

PN 000 8/88
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D' ELECTRONIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE DU SPECTROMETRE R. M. N

ET

MESURE DU TEMPS DE RELAXATION

Proposé par :

R. ZERGUI

Etudié par :

**H. BENSALD
H. BERKOUK**

Dirigé par :

R. ZERGUI

PROMOTION : Janvier 1988

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

Nous remercions Messieurs R. PUVADA et R. ZERGUI pour nous avoir conseillé et suivi tout au long de notre travail.

Nous remercions également l'ensemble des professeurs de l' E.N.P. auxquels nous devons notre formation , ainsi que tous nos amis pour leur soutien moral constant.

Nous tenons aussi à exprimer notre gratitude à Monsieur SAIS Djamel pour l'aide apportée à la mise a jour de ce polycopie.

P R E A M B U L E



Mis en évidence en 1946 par les professeurs F.BLOCH et E.PURCELL, le phénomène physique de résonance magnétique nucléaire R.M.N a constitué pendant plusieurs années un puissant outil d'analyse chimique qui permettait de préciser la structure des grosses molécules organiques.

Au cours de ces deux dernières décennies, la R.M.N a vu son utilisation s'élargir au domaine médical où elle bénéficie d'un intérêt grandissant.

En effet, l'imagerie R.M.N n'utilisant pas de produits de contraste et ne soumettant pas le corps à des radiations ionisantes, fournit sans aucun risque pour le patient des images de grande qualité apportant une aide précieuse au diagnostic.

L'étude de la résonance magnétique nucléaire a fait l'objet de nombreux ouvrages scientifiques et thèses de fin d'études

La réalisation des différents éléments du spectromètre R.M.N s'est étalée sur plusieurs semestres et a nécessité le travail d'un bon nombre d'étudiants.

De notre côté, nous avons essayé tout au long de ce projet de présenter et d'expliquer le phénomène de la résonance magnétique nucléaire ainsi que le fonctionnement du spectromètre .

Du point de vue pratique, notre but a été la mise au point finale de l'appareil, l'obtention du signal R.M.N et son utilisation pour la mesure des temps de relaxation.

* CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITES SUR LA R.M.N	.....1
- 1-1. Rappels	.....2
a) Le moment cinétique	.....2
b) Le moment magnétique	.....2
c) Le rapport gyromagnétique	.....2
d) Quantification des moments cinétique et magnétique	..3
e) Le nombre quantique magnétique	.....3
f) Le nombre quantique de spin	.....3
- 1-2 Etude et interprétation de la R.M.N par la physique quantique	.....4
a) Principe et différentes étapes de la R.M.N	.....4
b) Action d'un champ extérieur sur un noyau - précession de LARMOR -	.....7
c) Notion de relaxation	.....8
d) Temps de relaxation	.....8
- 1-3 Interprétation quantique de la R.M.N	.....9
 * CHAPITRE 2 : CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT DU SPECTROMÈTRE R.M.N	.....12
- 2-1 Introduction	.....13
- 2-2 Schéma synoptique du spectromètre R.M.N	.....14
- 2-3 Principe général et fonctionnement du spectromètre R.M.N à impulsions	.....15
a) Constitution	.....15
b) Fonctionnement	.....15
 * CHAPITRE 3 : ÉTUDE DES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS DU SPECTROMÈTRE R.M.N A IMPULSIONS	.....17
- 3-1 Le programmeur d'impulsions	.....18
a) Rôle	.....19
b) Constitution	.....19
c) Schéma synoptique	.....20
d) Fonctionnement	.....21
e) Chronogrammes	.....22
f) Mesures	.....23
- Liste des composants -	.....25

- 3-2	Le système émetteur	26
a)	Introduction	27
b)	Synoptique général	27
c)	Fonctionnement	28
d)	Étude des différents étages du système émetteur	28
-	Le circuit de commande	28
-	L'oscillateur radio-fréquence	28
-	L'amplificateur de puissance	29
-	L'étage de liaison	30
e)	Réalisation pratique	31
-	Circuit imprimé	31
-	Isolation	31
-	Mesures	31
-	Liste des composants -	38
- 3-3	Bobine d'excitation	40
- 3-4	L'électroaimant	40
- 3-5	Le système récepteur	42
a)	Introduction	43
b)	Synoptique général	43
c)	Étude des différents étages	44
-	Le préamplificateur	44
-	L'adaptateur	44
-	L'amplificateur	45
-	Filtrage et détection	45
d)	Réalisation pratique	46
-	Circuit imprimé	46
-	Isolation	46
-	Mesures	46
-	Liste des composants -	53
* CHAPITRE 4 :	MESURE DES TEMPS DE RELAXATION	54
a)	Mesure du temps de relaxation T_1	55
b)	Résultats expérimentaux	57
* CONCLUSION	.....	61
* BIBLIOGRAPHIE	.....	62

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LA R.M.N

CHAP 1 : GENERALITES SUR LA R.M.N

1-1. RAPPELS :

-a) Le moment cinétique :

Pour un système de points matériels en mouvement on définit un vecteur moment cinétique par :

$$\vec{\sigma} = \sum_n \vec{r}_n \wedge m_n \cdot \vec{v}_n$$

où : \vec{r}_n : rayon vecteur de chaque point matériel par rapport à une origine choisie.

m_n : masse de chaque point matériel.

\vec{v}_n : vecteur vitesse de chaque point matériel

-b) Le moment magnétique :

Pour un système de charges électriques en mouvement, on définit un vecteur moment magnétique $\vec{\mu}$ de module :

$$\mu = \frac{1}{k} \sum_n \frac{1}{2} r_n \cdot q_n v_n$$

où : k : est une constante relative au système d'unités ($k=1$ pour M.K.S.A)

q_n : valeur de chaque charge ponctuelle.

v_n : vitesse de chaque charge ponctuelle.

r_n : distance entre la charge et l'origine choisie.

-c) Le rapport gyromagnétique :

Le rapport gyromagnétique γ est un scalaire qui relie le moment cinétique au moment magnétique, il est tel que :

$$\gamma = \mu / \sigma$$

-d) Quantification des moments cinétique et magnétique :

En mécanique quantique, on démontre que la composante σ_z du moment cinétique (fig 1.1) suivant l'axe vertical oz ne prend que certaines valeurs spécifiques dont les différences sont des multiples de la quantité $\hbar = h / 2 \pi$ où h : constante de PLANCK.

Le moment cinétique est donc quantifié ainsi que le moment magnétique qui lui est proportionnel.

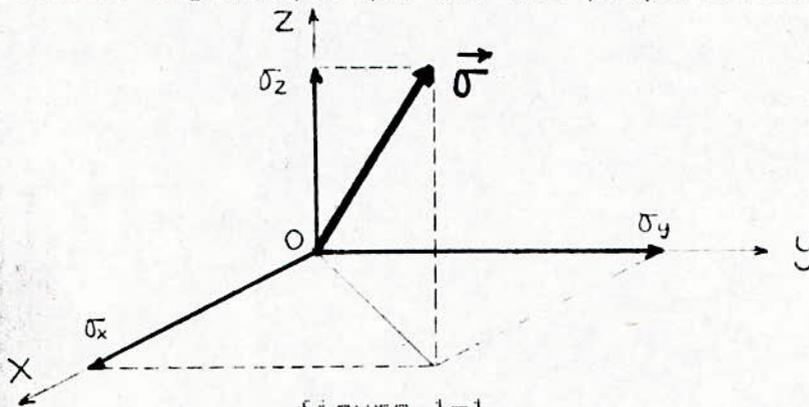


figure 1-1

-e) Le nombre quantique magnétique :

Les valeurs observables de la composante σ_z du moment cinétique sont données par la formule :

$$\sigma_z = m_I h / 2 \pi = m_I \hbar \quad h : \text{constante de PLANCK}$$

m_I est un nombre entier ou demi-entier appelé nombre quantique magnétique.

-f) Le nombre quantique de spin :

Le nombre quantique de spin I représente la valeur maximale du nombre quantique magnétique correspondant à la valeur maximale de la composante σ_z du moment cinétique.

Le nombre quantique de spin I est une caractéristique du noyau, il permet de déterminer les $2I + 1$ valeurs observables de σ_z .

* REMARQUE :

Dans le cas d'un nombre quantique de spin nul ($I = 0$) le noyau ne présente pas de phénomène R.M.N.

1-2. ETUDE ET INTERPRETATION DE LA R.M.N PAR LA PHYSIQUE CLASSIQUE :

-a) Principe et différentes étapes de la R.M.N :

Si nous plaçons un volume de matière contenant un certain nombre d'atomes dans un champ magnétique uniforme H_0 , il apparaît un moment magnétique \vec{M} aligné avec la direction du champ, le milieu à son état d'équilibre devient polarisé.

L'ensemble des protons du volume se comporte en moyenne comme une toupie portant le long de son axe une aiguille aimantée.

L'application d'une onde électromagnétique de fréquence f_0 dite "fréquence de LARMOR" créera un champ magnétique tournant H_1 faible, perpendiculaire à H_0 qui aura pour effet d'écartier le moment magnétique \vec{M} de sa position d'équilibre tout en continuant son mouvement de précession autour de H_0 (fig 1-2).

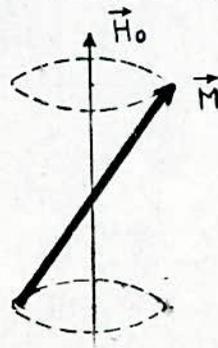


figure 1-2

Tant que dure l'impulsion électromagnétique R.F créant H_1 , le moment magnétique \vec{M} continue à s'écarter de H_0 tout en tournant autour de sa direction.

L'extrémité du vecteur moment magnétique va alors se déplacer le long d'une spirale inscrite sur une sphère.

(fig 1-3) .

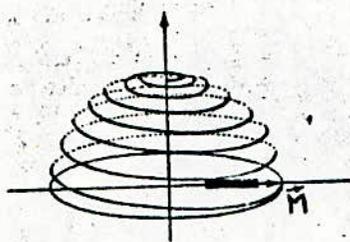
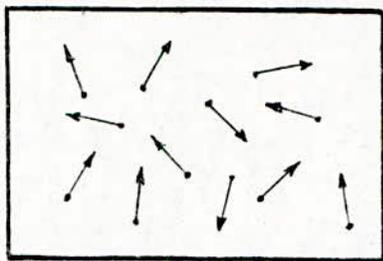


figure 1-3

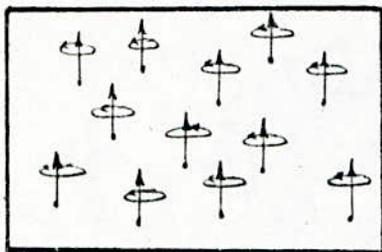
L'impulsion électromagnétique R.F dont la durée provoque un basculement du moment magnétique \vec{M} de 90° est dite : " Impulsion $\pi/2$ ", de la même manière une " Impulsion π " provoquera un basculement de 180° .

Quand l'excitation est arrêtée, c'est à dire quand le champ H_1 disparaît, le moment magnétique \vec{M} revient à sa position d'équilibre tout en poursuivant son mouvement de précession et en restituant une partie de l'énergie accumulée au cours du basculement par émission d'un signal R.F à la fréquence f_0 - Signal R.M.N - .

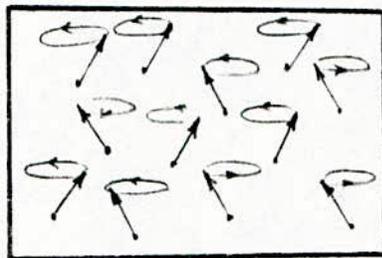
le principe général et les différentes étapes de la R.M.N sont résumées par la (figure 1-4) .



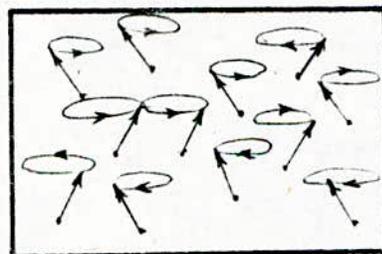
-a) État initial de l'échantillon. Les moments magnétiques sont désorganisés par l'agitation thermique.



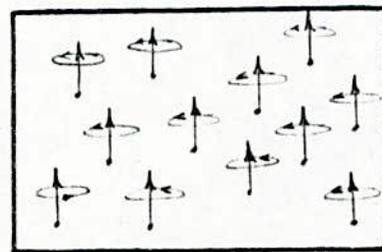
-b) Les moments magnétiques s'alignent sous l'application du champ directeur H_0 .



-c) L'application d'un champ magnétique tournant H_1 crée un mouvement de rotation des moments magnétiques autour de la direction de H_0 .



-d) Arrêt de l'impulsion radiofréquence crée H_1 , réalignement des moments magnétiques et émission du signal R.M.N.



-e) Retour à l'état d'équilibre. Les moments magnétiques sont à nouveau réorganisés autour de H_0 .

figure 1-4

-b) Action d'un champ extérieur sur un noyau :

- Précéssion de LARMOR -

Dans un champ magnétique uniforme H_0 , on place un noyau en mouvement de rotation. Le moment magnétique $\vec{\mu}$ sera soumis à un ensemble de forces dont le couple résultant est :

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

L'expression du théoème du moment cinétique $\vec{\sigma}$ dans le système d'axes ayant pour origine le centre de gravité du noyau sera :

$$\vec{\Gamma} = \frac{d\vec{\sigma}}{dt} = \vec{\mu} \wedge H_0$$

en utilisant l'expression du rapport gyromagnétique $\gamma = \mu/\sigma$ et les propriétés du produit vectoriel on aura :

$$\frac{d\vec{\mu}}{dt} = -\gamma \vec{H}_0 \wedge \vec{\mu}$$

en posant : $\omega_0 = 2\pi f_0 = -\gamma \cdot H_0$

on aboutit à l'équation de BLOCH :

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

Cette relation peut être généralisée à un grand nombre de noyaux simplement en utilisant le vecteur aimantation globale \vec{M} , obtenu par sommation vectorielle des moments magnétiques de chacun des noyaux .

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

Il découle de la solution de cette équation différentielle que le vecteur \vec{M} décrit un mouvement circulaire d'axe oz appelé mouvement de précession de LARMOR .

La vitesse de précession est constante de pulsion :

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \gamma \cdot H_0$$

avec : f_0 : fréquence de LARMOR.

-c) Notion de relaxation :

Comme on l'a vu précédemment, l'application d'une onde électromagnétique de fréquence f_0 de LARMOR aura pour effet le basculement des moments magnétiques des noyaux initialement alignés sur le champ uniforme H_0 .

Quand l'excitation est arrêtée, c'est à dire quand le champ H_1 disparaît les moments magnétiques se réalignent progressivement sur H_0 tout en poursuivant leur mouvement de précession rapide.

Ce retour progressif à l'état d'équilibre est appelé RELAXATION, il s'accompagne d'une émission d'un signal RF ayant la forme d'une sinusoïde amortie.

-d) Temps de relaxation :

L'énergie réémise par les noyaux pendant leur retour à l'état d'équilibre n'est pas immédiatement détectée, sa propagation est retardée par :

- Un noyau voisin qui l'absorbe et rebascule. C'est la relaxation spin-spin (où Transversale) caractérisée par un temps de relaxation T_2 .

- Le réseau entier, c'est la relaxation spin-réseau (où longitudinale) caractérisée par un temps de relaxation T1.

La mesure de ces deux temps de relaxation est importante en R.M.N car leur connaissance nous renseigne sur le noyau et son environnement et constituent la base de la technique d'imagerie par R.M.N . (I.R.M.N)

1-3. INTERPRETATION QUANTIQUE DE LA R.M.N :

Considérons un échantillon dans son état d'équilibre thermique, si E₀ représente l'énergie correspondant à l'état propre de l'atome (sans interaction extérieure), lorsqu'on applique le champ statique H₀, l'énergie du noyau devient :

$$E(m_I) = E_0 + W(m_I)$$

où W(m_I) est l'énergie d'interaction entre le moment magnétique \vec{M} du noyau et le champ \vec{H}_0

$$W(m_I) = - \vec{M} \cdot \vec{H}_0 = - M_z \cdot H_0$$

cette énergie est quantifiée car les valeurs de M_z sont quantifiées.

Donc le niveau d'énergie E₀ se trouve après application de H₀ subdivisé en plusieurs sous-niveaux correspondant chacun à une valeur déterminée du nombre quantique magnétique m_I. (fig 1-5)

Ces sous-niveaux ne possèdent pas des populations égales. Les sous-niveaux inférieurs seront plus peuplés

que les sous-niveaux supérieurs.

Le rapport des deux populations est donné par la relation statistique de BOLTZMANN :

$$N_+/N_- = \exp(\gamma \cdot h \cdot H_0 / 2\pi) = \exp(\Delta E / K \cdot T)$$

avec :

N_+ : population du sous-niveau supérieur

N_- : population du sous-niveau inférieur

γ : rapport gyromagnétique

T : température absolue du milieu

h : constante de PLANCK

K : constante de BOLTZMANN

ΔE : écart énergétique entre les niveaux supérieur et inférieur

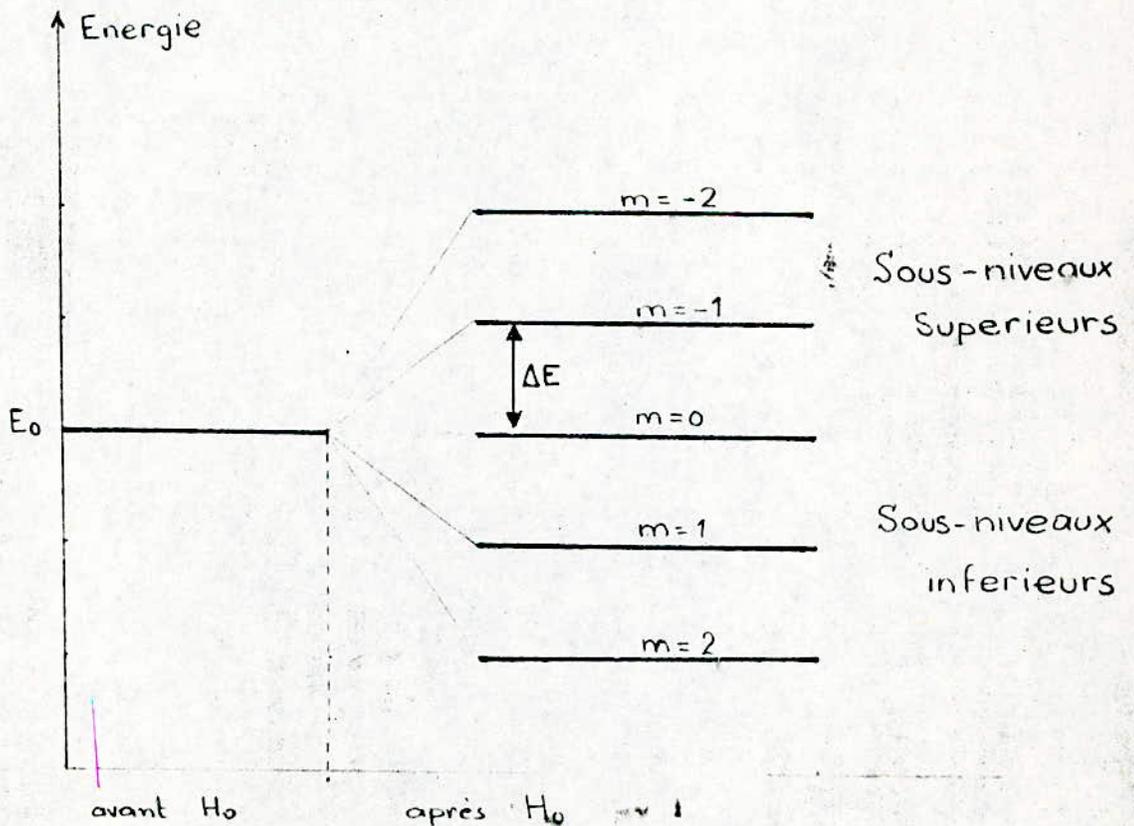


figure 1-5

En appliquant le champ tournant H_1 , et lorsque sa vitesse de rotation atteint la vitesse de précession ω_0 , il y aura absorption d'énergie et transition des électrons des sous-niveaux inférieurs vers les sous-niveaux supérieurs de façon à égaliser les deux populations.

Lorsque l'induction tournante est interrompue, le système tendra vers son état initial d'équilibre par dépeuplement progressif des sous-niveaux supérieurs suivant une loi exponentielle de constante de temps T_1 appelée temps de relaxation spin-réseau.

CHAPITRE 2

CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT

DU SPECTROMETRE R . M . N

CHAP 2 : CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT DU SPECTROMETRE R.M.N .

2-1. Introduction :

Pour détecter les signaux de résonance magnétique nucléaire, on dispose de deux techniques principales :

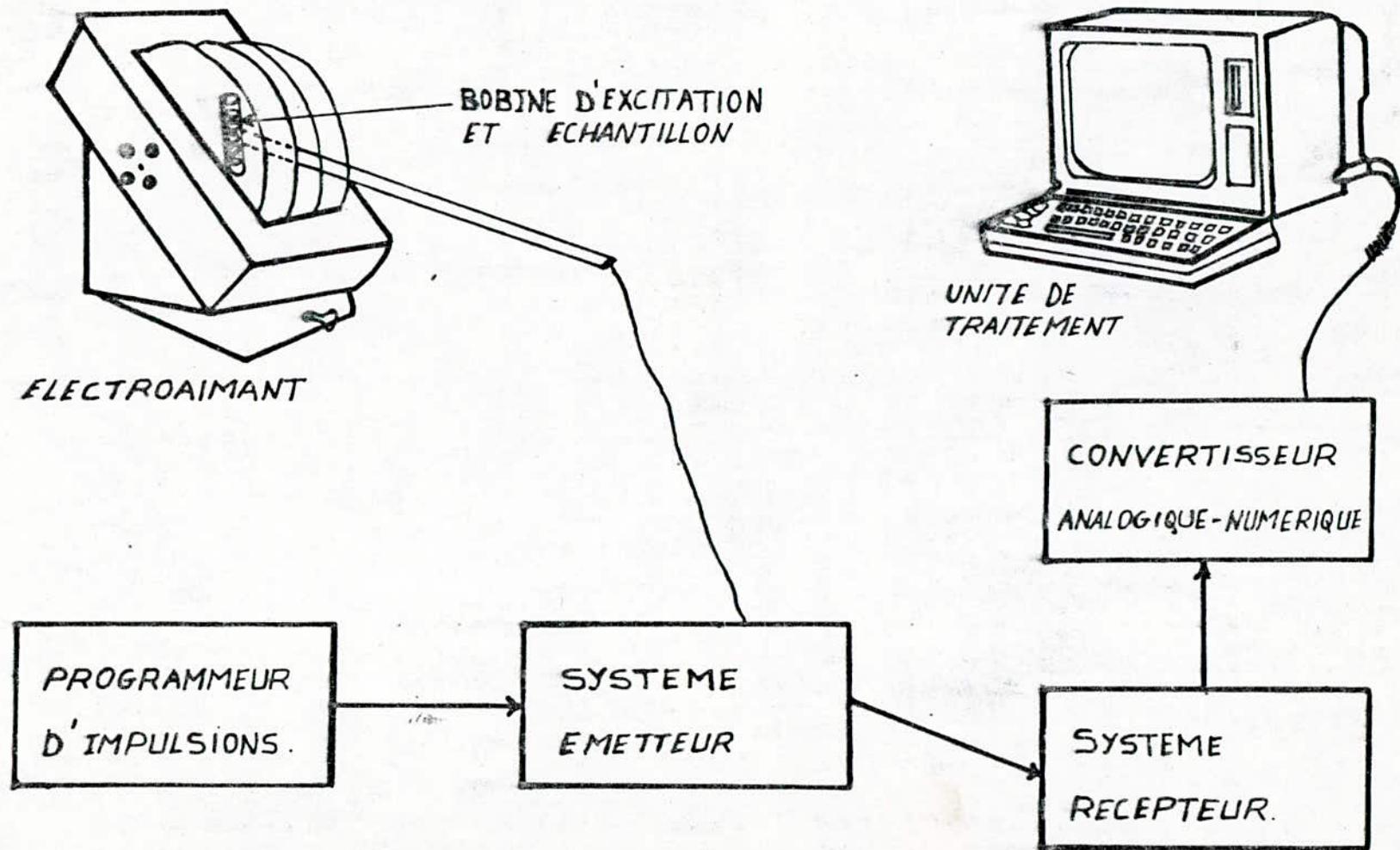
La première dite en onde continue est utilisée en analyse chimique, elle consiste à obtenir un spectre d'absorption en faisant varier la fréquence de façon continue et à induction constante.

La seconde, plus récente est utilisée en imagerie médicale, son principe est de soumettre l'échantillon à l'action d'un champ tournant créé par des impulsions radio fréquence, d'où son appellation de technique impulsionnelle.

Dans le cadre de cette étude, on s'intéressera à cette dernière technique car elle est à la base du spectromètre R.M.N réalisé.

2-2. Schéma synoptique du spectromètre R.M.N :

(voir fig 2-1)



SYNOPTIQUE GENERAL DU SPECTROMETRE R.M.N.

2-3. Principe général et fonctionnement du spectromètre R.M.N à impulsions:

-a) Constitution :

Le spectromètre R.M.N se compose de six éléments (fig 2-1)

- Le générateur d'impulsions.
- Le système émetteur.
- La bobine d'excitation.
- L'électroaimant.
- Le système récepteur.
- Le système de visualisation.

Une étude plus détaillée de chacun sera donnée au chapitre 3.

-b) Fonctionnement :

Le tube à essais contenant l'échantillon à analyser est placé à l'intérieur de la bobine d'excitation. L'ensemble est plongé dans le champ magnétique uniforme H_0 qui régné entre les deux pôles de l'électroaimant.

Le système émetteur commandé par le programmeur d'impulsions génère des salves haute fréquence de période et de durée variables.

Pendant la durée " ON " de l'impulsion, le signal radio-fréquence traverse la bobine d'excitation et crée le champs H_1 perpendiculaire et tournant autour de H_0 .

Pendant la période " OFF ", le champ H_1 disparaît, les noyaux de l'échantillon reviennent à leur état initial d'équilibre en émettant un signal de faible amplitude qui sera capté et véhiculé par la même bobine d'excitation vers le système récepteur où il sera considérablement amplifié.

Le signal R.M.N visualisé au moyen d'un oscilloscope apparaît sous la forme d'une sinusoïde amortie. Un réglage pour améliorer sa qualité peut être effectué par ajustage de la valeur du champ uniforme H_0 et de la durée des impulsions R.F.

CHAPITRE 3

ETUDE DES DIFFÉRENTS

ÉTAGES DU SPECTROMÈTRE

R . M . N A IMPULSIONS

3-1 LE PROGRAMMEUR D'IMPULSIONS

CHAP 3 : ETUDE DES DIFFERENTS ELEMENTS DU SPECTROMETRE
R.M.N A IMPULSIONS.

3-1. LE PROGRAMMEUR D'IMPULSION :

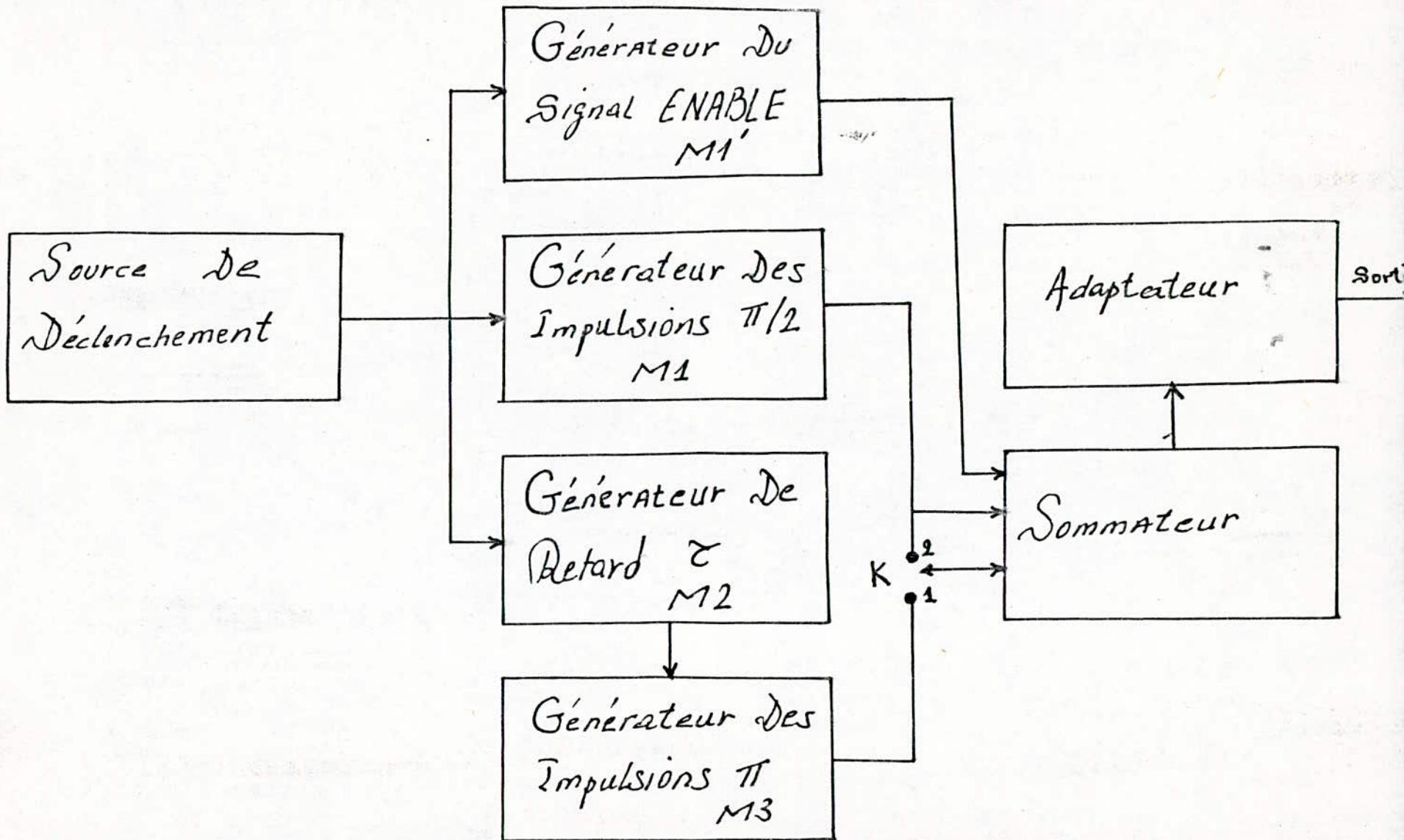
- a) Rôle :

Le programmeur d'impulsions a pour rôle la génération des séquences d'impulsions ($\pi/2$ et π) nécessaires pour commander le système émetteur, synchroniser l'oscilloscope (Trigger extérieur) et le convertisseur analogique numérique dans le cas d'une éventuelle acquisition et traitement par ordinateur (ENABLE).

- b) Constitution :

Le programmeur d'impulsions se compose de :

- Une source de déclenchement (Multivibrateur astable).
- Un générateur d'impulsions $\pi/2$ (Monostable M1).
- Un générateur de retard τ (Monostable M2).
- Un générateur d'impulsions π (Monostable M3).
- Un générateur du signal ENABLE (Monostable M1').
- Une unité de sommation.
- Un étage de sortie adaptateur d'impédance



Synoptique Du Programmeur D'Impulsions
figure 3-1

- d) Fonctionnement :

La source de déclenchement représentée par un multi-vibrateur astable, génère des impulsions de période T variable par un choix de capacité $C1$ ou $C2$ à l'aide du commutateur $K1$ et en agissant sur le potentiomètre $P1$.

Ces impulsions déclenchent simultanément à leurs fronts montants les monostables $M1$ et $M'1$ qui génèrent respectivement les impulsions $\pi/2$ et $ENABLE$ de durées réglables par le même potentiomètre $P2$ et le monostable $M2$ générateur des impulsions de retard τ réglables par le potentiomètre $P3$ et le commutateur $K2$ qui permet le choix de la capacité $C4$ ou $C5$.

Les impulsions π seront générées par le monostable $M3$ déclenché par les fronts descendants des impulsions issues de $M2$, leur durée est réglée par action sur $P4$.

Les impulsions issues de $M'1$ sont inversées et envoyées vers l'étage adaptateur d'impédance tandis que celles issues de $M1$ et $M3$ sont dans le cas où le commutateur $K3$ est en position 1 additionnées par un sommateur constitué de deux portes NOR du CI 7402 puis appliquées à l'étage adaptateur d'impédance à la sortie duquel on recueille les séquences " $\pi/2$ et π ". (fig 3.2-b).

Dans le cas où $K3$ est en position 2, on obtient en sortie un train d'impulsions $\pi/2$. (fig 3.2-a).

- e) Chronogrammes :

* K3 en position 2 :

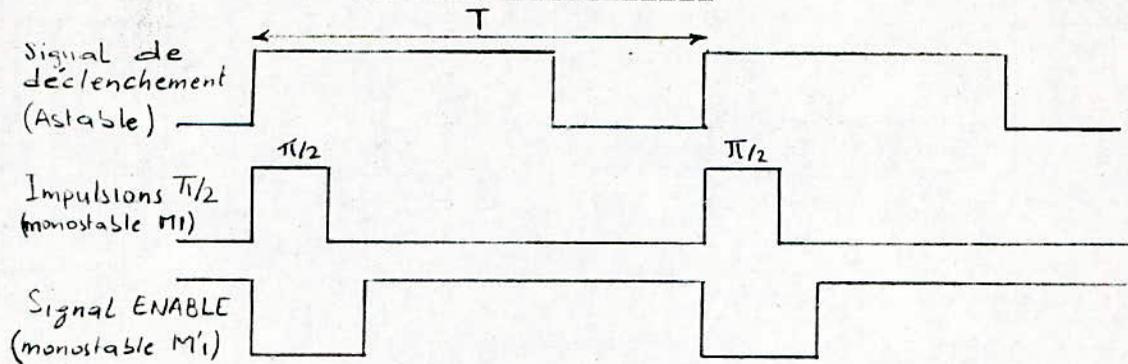


figure 3-2.a

* K3 en position 1 :

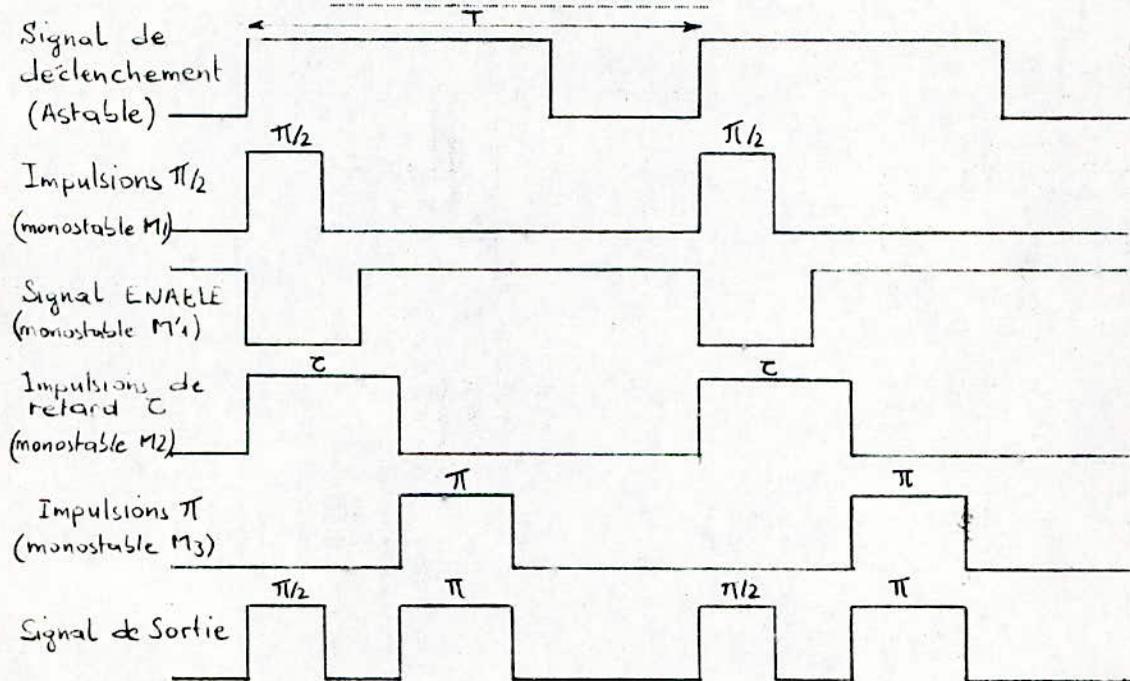


figure 3-2.b

- REMARQUE :

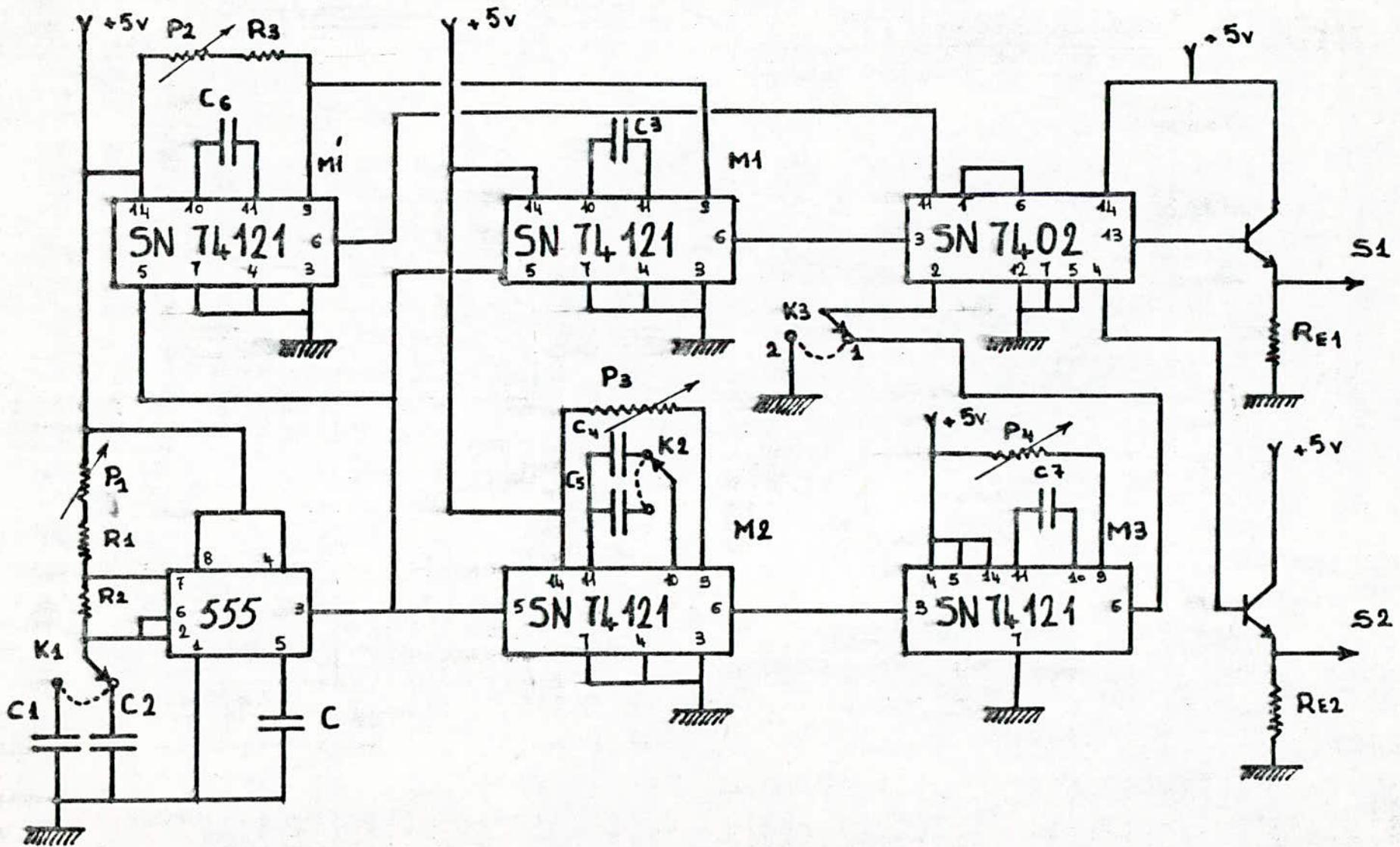
Pour éviter un chevauchement des impulsions $\pi/2$ et π la période T du monostable doit être supérieure au retard τ .

- f) Mesures :

```

*****
*   Impulsion   *   Capacité   *                               *
*                               *   Durée   *                               *
*****
*   Déclenchement * C1 = 4.7 * 11 ms .... 900 ms *
*                               *-----*
*   ( T )         * C2 = 66  * 700 ms .... 7 s *
*                               *-----*
*****
*   ENABLE       * C6 = 5 nF * 25 μs ... 250 μs *
*                               *-----*
*   π / 2        * C3 = 10 nF * 23 μs .... 210 μs *
*                               *-----*
*   Retard       * C4 = 9,4 F * 1.4 ms .... 36.5 ms *
*                               *-----*
*   ( τ )        * C5 = 100 F * 37 ms .... 6 s *
*                               *-----*
*****
*   π           * C7 = 27 nF * 36 μs .... 570 μs *
*                               *-----*
*****

```



SCHEMA ELECTRIQUE DU

PROGRAMMEUR D'IMPULSIONS

figure 3-3

LISTE DES COMPOSANTS:

- Résistances:

$R1 = R2 = 1 \text{ K}\Omega$
 $RE1 = RE2 = 2.2 \text{ K}\Omega$

$P1 = 250 \text{ K}\Omega$ (Linéaire 10 tours)
 $P2 = 22 \text{ K}\Omega$ (Linéaire)
 $P3 = 50 \text{ K}\Omega$ (Linéaire 10 tours)
 $P4 = 22 \text{ K}\Omega$ (Linéaire)

- Capacités:

$C1 = 4.7 \mu\text{F}$
 $C2 = 3 * 22 \mu\text{F}$
 $C3 = 10 \text{ nF}$
 $C4 = 2 * 0.47 \mu\text{F}$
 $C5 = 100 \mu\text{F}$
 $C6 = 5 \text{ nF}$
 $C7 = 27 \text{ nF}$

- Transistors:

$T1 = T2 = 2N 2219$

- Circuits Intégrés:

$IC1 = NE 555$
 $IC2 = IC3 = IC4 = IC5 = SN 74121$
 $IC6 = SN 7462$

3-2 LE SYSTEME ÉMETTEUR

3-2. LE SYSTEME EMETTEUR :

- a) Introduction :

Pour obtenir le signal de résonance magnétique nucléaire, l'échantillon devra être soumis à l'action de deux champs magnétiques, l'un uniforme (H_0) est fourni par l'électroaimant, l'autre tournant (H_1) est créé par les salves radio-fréquence générées et amplifiées en puissance par le système émetteur commandé par le programmeur d'impulsions.

- b) Synoptique général :

Le système émetteur comporte quatre étages (fig 3-4):

- Circuit de commande.
- Oscillateur radio-fréquence.
- Amplificateur de puissance.
- Etage de liaison.

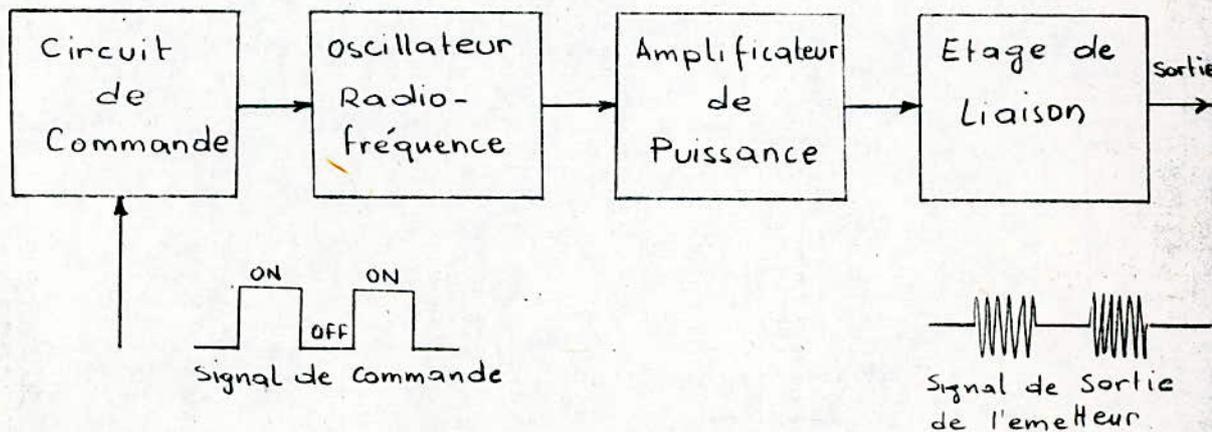


figure 3-4

- c) Fonctionnement :

Le programmeur d'impulsions est directement relié au circuit de commande qui lui permet d'agir sur l'oscillateur radio-fréquence et contrôler son fonctionnement de sorte qu'il ne travaille que pendant la durée " ON " des impulsions. (fig 3-5)

Les salves R.F ainsi obtenues, sont alors amplifiées en puissance puis envoyées vers la bobine d'excitation par l'intermédiaire d'un étage de sortie adaptateur d'impédance.

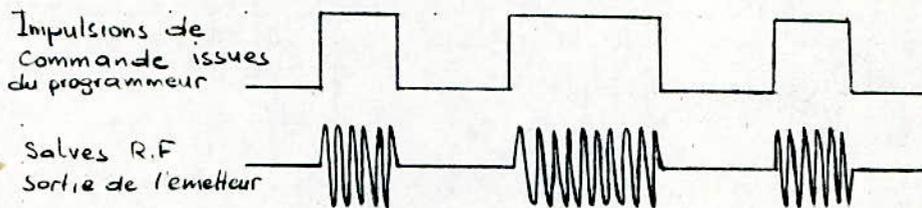


figure 3-5

- d) Etude des différents étages du système émetteur :

* Le circuit de commande :

Il est réalisé à partir d'un transistor (T2) travaillant en commutation. Il est saturé pendant la durée " ON " des impulsions issues du programmeur, le point M de l'oscillateur est alors à la masse ce qui permet son fonctionnement.

Pendant la durée " OFF ", le transistor est bloqué, le point M est en l'air et l'oscillateur ne délivre aucun signal.

* L'oscillateur radio-fréquence :

L'oscillateur utilisé est du type HARTLEY à collecteur commun. Le signal H.F de sortie est prélevé aux bornes de la bobine L3 couplée magnétiquement avec L1 et L2 .

L'étude théorique donne comme expression de la fréquence des oscillations :

$$f = 1 / 2\pi \sqrt{L.C2} \quad \text{où} \quad L = L1 + L2$$

La fréquence de travail du spectromètre est fixée à 5 MHz , on a choisi C2 = 51 pF et réalisé sur le même support les selfs L1 et L2.

* L'amplificateur de puissance :

Pour l'amplification en puissance des salves R.F on se doit de choisir un montage travaillant en hautes fréquences, absorbant peu de puissance afin d'éviter une dérive importante en fréquence et également présenter un bon rendement et une puissance de sortie suffisante.

Le circuit à deux amplificateurs classe C montés en cascade a été adopté car il répond à l'ensemble de ces critères.

Chacun des deux étages préamplificateur et amplificateur est constitué donc par un transistor 2N 2193 travaillant en classe C caractérisée par un courant collecteur Ic sous forme d'impulsions brèves et un point de repos situé en dessous du point de blocage 0 . (fig 3-6)

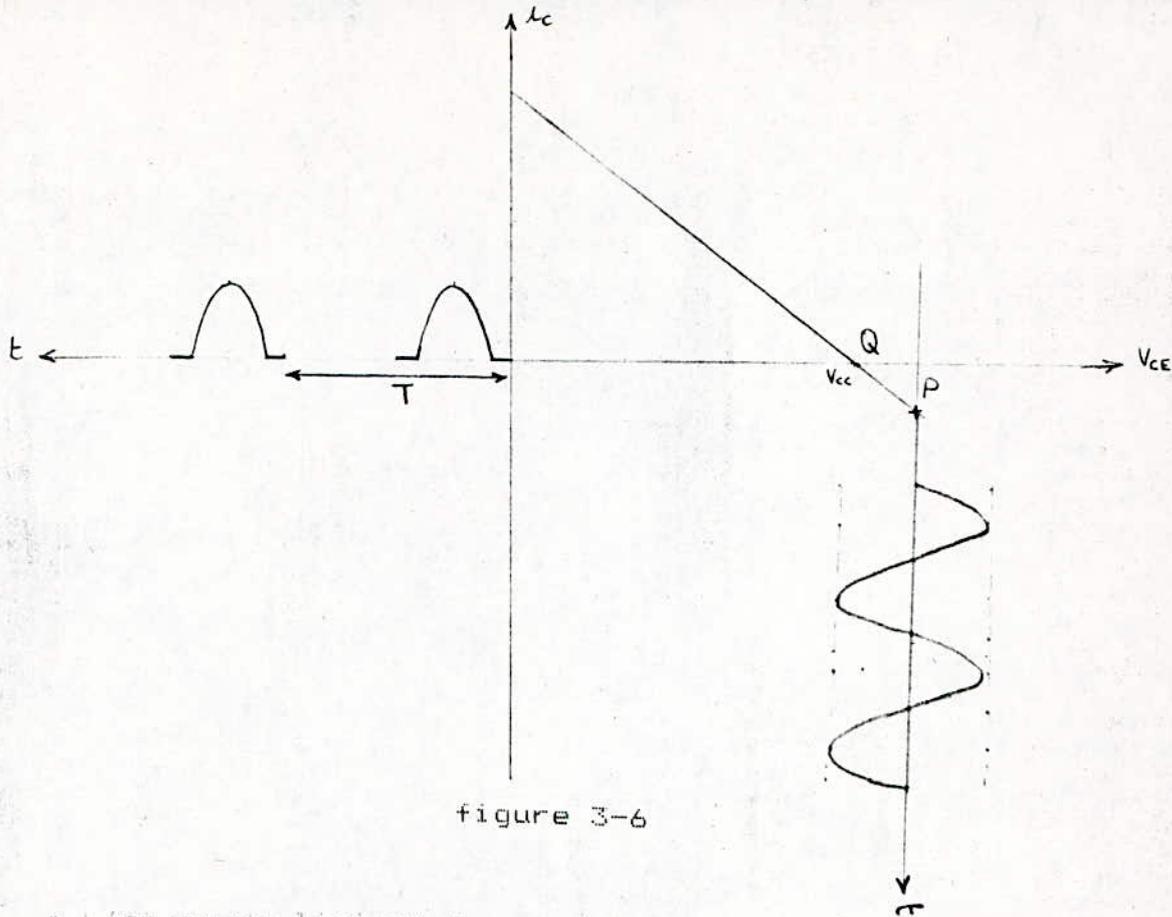


figure 3-6

* L'étage de liaison :

Il constitue l'étage de sortie du système émetteur et permet une bonne adaptation en impédance avec la bobine d'excitation par l'intermédiaire du circuit résonant parallèle L_6, C_5 .

La bobine d'excitation et la capacité variable C_7 forment un circuit L.C accordé à la fréquence de travail du spectromètre.

Les diodes D1 et D2, montées en tête bêche, empêchent le retour vers l'émetteur du signal R.M.N induit dont la faible amplitude est insuffisante pour les polariser.

- e) Réalisation pratique :

* Circuits imprimés :

Le système émetteur a été réalisé sur circuit imprimé double face dont les dessins sur papier calque sont donnés en figures 3-8.a et 3-8.b ainsi que le schéma d'implantation des composants figure 3-8.c .

* Isolation :

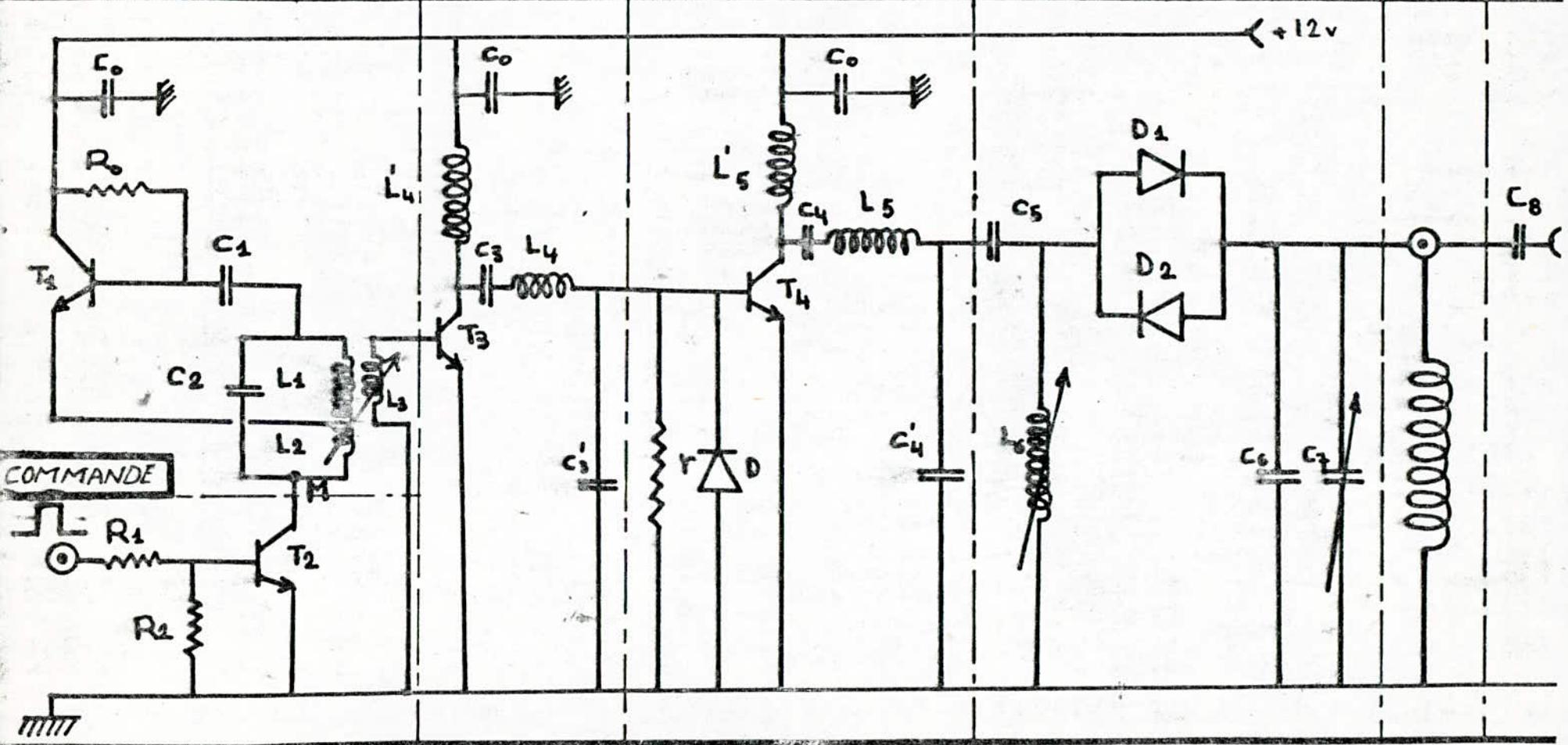
Pour éviter toute influence d'un étage sur un autre , des séparations en cuivre ont été prévues. L'ensemble du système est aussi protégé contre les parasites extérieurs par un boîtier en cuivre (blindage).

* Mesures :

Tension de sortie des impulsions R.F : 35 Volts.

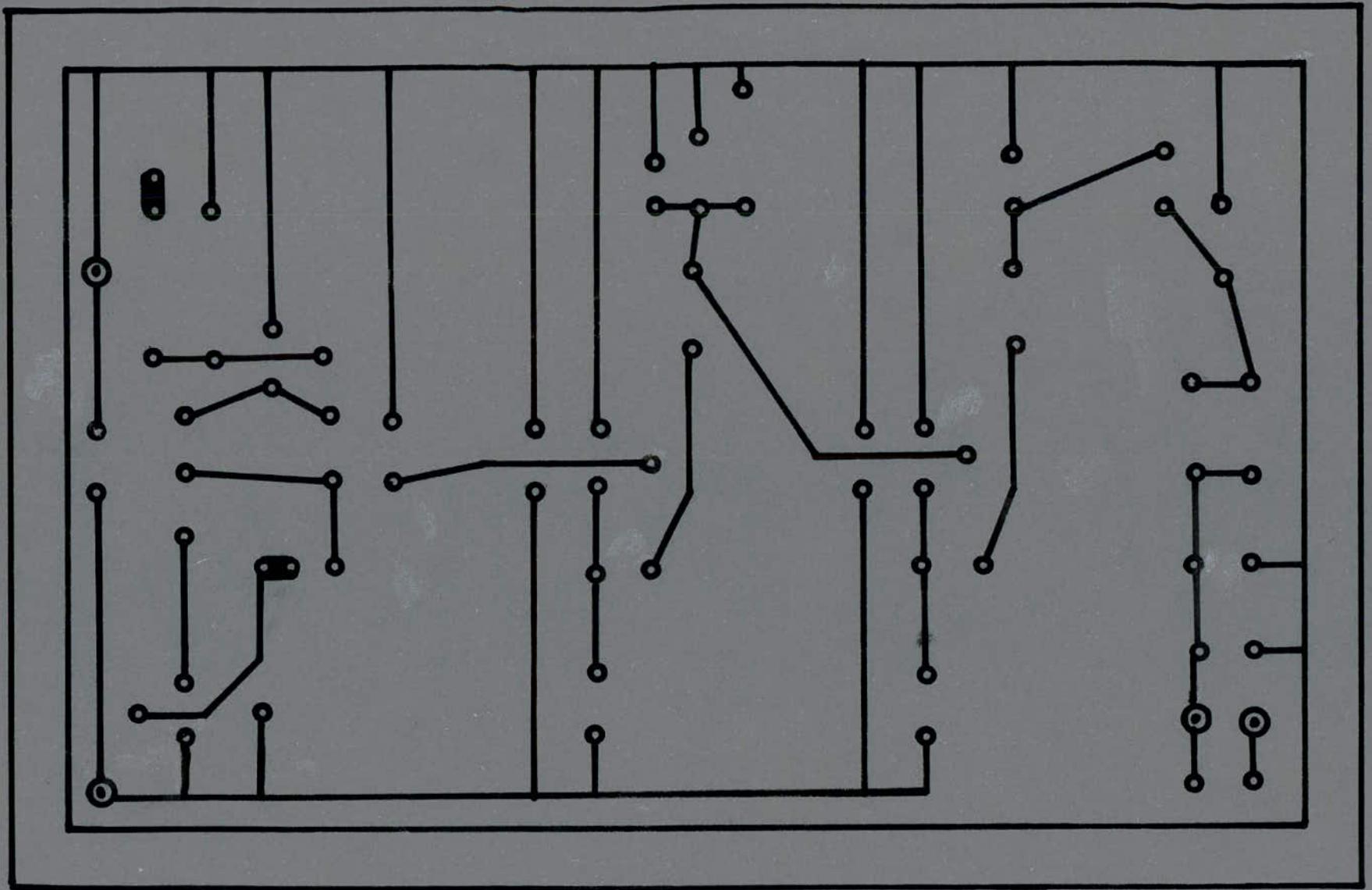
Fréquence des oscillations R.F : 5.15 MHz.

OSCILLATEUR - R.F BUFFER AMPLI-DE-PUISSANCE ETAGE-DE-LIAISON BOBINE SORTI



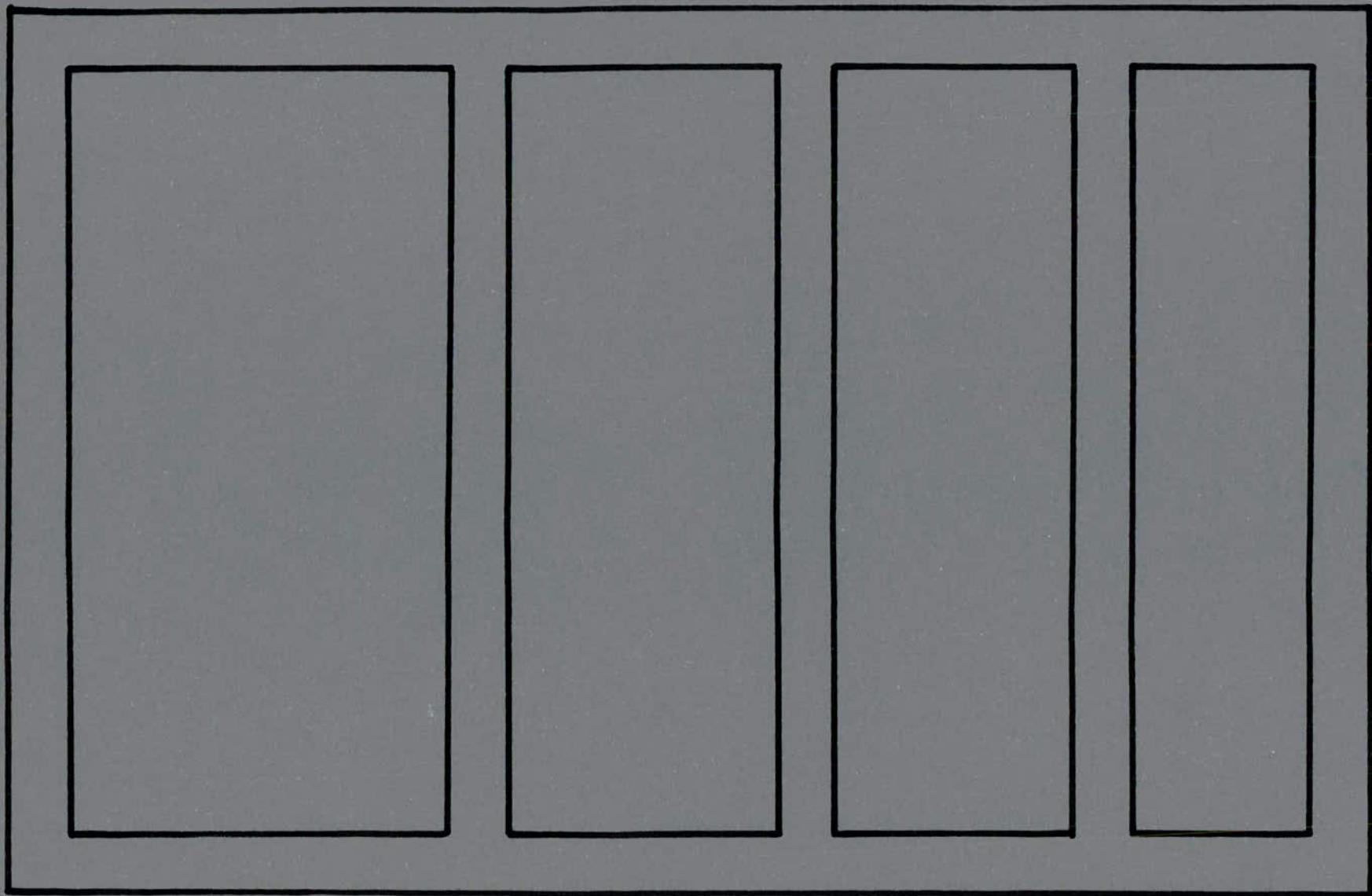
SCHEMA ELECTRIQUE

figure 3-7



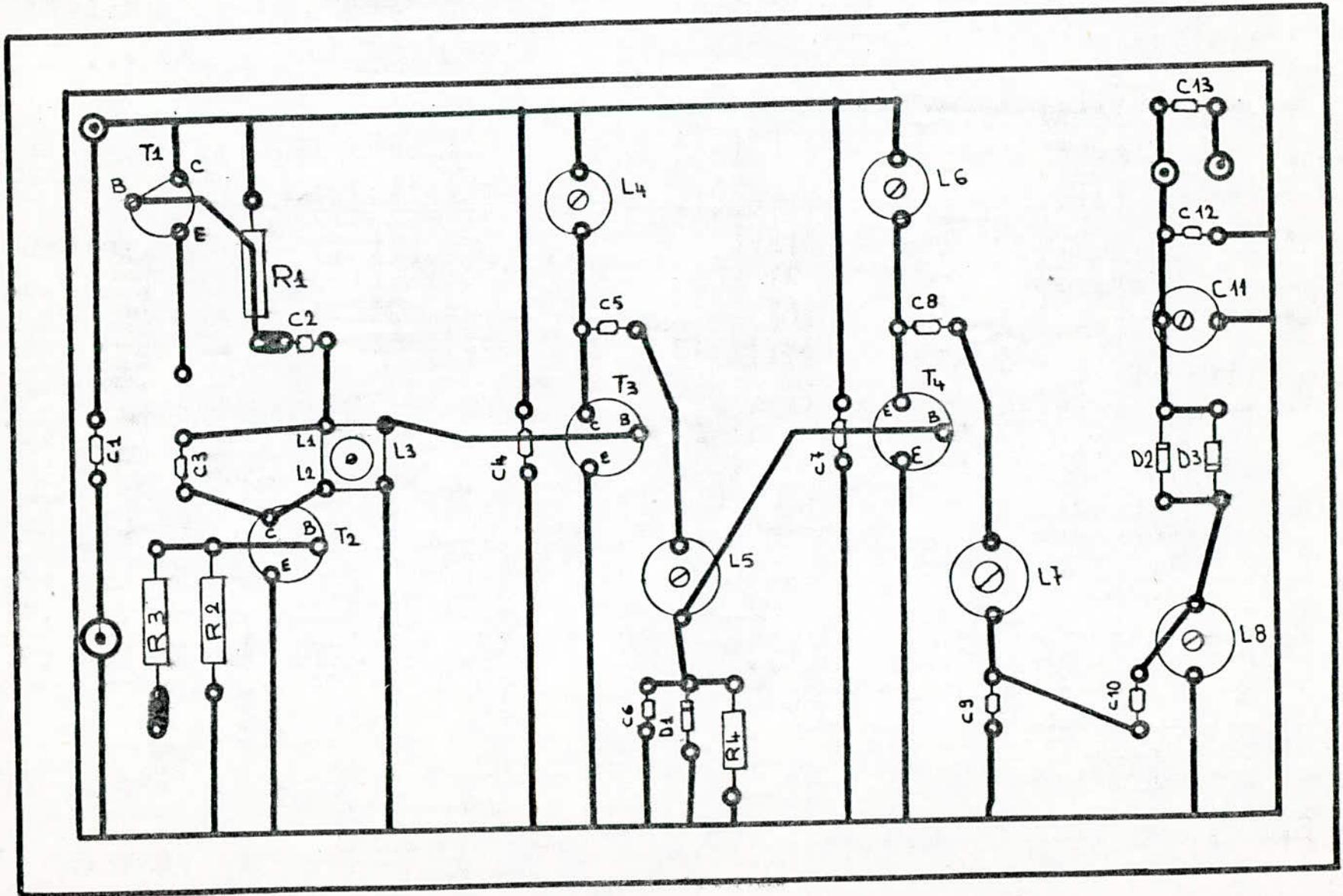
FACE CUIVREE

FIG 3-8. a



CÔTE COMPOSANTS

Fig 3-8. b



FACE COMPOSANTS | figure 3-8:c

LISTE DES COMPOSANTS :

- Résistances:

$$R1 = r = 470 \Omega$$

$$R2 = 1 \text{ K}\Omega$$

$$R = 10 \text{ K}\Omega$$

- Capacités:

$$C0 = 0.01 \mu\text{F}$$

$$C1 = 33 \text{ pF}$$

$$C2 = 51 \text{ pF}$$

$$C3 = C3 = C4 = C5 = 100 \text{ pF}$$

$$C6 = (35 + 4.7) \text{ pF}$$

$$C7 = 2 \text{ à } 34 \text{ pF}$$

$$C8 = 220 \text{ pF}$$

- Bobines :

$$L4 = L5 = 18 \text{ à } 24 \mu\text{H}$$

$$L'4 = L'5 = 15 \text{ à } 20 \mu\text{H}$$

$$L6 = 5 \text{ à } 6 \mu\text{H}$$

- Diodes :

$$D = D1 = D2 = 1\text{N } 4148$$

- Transistors

$$T1 = \text{BF } 254$$

$$T2 = T3 = 2\text{N } 2222$$

$$T4 = 2\text{N } 2193$$

3-3 LA BOBINE D'EXCITATION

3-4 L'ELECTROAIMANT

3-3 LA BOBINE D'EXCITATION :

Utilisée comme sonde, la bobine d'excitation joue un rôle pendant les phases d'émission et de réception.

En effet, pendant la durée " ON " des impulsions issues du programmeur, elle reçoit les salves R.F générées par l'émetteur et crée le champ tournant H_1 nécessaire à l'excitation de l'échantillon.

Pendant la durée " OFF " , elle recueille le signal R.M.N induit et le véhicule vers le système récepteur.

La réalisation pratique de la bobine a été faite par enroulement d'un fil \varnothing 0.5 mm en 20 spires jointives sur un support en papier de diamètre \varnothing 13 mm .

3-4 L'ELECTROAIMANT :

Son rôle est de fournir le champ magnétique uniforme H_0 qui devra être en outre, très homogène et variable de façon à pouvoir l'ajuster pour obtenir la résonance à la fréquence de travail fixée au préalable.

Le réglage de l'intensité du champ H_0 est possible par variation du courant d'alimentation, la courbe donnant les variations de H_0 en fonction du courant I est donnée en figure 3-9 .

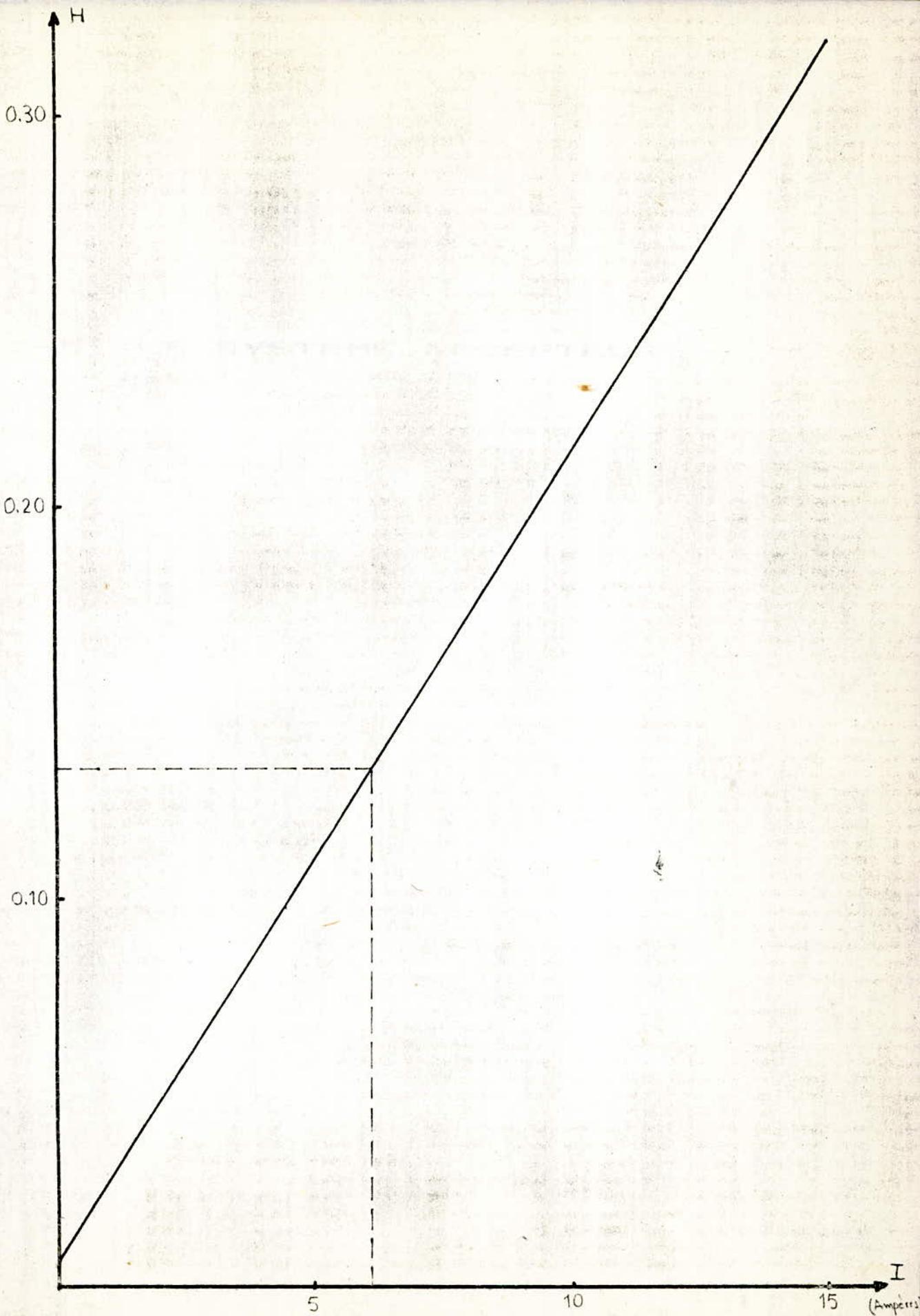


figure 3-9

3-5 LE SYSTEME RECEPTEUR

3-5 . LE SYSTEME RECEPTEUR :

-a) Introduction :

Le système récepteur est un amplificateur sélectif à bande étroite, présentant un important gain en tension, une grande impédance d'entrée et un rapport signal sur bruit très élevé.

Toutes ces caractéristiques permettent à cet étage récepteur de remplir sa tâche qui consiste à détecter et ramener le faible signal induit par l'échantillon (Quelques dizaines de micro-volts) à un niveau acceptable (Quelques volts) et permettre ainsi sa visualisation et son traitement.

-b) Synoptique général :

Le système récepteur est une chaîne amplificatrice constituée par :

- Un préamplificateur.
- Un étage adaptateur.
- Un étage amplificateur.
- Un étage de détection et de filtrage.

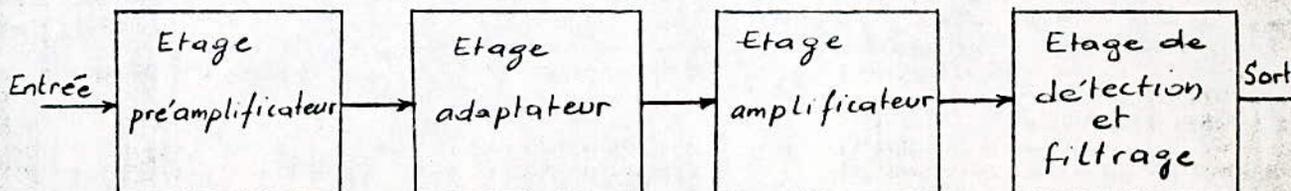


figure 3-10

-c) Etude des différents étages :

* Le préamplificateur :

L'étage préamplificateur est en fait un amplificateur sélectif réalisé à l'aide d'un Transistor MOS FET du type 3N 204 monté en source commune dont l'impédance de charge est un circuit résonant L.C accordé à la fréquence 5 MHz.

Le choix d'un MOS F.E.T est motivé par sa grande impédance d'entrée qui permet d'avoir un rapport signal sur bruit élevé.

Les diodes D1 et D2 placées en tête bêche et en parallèle avec le circuit résonant permettent le passage rapide du transistor de son état de blocage pendant la durée " ON " à son état de fonctionnement pendant la durée " OFF ".

* L'adaptateur :

L'adaptation en impédance entre les étages préamplificateur et amplificateur est réalisée à l'aide d'un transistor F.E.T du type BFW10 monté en suiveur et dont le gain en tension est fixé à un par le choix de la résistance source R5.

* L'amplificateur :

L'étage d'amplification est obtenu par le montage en cascade de deux amplificateurs opérationnels intégrés du type " C.I 3028 ".

Ces circuits intégrés sont généralement utilisés dans les plages de fréquences H.F et V.H.F.

Le gain en tension donné par l'ensemble est très élevé, il est réglable par les deux potentiomètres P1 et P2.

* Filtrage et Détection :

Cet étage élimine l'onde porteuse H.F du signal induit par l'échantillon (signal R.M.N) modulé en amplitude et recueille le signal modulant (B.F)nécessaire à la mesure des temps de relaxation.

La valeur de la capacité C est choisie de façon à ce qu'elle présente une faible impédance pour le signal H.F et une grande impédance pour le signal B.F.

$$1 / C \omega_{HF} < R < 1 / C \omega_{BF}$$

étant inconnue, on utilise la condition H.F. pour déterminer la valeur de la capacité

$$C > 1 / 2\pi f R$$

On fixe $R = 1 \text{ k}\Omega$

et on choisit $C = 1 \text{ nF}$.

- d) Réalisation Pratique :

* Circuit imprimé :

Les figures 3-12.a , 3-12.b et 3-12.c donnent à l'échelle 1 respectivement, les deux faces du circuit imprimé du récepteur et la disposition des composants.

* Isolation :

De la même manière que pour le système émetteur, le circuit récepteur est protégé par un boîtier en cuivre et ses différents étages séparés par des plaques en cuivre.

* Mesures :

- Gain en tension :

$$G_v = V_s / V_e = 2.7 \text{ v} / 2 \text{ mv} = 1350.$$

$$G \text{ dB} = 20 \text{ Log} (V_s / V_e) = 62 \text{ dB}.$$

- Bande passante :

$$\Delta f = 1.1 \text{ MHz}.$$

Preamplificateur

Suiveur

1^{er} Ampli

2^{ème} Ampli

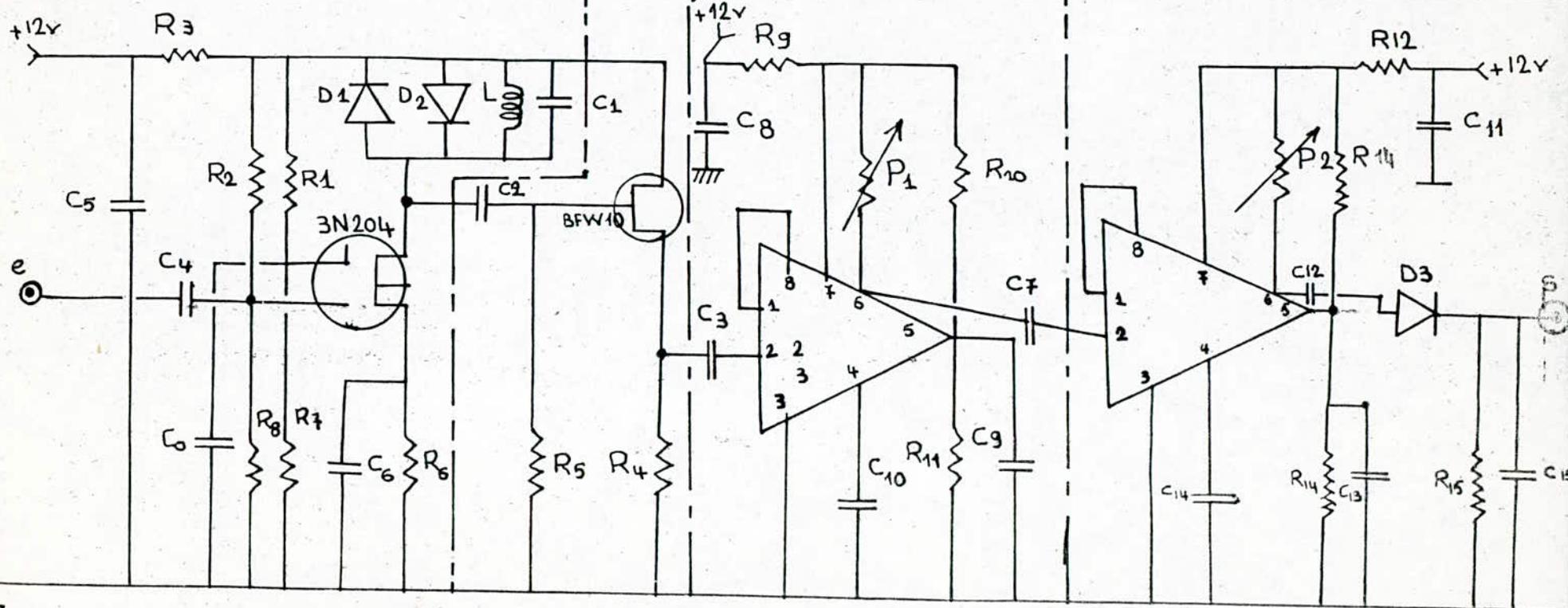
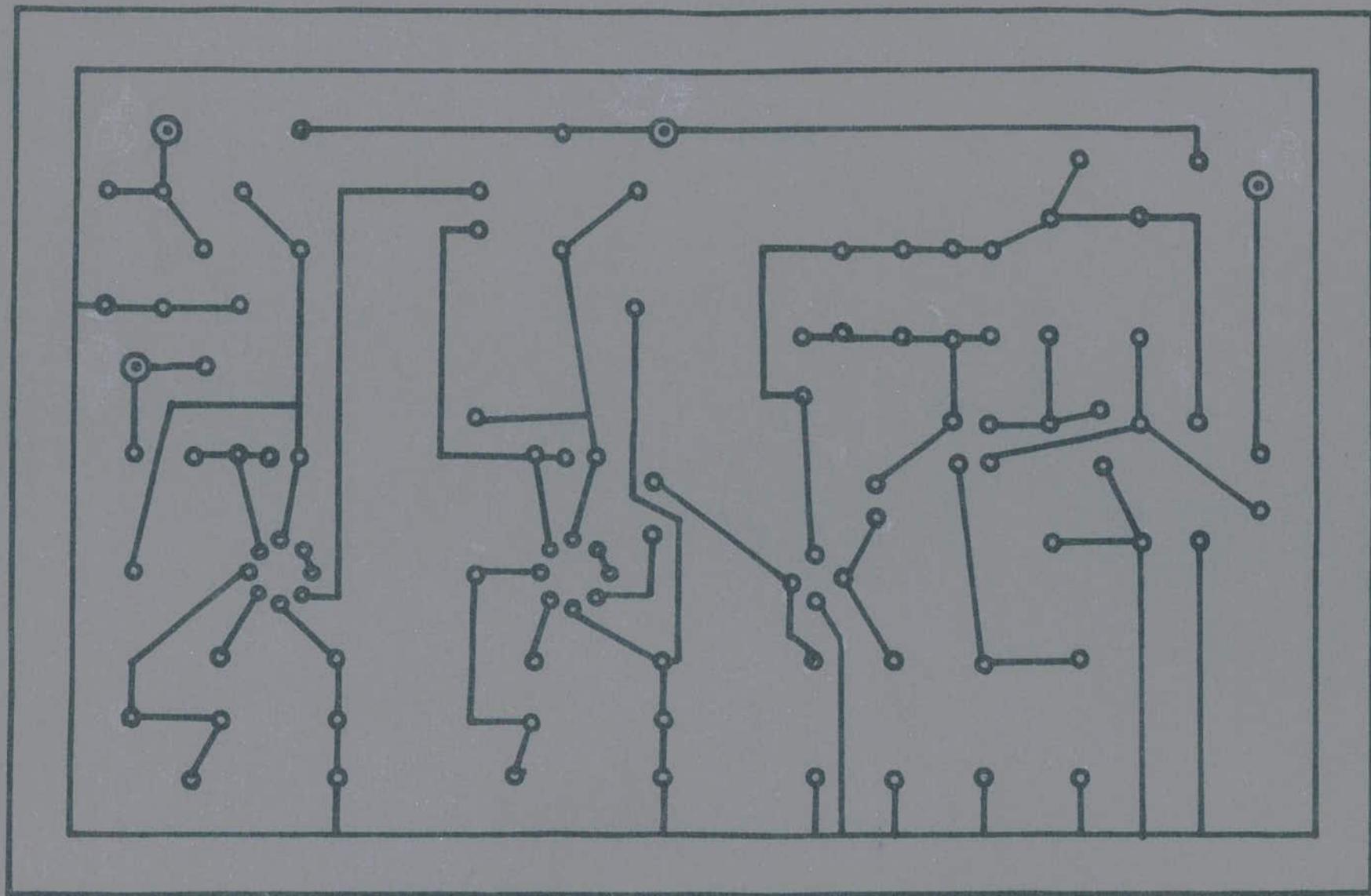
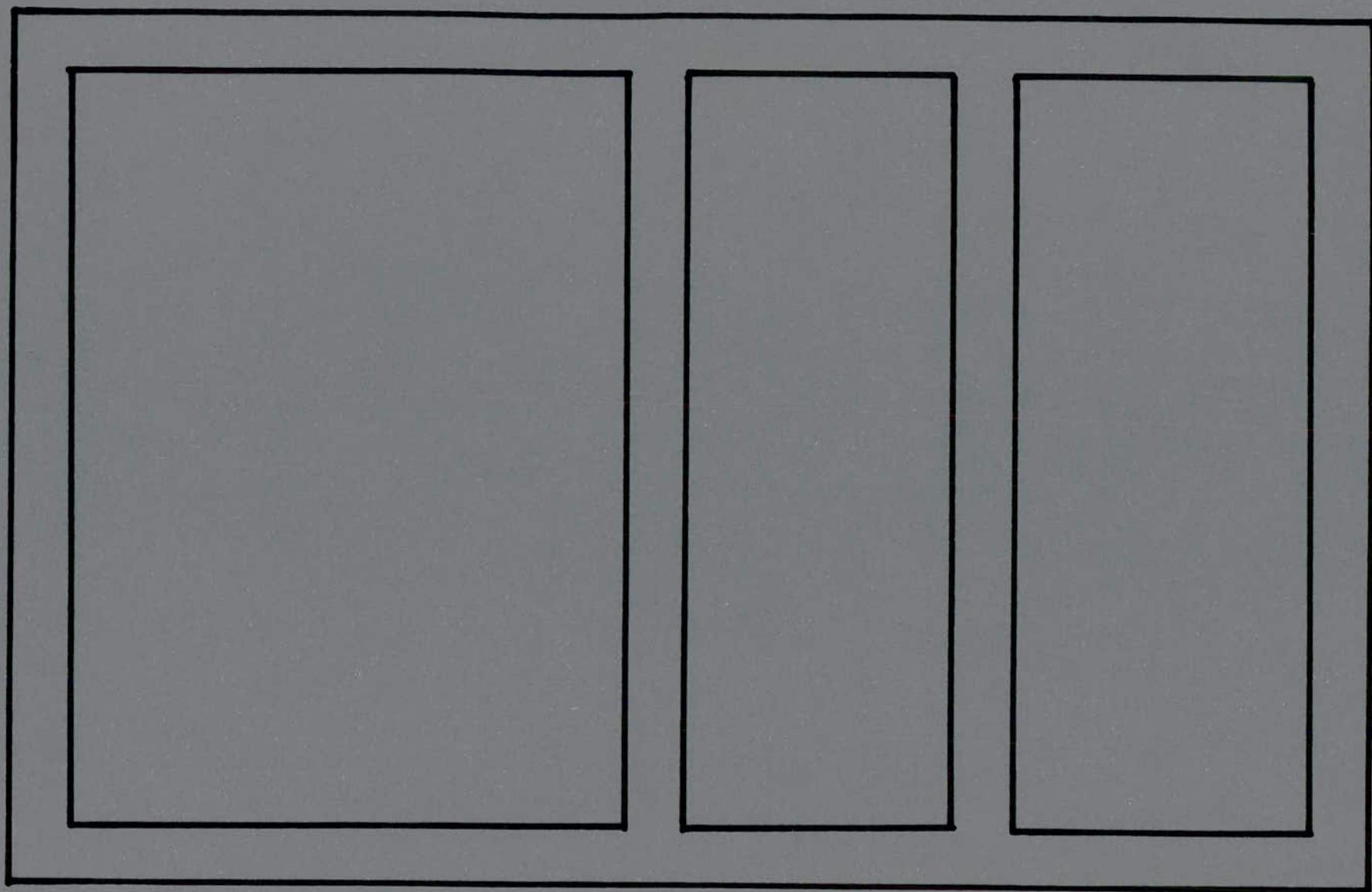


schéma électrique



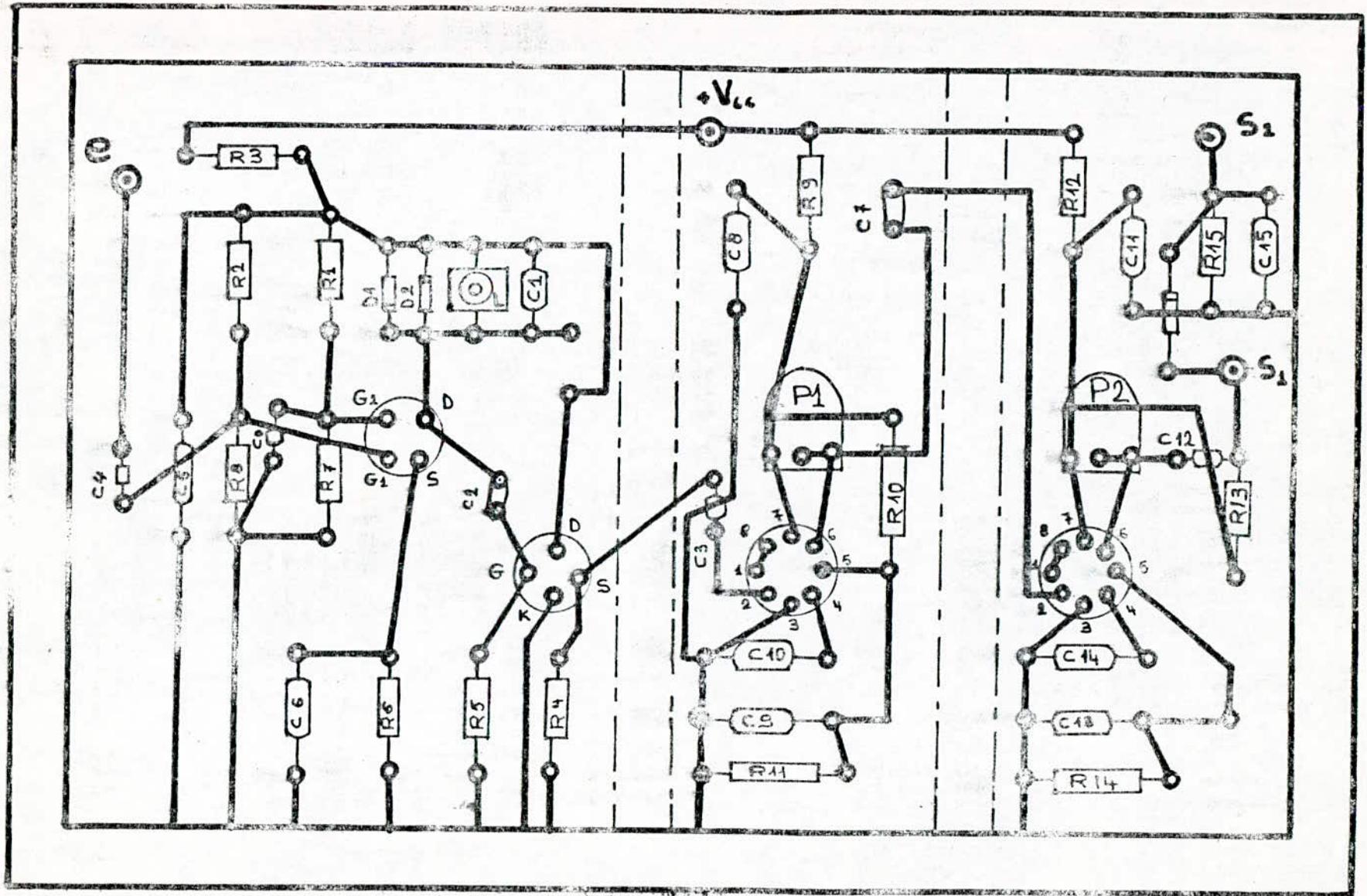
FACE CUIVREE

Fig 3-12, a



CÔTE COMPOSANTS

Fig 3-12. b



FACE COMPOSANTS

figure 3-12.c

LISTE DES COMPOSANTS:

- Résistances:

$$R1 = R2 = R5 = R7 = 150 \text{ K}\Omega$$

$$R3 = R9 = R12 = 68 \Omega$$

$$R4 = 150 \Omega$$

$$R6 = 220 \Omega$$

$$R8 = 68 \text{ K}\Omega$$

$$R10 = R13 = R15 = 1 \text{ K}\Omega$$

$$R11 = R14 = 2.2 \text{ K}\Omega$$

$$P1 = P2 = 2.2 \text{ K}\Omega$$

- Capacités:

$$C_0 = 10 \text{ nF}$$

$$C1 = 147 \text{ pF}$$

$$C2 = C3 = C7 = C12 = 100 \text{ pF}$$

$$C4 = 56 \text{ pF}$$

$$C5 = C6 = C8 = C9 = C10 = C11 = C13 = C14 = 0.01 \mu\text{F}$$

$$C15 = 1 \text{ nF}$$

- Bobines:

$$L1 = 5 \text{ à } 9 \mu\text{H}$$

- Diodes:

$$D1 = D2 = 1\text{N } 4148$$

$$D3 = \text{AA } 119 \text{ (Au Ge)}$$

- Transistors:

$$\text{TMF1} = 3\text{N } 204$$

$$\text{TF2} = \text{BFW } 10$$

- Circuits Intégrés:

$$\text{IC1} = \text{IC2} = \text{CA } 3028 \text{ A}$$

CHAPITRE 4

MESURE DES TEMPS DE RELAXATION

CHAP 4 : MESURE DES TEMPS DE RELAXATION

- a) Mesure du temps de relaxation T_1 :

Cette mesure est basée sur le phénomène de précession libre de l'aimantation après une impulsion d'excitation.

Au début le vecteur aimantation \vec{M} étant à l'équilibre il est tel que :

$$M_x = M_y = 0 \quad \text{et} \quad M_z = M_0 \quad (\text{fig 4-1})$$

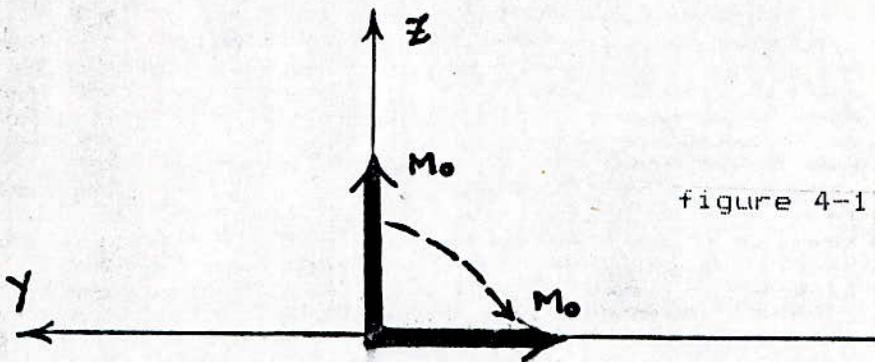


figure 4-1

Lorsqu'on applique une impulsion $\pi / 2$, le vecteur aimantation M_0 commence à s'écartier de sa position initiale jusqu'à atteindre l'axe ox d'où la nouvelle valeur de M :

$$M_x = M_z = 0 \quad \text{et} \quad M_y = M_0.$$

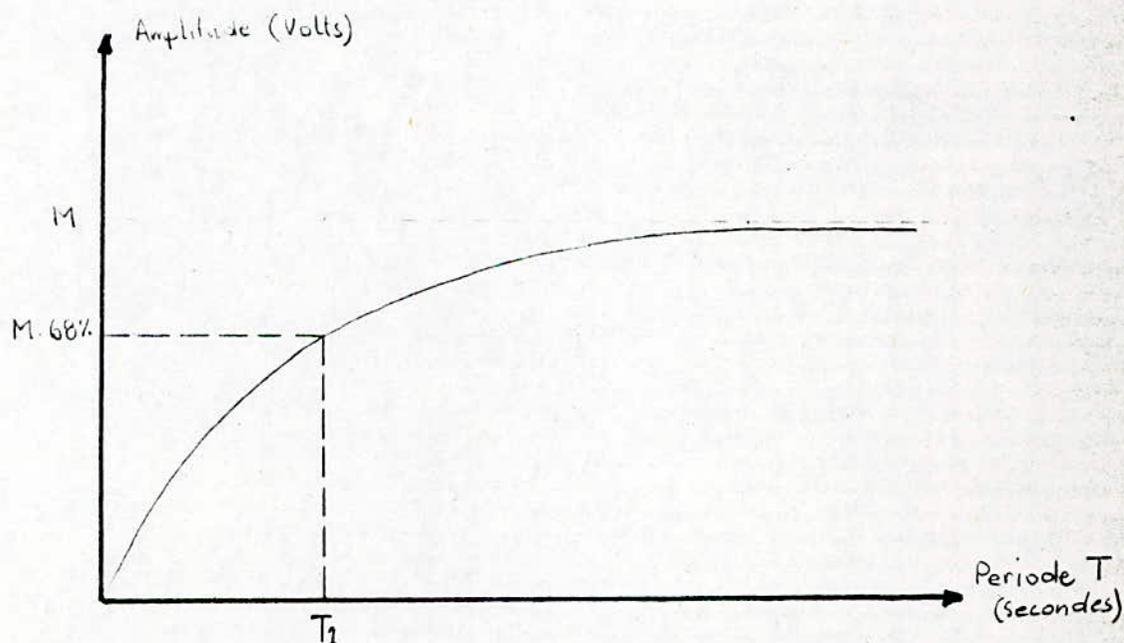
A la fin de l'impulsion, le vecteur aimantation revient progressivement vers son premier état avec un mouvement qui est régi par la loi :

$$M_z(T) = M_0 (1 - \exp(-T / T_1))$$

La mesure du temps de relaxation T_1 consiste à faire varier la période T et relever sur l'oscilloscope la valeur de l'amplitude maximale du vecteur aimantation.

On trace par la suite la courbe donnant, en ordonnées les valeurs de l'amplitude M et en abscisses les valeurs de la période T de l'impulsion $\tau / 2$.

T_1 sera égal à la projection sur l'axe des abscisses du point correspondant à l'intersection de la droite qui donne 68 % de M avec la courbe $M(T)$.



- b) Resultats expérimentaux :

* Mesures :

On a utilisé le spectromètre R.M.N pour mesurer les temps de relaxation T_1 de trois échantillons :

- Eau normale (du robinet)
- Eau distillée une fois
- Eau bidistillée

Les résultats obtenus sont donnés par le tableau suivant :

```
*****
* Eau normale      *  $T_1 = 0.90$  s *
*****
* Eau distillée   *  $T_1 = 1.80$  s *
*****
* Eau bidistillée *  $T_1 = 2.42$  s *
*****
```

* Courbes :

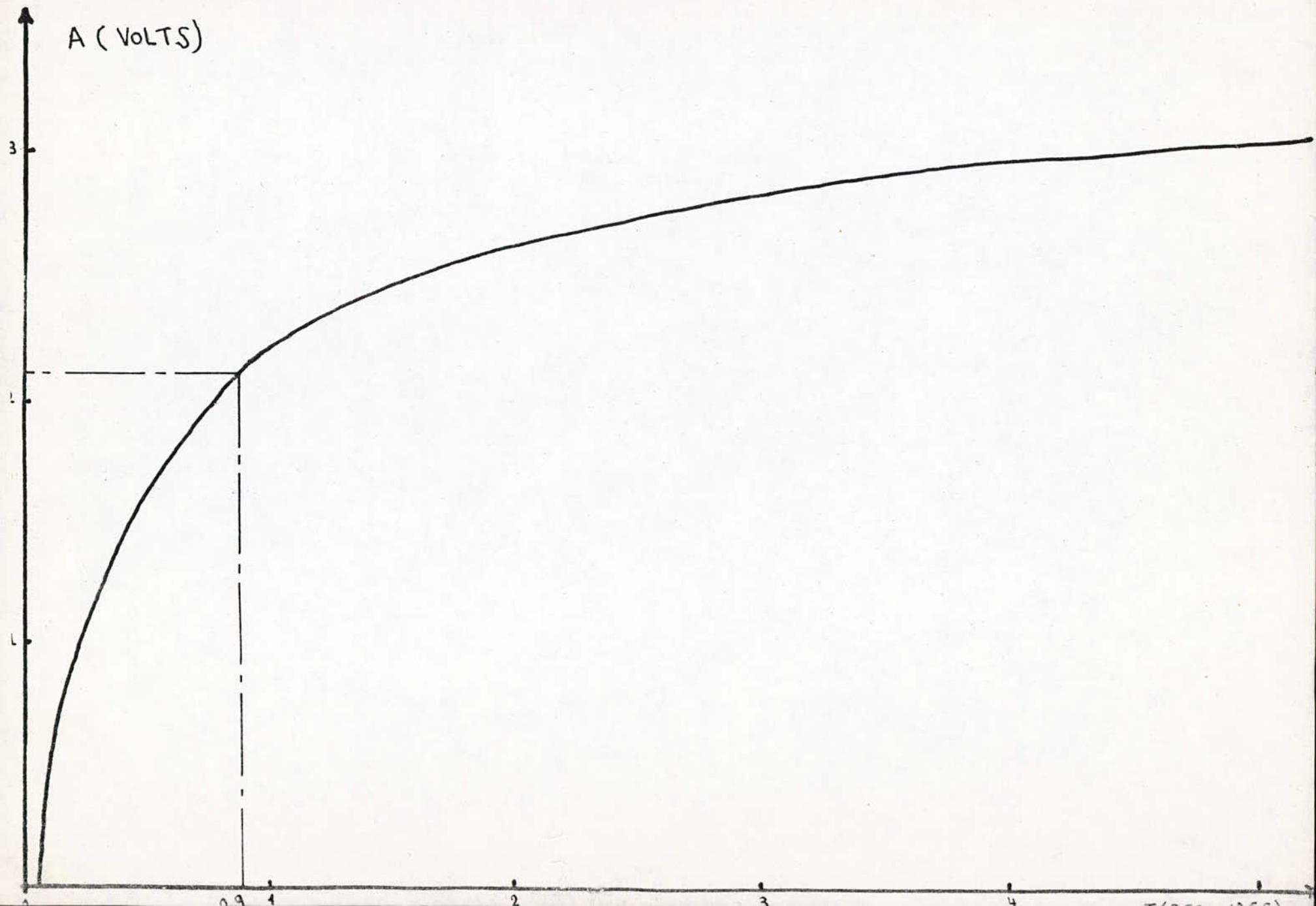
Les courbes donnant les variations de l'amplitude du signal R.M.N en fonction de la periode T sont données pour chacun des trois échantillons respectivement en figures : 4-2 , 4-3 et 4-4 .

* Commentaires :

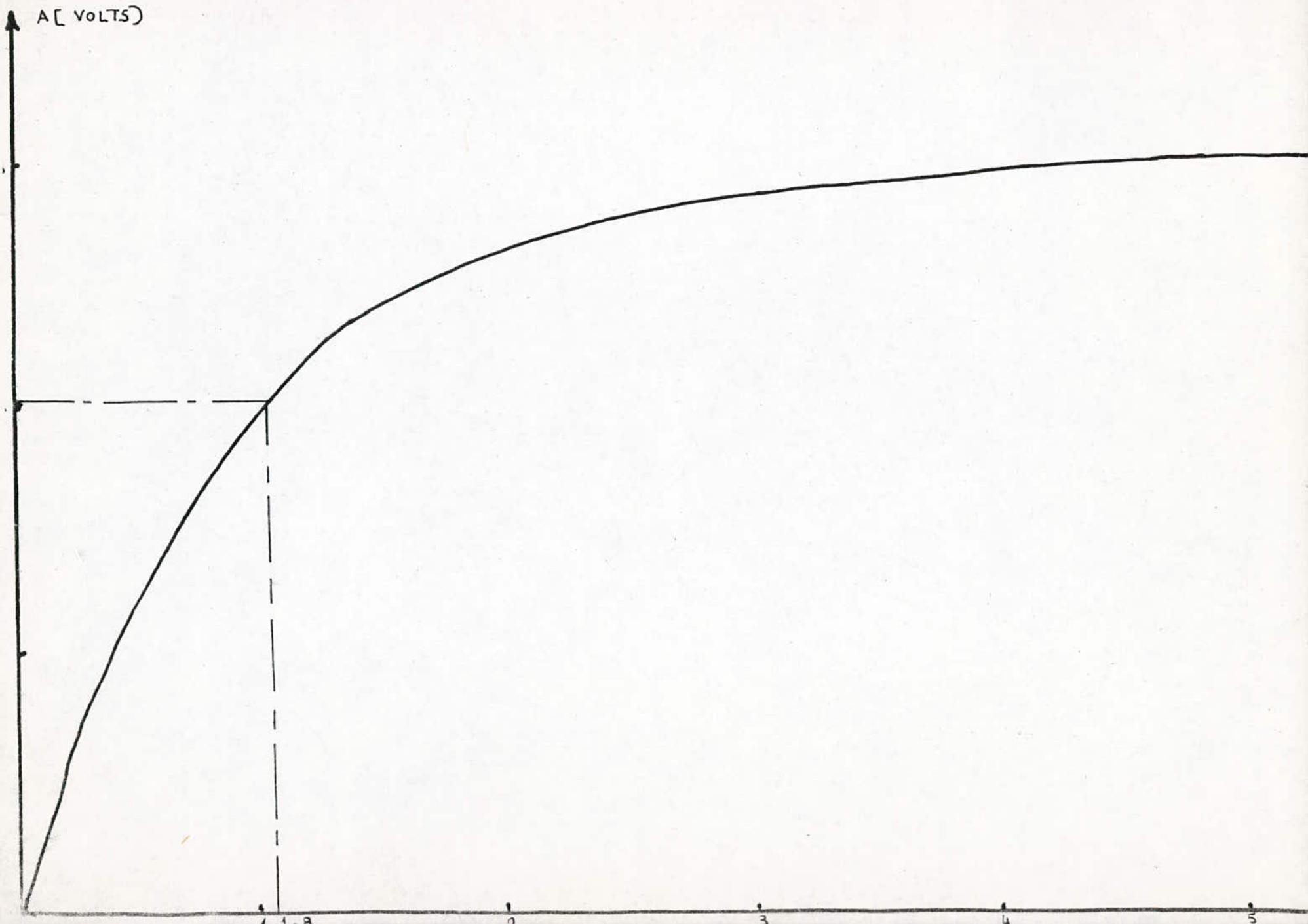
D'après les mesures effectuées, on remarque que le temps de relaxation de l'eau distillée est supérieur à celui de l'eau normale .

Les impuretés diminuent les temps de relaxation .

A (VOLTS)



A [VOLTS]



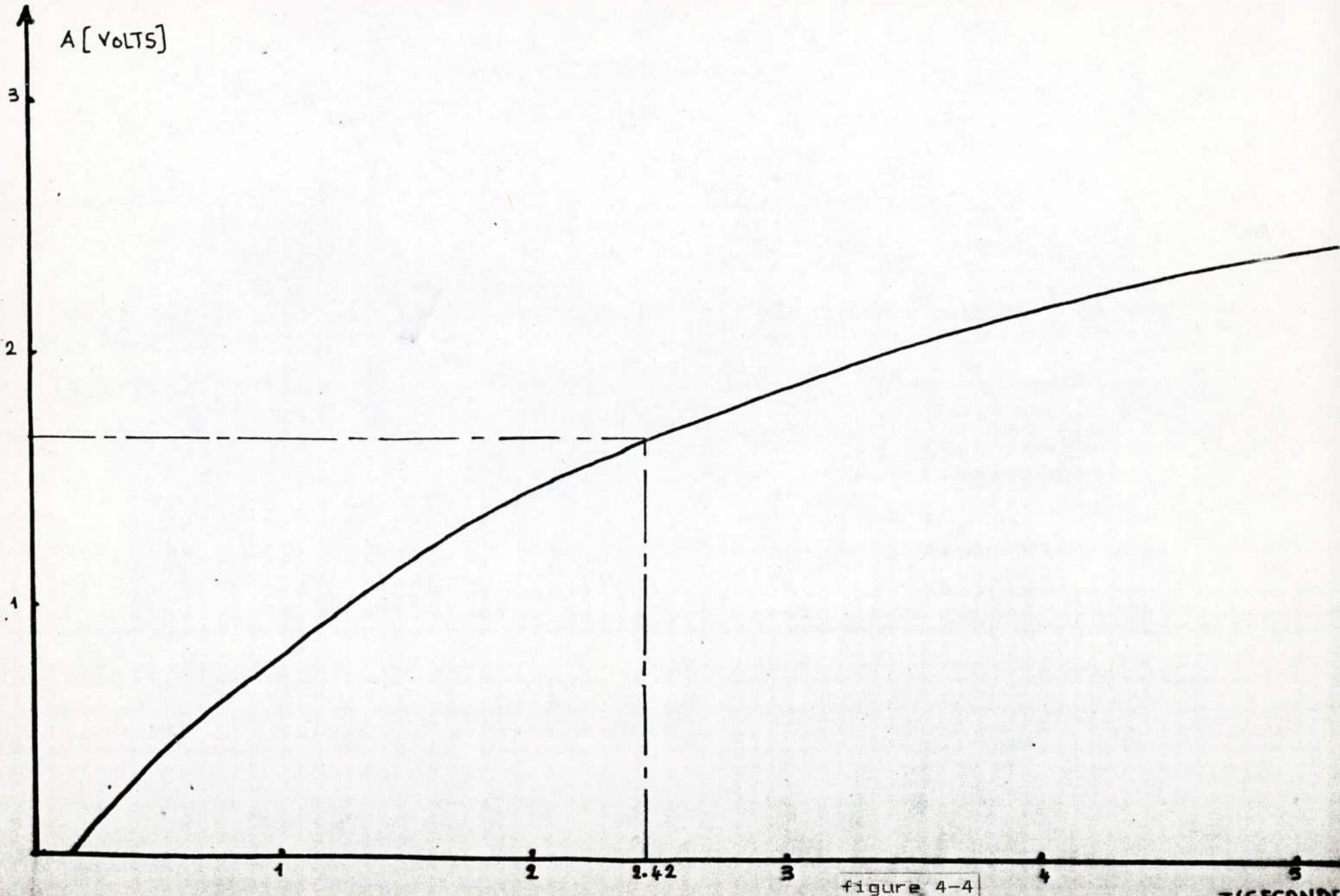


figure 4-4

T (SECONDS)

C O N C L U S I O N

Notre formation d'ingénieur se termine par la présentation de ce modeste travail qui en plus de la satisfaction d'avoir contribué à la réalisation d'un appareil R.M.N nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine pratique de l'électronique.

La mise au point du spectromètre R.M.N a été très délicate du fait de la fréquence élevée de travail et du manque de composants, spécialement les bobines (inductances variables).

Enfin, nous espérons que ce travail sera poursuivi et amélioré par la réalisation d'un système émetteur utilisant un quartz pour une plus grande stabilité en fréquence et une commande C.MOS pour diminuer le temps de commutation et augmenter le rapport du signal pendant la durée "ON" sur le signal de la durée "OFF".

=====

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

* LIVRES :

- ABRAGAM .T Les principes du magnétisme nucléaire
- BIGGI .V Emission et réception des ondes hertziennes
Amplification H.F de puissance
- CAGNAC .B Physique atomique Tome 1
Experiences et principes fondamentaux
- MALVINO .A.P Principes d'électronique
- GERMICHEN .P Transistors a effet de champ

* REVUES :

- Electronique applications numéro 30 juin-juillet 83
pages 101 à 109
- L'onde électrique numéro 5 sept - oct 84
pages 38 à 44
- La recherche numéro 172 décembre 85
pages 1452 à 1463

* PROJETS DE FIN D'ETUDES :

- Etude et réalisation d'un système émetteur par impulsions
pour la mesure des temps de relaxation.
Janvier 83
- Etude et réalisation d'un spectromètre R.M.N à impulsions
pour une application biomédicale.
Juin 86
- Réalisation et mesures des caractéristiques des étages
d'un spectromètre R.M.N à impulsions.