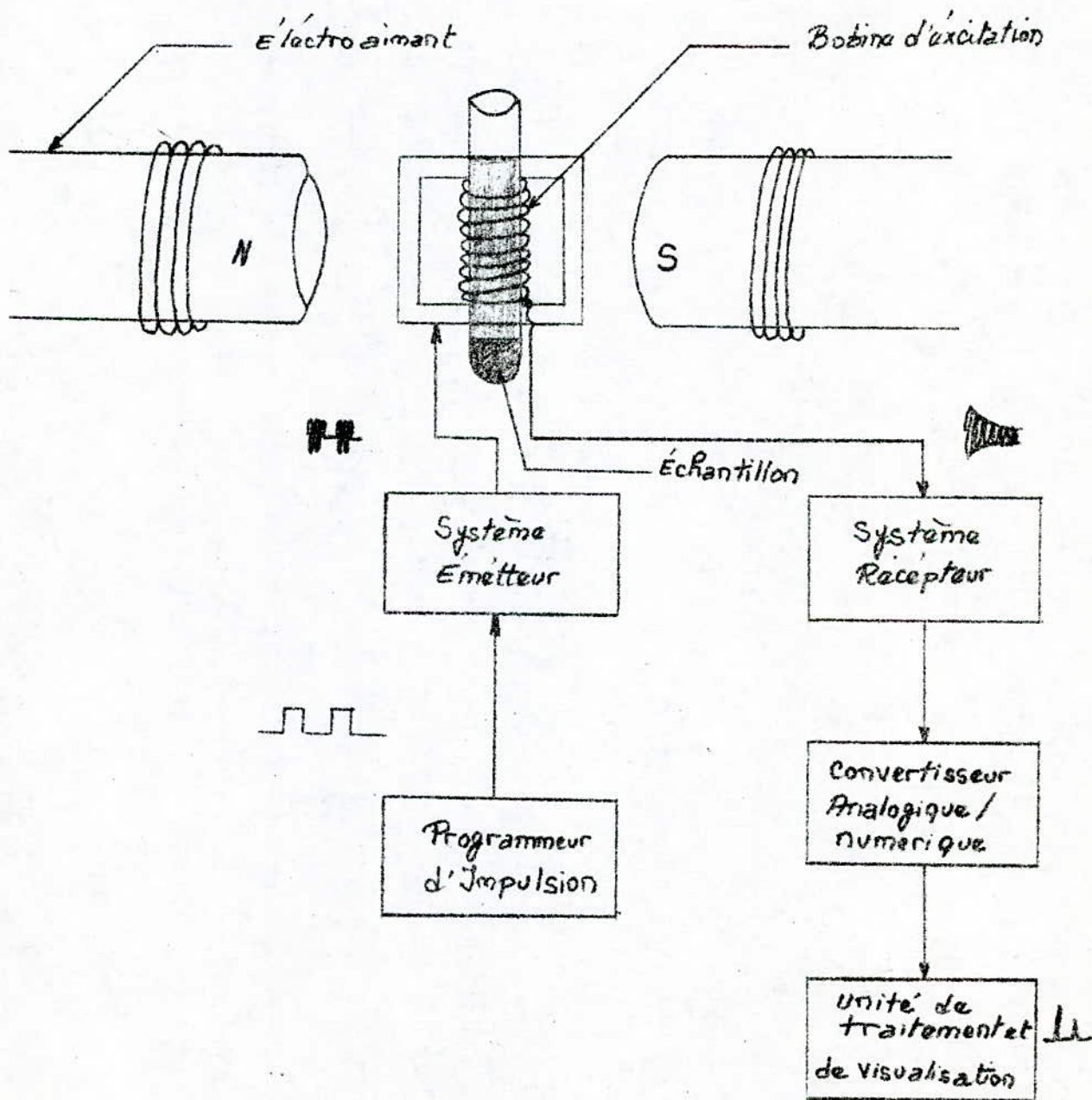
*Le spectrometre RMN
a Impulsion*

1) CONSTITUTION DU SPECTROMETRE RMN A IMPULSION:

Le spectromètre RMN à impulsion comprend:

- *Un programmeur d'impulsion.
- *Un système émetteur.
- *Une bobine d'excitation émettrice, réceptrice.
- *Un système récepteur.
- *Un électroaimant.
- *Une unité de traitement et de visualisation.

a) L'INSTRUMENTATION RMN:



5) PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT GENERAL :

Le programmeur d'impulsion génère des séquences d'impulsions qui vont commander l'oscillateur radiofréquence. L'émetteur fournit des salves d'un signal sinusoïdal radiofréquence dont la durée est commandée par le programmeur. L'échantillon à analyser est placé à l'intérieur de la bobine d'excitation; celle-ci est mise dans un électroaimant qui crée un champ magnétique H_0 ; cette même bobine sert à l'émission et à la réception des signaux radiofréquences. Durant la durée "ON" du signal radiofréquence issu de l'émetteur, la bobine d'excitation crée un champ magnétique H_1 perpendiculaire à H_0 qui polarise les noyaux de l'échantillon. Lors de la durée "OFF" le champ magnétique H_1 est coupé, la bobine recueille le signal induit par l'échantillon et le transmet au récepteur qui l'amplifie en tension. Pour notre cas, le signal RMN va être visualisé sur un oscilloscope, mais en général ce système de visualisation est remplacé par un ordinateur utilisé pour le traitement de données.

2) L'AIMANT :

Une expérience RMN implique la présence d'un champ magnétique statique à la fois stable et homogène; ce champ peut être généré de différentes manières.

a) AIMANT PERMANENT :

Il est conçu avec des alliages ayant des propriétés ferromagnétiques. Son avantage est de ne demander aucune énergie pour maintenir son champ et par conséquent aucun système de refroidissement.

Son inconvénient, est son poids et la limitation du champ qu'il peut produire (environ 0.3 Tesla).

b) L'ELECTRO AIMANT :

Il est constitué de bobines dans lesquelles un fort courant circule.

Il consomme une grande énergie et de ce fait il nécessite un système de refroidissement très efficace.

La limite pratique du champ magnétique obtenu est de 0.7 Tesla.

c) AIMANT SUPRACONDUCTEUR :

Certains alliages lorsqu'ils sont refroidis à une température voisine du zéro absolu présentent une forte diminution de la résistance électrique et deviennent des supraconducteurs. Ces alliages sont enroulés en bobines, puis placés dans un bain d'hélium liquide (-269°C ou 4K).

De fort courant peuvent circuler dans ces bobines, et un champ magnétique extrêmement stable peut être produit.

3) LE PROGRAMMEUR D'IMPULSION:

La principale fonction que doit remplir le programmeur est de générer des séquences d'impulsions réglables ($\pi/2$ & π) qui vont commander l'oscillateur radiofréquence.

4) L'EMETTEUR:

Le système émetteur commandé par le programmeur d'impulsion, génère des salves d'un signal sinusoïdal radiofréquence nécessaire à exciter les noyaux de l'échantillon à analyser.

En absence de toute impulsion du programmeur, l'oscillateur ne délivre aucun signal (durée OFF). Lors d'une impulsion d'excitation, l'oscillateur délivre un signal sinusoïdal (durée ON).

La plus importante caractéristique que doit avoir l'émetteur, est qu'il doit être de très faible bruit et très stable en amplitude et en fréquence. Sa stabilité dépend essentiellement de l'oscillateur radiofréquence.

Le rapport en tension du niveau ON sur le niveau OFF doit être le plus grand possible.

5) LA BOBINE D'EXCITATION:

La bobine d'excitation est alimentée par des salves d'un signal sinusoïdal venant de l'émetteur: lors de la durée ON celle-ci crée un champ tournant H_1 polarisant les noyaux de l'échantillon. ce champ sera coupé lors de la durée OFF. Cette bobine doit présenter une faible résistance aux impulsions hautes fréquences.

6) LE RECEPTEUR:

Le rôle du récepteur est de recueillir le signal induit par l'échantillon lors de la durée OFF.

Le signal RMN étant très faible (de quelques microvolts), il est amplifié en tension puis détecté et filtré en sortie.

Le récepteur doit être un détecteur à faible bruit des signaux haute fréquence.

7) LE SYSTEME D'ACQUISITION DE DONNÉE ET L'ORDINATEUR:

Le signal RMN, peut être analysé en ses composantes fréquentielles. Pour établir le spectre des rayonnements émis, il faut procéder à l'analyse des fréquences composant ce signal par une opération développée par Fourier analogue à la décomposition d'un son en ses harmoniques qui fournit la distribution des différentes fréquences.

Avant, que cela soit possible, le signal doit être digitalisé puis stocké dans un ordinateur.

CHAPITRE 3

*Etude et Realisation du spectometre
RMN a Impulsion*

A/ LE PROGRAMMEUR
D'IMPULSION

LE PROGRAMMEUR D'IMPULSION

a) ROLE :

Le rôle du programmeur d'impulsion est de générer des séquences d'impulsions réglables nécessaires respectivement à moduler le signal haute fréquence (HF) issu de l'oscillateur (pour $\pi/2$ et $\pi/2 \& \pi$) et aussi pour une acquisition de donnée à un convertisseur analogique/numérique (signal ENABLE).

b) CONSTITUTION DU PROGRAMMEUR D'IMPULSION :

* Une source de déclenchement (horloge) : multivibrateur astable.

* Deux monostables M1 et M1' (montés en parallèles) :

- M1 : Générateur de la première impulsion ($\pi/2$).

- M1' : Générateur du signal "ENABLE".

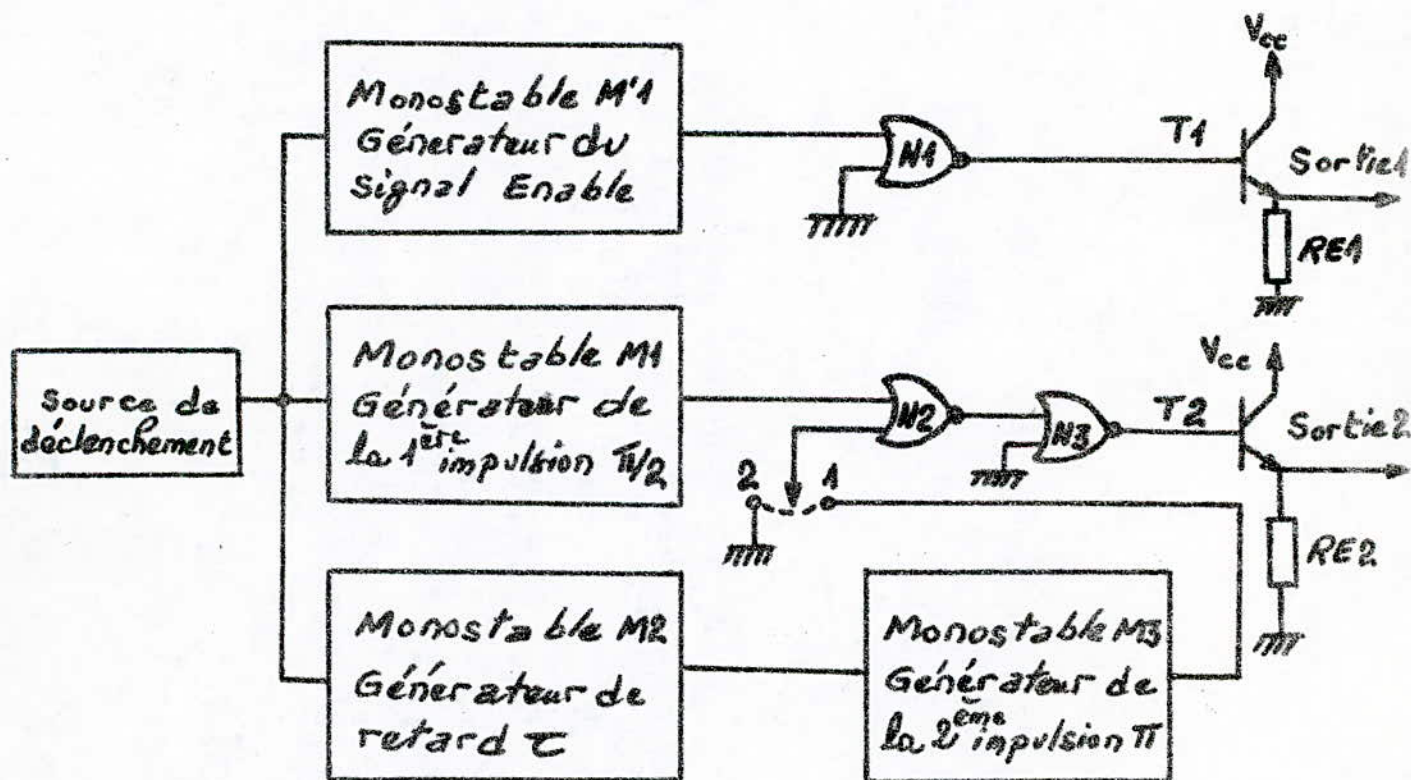
* Un monostable M2 : Générateur de retard (τ).

* Un monostable M3 : Générateur de la deuxième impulsion (π).

* D'une unité de sommation.

* De deux étages de sortie adaptateurs d'impédances.

c) SYNOPTIQUE :



d) PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

La source de déclenchement en son front montant des impulsions déclenche en même temps les monostables M1 et M1, dont les durées des impulsions " $\pi/2$ " et "ENABLE" sont commandées par le même potentiomètre. Les durées de ces deux impulsions sont respectivement comprise entre 20 μ s et 200 μ s ($\pi/2$) et 25 μ s et 250 μ s (ENABLE).

Cette même source de déclenchement,

en son front montant des impulsions, déclenche aussi le monostable M2 générateur de l'impulsion de retard " τ " de durée comprise entre 10ms et 5s.

Au front descendant de l'impulsion issue de M2, le monostable M3 est déclenché, générant ainsi les impulsions " π " de durée comprise entre 40 μ s et 400 μ s.

Le signal issu de M1 est inversé à l'aide de la porte NOR N1 puis appliqué à un étage suiveur adaptateur d'impédance.

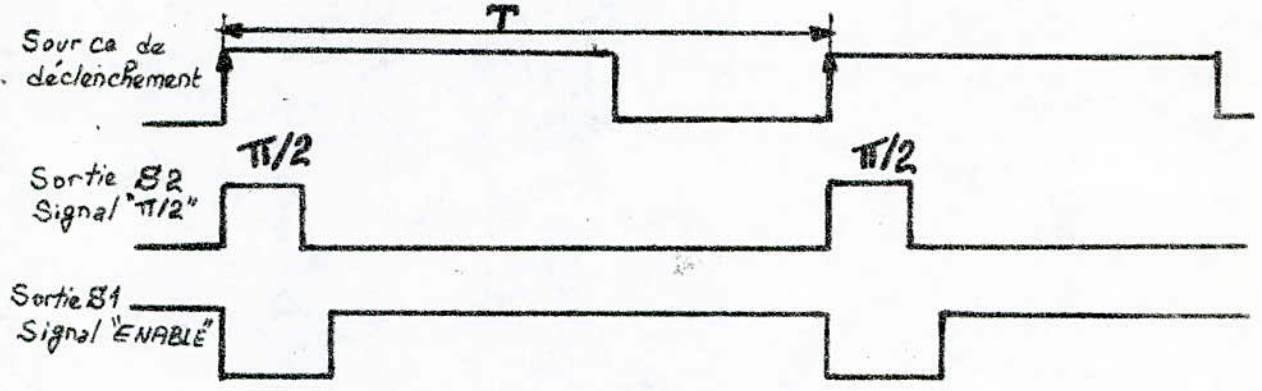
Les deux impulsions issues des monostables M1 et M3 sont additionnées à l'aide des portes NOR N2 et N3 puis appliquées à un étage adaptateur d'impédance.

A l'aide de l'interrupteur K3 nous avons la possibilité, soit de récupérer un train d'impulsions " $\pi/2$ " (K3 en position 2), soit de récupérer des séquences d'impulsions " $\pi/2 \& \pi$ " (K3 en position 1).

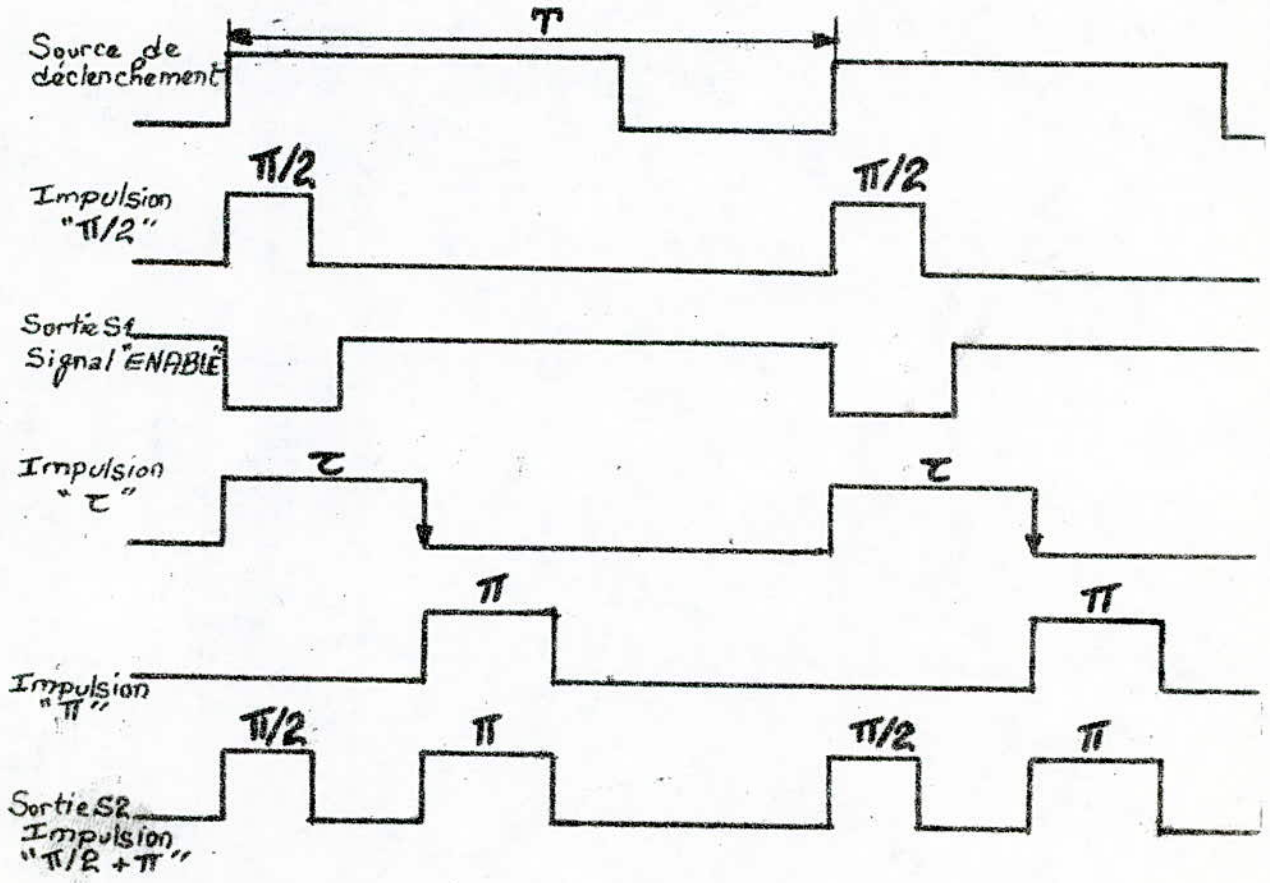
** On notera que pour agir sur le potentiomètre P3 (τ), il faut que la période "T" de l'astable soit grande devant la durée de l'impulsion " τ " générée par le monostable M2.

e) CHRONOGRAMMES DES SIGNAUX SELON LA POSITION DE K3:

*K3 EN POSITION 2:



*K3 EN POSITION 1:



ETUDE DES DIFFERENTS CIRCUITS INTEGRES:

Le programmeur d'impulsion comprend 6 circuits intégrés:
Un astable (NE555), 4 Monostables (SN74121), et un additionneur (SN7402).

1) La source de déclenchement:

La source de déclenchement est réalisée à l'aide du circuit intégré NE555 monté en astable.

a) Présentation du NE555:

Le NE555 est un circuit intégré comportant 8 broches, il peut être utilisé en astable ou en monostable; présente comme il est indiqué en figure (1), le NE555 va osciller de lui-même (sans déclenchement), dès la mise sous tension; il fournit en sortie (broche 3) des impulsions carrées dont la période dépend des éléments P_1, R_1, R_2 et C_1 OU C_2 (selon la position de K_1).

La broche 1 est reliée à la masse; la broche 4 est une broche de remise à zéro, on la relie à l'alimentation (broche 8), pour éviter tout déclenchement non voulu.

La broche 5 permet la commande du NE555; lorsqu'elle n'est pas utilisée on la relie à travers une capacité de 10 nF à la masse pour éviter toute influence de parasites externes.

b) Table de vérité de la bascule RS:

```
*****  
* R * S * Q+ *  
*****  
* 0 * 0 * Q *  
*****  
* 0 * 1 * 1 *  
*****  
* 1 * 0 * 0 *  
*****  
* 1 * 1 * 0 *  
*****
```

0 état quelconque de Q

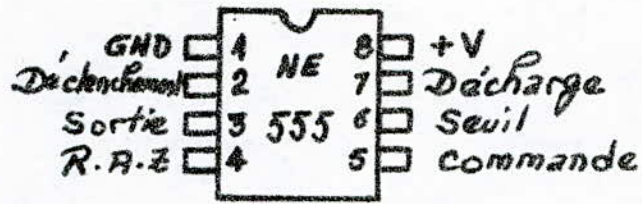


Figure -1- Brochage du NE 555

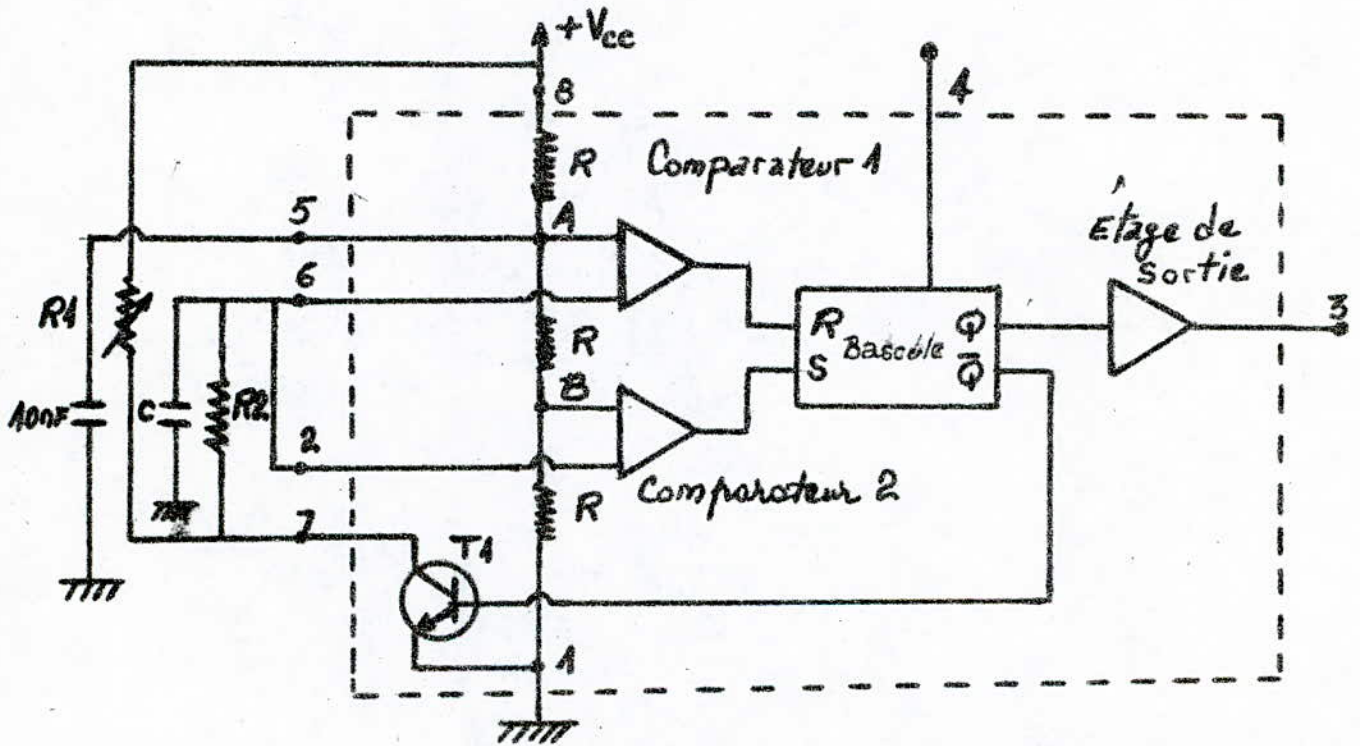


Figure -2- Schema interne du NE 555

c) PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

Aux points A et B nous avons les tensions suivantes: $U_A = 2/3 U_{cc}$; $U_B = 1/3 U_{cc}$.

Al' instant $t=0$, on supposera que la sortie du comparateur 1 appliquée à R est au niveau logique zéro ($R=0$), et que la sortie du comparateur 2 appliquée à S est au niveau logique un ($S=1$).

La sortie Q de la bascule RS est au niveau haut ($Q=1$), alors que la sortie \bar{Q} appliquée à la base du transistor T1 est à l'état bas ($\bar{Q}=0$) et le bloque.

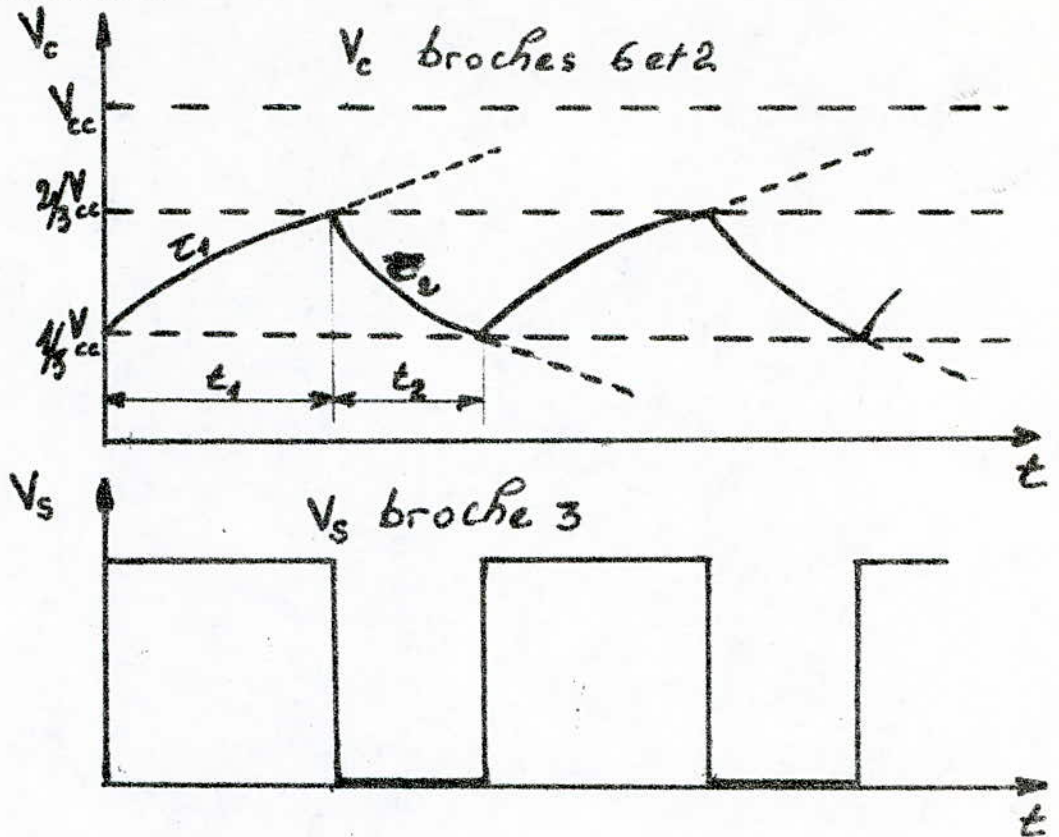
Le condensateur C1 commence à se charger à travers P1, R1 et R2 en tendant exponentiellement vers U_{cc} avec une constante de temps $\tau = (P1+R1+R2)C1$.

Quand la tension U_A croit et dépasse de quelques microvolt la tension U_B , le comparateur 2 passe au niveau bas ($R=S=0$): la bascule garde le même état qu'avant, et le condensateur continu à se charger jusqu'à une tension légèrement supérieure à U_A .

Lorsque la tension aux bornes du condensateur atteint les 2/3 de U_{cc} , la sortie du comparateur 1 passe à l'état haut ($R=1$), tandis que la sortie du comparateur 2 passe au niveau bas ($S=0$): ce qui donne $Q=0$ et $\bar{Q}=1$: le transistor T1 devient saturé, le condensateur commence à se décharger à travers R2 et la masse en tendant exponentiellement vers zéro avec une constante de temps $\tau = R2C1$.

Quand la tension U_B croit et dépasse de quelques microvolt la tension U_A , le comparateur 1 passe au niveau bas ($R=S=0$), la bascule garde le même état et le condensateur continu à se décharger jusqu'à atteindre le 1/3 de U_{cc} , alors le comparateur 2 bascule ($S=1$), la capacité se charge à nouveau et le cycle recommence.

d) FORME DES SIGNAUX:



e) PERIODE DU SIGNAL DE SORTIE:

1) CALCUL DE t_1 :

La loi de charge et de décharge aux bornes d'un condensateur est régie par l'équation:

$$V_c(t) = (V_{c, \text{final}} - V_{c, \text{initial}}) \left(1 - e^{-t/\tau}\right) + V_{c, \text{initial}}$$

$$\bar{a} \quad t = t_1: V_c(t_1) = \frac{2}{3}V_{cc}; V_p(t_1) = V_{cc}; V_{c, \text{initial}}(t_1) = \frac{1}{3}V_{cc}.$$

$$\frac{2}{3}V_{cc} = (V_{cc} - \frac{1}{3}V_{cc}) \left(1 - e^{-t_1/\tau_1}\right) + \frac{1}{3}V_{cc}$$

$$\text{d'où } t_1 = 0,7 \cdot (R_1 + R_2) \cdot C_1; \tau_1 = (R_1 + R_2) \cdot C_1.$$

2) CALCUL DE t_2 :

$$\bar{a} \quad t = t_2: V_c(t_2) = \frac{1}{3}V_{cc}; V_p(t_2) = 0; V_{c, \text{initial}}(t_2) = \frac{2}{3}V_{cc}.$$

$$\frac{1}{3}V_{cc} = -\frac{2}{3}V_{cc} \left(1 - e^{-t_2/\tau_2}\right) + \frac{2}{3}V_{cc}$$

$$\text{d'où } t_2 = 0,7 \cdot R_2 \cdot C_1; \tau_2 = R_2 \cdot C_1.$$

L'expression de la période est: $T = t_1 + t_2$ d'où $T = 0,7(R_1 + R_2 + 2R_2) \cdot C_1$.

2) ETUDE DU CIRCUIT INTEGRE SN74121:

a) PRESENTATION DU SN74121:

Ce circuit intégré se présente sous forme rectangulaire, en boîtier dual inline (DIL), à deux fois sept broches, de la série 54/74, réalise selon la technologie TTL: c'est un circuit intégré monostable.

Les monostables sont des circuits possédant deux états logiques: l'un stable, correspondant à l'état où il n'y a pas d'impulsion à l'entrée, et l'autre instable n'apparaissant que pour une impulsion à l'entrée, ne durant que le temps fixé par la structure du circuit R_{ext} et C_{ext} externes associés à ce monostable, après il retourne à son état initial stable.

R_{ext} et C_{ext} sont des éléments extérieurs; ce sont eux qui déterminent la période de l'état instable ($t = 0.7(R_{int} + R_{ext})C_{ext}$).

Ce circuit intégré possède trois entrées de commande:

* Les entrées A1 et A2 permettent de déclencher le monostable sur des fronts descendants.

* L'entrée B est suivie d'un trigger de Smitt, elle permet de déclencher le monostable sur une montée même lente du signal appliqué.

R_{ext} peut varier de $2K\Omega$ à $40K\Omega$, R_{int} est donnée par le constructeur et vaut $2K\Omega$, et C_{ext} varie de $10PF$ à $1000\mu F$: ceci permet d'obtenir des durées t de $40 ns$ à $28s$.

b) TABLE DE VERITE:

```

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
*   entrées   *   sorties   *
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
* A1 * A2 * B ***** Q *** Q *
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
* 0 * 0 * 1 ***** 0 *** 1 *
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
* 0 * 0 * 1 ***** 0 *** 1 *
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
* 0 * 0 * 0 ***** 0 *** 1 *
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
* 1 * 1 * 0 ***** 0 *** 1 *
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
* 1 * 1 * 1 ***** 1 *** 1 *
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
* 1 * 1 * 1 ***** 1 *** 1 *
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
* 1 * 1 * 1 ***** 1 *** 1 *
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
* 0 * 0 * 1 ***** 1 *** 1 *
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
* 0 * 0 * 1 ***** 1 *** 1 *
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

```

- ϕ : Etat indéterminé.
- Ω : Impulsion de sortie positive.
- ω : Impulsion de sortie négative.
- \uparrow : déclenchement sur un front de montée.
- \downarrow : déclenchement sur un front de descente.

c) PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT:

Les monostables M1, M1 et M2 ont les broches 3 et 4 reliées à la masse (A1=A2=0).

Le signal issu de la source de déclenchement est appliqué aux broches 5 de chacun de ces monostables (B: déclenchement sur les fronts montants de l'horloge NE555).

Le monostable M3 est déclenché de sa broche 3 à partir des fronts descendants du signal issu de M2: ses broches 4 et 5 sont reliées à l'alimentation (A2=B=1); nous avons la combinaison: A1= et A2=B=1.

Initialement on supposera que le monostable est à son état stable: Q=0 et $\bar{Q}=1$.

Les broches 3 et 4 étant reliées à la masse, la sortie de la porte 1 de type NOR sera toujours maintenue à 1.

L'impulsion de déclenchement issue de l'horloge est appliquée à la broche 5 et fait passer la sortie de la porte 2 de type AND à 1 forçant ainsi la sortie Q à l'état haut et maintient cet état pendant une durée déterminée par le circuit extérieur R_{ext} et C_{ext} , vérifiant la relation: $t = 0.7(R_{ext} + R_{int})C_{ext}$ puis revient à son état initial stable.

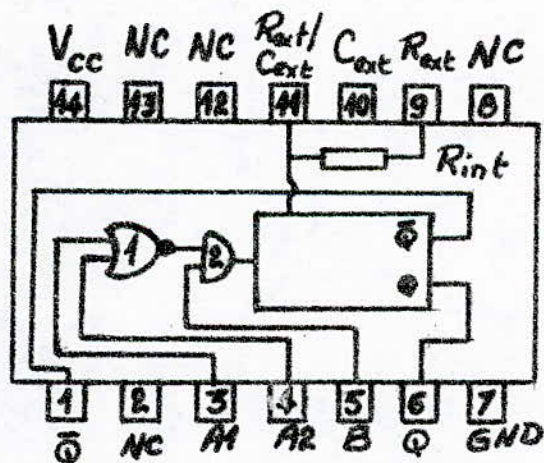


Figure-3- Brochage du SN74121

3) ETUDE DU CIRCUIT INTEGRE SN7402:

a) PRESENTATION DU SN7402:

Le type 7402 est un quadruple NOR, dont le brochage et la composition intérieure simplifiée sont donnés à la figure (4). Le boîtier est dual inline (DIL) à deux fois sept broches; le choix des entrées est indifférent. Les broches 7 et 14 correspondent respectivement à la masse et à l'alimentation V_{cc} . On sait que pour une porte NOR les niveaux des entrées doivent être additionnés et le résultat inversé: $0+0=0$, sortie 1; $0+1=1$, sortie 0; $1+1=1$, sortie 0; $1+0=1$, sortie 0. Il est utilisé comme unité de sommation des impulsions $\Pi/2$ & Π délivrées respectivement par les monostables M1 et M3; les portes 1 et 2 sont utilisées pour cette fonction; et aussi comme inverseur de l'impulsion issue de M1; la porte 3 accomplit cette fonction.

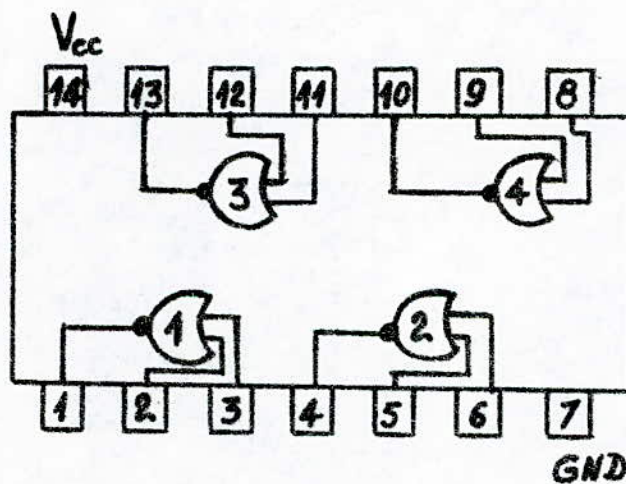


Figure-4- Brochage du SN7402

4) REALISATION PRATIQUE:

Pour la réalisation pratique nous avons opté pour une plaque d'époxy de type "module", enfichable à un connecteur dont la répartition de ses 18 broches est en annexe.

a) LE CIRCUIT IMPRIME:

Le circuit imprimé est du type double face: les côtés composants, et soudures sont respectivement représentés en grandeur réelle en figure(5) et en figure(6).

b) IMPLANTATION DES COMPOSANTS:

Le schéma d'implantation des différents composants est représenté à l'échelle réelle en figure(7). Afin de ne pas détériorer les circuits intégrés nous les avons placés sur des supports soudés auparavant sur la plaquette d'époxy.

c) LE BOITIER:

C'est un boîtier en aluminium de type rectangulaire dont les dimensions sont: 230X125X60. Sur ce boîtier sont fixés les potentiomètres, les commutateurs et les fiches femelles des différentes sondes.

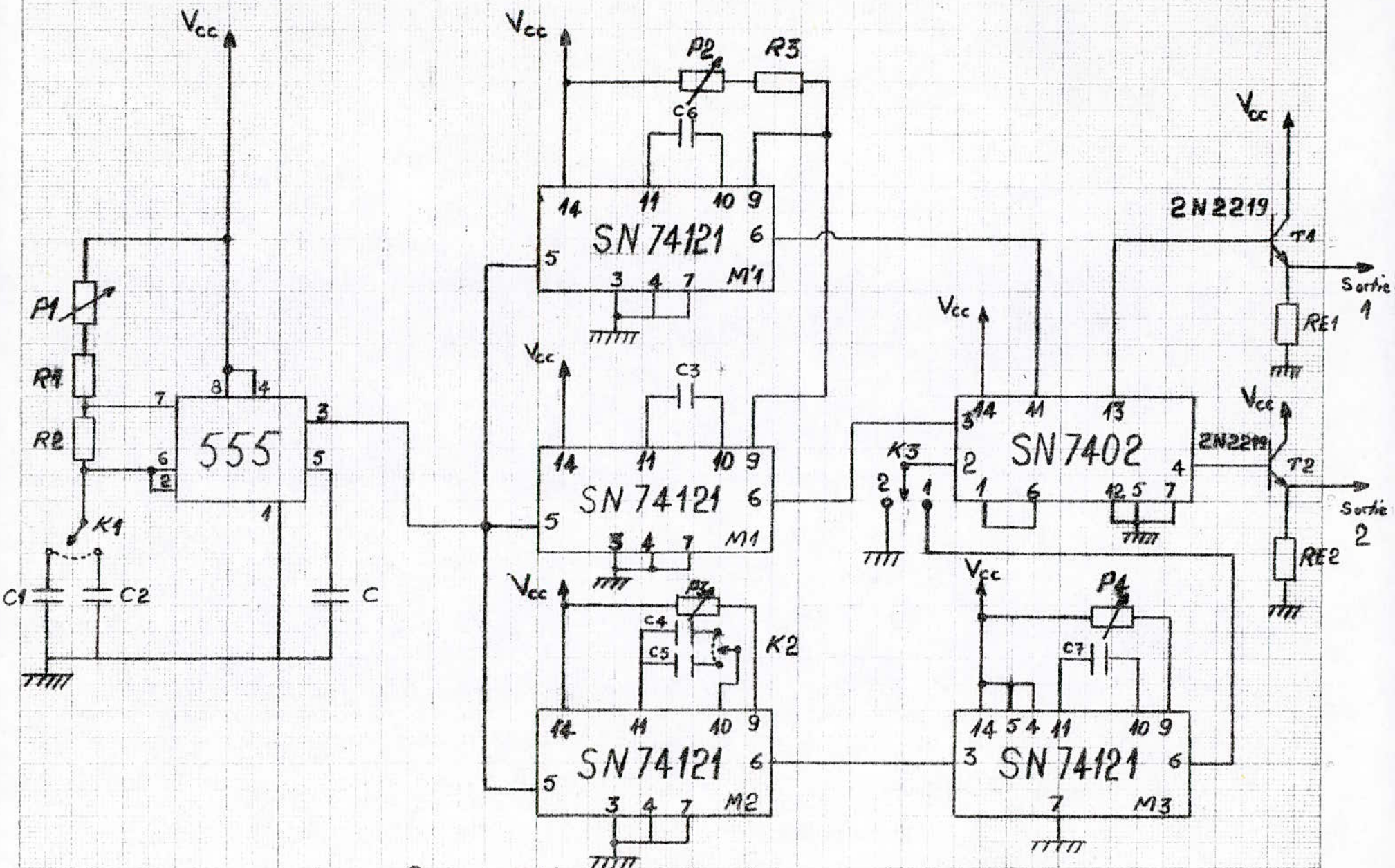
*On notera que pour le même signal (séquences $\Pi/2$ & Π), deux **fiches** femelles sont utilisées: l'une pour le visualiser sur l'oscilloscope et l'autre prévu pour le système émetteur.

RESULTATS EXPERIMENTAUX

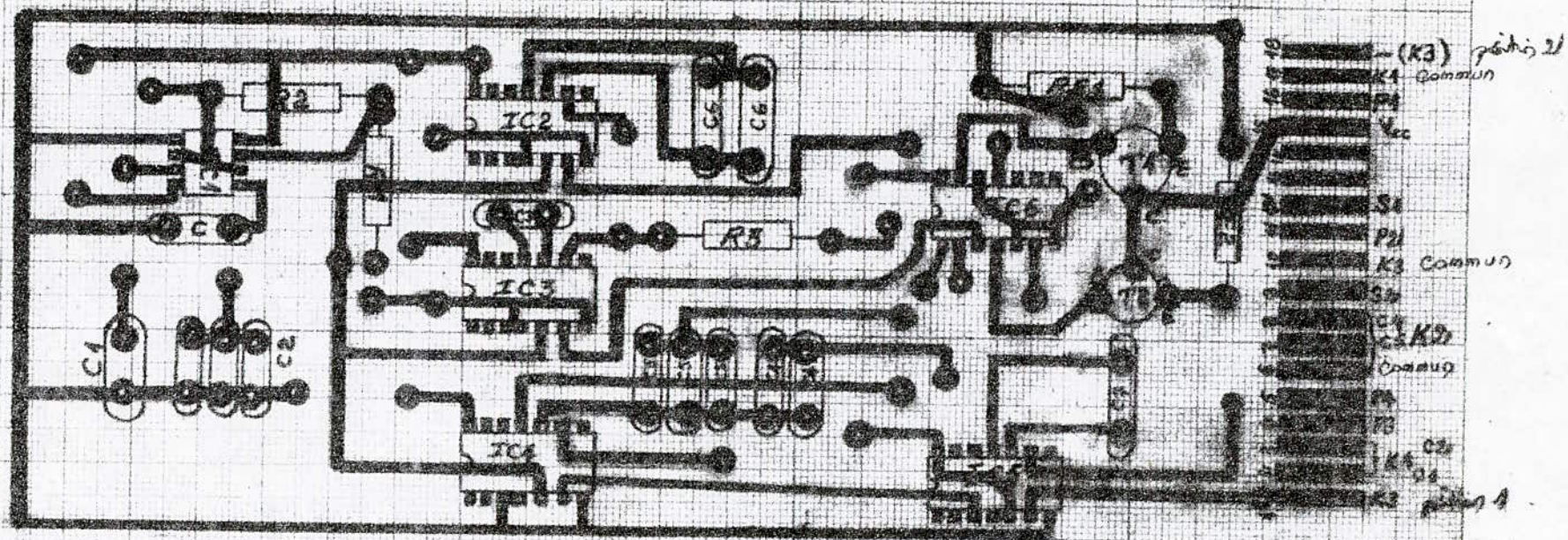
```

*****
*Nombre de*   Periode T   *
* Tours *C1=4.7µF**C2=66µF**C4=9.4µf*
*****
* 0 * 10.6ms ** 0.16s * 15ms *
*****
* 0.5 * 54ms ** 0.76 * 47ms *
*
*****
* 1 * 105ms ** 1.4s * 47ms *
*****
* 1.5 * 140ms ** 2.25s * 64ms *
*****
* 2 * 188ms ** 2.75s * 80ms *
*****
* 2.5 * 240ms ** 3.5s * 96ms *
*****
* 3 * 280ms ** 4.1s * 112ms *
*****
* 3.5 * 320ms ** 4.75s * 131ms *
*****
* 4 * 350ms ** * 150ms *
*****
* 4.5 * 400ms ** * 160ms *
*****
* 5 * 440ms ** * 180ms *
*****
* 5.5 * 500ms ** * 200ms *
*****
* 6 * 530ms ** * 220ms *
*****
* 6.5 * 580ms ** * 240ms *
*****
* 7 * 640ms ** * 250ms *
*****
* 7.5 * 680ms ** * 260ms *
*****
* 8 * 700ms ** * 270ms *
*****
* 8.5 * 740ms ** * 270ms *
*****
* 9 * 800ms ** * 300ms *
*****
* 9.5 * 840ms ** * 310ms *
*****
* 10 * 900ms ** * 330ms *
*****
* Temps de montee=0.1µs *
*
* Temps de descente=0.6µs *
*****

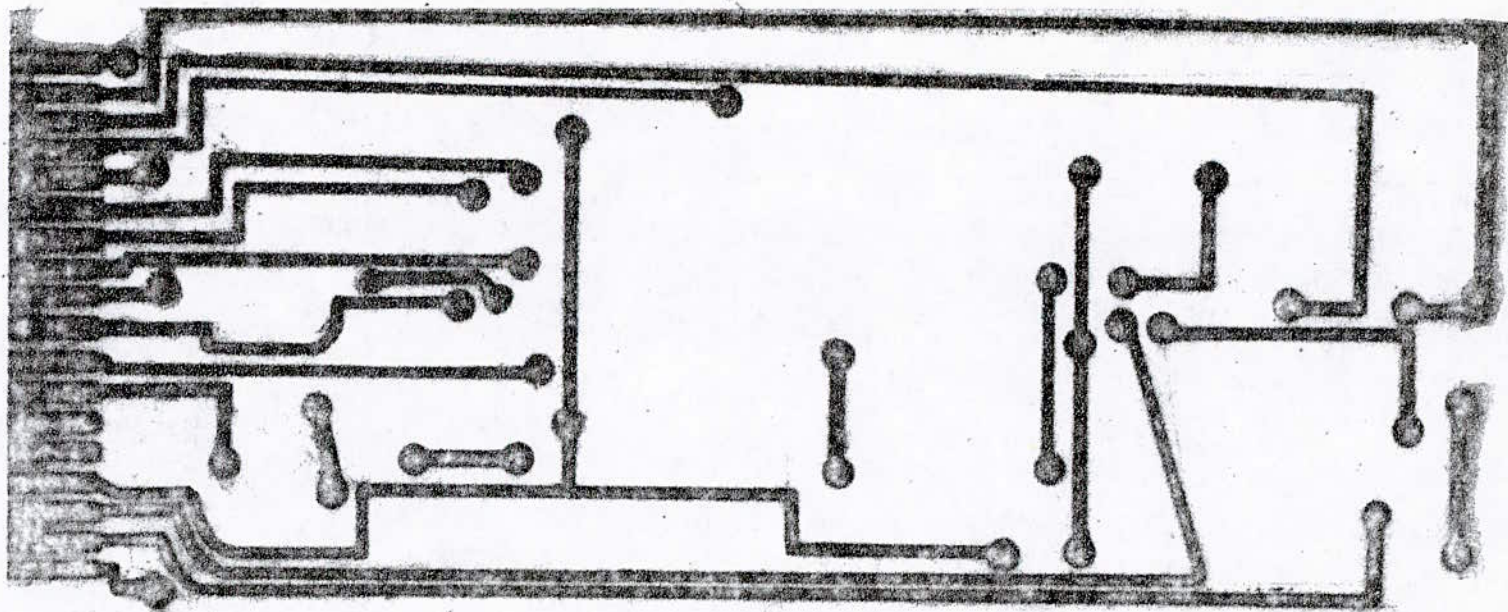
```

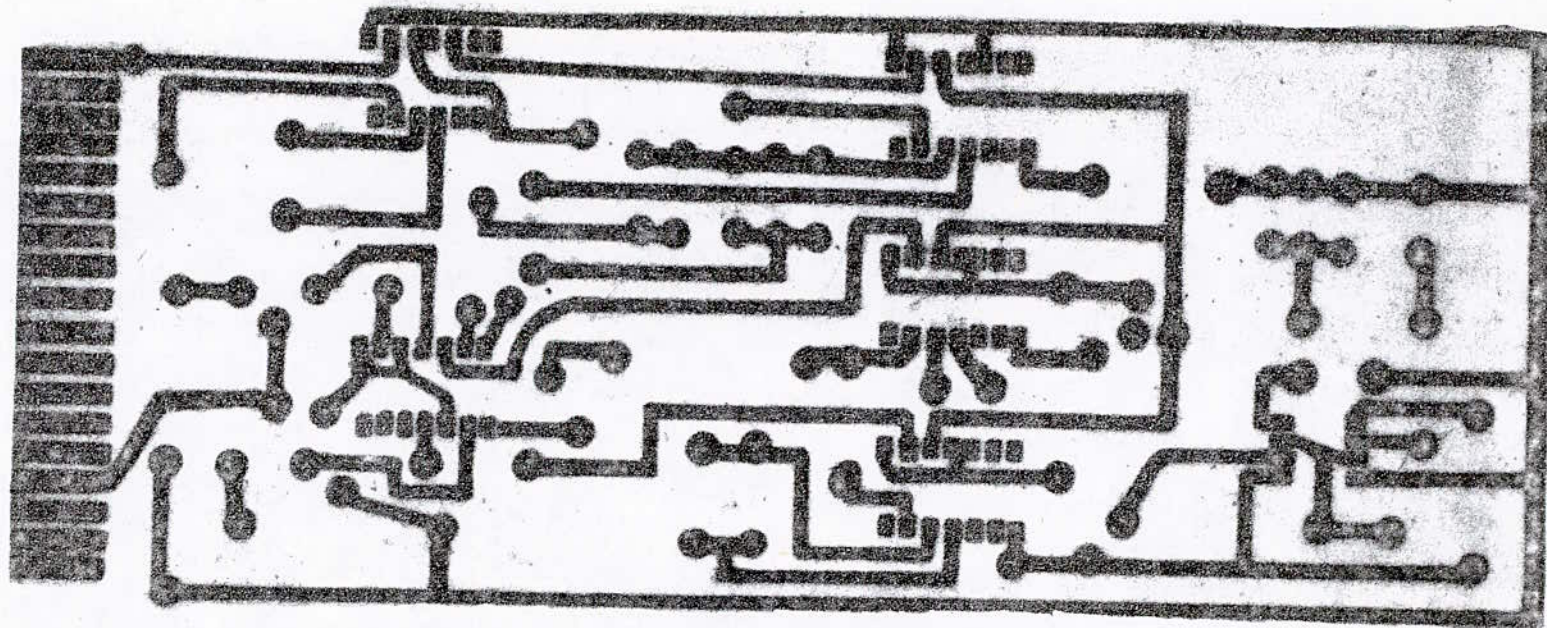
Schema Electrique du Programmeur d'Impulsion



Schema d'Implantations. figure-7.



Circuit Imprimé : Côté Composants . figure . 5 .



Circuit Imprimé - Côté Soudures. figure-6.

REPARTITION DES FILS ÉLECTRIQUES SUR LE CONNECTEUR

```

*****
*Numéro*Nom du*Diréction*Couleur du *
*broche*signal*          *fil      *
*****
* 1  *Positi*Uers K3  *Blanc fin  *
*   *non 1 *          *          *
*****
* 2  *  _  *Uers C1  *Violet    *
*****
* 3  *  _  *Uers C2  *Jaune     *
*****
* 4  *Impuls*Uers P3  *Rose     *
*   *ion Ƴ *          *          *
*****
* 5  *Impuls*Uers P4  *Bleu clair*
*   *ion Ⅱ *          *          *
*****
* 6  *Commut*Uers K2  *Rouge fin *
*   *ateur *          *          *
*****
* 7  *  _  *Uers C5  *Vert clair*
*****
* 8  *  _  *Uers C4  *Blanc     *
*****
* 9  *Ⅱ/2 ou*Uers S2  *Rouge     *
*   *Ⅱ/2&Ⅱ *          *          *
*****
* 10 *Commut*Uers K3  *Bleu foncé*
*   *ateur *          *          *
*****
* 11 *Impuls*Uers P2  *Marron   *
*   *ionⅡ/2*          *          *
*****
* 12 *Enable*Uers S1  *Bleu ciel *
*****
* 13 *  _  *  _  *  _  *
*****
* 14 *  _  *  _  *  _  *
*****
* 15 *Ucc   *Uers doui*Rouge/Noir*
*   *   *   *lle rouge*
*****
* 16 *Impuls*Uers P1  *Jaune/Vert*
*   *ion T *          *          *
*****
* 17 *Commut*Uers K1  *Vert foncé*
*   *ateur *          *          *
*****
* 18 *GND et*Uers doui*Noir     *
*   *positi*lle noir *
*   *non 2 *          *
*   *de K3 *          *
*****

```


Liste des composants:

1) Le programmeur d'impulsion:

*Résistances 1W, 10%:

R1=R2=1K Ω .
RE1=RE2=2.2K Ω .
R3=3.3K Ω .

*Potentiomètres:

P1=250K Ω , Linéaire, 10Tours.
P2=22K Ω , Linéaire.
P3=50K Ω , Linéaire, 10Tours.
P4=22K Ω , Linéaire.

*Condensateurs:

C1=4.7 μ F/16V, Tantale.
C2=3*22 μ F/16V, Tantale.
C3=10nF, Céramique.
C4=2*4.7 μ F/16V, Tantale.
C5=100 μ F+2*22 μ F=144 μ F/16V, Tantale.
C6=5nf, Céramique.
C7=27nF/250V, Mylar.

*Transistor:

T1, T2 2N2219.

*Circuits Intégrés:

IC1:NE555.
IC2, IC3, IC4, IC5:SN74121
IC6:SN7402.

*Divers:

K1, K2, K3: Commutateurs 2 positions.
2 douilles femelles (rouge, noir), \varnothing 5mm.
3 fiches mâles pour sonde.

B/ LE SYSTEME
EMETTEUR

I) INTRODUCTION:

L'énergie transmise au milieu que l'on doit étudier par l'absorption résonante de l'onde électromagnétique y produit des perturbations. Le retour à l'état d'équilibre s'accompagne de la réémission d'une partie de cette énergie. Ce phénomène fut mis en évidence par Felix Bloch qui au lieu d'utiliser une irradiation continue, envoyait sur l'échantillon de substance des impulsions successives d'onde électromagnétique. Entre ces impulsions, il était possible de détecter le rayonnement réémis par le milieu. L'analyse de ce rayonnement nous fournit certaines informations sur l'échantillon en question: c'est ce qui nous a permis de choisir un système émetteur par impulsions.

II) ETUDE THEORIQUE:

1) Schema bloc:

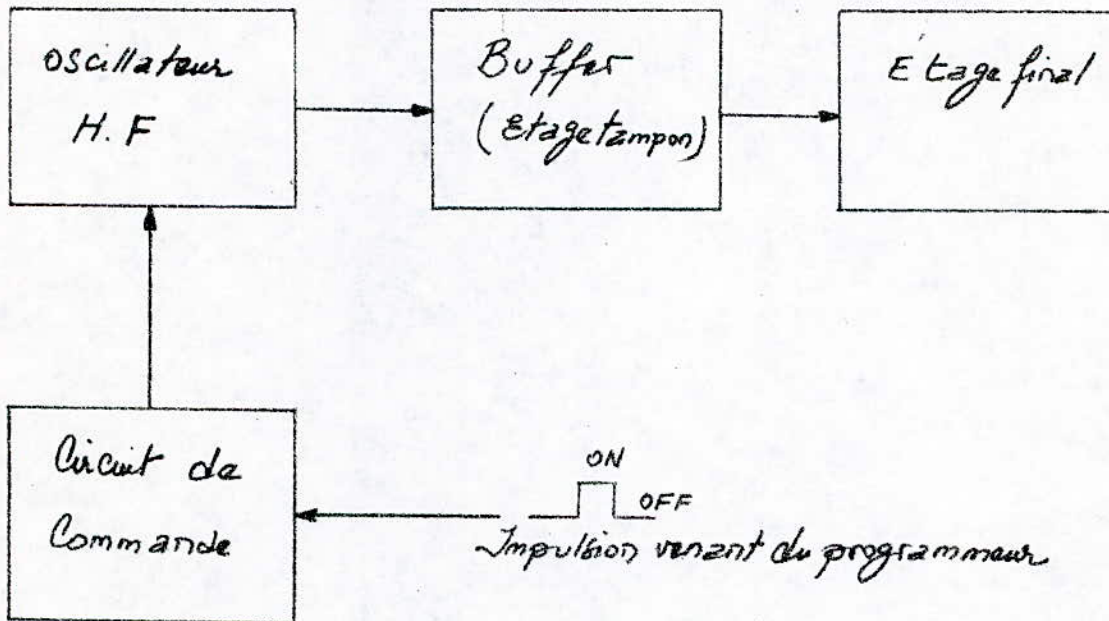


Figure - 1.

2) PRINCIPLE DE FONCTIONNEMENT :

Lors de la période ON, l'oscillateur HF est alimenté par l'intermédiaire du circuit de commande, et fournit un signal radiofréquence qui sera amplifié en puissance, puis envoyé vers la bobine d'excitation, excitant ainsi l'échantillon à étudier. Au cours de la période OFF, l'oscillateur HF est bloqué, l'information est recueillie par l'intermédiaire de la bobine d'excitation. Pendant la période OFF, aucun signal autre que celui provoqué par l'échantillon ne doit être observé dans la bobine, dans le cas contraire l'information recueillie sera erronée et il nous serait impossible de tirer des conclusions correctes.

les signaux parasites en question ne peuvent provenir que du système émetteur et sont de deux types différents :

- parasites dus aux bruits

- parasites dus à la stabilité en fréquence.

pour réduire les parasites dus aux bruits nous devons réaliser un émetteur dont le rapport tension pendant la durée ON à celle de la tension résiduelle pendant la période OFF, soit le plus grand possible.

en ce qui concerne les parasites dus à la stabilité en fréquence, peuvent être également réduites en réalisant un oscillateur à très grande stabilité en fréquence et par conséquent une stabilité en amplitude du système émetteur.

3) ETUDE DE L'OSCILLATEUR HF :

Un oscillateur quasi-sinusoidal est un système bouclé à réaction positive.

Considérons le montage suivant :

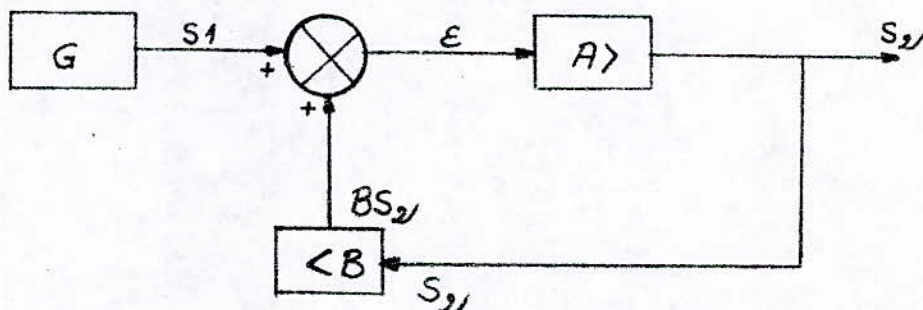


Figure - 2 -

Soit un amplificateur linéaire A alimenté par un générateur G qui délivre un signal S_1 . On ajoute au signal d'entrée une fraction du signal de sortie à l'aide d'un comparateur qui réalise une addition. L'amplificateur A reçoit à son entrée un signal et délivre un signal S_2 tel que: $S_2 = A \cdot E$. L'élément [B] de la chaîne de retour prélève une partie du signal de sortie que l'on note: BS_2 et l'envoie sur le comparateur et on a alors:

$$E = S_1 + BS_2 \quad (1)$$

d'autre part on a:

$$S_2 = A \cdot E \quad (2)$$

d'où $E = A(S_1 + BS_2)$

on alors:

$$S_2(1 - AB) = AS_1$$

d'où:

$$S_2/S_1 = A/(1 - AB) \quad (3)$$

ou A et B peuvent être réels ou complexes.

La relation (3) montre que le montage devient auto-oscillateur si le produit AB tend vers 1, c'est à dire que le dénominateur de l'amplification résultante s'annule, ce qui ne veut pas dire que S_2 devient infini, mais que S_2 conserve sa valeur même si S_1 tend vers zéro, on peut donc supprimer le générateur (G) à l'entrée et le montage continue à osciller de lui même, on dit qu'il est "accroché".

Dans le cas général, A et B sont fonctions de la fréquence et on doit raisonner sur des nombres complexes:

$$\bar{A}(\omega) \cdot \bar{B}(\omega) = 1 \quad \text{d'où} \quad \begin{cases} |A(\omega)| \times |B(\omega)| = 1 & (4) \\ \text{Arg} A(\omega) + \text{Arg} B(\omega) = 2k\pi & (5) \end{cases}$$

les relations (4) et (5) représentent les conditions limites d'oscillation de BARKHAUSEN.

Pour la réalisation de notre oscillateur HF, nous avons utilisé un oscillateur Hartley à collecteur commun dont le schéma du montage est le suivant:

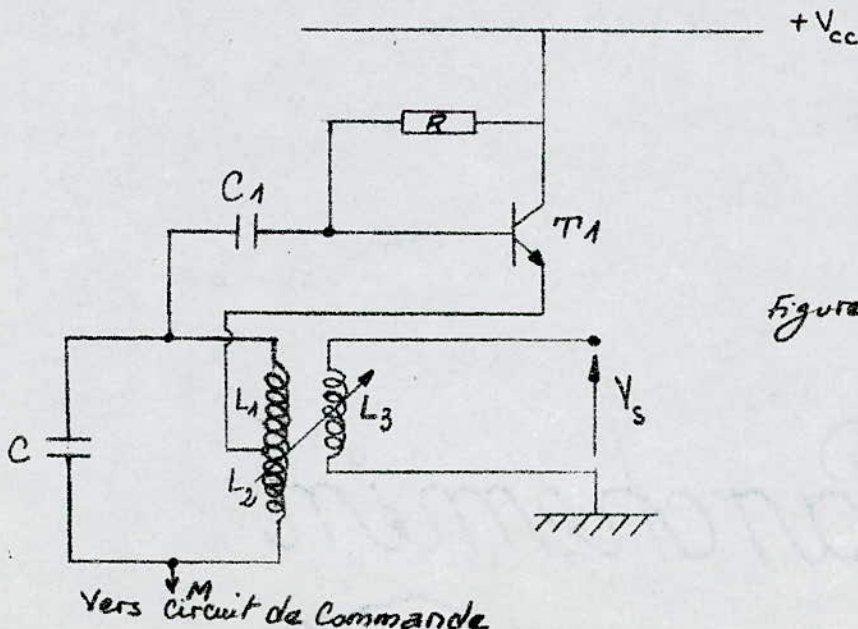


Figure - 3 -

Le schéma de la figure-3. peut être représenté comme suit :

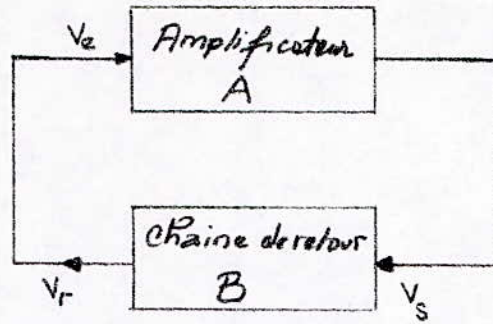


Figure - 4 -

ou l'amplificateur A représente le transistor T1, la chaîne de retour B représente le circuit résonant parallèle constitué de la capacité C et du primaire du transformateur.

La tension de sortie de l'oscillateur est prélevée au secondaire du transformateur.

La polarisation du transistor est assurée par la résistance R entre la base et le collecteur.

Schema équivalent du montage :

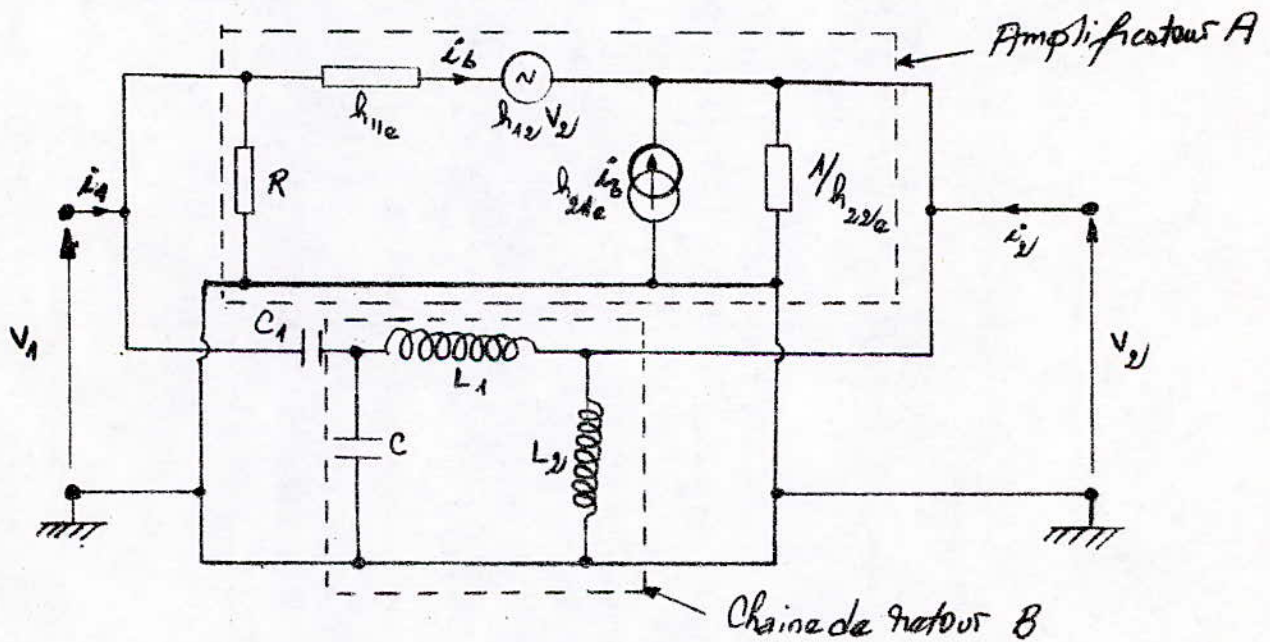


Figure - 5 -

En utilisant la matrice hybride $[H]$, on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (\text{I})$$

soit $[H]_A$ la matrice de la chaîne directe

et $[H]_B$ la matrice de la chaîne de retour.

la matrice totale de l'oscillateur est :

$$[H] = [H]_A + [H]_B \quad (\text{II})$$

Partant des deux relations (I) et (II), on déduit la relation donnant l'impédance d'entrée Z_e en fonction des paramètres hybrides et on a alors :

$$Z_e = H_{11} - (H_{12} \cdot H_{21}) / H_{22}$$

pour qu'il y ait oscillation on doit avoir $U_1 = 0$

d'autre part $Z_e = U_1 / i_1 = H_{11} - (H_{12} \cdot H_{21}) / H_{22} = 0$

D'où : $H_{11} \cdot H_{22} - H_{12} \cdot H_{21} = 0$, $\Delta H = 0$ (III)

mais les paramètres H_{ij} étant complexes donc la relation (III) nous donne deux équations :

$\text{Re}(\Delta H) = 0$ et $\text{Im}(\Delta H) = 0$

$\text{Re}(\Delta H) = 0$ implique $\omega = 1 / \sqrt{C(L_1 + L_2 + 2M)}$ fréquence d'oscillation

$\text{Im}(\Delta H) = 0$ implique $L_1 + M/L_2 + M = h_{21} / \Delta h$ condition d'entretien des oscillations

dans le cas d'un couplage parfait $L_1 + L_2 + 2M$ représente l'inductance L de la bobine totale et on a alors :

$$\omega_0 = 1 / \sqrt{LC} \quad \text{d'où}$$

$$f_0 = 1 / 2\pi \sqrt{LC}$$

Le cahier de charges nous impose une fréquence $f_0 = 10$ Mhz. pour cela on a fixe $C = 47$ pF. et on a réalisé un transformateur à prise sur le primaire. L'inductance L_1 comporte 10 spires et l'inductance L_2 comporte 6 spires et l'ensemble est bobiné sur un support dont le diamètre est environ de 3mm avec un noyau en ferrite afin de pouvoir ajuster la fréquence. La tension de sortie est prélevée sur un secondaire comportant 3 spires.

4) CIRCUIT DE COMMANDE :

L'oscillateur HF est commandé par un interrupteur électronique composé d'un transistor travaillant en commutation dont le schéma est ci-dessous :

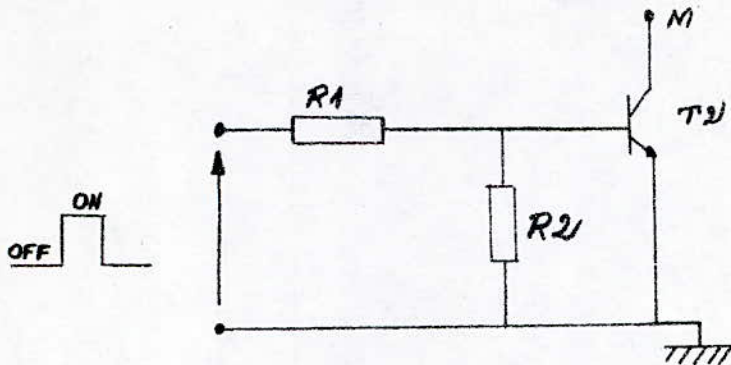


Figure - 6 -

Pendant la période ON le transistor T2 est saturé et le point M du circuit résonant est mis à la masse par l'intermédiaire du collecteur du transistor T2 et par conséquent l'oscillateur fonctionne.

pendant la durée OFF T2 est bloqué et le point M du circuit résonant est en l'air donc l'oscillateur sera bloqué.

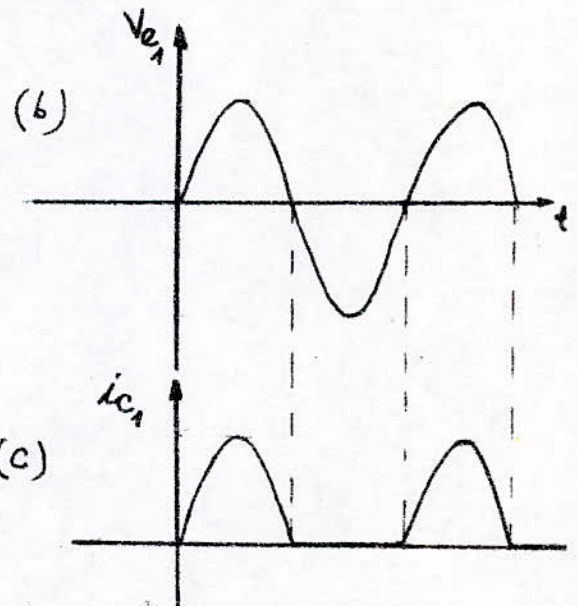
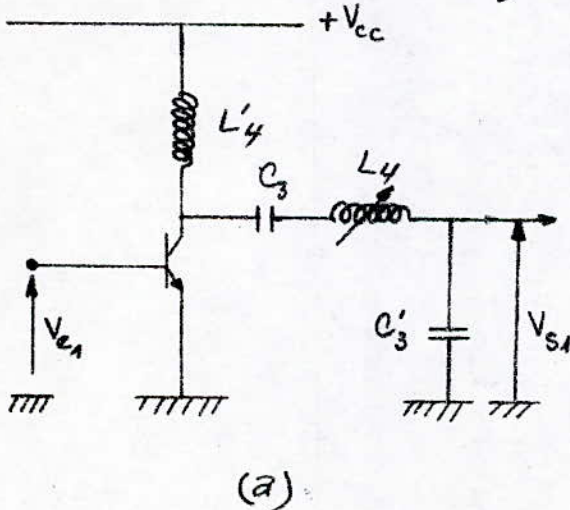
le diviseur de tension (R1,R2) permet de limiter le courant de base et protège ainsi le transistor T2. Les valeurs choisies sont : $R1=470\Omega$ et $R2=1k\Omega$

5) AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE :

L'ampli de puissance se compose de deux étages.

Le premier étage ou buffer (étage tampon) est un préampli de puissance consommant peu de puissance afin d'éviter les dérives en fréquence que peut provoquer une trop forte consommation de puissance de l'oscillateur.

Figure - 7 -



Durant les alternances positives de U_{e1} , la diode base-emetteur est conductrice et le courant collecteur circule, pendant les alternances négatives de U_{e1} , la diode est bloquée et le courant collecteur est nul, d'où la forme du courant i_{c1} , donc le courant collecteur circule durant 180° et par conséquent le transistor T3 fonctionne en classe C.

Le courant collecteur prend la forme d'impulsions brèves attaquant un circuit résonant série constitué des capacités $C3, C3'$ et de la bobine $L4$. La tension entre les bornes de ce circuit est presque une sinusoïde parfaite. Comme le transistor fonctionne en classe C, son point de fonctionnement est sur le point de blocage $Q(I_c=0, U_{ce}=U_{cc})$ et en régime dynamique la tension U_{ce} varie autour de U_{cc} comme l'indique la figure-8:

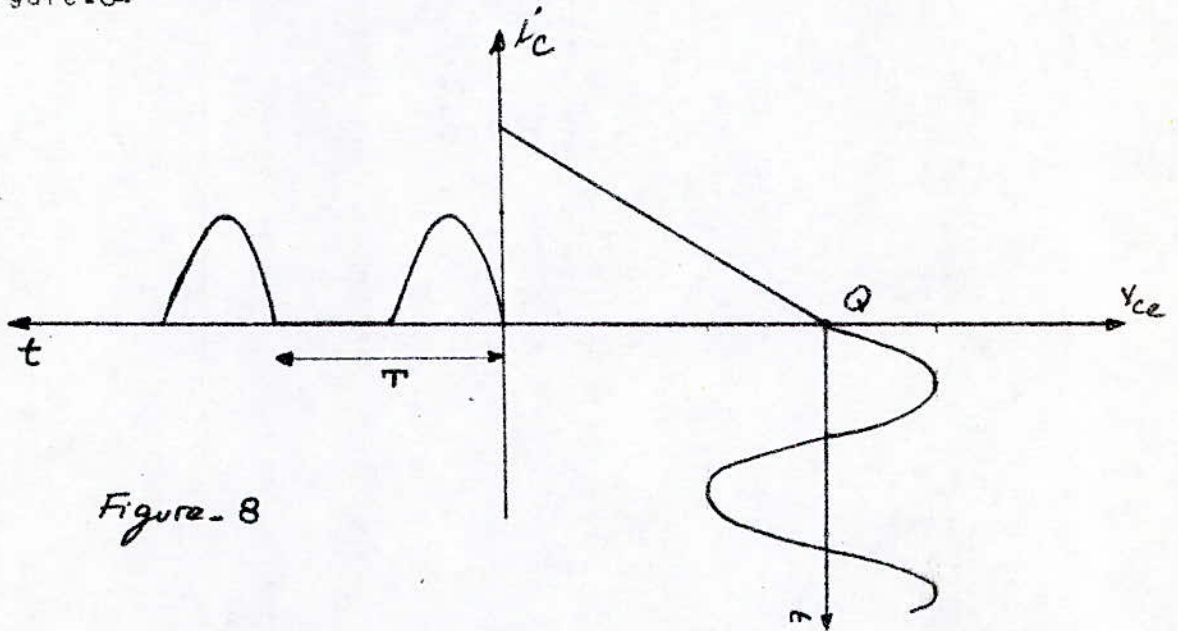


Figure-8

Pour obtenir une onde sinusoïdale, il faut que le circuit résonant doit avoir un coefficient de qualité élevé ($Q > 10$) et que la fréquence de résonance du circuit doit être égale à $1/T$, $f = 1/T$ mais comme $1/T = 10 \text{ Mhz}$, d'autre part la fréquence de résonance du circuit est donnée par la relation:

$$L4 \cdot C3C3' \cdot \omega^2 / (C3 + C3') = 1 \quad (1)$$

d'où

$$\omega^2 = (C3 + C3') / L4 \cdot C3 \cdot C3'$$

d'où

$$f = 1/2\pi \sqrt{L4C3C3' / (C3 + C3')} = 10 \text{ Mhz} \quad (2)$$

On fixe $C_3=100\text{pF}$ et $C'_3=50\text{pF}$. En utilisant les relations (1) et (2) on détermine $L_4=15\mu\text{H}$.

La bobine L_4 est une bobine variable, elle comporte 35 spires enroulées sur un support de 5mm de diamètre, sa valeur varie entre $9\mu\text{H}$ et $18\mu\text{H}$.

La bobine L_4 est une bobine de choc, elle empêche le courant HF de passer dans l'alimentation.

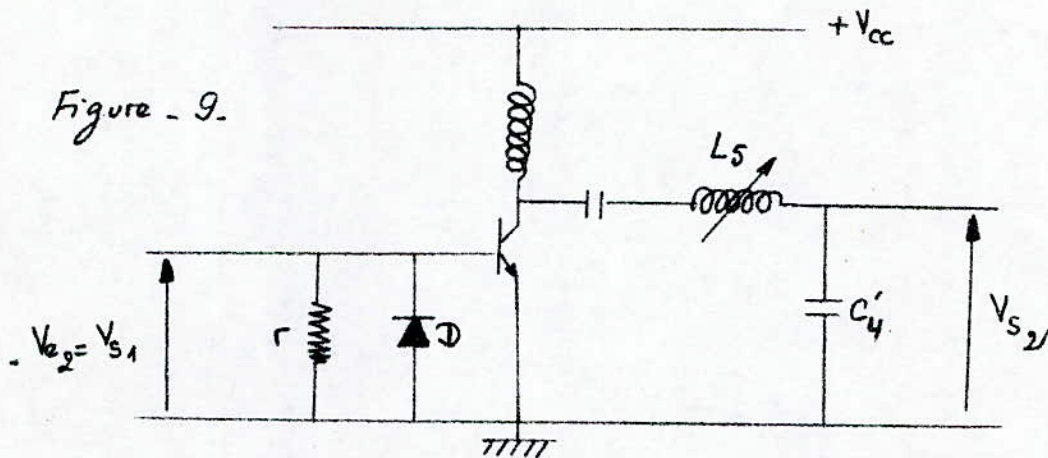
La tension de sortie du buffer est prise aux bornes de C'_3 d'où l'impédance de sortie de cet étage est:

$$X_{C_3} = 1/2\pi f C_3 = 1/2\pi \cdot 10^7 \cdot 50 \cdot 10^{-12} = 320\Omega$$

Cette impédance est assez faible et permet une bonne adaptation du buffer à l'étage suivant.

L_5 , 2^{ème} étage de l'ampli de puissance est l'étage final du système émetteur, il permet d'amplifier davantage en puissance le signal venant du buffer: il travaille en classe C comme l'étage précédent.

Le schéma de cet étage est donné en figure-9.



La tension d'entrée de cet étage étant la tension de sortie de l'étage buffer dont l'amplitude est assez importante; pour éviter la rupture de la jonction base émetteur du transistor T4, on place une diode D entre la base et l'émetteur: c'est une diode de protection travaillant en commutation HF de type 1N4148.

A la résonance, on a:

$$L_5 \cdot C_4 \cdot C'_4 \cdot \omega^2 / (C_4 + C'_4) = 1$$

Connaissant ω , et en fixant $C_4=50\text{pF}$ et $C'_4=100\text{pF}$ on détermine $L_5=15\mu\text{H}$.

La bobine L5 comporte 40 spires, enroulées sur un support de 7mm de diamètre: celle ci varie entre 6 μ H et 24 μ H.

L'impédance d'entrée de cet étage est $r // h = Z_e$. Comme h est assez grande, on a pratiquement $Z_e = r$.

Pour avoir une bonne adaptation entre le buffer et l'étage final, on doit avoir $r = X_{C3} = 1/2\pi f C3 = 320\Omega$. La valeur nominale prise est $r = 470\Omega$.

La sortie du système émetteur est prise aux bornes de C4, et par conséquent l'impédance de sortie est:

$$Z = X_{C4} = 1/2\pi f C4 = 160\Omega.$$

L'impédance de sortie étant assez faible, celle ci permet une bonne adaptation avec l'étage suivant constitué de la bobine d'excitation.

6) RESULTATS OBTENUS:

*Tension de sortie $U_s = 50$ volt

*Rapport en tension ON/OFF = 50000mv/12mv = 4100.

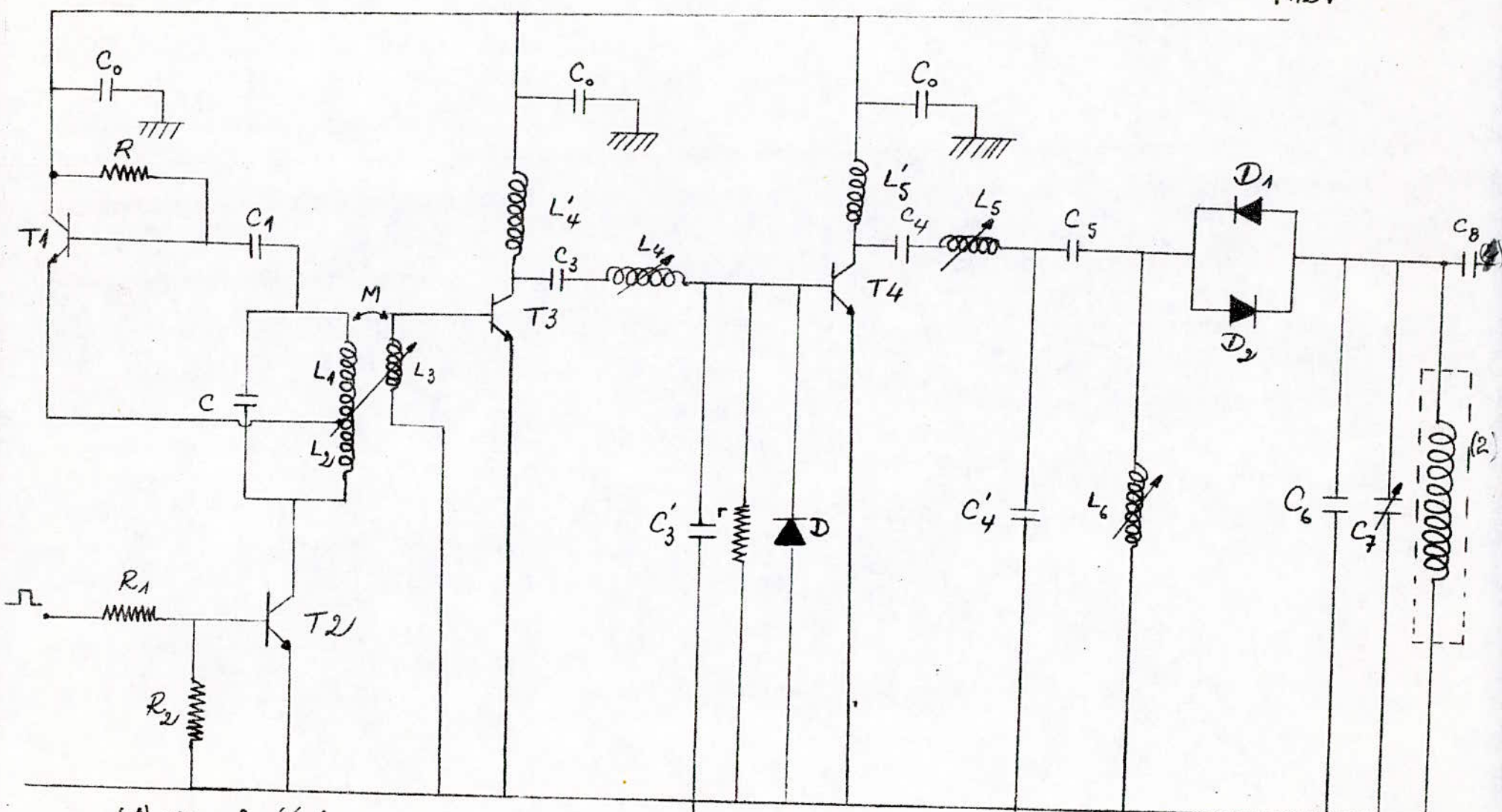
*Fréquence du signal de sortie $F = 10.006$ Mhz.

7) REALISATION PRATIQUE:

Le montage final a été réalisé sur circuit imprimé à double face dont les vues des deux faces sont en figure-10- et en figure-11-.

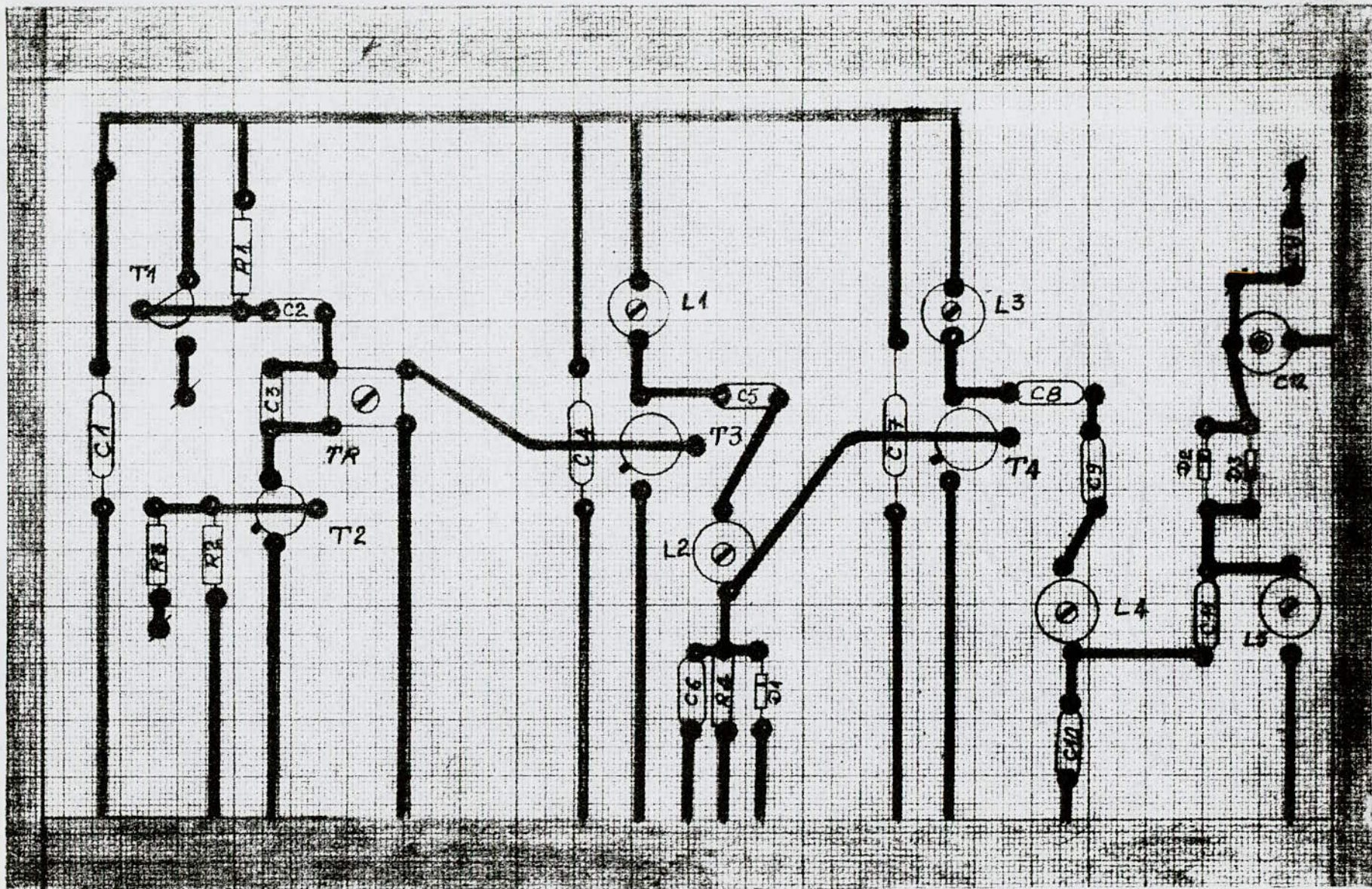
Où que l'on travaille à une fréquence de 10Mhz, les différents étages sont séparés par des plaques d'isolations en cuivre pour éviter toute influence d'interférence d'un étage sur un autre; le tout est enfermé dans un boîtier en cuivre de forme rectangulaire dont les dimensions sont: 230X150X50.

+12V

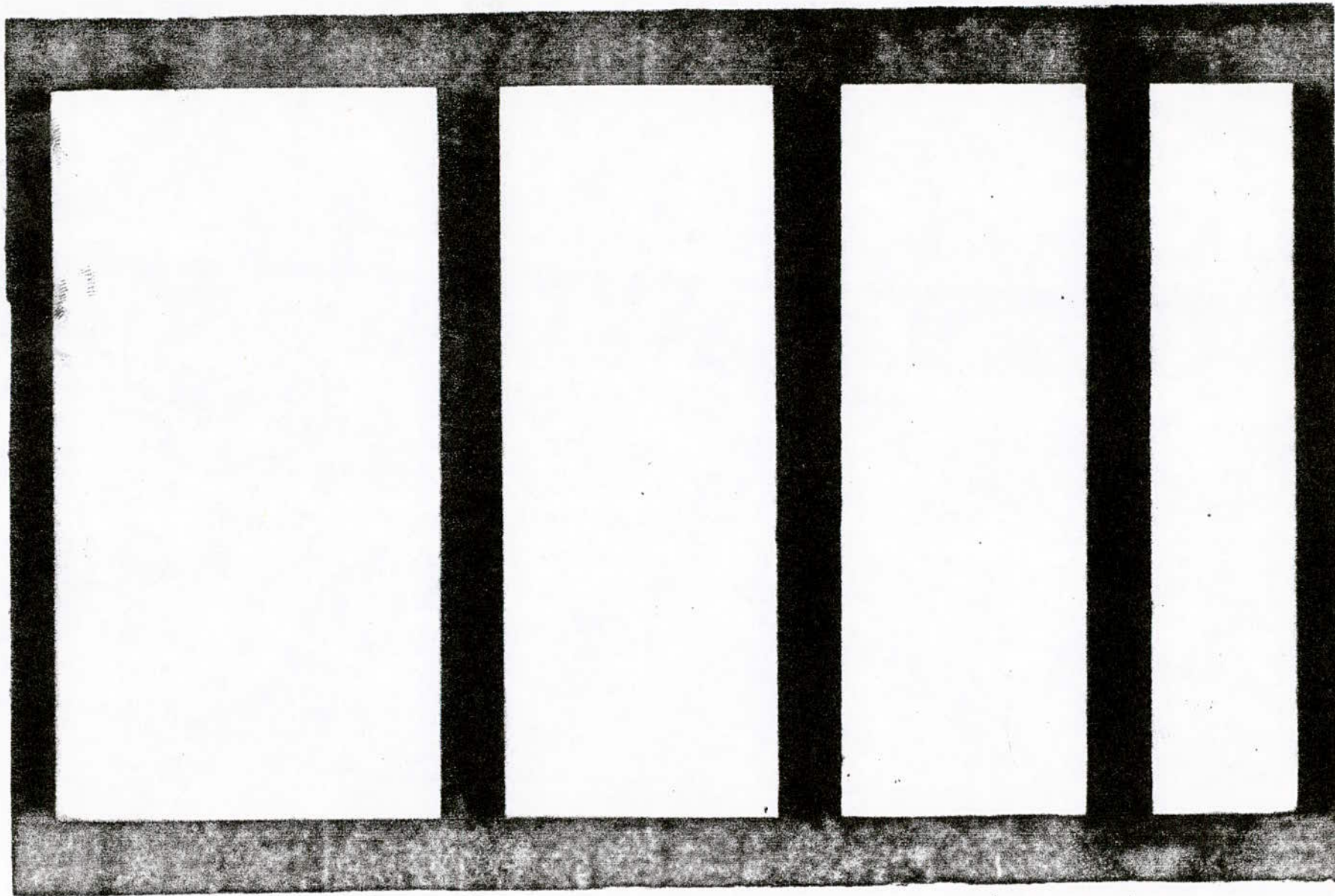


- (1) vers récepteur
- (2) Bobine d'excitation

Schema électrique du système Emetteur

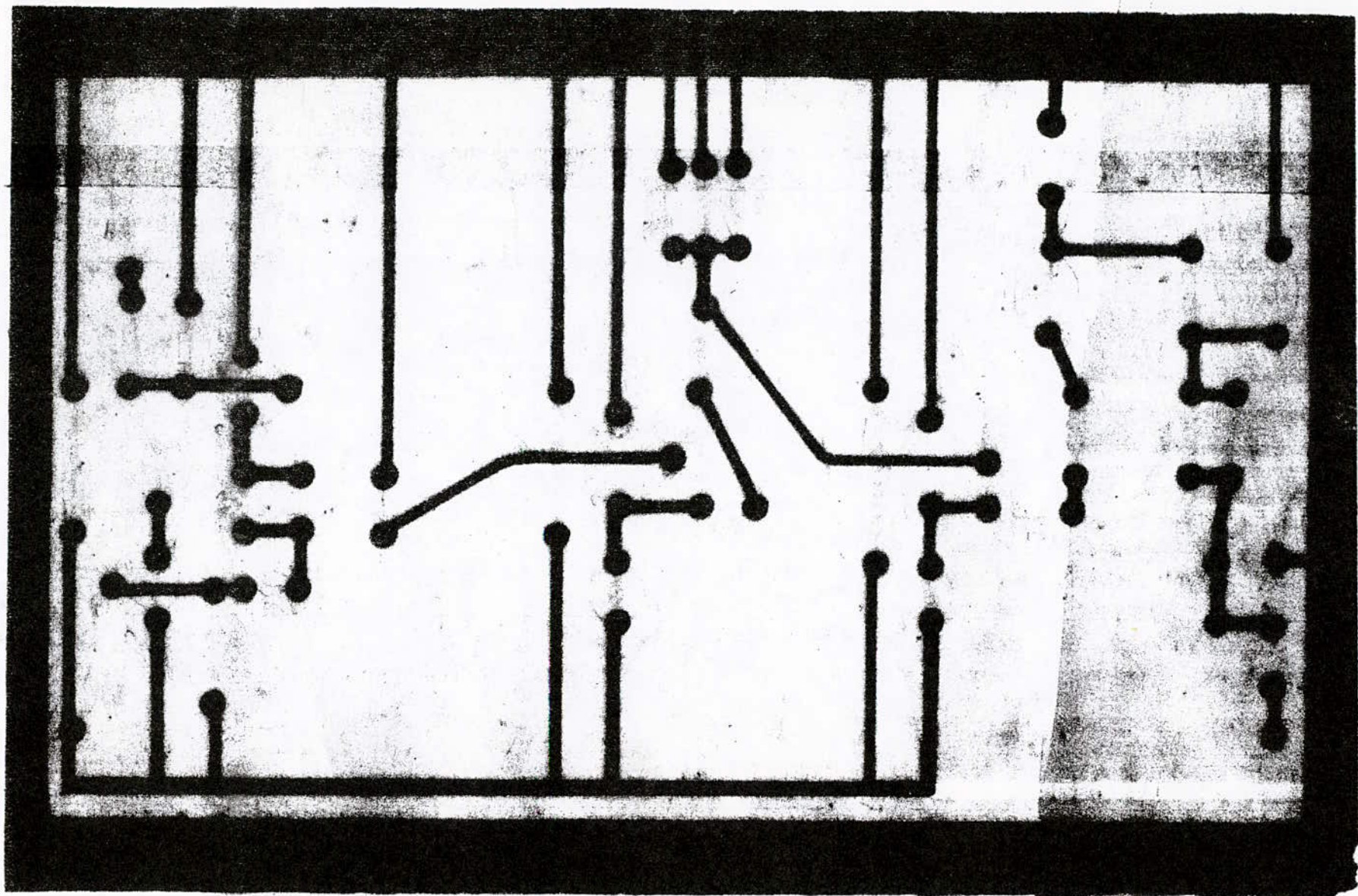


Schema d'Implantation du Système Emetteur



Circuit Imprimé Côté Composants

Figure-10-

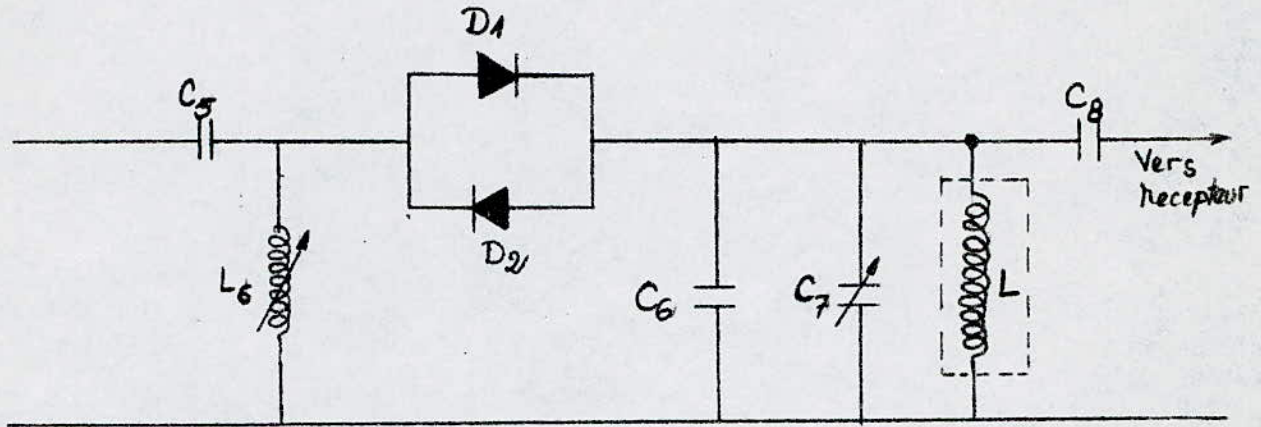


Circuit Imprimé côté Soudures
FIGURE - 11 -

C/ LA BOBINE

D'ÉXCITATION

1) SCHEMA ELECTRIQUE :



2) PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

La cellule L_6, C_5 de l'entrée réalise l'adaptation d'impédance entre l'émetteur et la bobine d'excitation.

— Les diodes D_1 et D_2 montées en tête bêche, empêchent le signal de précession libre de passer dans l'émetteur lors de la période "OFF". Ce signal de précession libre, caractéristique des temps de relaxation T_1 et T_2 , est induit par les noyaux de l'échantillon, et émis, par l'intermédiaire de la bobine d'excitation vers le récepteur.

— Les capacités C_6 et C_7 , avec la bobine, réalisent un circuit résonant parallèle à la fréquence de 10 Mhz.

Paraphemin

D/ LE SYSTEME
RECEPTEUR

1) INTRODUCTION:

L'étude est la réalisation du système récepteur a déjà fait à plus d'un titre l'objet d'une thèse de projet de fin d'étude. Néanmoins, la réalisation est restée toujours inachevée faute de manque de composants: dans ce sens, notre travail s'est basé sur l'achèvement et la mise au point ainsi que la mesure de certaines caractéristiques d'un système récepteur dont l'étude et la réalisation ont été faites (voir thèse janvier 1984: RMN étude et réalisation d'un système récepteur par impulsions pour la mesure des temps de relaxations).

1) SYSTEME RECEPTEUR:

1) ROLE:

Le signal induit par l'échantillon étant très faible (de quelques microvolts), il est donc nécessaire de l'amplifier afin de pouvoir l'analyser. Le rôle du système récepteur est donc d'amplifier le signal issu de l'échantillon jusqu'à un niveau acceptable.

2) SCHEMA DE PRINCIPE: (voir figure-1)

L'étage préamplificateur constitué du MOS FET (T1) ET DU FET (T2) est un ampli sélectif à bande étroite; le second étage constitué de deux circuits intégrés CA3028 est un ampli de tension à large bande dont le gain est réglable par l'intermédiaire de deux potentiomètres ajustables P1 et P2.

3) Mesures:

Après réalisation et mise au point on effectue les mesures suivantes:

a) PREAMPLI (3N304 ET BFW10):

Pour un signal d'entrée $U_e = 4\text{mV}$ on a obtenu une tension de sortie $U_s = 120\text{mV}$ d'ou le gain:

$$G_{AV} = U_s / U_e = 120\text{mV} / 4\text{mV} = 30$$

$$\text{soit } G_{dB} = 20 \log 30 = 29,5 \text{ dB}$$

b) LA BANDE PASSANTE:

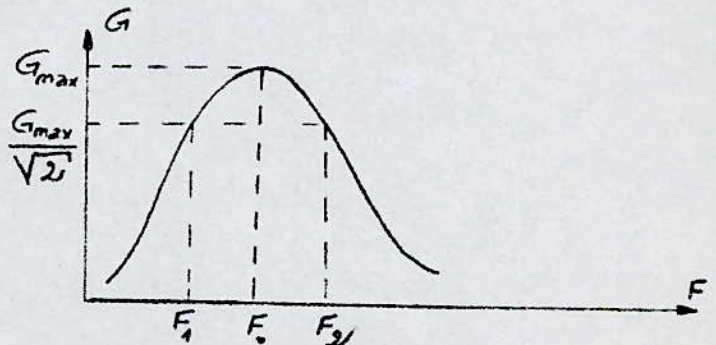
Les mesures nous ont données:

$$F_1 = 9.5\text{Mhz}$$

$$F_2 = 10.5\text{Mhz}$$

D'ou la bande passante:

$$B = F_2 - F_1 = 1\text{Mhz}$$



b) L'AMPLI :

Il est constitué de deux CA3028.
Pour un signal d'entrée $U_e = 4\text{mV}$ on a obtenu $U_{s2} = 1\text{V}$
D'où le gain : $G_{s2} = U_{s2} / U_e = 1000\text{mV} / 4\text{mV} = 250$
soit un gain total de l'ampli :

$$G_{\text{dB}} = 20 \log 250 = 48\text{dB}$$

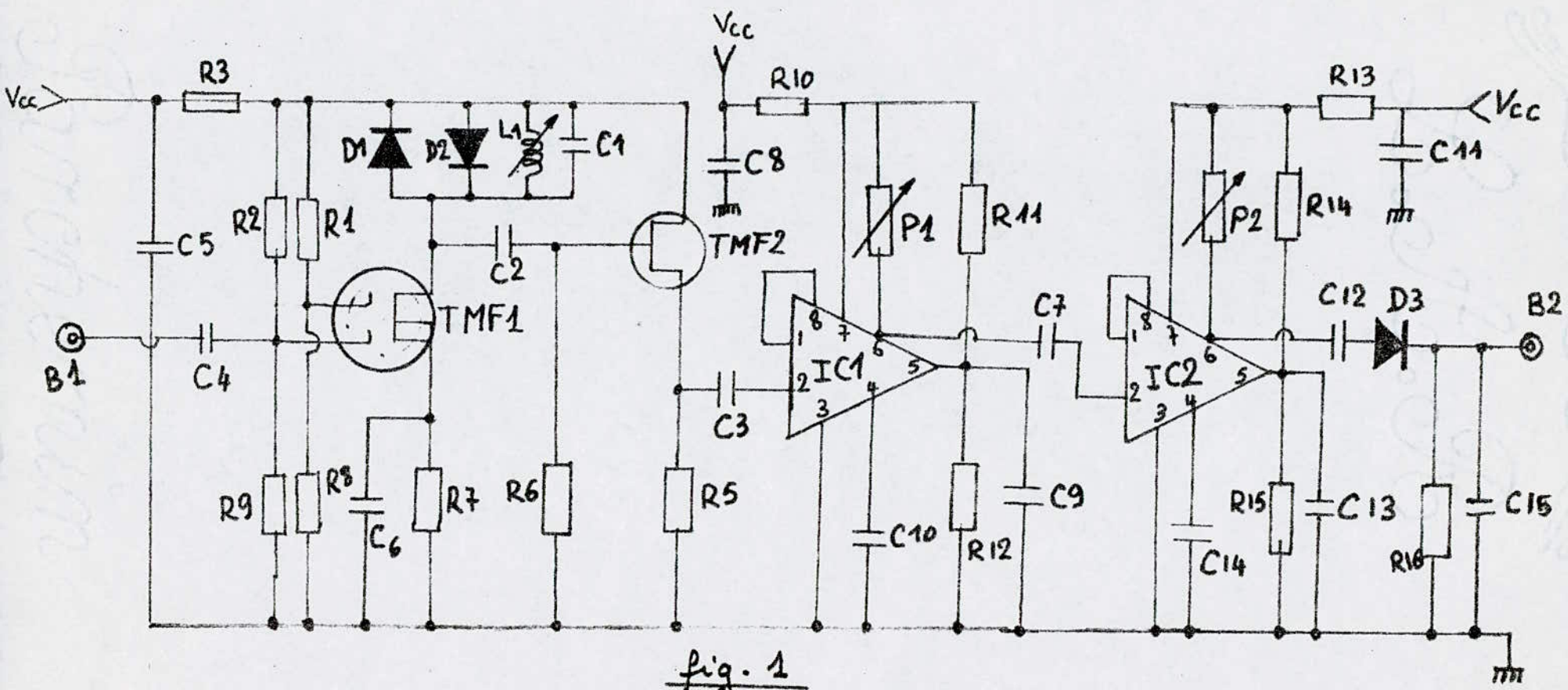


fig. 1

SCHEMA DE PRINCIPE DU RECEPTEUR

LISTE DES COMPOSANTS:
IDLE SYSTEME EMETTEUR:

*Capacités:

$C_0=2200\text{pF}$
 $C1=33\text{pF}$
 $C=C3=42\text{pF}$
 $C4=C4=C5=C3=100\text{pF}$
 $C6=25\text{pF}$
 $C7=3334\text{pF}$
 $C8=56\text{pF}$

*Resistances:

$R=10\text{K}\Omega$
 $R1=R=470\Omega$
 $R2=1\text{K}\Omega$

*Bobines:

$L4=L5=336\mu\text{H}$
 $L4=L5=515\mu\text{H}$
 $L6=144\mu\text{H}$

*Transistors:

$T1=BF254$
 $T2=2N2222$
 $T3=T4=2N2193$

*Diodes

$D=D1=D2=1N4148$

IDLE SYSTEME RECEPTEUR:

*capacités:

$C1=18\text{pF}$
 $C2=C3=C7=C12=100\text{pF}$
 $C4=56\text{pF}$
 $C5=C6=C8=C9=C10=C11=C13=C14=C15=0.01\mu\text{F}$

*Resistances:

$R1=R2=R6=R8=150\text{K}\Omega$
 $R3=R10=R13=68\Omega$
 $R5=150\Omega$
 $R7=220\Omega$
 $R9=68\text{K}\Omega$
 $R11-R14=1\text{K}\Omega$
 $R12=R15=R16=2.2\text{K}\Omega$
 $P1=P2=2.2\text{K}\Omega$

*Bobine:

$L1=12.5\mu\text{H}$

*Transistors:

$TMF1=3N304$
 $TMF2=BFW10$

*Circuits intégrés:

$IC1=IC2=CA3028$

*Diodes:

$D1=D2=1N4148$

CHAPITRE 4

APPLICATIONS

a) MESURE DU TEMPS DE RELAXATION T1 PAR LA METHODE DE LA SATURATION PROGRESSIVE :

Cette methode est bas e sur le phénomène de précession libre de l'aimantation \vec{M} après une impulsion d'excitation.

Initialement l'aimantation est dirigée selon l'axe z tel que :

$$M_x = M_y = 0 \text{ et } M_z = M$$

Une impulsion $\pi/2$ amène l'aimantation \vec{M} sur l'axe oy tel que :

$$M_x = M_y = M \text{ et } M_z = 0$$

A la fin de l'impulsion, le mouvement de précession libre de l'aimantation \vec{M} amorcée autour de l'axe oz aura la loi de variation :

$$M_z(t) = M(1 - \exp(-t/T_1)) \quad (1)$$

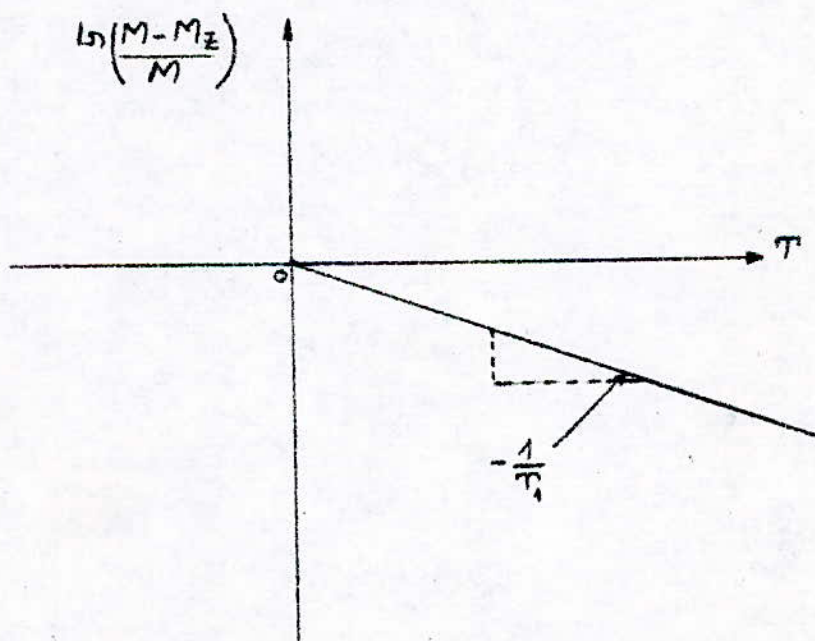
En developpant l'équation (1) on obtient :

$$\ln(M - M_z/M) = -t/T_1$$

On se propose de mesurer le temps de relaxation T1 en appliquant des impulsions $\pi/2$. Pour differentes valeurs de la période T on releve pour chaque cas sur l'oscilloscope l'amplitude maximale de l'aimantation M_z .

On trace par la suite le graphe de la quantite' $y = \ln(M - M_z/M) = -t/T_1$ qui est une droite de pente $-1/T_1$.

Connaissant la pente, il serait facile d'en deduire le temps de relaxation T1.



b) Application en biomédicale:

L'analyse d'un tissu humain repose sur la mesure de son temps de relaxation T1

Pour un tissu cancéreux, sa valeur sera très supérieure à la valeur normal.

L'application de la R.M.N, dans de domaine de l'imagerie médicale, apais
avantage sur les anciennes méthodes telles que le scanner et les Rayons X,
pour deux importantes raisons.

- D'une part, parce qu'elle est moins nocive pour le corps humain.
- D'autre part, le contraste et la définition obtenus pour cette méthode, font
que la qualité et la netteté de l'image dépassent de loin celles des autres
méthodes.

CONCLUSION

Le travail réalisé au cours de ce semestre permet d'achever la réalisation du spectromètre RMN à impulsions.

L'expérience nous a appris que pour faire une réalisation en haute fréquence, il faut avoir beaucoup de patience et de persévérance.

Nous espérons par ce travail avoir donné une idée sur le phénomène de magnétisme nucléaire et que l'étude et les réalisations faites apporteront une contribution à la réalisation et la mise au point définitive du spectromètre RMN à impulsions; notre souhait est de voir d'autres étudiants continuer ce travail par l'étude des caractéristiques de l'électroaimant ainsi que le tracé de sa courbe caractéristique $H=f(I)$, courbe dont l'importance est primordiale pour l'obtention du signal RMN.

BIBLIOGRAPHIE

- *Cagnac tome 1 "physique atomique".
- *D.W Mathieson "Nucléar Magnétique Resonance".
- *Steffen B Peterson } An introduction
Robert N Muller } to Biomedical
Peter A Rinck } Nuclear Magnetic
Resonance
- *L'imagerie par résonance magnétique nucléaire:
Revue la Recherche N°172 décembre 1985 .
- *La résonance magnétique nucléaire en médecine:
Revue électronique application N°30 Juin 1983
- *Malvino
- *Milsant tome 3
- *Projet fin d'étude:
La Résonance Magnétique Nucléaire
Janvier 83; Janvier 84; Juin 84; Juin 86