

50376
1966
79

50376
1966
79

Ce travail a été réalisé dans les laboratoires de l'Institut Supérieur d'Electronique du Nord, et nous a été confié par Monsieur le Doyen Norbert SEGARD, directeur de l'ISEN. Il a été dirigé par Monsieur POULIQUEN, professeur à l'ISEN et à la Faculté libre des Sciences de Lille. Nous les remercions tous deux ainsi que les ingénieurs et collaborateurs des laboratoires de recherches.

Nos remerciements vont aussi à Messieurs les Professeurs DEHORS, LIEBART, CONSTANT qui ont bien voulu former notre Jury.



MESURE DE LA PUISSANCE ELECTRIQUE TRANSMISE

A UN QUARTZ EMETTEUR D'ULTRASONS

DETERMINATION DE SON SCHEMA EQUIVALENT A FORT NIVEAU

Introduction

- 1-Diverses méthodes de mesure possibles
 - 11-Mesures de la tension, du courant et de leur déphasage mutuel
 - 12-Méthode des 3 ampèremètres ou des 3 voltmètres
 - 13-Méthode choisie.
- 2-Présentation du matériel
 - 21-Le projecteur d'ultrasons
 - 22-Le générateur et les aménagements apportés
 - 23-Appareils de mesure
- 3-Méthode de mesure et problèmes posés
 - 31-Présentation du montage initial
 - 32-Les blindages
 - 33-Problèmes posés par la mesure du courant
- 4-Mesures à 1MHz
 - 41-Matériel utilisé
 - 42-Résultats en ondes progressives
 - 43-Résultats en ondes stationnaires
- 5-Mesures à 3 MHz
 - 51-Introduction
 - 52-Matériel réalisé
 - 53-Résultats

Conclusion

INTRODUCTION

Dans des travaux précédents, on a montré comment étaient réalisées des mesures d'impédances du quartz en vue de leur adaptation à des générateurs HF. Ces mesures ont été faites soit avec un pont Général Radio, soit avec un Q-Mètre. Dans ce cas comme dans l'autre le quartz était soumis à des tensions de quelques volts (5 au minimum), c'est-à-dire que la puissance électrique transmise au quartz était de l'ordre de quelques microwatts. Nous nous sommes alors posé une double question: cette impédance est-elle constante quand on alimente le quartz avec des tensions hautes fréquences beaucoup plus fortes comprises entre 0 et 4 000 V_{eff} ? D'autre part, comment mesurer la puissance électrique transmise au quartz, ceci en vue d'une détermination postérieure du rendement ultrasonique du quartz.

C'est à ces deux questions que ce travail a tenté d'apporter une réponse satisfaisante et assez précise.

I - Les diverses méthodes envisagées

1.1 - Mesure de la tension, du courant et de leur déphasage mutuel

Cette méthode résulte de l'application directe de l'expression de la puissance électrique alternative dissipée dans un circuit $P = VI \cos \varphi$

Mais on sait(1) que le quartz chargé par une impédance acoustique peut se représenter avec une bonne approximation par une capacité C_0 en parallèle sur une résistance R_p avec $C_0 \simeq 40$ pF et $R_p \simeq 200$ K Ω ; ceci étant valable pour un quartz de 6 cm de diamètre résonnant aux environs de 1 MHz. Dans ces conditions l'impédance équivalente Z peut s'exprimer par $\frac{1}{Z} = \frac{1}{R_p} + j C_0 \omega$

$$Z = \frac{R_p}{1 + j \frac{R_p}{C_0} \omega}$$

Le déphasage entre la tension aux bornes du quartz et le courant qui le traverse sera donné par $\tan \varphi = R_p C_0 \omega$ soit avec les valeurs numériques considérées $\tan \varphi \simeq 25$. Dans ces conditions il est assez difficile de mesurer le $\cos \varphi$ avec précision. Evaluons l'erreur sur P :

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta V}{V} + \frac{|\Delta \cos \varphi|}{\cos \varphi}$$

$$|\Delta \cos \varphi| = \sin \varphi \Delta \varphi$$

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta V}{V} + \Delta \varphi \tan \varphi$$

Si on veut que $\frac{\Delta P}{P}$ soit inférieur à 5 % en admettant une erreur de 1,5 % sur V et I, on doit avoir sur $\Delta \varphi \tan \varphi$ une erreur inférieure à 2 %

$$\Delta \varphi \tan \varphi < 2 \cdot 10^{-2} \quad \text{soit } \Delta \varphi \simeq \frac{2 \cdot 10^{-2}}{25}$$

$$\Delta \varphi < 8 \cdot 10^{-4} \text{ radian}$$

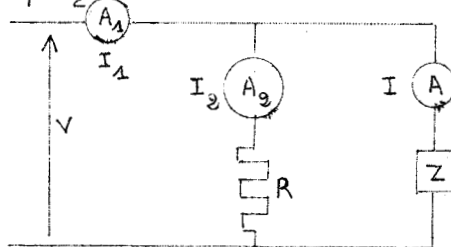
Or, puisque $\tan \varphi \simeq 25$ $\varphi \simeq \pi/2$, il semble illusoire de vouloir obtenir une telle précision sur un angle de près de $\frac{\pi}{2}$.

Cette méthode par la précision qu'elle impose ne pouvait pas nous donner de résultats satisfaisants.

(1) - M. SEGARD, A. DEFEBVRE, P. WALLEZ,

1.2 - Méthodes des 3 ampèremètres

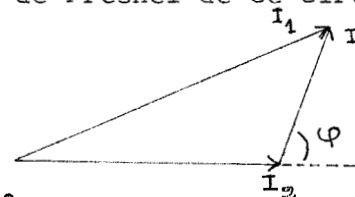
Cette méthode est classique pour mesurer la puissance dissipée dans une impédance en alternatif sans mesurer de déphasage entre courant et tension. On utilise pour cela le schéma suivant où A_1 , A_2 et A sont les 3 ampèremètres.



R est une résistance pure

Z est l'impédance dans laquelle on veut mesurer la puissance, dans notre cas le quartz.

En prenant V comme référence de phase et si φ représente l'argument de l'impédance complexe Z , le diagramme de Fresnel de ce circuit est le suivant



Il permet d'écrire :

$$I_1^2 = I_2^2 + I^2 + 2 I I_2 \cos \varphi$$

La puissance dissipée dans Z , $P = VI \cos \varphi$ s'écrira : $P = \frac{R}{2} (I_1^2 - I_2^2 - I^2)$

Evaluons l'erreur sur P :

$$\frac{\Delta P}{P} \leq \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta (I_1^2 - I_2^2 - I^2)}{I_1^2 - I_2^2 - I^2}$$

ce qui donne si on peut admettre que les incertitudes relatives sur I_1 , I_2 et I sont les mêmes :

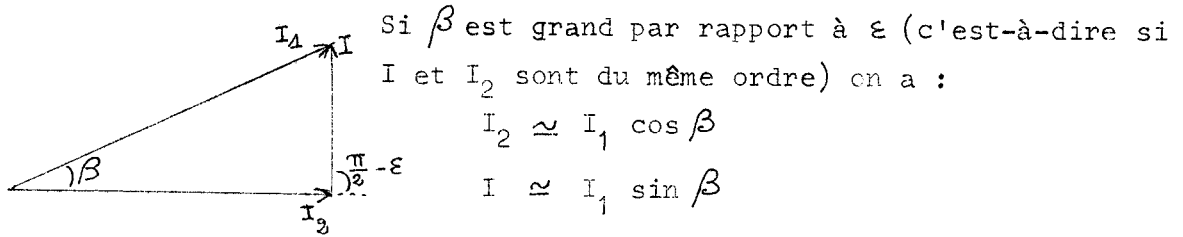
$$\frac{\Delta P}{P} \leq \frac{\Delta R}{R} + 2\alpha \frac{I_1^2 + I_2^2 + I^2}{I_1^2 - I_2^2 - I^2} \quad \text{où} \quad \alpha = \frac{\Delta I}{I}$$

Etudions le second terme de cette expression dans le cas qui nous concerne, c'est-à-dire pour $\tan \varphi \approx 25$.

Posons $\varphi = \frac{\pi}{2} - \varepsilon$ avec ε tel que $\tan \varepsilon \approx \sin \varepsilon \approx \varepsilon$

$$I_1^2 - I_2^2 - I^2 = 2 I I_2 \cos \left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon \right) = 2 I I_2 \sin \varepsilon$$

$I_1^2 + I_2^2 + I^2 \approx 2 I_1^2$ car le triangle est rectangle à un infiniment petit près de l'ordre de ε .



a des infiniment petits près

$$\frac{I_1^2 + I_2^2 + I^2}{I_1^2 - I_2^2 - I^2} \simeq \frac{2 I_1^2}{2 I I_2 \sin \epsilon} \simeq \frac{2 I_1^2}{2 I_1^2 \sin \beta \cos \beta \sin \epsilon} = \frac{2}{\sin 2\beta \sin \epsilon}$$

d'où $\frac{\Delta P}{P} \leq \frac{\Delta R}{R} + \frac{4\alpha}{\sin 2\beta \sin \epsilon}$

Cette expression sera minimale en même temps que $\sin 2\beta$ sera maximal, soit pour $\beta = \frac{\pi}{4}$. Dans ce cas :

$$\left(\frac{\Delta P}{P}\right)_{\min} \leq \frac{\Delta R}{R} + \frac{4\alpha}{\sin \epsilon} \quad \text{or} \quad \sin \epsilon \simeq \text{tg } \epsilon \simeq \frac{1}{\text{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \epsilon\right)} \simeq \frac{1}{25}$$

$$\left(\frac{\Delta P}{P}\right)_{\min} \leq \frac{\Delta R}{R} + 100\alpha$$

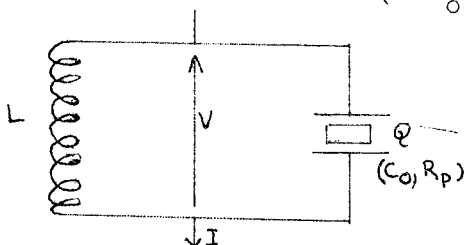
On voit que si $\alpha = 1\%$, ce qui peut être atteint avec un ampèremètre électronique, l'incertitude sera de 100 % sur la puissance, au minimum.

D'autre part, il faudra une résistance R telle que $R = |Z|$ soit 8 k Ω , ce qui avec 4 000 V_{eff} à ses bornes dissiperait 2 KW...

Il fallait donc trouver ici une méthode autre que ces méthodes classiques.

1.3 - La solution choisie

Les autres méthodes examinées ont montré que c'était toujours la valeur du déphasage qui rendait la précision médiocre. De là provient l'idée de notre solution. Elle consiste dans la compensation de l'effet capacitif du quartz par l'adjonction d'une self disposée en parallèle. On s'arrange pour que le circuit ainsi obtenu soit à la résonance à la fréquence de travail et donc purement résistif. Dans ces conditions ($L C_0 \omega^2 = 1$), la puissance transmise en quartz



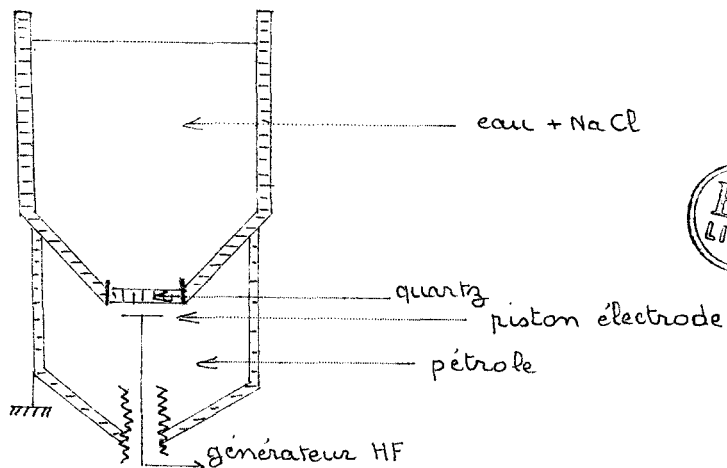
s'exprime simplement par $P = VI$ et la résistance R_p par $R_p = \frac{V}{I}$

Ceci, du moins, serait exact si nous avions une self pure L , mais il est évident qu'elle a des pertes dont il faudra tenir compte.

II - Présentation du matériel

2.1 - Le Projecteur

C'est un projecteur de la SCAM (type L) figure ci-dessous



Le quartz est disposé entre les armatures d'un condensateur ; l'une est un piston électrode, l'autre l'eau rendue conductrice par adjonction de Na Cl (2 g par l). Le piston électrode est séparé du quartz par du pétrole desséché sur Calcium et dégazé afin d'augmenter la rigidité diélectrique de l'ensemble. D'autre part, la distance qui sépare le quartz du piston électrode est réglée de sorte que dans le pétrole règne un régime d'ondes stationnaires ; ce qui minimise la consommation de puissance. Ce réglage s'obtient dans la partie inférieure du bac par rotation de la tige, support du piston, filetée. Le quartz peut ainsi émettre une puissance de l'ordre de 5 W/cm^2 pour des tensions de 4 à 5 KV eff.

2.2 - Le générateur Haute fréquence

Notre générateur, un émetteur de trafic pour bateau, a été fourni par la Société Radio Océan. C'est donc un matériel robuste et d'utilisation facile. Sur toutes les gammes, il peut fournir une puissance HF de 300 W. En cas de besoin, nous aurions pu même obtenir davantage en excitant plus vigoureusement l'étage final de puissance. L'émetteur peut fonctionner dans 3 gammes de fréquence ; à chacune correspond un tiroir de l'émetteur. La gamme "ondes hectométriques" (O.H) fonctionne vers 500 KHz, la gamme "ondes téléphoniques" (O.T) vers 3 MHz et enfin la gamme "ondes décimétriques" (O.D) travaille sur les fréquences 4, 6, 8, 12, 16 et 24 MHz.

Chaque tiroir comporte un oscillateur piloté par quartz (tube 6AQ5) un amplificateur séparateur non accordé ou, du moins, peu sélectif (tube 6AQ5). L'étage suivant est un driver, c'est-à-dire un amplificateur de puissance destiné à exciter l'étage final. Cet amplificateur constitué par un tube 807 peut fournir 30W, et est en général peu sélectif. Enfin, l'étage final, un amplificateur de puissance, pouvant débiter 300 W, ou même pour OH et OT, en l'excitant davantage 600 W. Cet amplificateur est constitué d'un tube 813 pour l'étage OD et de deux branchés en parallèle pour les autres.

Ce générateur était réalisé pour fonctionner piloté par quartz sur fréquences fixes, situées dans les bandes réservées au trafic. D'autre part, la puissance émise pouvait avoir deux valeurs dénommées "Réduite" et "Normale". Il nous a donc fallu modifier certains éléments puisque nous voulions faire varier la fréquence et la puissance.

2.2.1 - Choix des gammes de fréquences

Notre quartz résonnant à 1 MHz et sur tous les harmoniques impairs, nous avons donc choisi de faire fonctionner l'étage de OH à 1 MHz et l'étage OD à 3 MHz, puis éventuellement sur d'autres harmoniques. Pour cela, il a donc fallu modifier les gammes de fonctionnement de ces 2 étages et aussi leurs circuits d'adaptation de sortie.

2.2.2 - Modification des pilotes d'étage

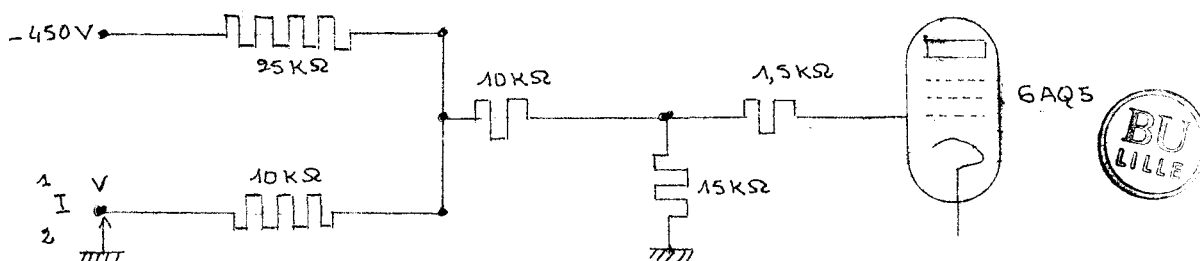
Les 2 étages utilisés sont normalement pilotés par quartz. Or nous voulions des fréquences variables. Il a donc fallu modifier les pilotes de ces étages pour les faire osciller sans quartz. Après cela nous avons constaté que la fréquence glissait notablement au cours du temps et que d'autre part quand l'étage de puissance fonctionnait en pleine excitation la fréquence changeait de 4 à 5 KHz. Nous avons alors supprimé l'oscillateur pilote de l'étage et nous l'avons remplacé par un générateur à fréquence voulue suivi d'un amplificateur de tension et d'un cathode-follower. Ce générateur extérieur est très stable car il sort sur une impédance de charge de 75Ω .

Comme il est suivi de deux amplificateurs dont un séparateur, les étages de puissance n'ont plus d'influence notable sur la fréquence.

2.2.3 - Réglage du niveau de puissance ~~é~~taise

Dans le montage initial ce réglage est obtenu en imposant une tension de polarisation à l'un des tubes, soit un peu au-dessous du cut-off soit très nettement au-dessous car il est évident que tous les amplificateurs fonctionnent en classe C. Prenons l'exemple de l'étage fonctionnant à 1 MHz.

Le schéma initial est le suivant :

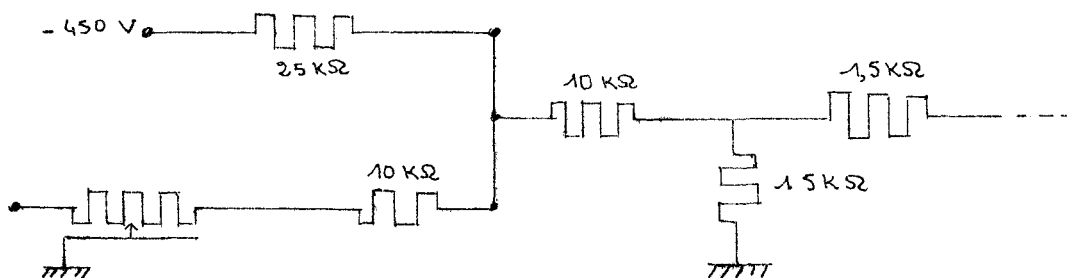


La commutation est réalisée par l'interrupteur I

Position 1 : $V_g = -110$ V tube bloqué

Position 2 : $V_g = -60$ V puissance normale

Un potentiomètre interrupteur remplace l'interrupteur I de sorte que le tube peut être bloqué puis débloqué progressivement



2.3 - Appareils de mesure

2.3.2. - Voltmètres électroniques

La mesure de tension appliquée au quartz est faite à l'aide

d'un diviseur capacitif au millième de Marque Hewlett Packard (n°452A) suivi d'un voltmètre de même marque (400 H puis 3400 A).

Pour la mesure des courants, on se sert de deux mullivoltmètres électroniques continus ou alternatifs. Le millivoltmètre continu utilisé avec un thermocouple est un appareil Philips fonctionnant sur piles ; sa précision est de 3 %. Le mullivoltmètre alternatif, mesurant les tensions aux bornes d'une faible résistance insérée dans le circuit, est un appareil Hewlett Packard sensible à la valeur efficace de la tension appliqué. Il est garanti à 1 %.

2.3.3 - Fréquencemètres

Nous en avons utilisé deux. L'un de l'armée américaine basé sur le principe du battement entre la fréquence à mesurer et celle d'un oscillateur interne étalonné ; l'inconvénient du système est que l'on trouve plusieurs fréquences pour lesquelles le battement est nul. L'autre est un fréquencemètre Rochard à affichage numérique. Sa stabilité, après un temps de chauffage d'à peu près une heure, est de 10^{-7} ; l'erreur commise sur chaque lecture est donc de 2 Hz. Ceci est plus que suffisant et son utilisation est évidemment beaucoup plus simple que celle du premier . Pour nos mesures, il fallait que l'erreur commise soit inférieure à 500 Hz, ce que nous n'étions pas sûr d'atteindre avec le premier appareil.

2.3.4 - Appareil de mesure de courant

Pour mesurer le courant Haute Fréquence, nous avons pensé à priori à utiliser des thermocouples, leur mise en oeuvre étant simple. Nous avons choisi toute la série des thermocouples Philips

| | | | |
|------|------------|------|------------|
| Th 1 | 0 à 15 mA | Th 2 | 0 à 30 mA |
| Th 3 | 0 à 75 mA | Th 4 | 0 à 150 mA |
| Th 5 | 0 à 300 mA | | |

Les thermocouples ont été utilisés et nous ont donné un certain nombre de résultats intéressants. Cependant ils présentent quelques inconvénients.

- D'abord, pour des courants inférieurs à 5 mA, les résultats sont imprécis vu leur caractéristique quadratique dans cette gamme.

- Ils ne supportent que des surcharges faibles (10 à 20 %) ce qui est un sérieux handicap pour mesurer le courant qui traverse un circuit bouchon accordé puisqu'ils détectent un minimum de courant, un désaccord accidentel du circuit provoquera une augmentation très forte de celui-là ce qui pourra entraîner la destruction du thermocouple.

- La tension thermocélectrique est mesurée à l'aide d'un millivoltmètre. Or entre le filament chauffant (traversé par la HF) et la soudure le constructeur ne prévoit qu'une différence de potentiel maximale de 125 V. L'un des points du filament chauffant étant à la masse la tension ne peut être mesurée à l'aide d'un voltmètre électronique branché sur le secteur, car il peut y avoir des d.d.p supérieures entre masse de l'appareil de mesure et masse du circuit. Il faut donc utiliser un millivoltmètre fonctionnant sur piles.

III - METHODE DE MESURES ET PROBLEMES POSES

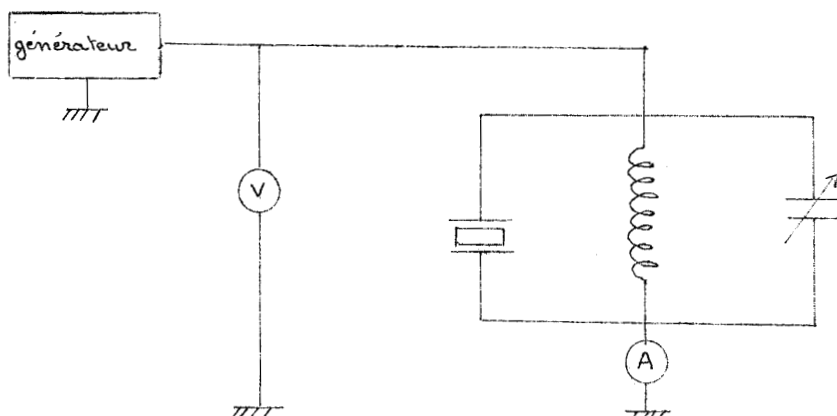
3.1 - Présentation du montage

L'idée de base nécessite un circuit accordé à la fréquence de travail ; la capacité de ce circuit est celle du quartz. Mais il faut faire ces mesures en fonction de la fréquence. Pour que le circuit reste accordé, l'un de ses éléments doit être variable. Nous avons d'abord essayé de réaliser une self variable à l'aide d'un noyau plongeur en poudre de fer. Mais le réglage était délicat.

Nous avons donc préféré choisir une self trop faible pour être accordée aux fréquences de travail et ajouter un condensateur variable en parallèle sur le quartz. On obtient ainsi un circuit facilement accordable et couvrant une gamme suffisante pour nos mesures.

Pour l'exploitation de nos résultats il a fallu tenir compte des pertes dans la self et le condensateur variable. En ce qui concerne ce dernier nous avons pu mesurer son coefficient de qualité, donc constater que sa résistance parallèle est beaucoup plus grande que celles de la self et du quartz et de ce fait négligeable. Quant à la self, nous avons mesuré sa résistance parallèle par deux méthodes; la première à l'aide du Qmètre, la seconde en déterminant le courant qui traverse le circuit bouchon accordé, constitué par cette self et le condensateur variable utilisé. Ces deux méthodes donnent des résultats concordants qui nous permettront ultérieurement de faire les corrections nécessaires.

Le schéma complet se présente donc comme suit :



Les mesures se feront donc en 2 temps :

1° Le quartz étant branché, on fait varier la capacité pour obtenir le minimum de courant pour une tension V .

2° On débranche le quartz, on recherche par ajustement du condensateur variable un minimum de courant pour une même tension V aux bornes de ce nouveau circuit.

La différence entre les deux courants ainsi obtenus représente l'intensité qui traverse la résistance parallèle du quartz pour la tension V .

3.2 - Problème de blindage

Dans les mesures préliminaires que nous avons réalisées, nous avons été fréquemment gênés par le champ électromagnétique rayonné. D'autre part, les mouvements de l'opérateur provoquaient des variations de capacité par rapport à la masse des différents éléments du circuit accordé, notamment de la self. De ce fait, le circuit était désaccordé et l'ampèremètre subissait une surintensité, ce qui dans le cas du thermocouple pouvait lui être fatal. Pour ces deux raisons, nous avons estimé nécessaire de mettre sous cage de Faraday tous les éléments du circuit accordé. Cette cage a été fabriquée en clinquant de cuivre de $2/10^{\text{e}}$ de mm d'épaisseur et nous a permis d'atténuer suffisamment le champ rayonné et de rendre stable la capacité parasite de la self par rapport à la masse (atténuateur de 40 dB).

3.3 - L'ampèremètre

Nous avons vu plus haut (Paragraphe 2.3.4.) les avantages et inconvénients des thermocouples. Nous les avons utilisés pour faire les mesures. Les résultats obtenus sont satisfaisants, sauf pour les faibles courants ; leur caractéristique tension continue en fonction du courant haute fréquence étant quadratique pour les faibles courants. C'est pourquoi nous avons par la suite remplacé le thermocouple par une résistance pure r d'une centaine d'ohms aux bornes de laquelle nous mesurons la chute de tension provoquée par le courant. Mais ici encore un nouveau problème est posé :

la tension appliquée aux bornes du circuit accordé comporte un certain taux d'harmoniques ; ce circuit étant sélectif, il ne présente une impédance élevée que pour le fondamental (sur lequel il

est accordé), pour les harmoniques au contraire son impédance est très faible.

Nous avons calculé que si la tension appliqué au circuit comportait 1 % d'harmoniques le courant résultant de la tension à fréquence fondamentale et celui résultat des harmoniques étaient du même ordre de grandeur. Ce qui introduit une trop grande erreur. Nous avons d'ailleurs pu vérifier à l'oscilloscope que la tension aux bornes de la résistance pure r comportait effectivement un taux important d'harmoniques. On a évidemment les mêmes inconvénients avec les thermocouples. Pour les éliminer nous avons dû réaliser un filtre passe-bas ayant une fréquence de coupure voisine de celle à laquelle on travaille et au moins 40 dB d'atténuation pour tous les harmoniques.

IV - MESURES A 1 MHz

Nous avons étudié un quartz au voisinage de sa fréquence de résonance fondamentale et du troisième harmonique c'est-à-dire autour de 1 et 3 MHz. Nous avons détaillé particulièrement l'étude en fonction de divers paramètres au voisinage de 1 MHz, mais au voisinage de 3 MHz l'étude similaire a été plus succincte.

4.1.- Mise au point du matériel nécessaire

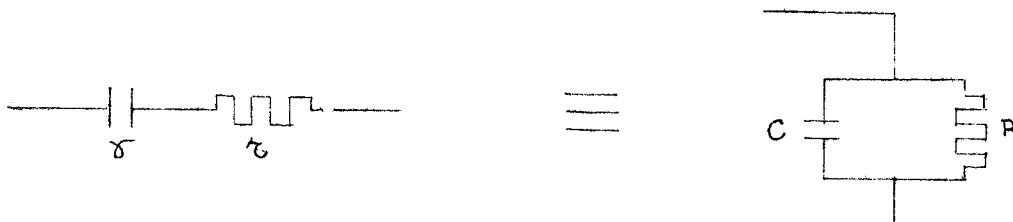
4.1.1. - Le générateur et l'adaptation d'impédance

Une fois modifié pour travailler à 1 MHz, le tiroir OH a été essayé sur une antenne fictive : résistance en série avec une capacité. Nous avons pu obtenir une puissance de 600 W avec une résistance de 20Ω en série avec une capacité de 20 pF. La valeur de cette capacité n'est pas critique car on peut compenser par une self d'adaptation qui fait partie du générateur.

Or, l'impédance du circuit que nous voulions alimenter, sensiblement égale à la résistance parallèle du quartz est de l'ordre de $200 K\Omega$.

Pour réaliser l'adaptation d'impédance on pourra connecter un condensateur en parallèle sur notre circuit.

En effet l'équivalence entre les circuits RC parallèle et $r \gamma$ série nous permet d'écrire:



$$j C \omega + \frac{1}{R} = \frac{1}{r + \frac{1}{j \gamma \omega}} = \frac{\gamma \omega}{r \gamma \omega - j} = \frac{\gamma \omega (r \gamma \omega + j)}{1 + r^2 \gamma^2 \omega^2}$$

d'où l'on tire

$$\frac{1}{R} = \frac{r \gamma^2 \omega^2}{1 + r^2 \gamma^2 \omega^2}$$

$$C = \frac{\gamma}{1 + r^2 \gamma^2 \omega^2}$$

et puisque $r \gamma \omega$ est très faible d'où $C \approx \gamma$ et $R \approx \frac{1}{r \gamma^2 \omega^2}$

$$\text{d'où } \gamma = \frac{1}{\sqrt{r R \omega^2}}$$

Il faut que : $r = 20 \Omega$ et $R = 200 \text{ K}\Omega$ $\omega = 2\pi \cdot 10^6 \text{ rad/sec}$
ce qui entraîne $\gamma \approx C = 80 \text{ pF}$

Cette valeur de capacité est dans la gamme d'accords possibles à l'aide de la self d'adaptation.

On obtient ainsi le circuit de la figure ci-dessous où G est le générateur haute fréquence

V le diviseur capacitif suivi du voltmètre électronique

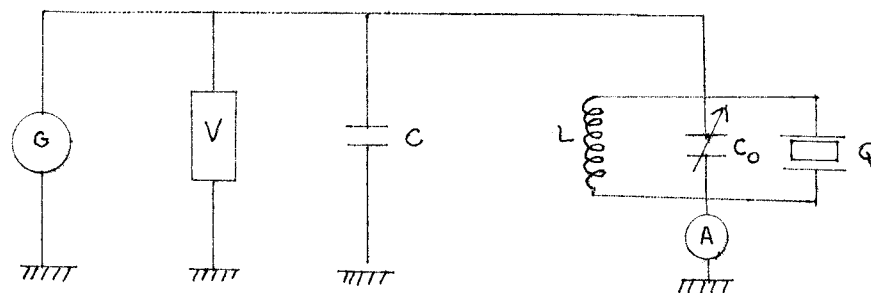


C le condensateur d'adaptation

L et C_0 les éléments composant la capacité propre du quartz

Q le quartz

A l'ampèremètre (thermocouple ou faible résistance) qui permet de mesurer le courant à l'accord du circuit.

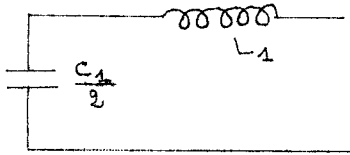


4.1.2. - Le filtre

Nous avons signalé plus haut (paragraphe 3.3.) la nécessité de placer entre la petite résistance aux bornes de laquelle on mesure la chute de tension provoqué par le courant et le millivoltmètre de mesure un filtre passe-bas ayant au moins 40 décibels d'atténuation pour tous les harmoniques.

Notre première idée avait été de placer en série avec le circuit comportant le quartz deux circuits bouchons accordés sur les fréquences du second et du troisième harmonique, et la résistance de faible valeur aux bornes de laquelle on effectuait la mesure. Les harmoniques devaient apporter dans ces conditions une perturbation de l'ordre de 1 %. En fait, cette solution ne donne pas de résultats satisfaisants car les trois circuits accordés réagissent les uns sur les autres et d'autre part les blindages des cables introduisent des capacités qui viennent se mettre en parallèle sur les circuits bouchons et rendent leur accord impossible. On a donc réalisé un filtre de Zobel constitué de quatre demi-cellules passe-bas; deux présentant une fréquence infinie pour 2 MHz, la fréquence la plus gênante. Nous avons choisi comme impédance image $R = 100 \Omega$.

Les deux premières demi-cellules conforme à la figure sont telles que

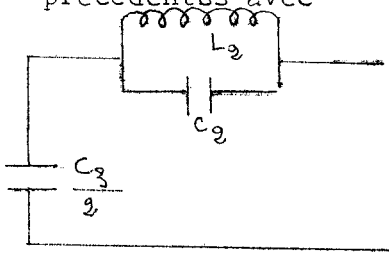


$$L_1 = \frac{R}{\pi f_1} \quad \text{et} \quad C_1 = \frac{1}{\pi f_1 R}$$

où f_1 désigne la fréquence de coupure à 3 décibels. Nous avons choisi

$f_1 = 1,6$ MHz. On trouve alors $L_1 = 19,9 \mu\text{H}$ $C_1 = 1\,990$ pF.

Les deux autres demi-cellules sont des cellules dérivées en m des précédentes avec



$$L_2 = m L_1$$

$$C_2 = \mu C_1$$

$$C_3 = m C_1$$

$$\text{avec } m = \sqrt{1 - \frac{f_1^2}{f_\infty^2}}$$



$$\text{et } \mu = \frac{f_1^2}{f_\infty^2} \times \frac{1}{4m}$$

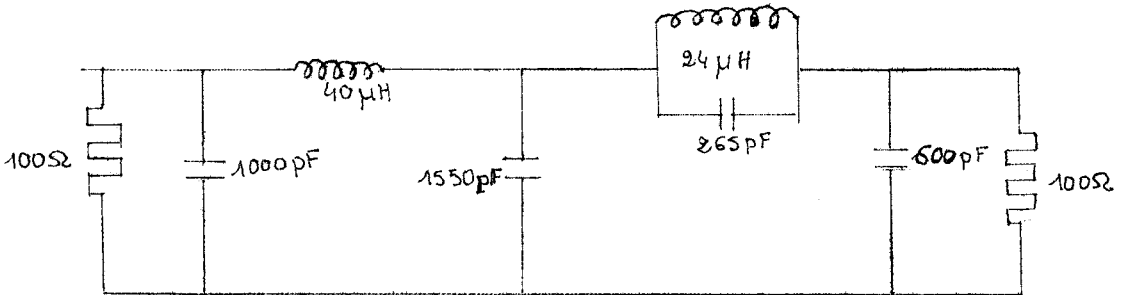
Puisque $f_\infty = 2$ MHz

$$\text{On a alors } \frac{f_\infty}{f_1} = 1,25 \quad \text{donc } m = 0,6$$

$$\text{et } \mu = 0,266$$

On en déduit $L_2 = 11,9 \mu\text{H}$ $C_2 = 530$ pF et $C_3 = 1190$ pF

À l'entrée et à la sortie du filtre on a placé l'impédance image soit une résistance de 100Ω . Le schéma complet du filtre est alors le suivant :



Dans ces conditions, vu du filtre on peut considérer le circuit comportant le quartz comme un générateur de courant dont on veut justement mesurer l'intensité. La tension développée par ce courant i sera à l'entrée du filtre V_e

$$V_e = Z_e i \quad Z_e \text{ impédance d'entrée du filtre}$$

La tension mesurée à la sortie du filtre sera V_s

$$V_s = A V_e \quad A \text{ atténuation du filtre}$$

Dans ces conditions
$$i = \frac{V_s}{A Z_e}$$

Il faudra donc déterminer l'atténuation et l'impédance d'entrée avec le maximum de précision.

Le gain est mesuré à l'aide d'un voltmètre électronique de précision 1 %. Dans la gamme de fréquence voisine de 1 MHz l'appareil est utilisé pour mesurer V_e et V_s sur la même sensibilité. On peut donc espérer une excellente précision sur le rapport $A = \frac{V_s}{V_e}$

Tableau de mesure donnant A ($V_e = 300 \text{ mV}$)

| F KHz | V_s mv | $A = \frac{V_s}{V_e}$ | A en décibels |
|-------|----------|-----------------------|---------------|
| 500 | 170 | 0.57 | 5 |
| 800 | 170 | 0.57 | 5 |
| 900 | 212 | 0.71 | 3 |
| 950 | 237 | 0.79 | 2 |
| 1 000 | 243 | 0.81 | 1.8 |
| 1 020 | 235 | 0.78 | 2.2 |
| 1.040 | 222 | 0.74 | 2.6 |
| 1 060 | 200 | 0.67 | 3.5 |

.../

| | | | |
|--------|--------|-------------------|--------|
| 1 080 | 180 | 0.60 | 4.4 |
| 1 100 | 160 | 0.53 | 5.5 |
| 1 500 | 14 | 0.046 | 27 |
| 2 000 | 0.6 | $2 \cdot 10^{-3}$ | 55 |
| 5 000 | < 3 | $< 10^{-2}$ | > 40 |
| 10 000 | < 10 | < 0.03 | > 30 |

ce qui donne la courbe de réponse ci-jointe.

L'impédance d'entrée a été mesurée à l'aide d'un pont général radio de bonne précision ; ce pont mesure la partie réelle R et la partie imaginaire X de l'impédance branchée à ses bornes. Partout de ces valeurs il nous faudra calculer $Z_e = \sqrt{R^2 + X^2}$.

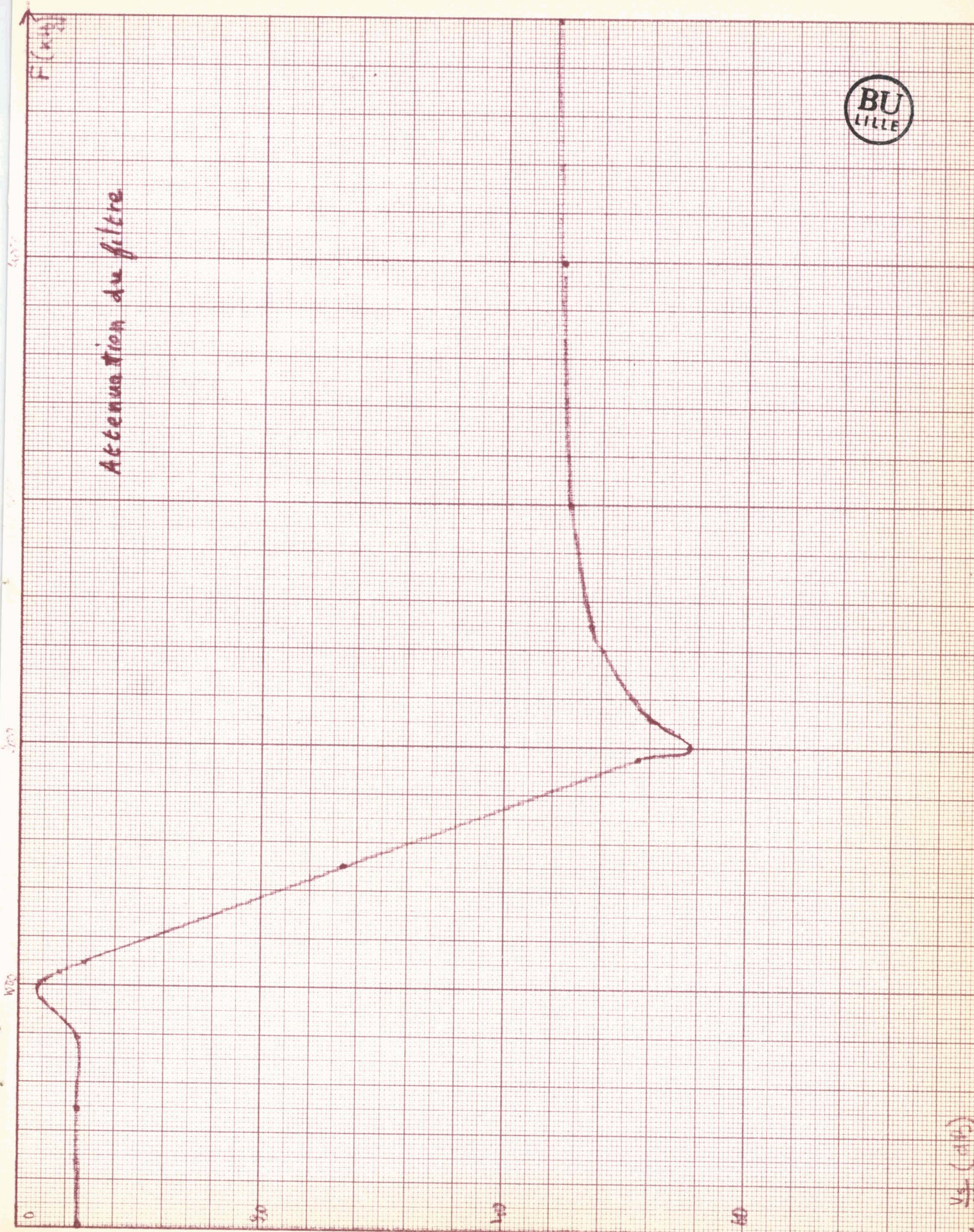
Nous avons obtenu les résultats suivants qui nous ont permis de déterminer le produit $A Z_e$

| F kHz | $R \Omega$ | $X \Omega$ | $Z_e \Omega$ | $A Z_e \Omega$ |
|-------|------------|------------|--------------|----------------|
| 920 | 57.5 | -11 | 59 | 45.5 |
| 940 | 56 | -10 | 57 | 45.5 |
| 960 | 55 | -7 | 55.5 | 46 |
| 980 | 55 | -5 | 55 | 47 |
| 1 000 | 55 | -2 | 55 | 47 |
| 1 020 | 57 | +2 | 57 | 48 |
| 1 040 | 60 | +5 | 60 | 47 |
| 1 060 | 65 | +7 | 65 | 47 |
| 1 080 | 70 | +9 | 70.5 | 45.5 |
| 1 100 | 73 | +8 | 73.5 | 41.5 |



Attenuation du filtre

F (kHz)

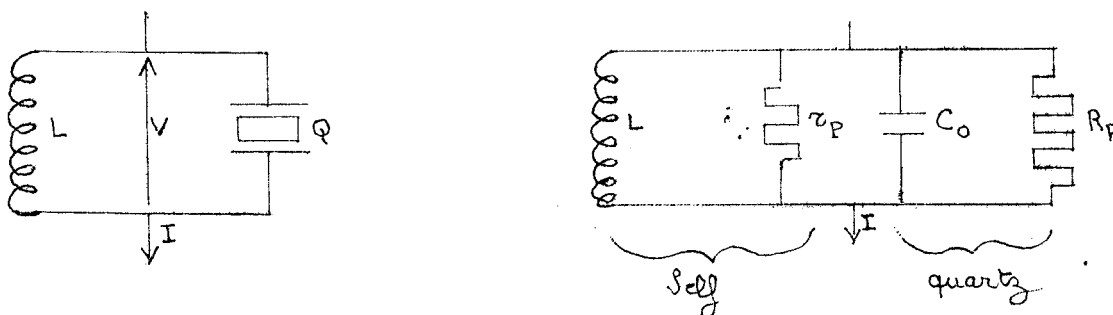


10^0 10^1 10^2 10^3 10^4

L'un des éléments du filtre étant variable (condensateur qui règle l'accord sur f_{∞}) ces mesures sont à refaire chaque fois que l'on retouche cet accord. Pour les mesures que nous avons faites, les valeurs que nous avons données de A Ze sont celles qui ont été utilisées dans les calculs.

4.1.3. - Etude de la self d'accord

Nous avons déjà mentionné (paragraphe 1.3.) le fait que, pour atteindre les vraies valeurs de la résistance parallèle du quartz et de la puissance électrique transmise au quartz, il fallait faire intervenir les pertes dans la self d'accord qui se traduisent par une résistance parallèle r_p variable avec la fréquence. Les deux schémas électriques indiqués par la figure ci-dessous sont équivalents.

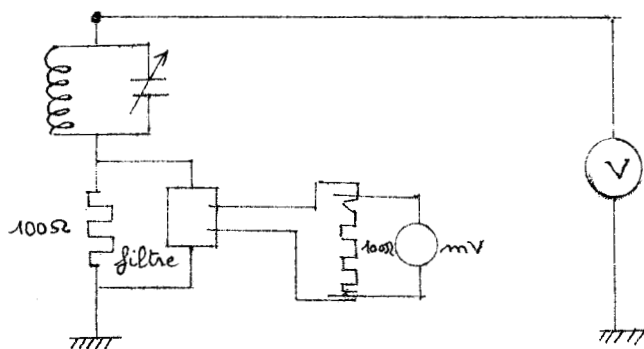


A la résonance L et C_0 se compensent exactement et donc le circuit est équivalent à la résistance r_p en parallèle sur la résistance R_p .

Pour mesurer R_p il faudra donc connaître préalablement la valeur de r_p . Si on appelle ρ la quantité $\frac{V}{I}$ on aura

$$R_p = \frac{r_p \times \rho}{r_p - \rho}$$

Nous avons effectué pour déterminer r_p deux séries de mesures ; l'une, en fonction de la tension appliquée à la self en utilisant le schéma ci-dessous :



Cette série de mesures avait pour but de vérifier la constance de r_p en fonction de V et surtout de voir s'il était possible de faire des mesures cohérentes par notre procédé puisque r_p ne devait pas varier on devait donc trouver un résultat constant quelle que soit la tension appliquée.

Pour une fréquence fixe $F = 990$ KHz nous avons obtenu les résultats suivants :

| V en volts | mV en millivolts | $I = \frac{mV}{AZ_e}$ en mA | $r_p = \frac{V}{I}$ en K |
|--------------|------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 380 | 28 | 0.60 | 630 |
| 440 | 33 | 0.70 | 630 |
| 870 | 64 | 1.35 | 640 |
| 1 130 | 85 | 1.80 | 630 |
| 1 600 | 118 | 2.50 | 640 |
| 2 450 | 182 | 3.85 | 625 |
| 2 900 | 215 | 4.55 | 645 |
| 3 850 | 290 | 6.20 | 630 |

Les variations de r_p mesuré correspondent à une erreur de $\pm 2\%$ ce qui correspond aux imprécisions de mesure dues aux appareils. On pourra admettre pour cette fréquence que $r_p = 630 \text{ K}\Omega$. D'autre part puisque cette valeur est indépendante de la tension appliquée à la self nous pouvons réaliser les mesures en fonction de la fréquence à l'aide d'un Q-mètre. C'est ainsi que nous avons réalisé la seconde série de mesures en utilisant la self à étudier comme self de Q-mètre. Nous avons obtenu les résultats suivants :

| F en KHz | C en pF | Q | r_p en $\text{K}\Omega$ |
|----------|---------|-----|---------------------------|
| 900 | 60.8 | 193 | 560 |
| 920 | 57.5 | 191 | 575 |
| 940 | 54.2 | 189 | 590 |
| 960 | 51.4 | 187 | 605 |
| 980 | 48.7 | 186 | 620 |
| 990 | 47.6 | 185 | 635 |
| 1 050 | 40.3 | 180 | 720 |
| 1 100 | 30.5 | 175 | 835 |

A l'aide de ces valeurs nous pouvons espérer corriger la valeur de R_p de telle façon que le résultat ait une précision meilleure que 4% , du moins tant que r_p sera beaucoup plus grand que R_p ; en effet la résistance mesurée ρ est obtenue par r_p et R_p en parallèle : $\frac{1}{\rho} = \frac{1}{r_p} + \frac{1}{R_p}$. Nous connaissons ρ et r_p et nous devons déterminer R_p .

On a donc $R_p = \frac{r_p \rho}{r_p - \rho}$. Effectuons sur R_p un calcul d'incertitude pour préciser l'erreur maximale commise sur cette dernière.

$$\begin{aligned} \frac{d R_p}{R_p} &= \frac{d r_p}{r_p} + \frac{d \rho}{\rho} - \frac{d(r_p - \rho)}{r_p - \rho} \\ &= \frac{d r_p}{r_p} - \frac{d r_p}{r_p - \rho} + \frac{d \rho}{\rho} + \frac{d \rho}{r_p - \rho} \\ \text{soit } \frac{d R_p}{R_p} &= d \rho \frac{r_p}{\rho(r_p - \rho)} - d r_p \frac{\rho}{r_p(r_p - \rho)} \\ \frac{\Delta R_p}{R_p} &\leq \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} r_p + \frac{\Delta r_p}{r_p} \rho \right) \frac{1}{r_p - \rho} \end{aligned}$$

On peut admettre que les incertitudes relatives existant sur ρ et r_p sont égales à 2 %.

$$\text{Dans ces conditions } \frac{\Delta R_p}{R_p} \leq \frac{2}{100} \times \frac{r_p + \rho}{r_p - \rho}$$

$$\text{Tant que } \rho \leq \frac{r_p}{3} \quad \frac{\Delta R_p}{R_p} \leq 4 \%$$

Les mesures montrent que cette précision sera atteinte dans une bande de fréquence de 100 KHz (50 KHz de part et d'autre de la fréquence de résonance du quartz).

4.2 - Résultats en ondes progressives

Nous avons étudié dans ces conditions la variation de R_p en fonction de 4 paramètres : la fréquence, la puissance appliquée au quartz, la hauteur d'eau et la température. Nous en avons déduit la constance de la capacité parallèle C du quartz. Le quartz utilisé a une fréquence de résonance de 1 002,7 KHz. Elle a été mesurée par la méthode de la crevasse

4.2.1. - Etude de R_p en fonction de la fréquence

Pour chaque fréquence, nous avons fait la mesure pour 3 niveaux de tension différents aux bornes du quartz.

Le courant a été mesuré en plaçant une résistance en série avec le circuit comme il a été indiqué ci-dessus. Enfin pour atteindre la vraie valeur de R_p , nous avons fait intervenir la valeur de la résistance parallèle de la self d'après les valeurs données au paragraphe précédent.

Nous reproduisons ci-dessous une série de mesures complètes réalisées à température et à hauteur d'eau constantes.

Valeur de R_p en fonction de la fréquence

| F KHz | V HF volts | $AZ_e I$ mV | I mA | ρ K Ω | R_p K Ω |
|-------|------------|-------------|-------|-------------------|------------------|
| 950 | 890 | 168 | 3.67 | 242 | 410 |
| | 1 540 | 290 | 6.33 | 243 | |
| | 3 080 | 580 | 12.67 | 243 | |
| 960 | 810 | 167 | 3.62 | 224 | 345 |
| | 1 650 | 335 | 7.30 | 226 | |
| | 3 150 | 660 | 14.30 | 220 | |
| 970 | 800 | 180 | 3.87 | 206 | 299 |
| | 1 550 | 350 | 7.50 | 206 | |
| | 3 000 | 690 | 14.8 | 201 | |

Température : 24° C ; hauteur d'eau : 20 cm.

| F | V _{HF} | A Z _e I | I | P | R _P |
|-------|-----------------------|---------------------|------------------------|-------------------|----------------|
| 980 | 850 1 650 3 150 | 200 410 810 | 4.25 8.7 17.2 | 200 190 183 | 259 |
| 990 | 780 1 560 3 100 | 220 440 900 | 4.67 9.40 19.20 | 167 166 162 | 216 |
| 1 000 | 780 1 480 3 100 | 235 455 980 | 5.0 9.70 20.80 | 156 142 142 | 194 |
| 1 010 | 780 1 450 3 050 | 245 470 1 030 | 5.15 9.90 21.70 | 153 147 141 | 180 |
| 1 015 | 820 1 450 2 900 | 250 457 950 | 5.25 9.60 20.0 | 156 151 145 | 186 |
| 1 020 | 830 1 600 3 100 | 250 500 1 020 | 5.20 10.40 21.30 | 160 154 153 | 198 |
| 1 030 | 840 1 500 3 020 | 247 450 932 | 5.20 9.50 19.60 | 162 158 154 | 199 |
| 1 040 | 840 1 500 3 175 | 200 365 800 | 4.25 7.77 17.0 | 198 193 187 | 255 |
| 1 050 | 810 1 570 3 150 | 188 360 740 | 4.0 7.65 15.70 | 202 205 200 | 276 |
| 1 060 | 790 1 580 3 050 | 150 305 590 | 3.20 6.40 12.50 | 247 243 244 | 365 |
| 1 070 | 800 1 570 3 100 | 130 255 510 | 2.80 5.52 11.0 | 286 284 282 | 450 |
| 1 080 | 1 470 2 900 | 210 410 | 4.62 9.0 | 320 322 | 543 |



On peut tirer plusieurs conclusions de ces mesures :

1° La courbe de variation de R_p en fonction de la fréquence à tension constante appliquée au quartz (cf courbe ci-jointe) est un courbe classique qui traduit la résonance mécanique du quartz. On peut en déduire que le quartz résonne vers 1010 KHz puisqu'à cette fréquence sa résistance parallèle est la plus faible et donc, à tension constante appliquée au quartz, qu'il absorbe le plus de puissance. Ce résultat classique avait déjà été obtenu par des mesures à très faible niveau d'excitation.

On peut noter que pour une fréquence comprise entre 970 et 1 060 KHz le calcul d'incertitude du paragraphe 4.1.3. montre

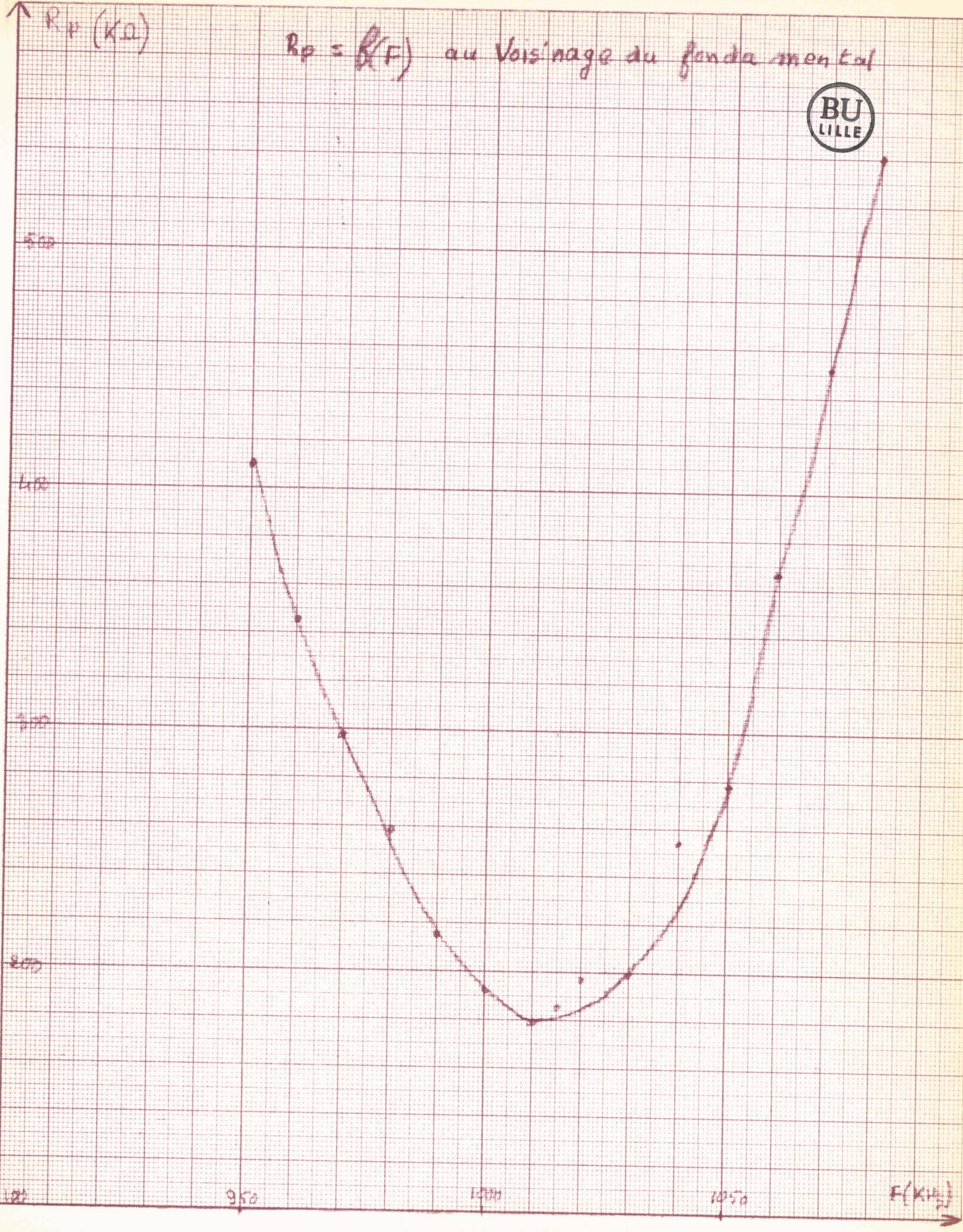
$$\text{que } \frac{\Delta R_p}{R_p} < 4 \%$$

2° La résistance ρ équivalente à R_p et r_p en parallèle varie très peu en fonction de la tension appliquée pour des fréquences éloignées de la fréquence de résonance alors que pour que des fréquences proches de celle-ci ces mêmes variations sont très nettement mesurables (6 à 8 %). Ce résultat indique que la résistance parallèle du quartz varie effectivement en fonction de la puissance électrique qu'il absorbe. En effet, à tension constante, pour des fréquences éloignées de la fréquence de résonance R_p est beaucoup plus grande que pour les fréquences proches de la résonance et donc la puissance absorbée par le quartz est beaucoup plus faible pour les premières que pour ces dernières. Autrement dit pour ces dernières ^{la} puissance ultra-sonore est-elle aussi beaucoup plus faible et des phénomènes tels que la cavitation n'apparaissent que pour des niveaux de tension plus élevés à 1010 KHz que ceux nécessaires.

Or, d'autres mesures nous permettent de penser qu'à fréquence constante ce sont effectivement ces phénomènes de cavitation qui provoquent ces variations de résistance parallèle R_p en fonction de la puissance absorbée.

R_p (kN)

$R_p = R(F)$ au voisinage du fondamental



4.2.2. - Variation de R_p en fonction de la puissance appliquée

Pour cette série de mesures nous utilisons notre générateur Haute Fréquence à fréquence constante ; pour cela il est piloté par quartz. Nous réalisons notre montage habituel. La fréquence $F = 990$ KHz. Nous avons pris ^{un}soin particulier au dégazage de l'eau dans laquelle les ultrasons sont émis (dégazage par ébullition sous vide pendant près d'une heure). Nous avons obtenu les résultats indiqués dans le tableau de mesure suivant :

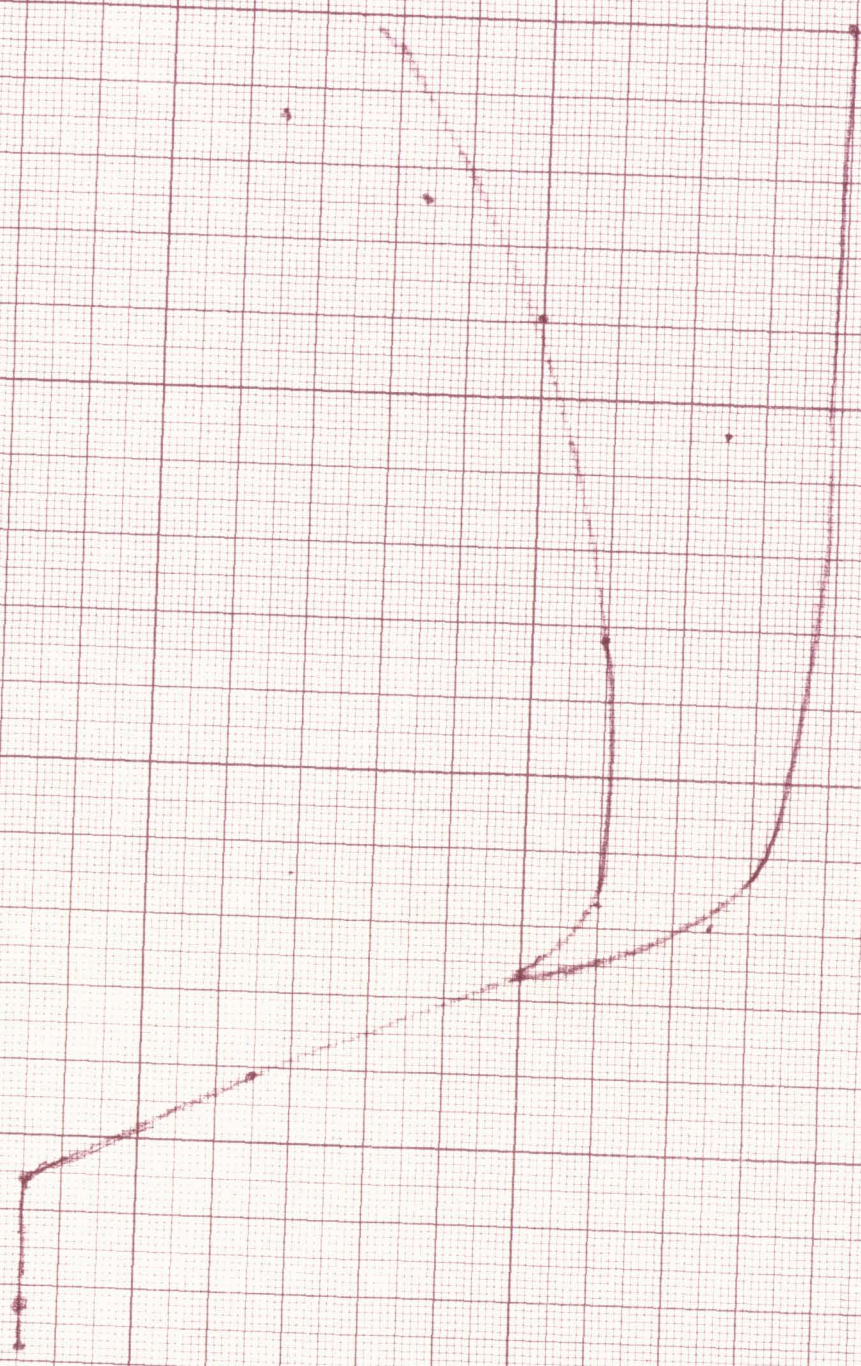
| V en volts | AZ _e I en mv | I mA | ρ en K | R_p en K Ω |
|------------|-------------------------|------|-------------|---------------------|
| 440 | 122 | 2.6 | 170 | 233 |
| 530 | 145 | 3.1 | 170 | 233 |
| 890 | 247 | 5.25 | 170 | 233 |
| 1 170 | 330 | 7 | 167 | 227 |
| 1 450 | 420 | 8.9 | 163 | 220 |
| 1 600 | 470 | 10 | 160 | 215 |
| 1 650 | 480 | 10.2 | 162 | 218 |
| 2 350 | 685 | 14.6 | 162 | 218 |
| 2 900 | 850 | 18.1 | 160 | 215 |
| 3 500 | 1 000 | 21.2 | 165 | 223 |
| 3 200 | 92 | 19.6 | 163 | 220 |
| 3 700 | 1 040 | 22.1 | 167 | 227 |
| 4 000 | 1 200 | 25.5 | 158 | 212 |

Ceci nous donne une courbe de variation représentée ci-après. Elle peut s'interpréter par le phénomène de cavitation. En effet pour des niveaux de tension faibles la propagation des ultrasons se fait quasi parfaitement sous forme d'ondes progressives. Dès que la cavitation se produit, la propagation est perturbée par l'apparition de bulles. Il est probable qu'elles provoquent le retour d'une partie

R_p en fonction de la tension appliquée



(1974)



2.50

1.00

0.50

0.25

des Ultrasons sur le quartz et, en conséquence, augmente son amortissement ce qui se traduit par une diminution de R_p .

Si l'on dépasse très franchement le seuil de cavitation ($V_{HF} > 2\ 000$ volts efficaces) la résistance parallèle fluctue de façon aléatoire autour d'une valeur moyenne de l'ordre de 215 à 220 $K\Omega$.

Ceci pourrait s'interpréter en disant que la cavitation est irrégulière dans le temps. Ce qui d'ailleurs permet de justifier en partie cette interprétation, c'est que le seuil de cavitation est assez mal défini. On a affaire à un phénomène métastable. Si on augmente très progressivement la tension aux bornes du quartz jusqu'à 2000 V, il faut parfois attendre plusieurs dizaines de secondes avant que se produise le phénomène. Dès son apparition observée avec celle des bulles, les mesures commencent à fluctuer.

C'est cette même interprétation qui s'applique aux mesures faites en fonction de la fréquence puisque pour une fréquence donnée si l'on fait 3 mesures à des niveaux de tension différents la cavitation apparaîtra pour un niveau de tension d'autant plus élevé que l'on sera plus loin de la résonance propre du quartz. En conséquence les 3 mesures de R_p faites à des niveaux de tension différents (de l'ordre de 1000, 2000 et 3000 volts) donneront des résultats très proches les uns des autres quand on est loin de la résonance (vers 950 et 1050 KHz) et au contraire des résultats sensiblement différent et décroissant avec la tension pour des fréquences proches de la résonance (1010KHz).

Il faut remarquer cependant que ces variations de résistance en fonction de la tension sont relativement faibles (7 à 8 %). Donc des mesures faites à très faible niveau d'excitation (par exemple au Q mètre) doivent donner des résultats relativement satisfaisants.

4.2.3. - Variation de R_p en fonction de la température

Ces mesures sont faites à fréquence fixe et à tension constante. Elles ont pour but de détecter si la température est un facteur influent sur la génération des ultrasons et donc sur la résis-

tance parallèle du quartz. Pour cela nous avons rempli le vase laboratoire d'eau dégazée, initialement à 52° centigrade. L'eau s'est refroidie en plus de 3 heures pendant lesquelles la tension appliquée au quartz est restée sensiblement constante. Toutes les 20 minutes nous avons relevé les valeurs de courant et de tension. Nous avons obtenu pour R_p une valeur constante à mieux de 2 % près. De plus, ces variations sont aléatoires en fonction de la température du bain. Elles semblent donc plus relever de l'imprécision des mesures que d'une variation effective de R_p en fonction de la température.

4.2.4. - Variation de R_p en fonction de la distance séparant le quartz de l'absorbant supérieur

Les autres paramètres étant fixés nous avons fait varier cette distance et nous avons pu constater que les variations de courant ne sont pas détectables. Ceci n'était qu'une simple vérification puisqu'il est tout à fait logique d'admettre, qu'étant en ondes progressive, de toute façon le quartz émet des ultrasons dans une charge acoustique constante.

Nous avons pu vérifier aussi que la capacité parallèle du quartz était rigoureusement constante en fonction de n'importe lequel de ces quatre paramètres. Nous avons tenté aussi de réaliser des mesures en fonction de la quantité de gaz dissous dans l'eau. Nous nous sommes heurtés au problème du dosage de cette quantité de gaz. Ces mesures ont été abandonnées d'autant plus que les premiers résultats obtenus étaient peu cohérents et que cela nous aurait apparemment mené trop loin.

4.3 - Résultats en ondes stationnaires

4.3.1. - Méthode de mesures

Le quartz émet les ultrasons dans l'eau mais, le vase laboratoire constitue maintenant, non plus une cage sourde, mais une cavité résonnante. Pour la réaliser sur la surface libre de l'eau,

nous disposons un réflecteur (lame métallique surmontée d'un flotteur) parallèle au quartz. Pour pouvoir observer tous les régimes d'ondes stationnaires nous avons provoqué un écoulement de l'eau par un fin capillaire. Le quartz chargé de son impédance acoustique variable reste branché dans un circuit selfique tel que le courant soit à tout instant minimum. Ceci est facilement réalisable puisque la capacité parallèle du quartz reste constante étant donné qu'elle représente la capacité du condensateur équivalent en quartz, capacité déterminée par la structure géométrique et la constante diélectrique du quartz et des isolants qui l'entourent. Elle est donc constante, et quand le circuit est accordé pour un régime d'ondes stationnaires particulier il le reste quel que soit le régime d'onde.

Par contre, la résistance parallèle du quartz qui caractérise l'énergie reçue par lui varie elle très notablement avec ce régime d'ondes. Le circuit accordé est donc équivalent à la résistance constante r_p de la self en parallèle sur R_p variable du quartz. Nous enregistrons maintenant à tension constante le courant traversant le circuit accordé pendant que la hauteur d'eau diminue. Pour mesurer le courant nous avons utilisé un thermocouple. Des mesures de ce type mais à plus faible puissance, ont déjà été réalisées à l'aide d'un Q-mètre. On retrouve ici tous les problèmes de ce genre de mesures ; en particulier, la très forte influence du parallélisme entre le réflecteur et la surface du quartz, qui est par ailleurs très difficile à obtenir par notre procédé.

De même, le fait que le support du vase ne soit pas parfaitement rigide, provoque des fluctuations du parallélisme car le support vibre sous l'influence d'un ébranlement mécanique extérieure (camions, etc...)

D'autre part, à fortes puissances le bain ultrasonné est lui-même agité par les courants de convection. Le flotteur subit l'effet de la pression de radiation qui s'exerce sur lui. C'est pourquoi les enregistrements à forts niveaux sont beaucoup plus délicats que ceux à faible niveaux.

Enfin, à partir d'un certain seuil de tension la cavitation apparaît et tout enregistrement est impossible.

Pour toutes ces raisons les enregistrements que nous avons réalisés sont beaucoup moins contrastés que ceux réalisés à faible puissance. En d'autres termes les maxima et minima sont beaucoup plus faibles. En effet, plus le parallélisme réflecteur quartz est parfait plus les maxima sont importants quand l'onde revient en phase sur le quartz (l'amortissement diminue et R_p croît) et inversement plus les minima sont faibles quand cette onde revient en opposition de phase (la charge du quartz augmente et R_p décroît).

Pour réaliser cet enregistrement nous réglons la tension haute fréquence à une valeur, nous provoquons l'écoulement lent d'eau et nous enregistrons le courant traversant le circuit accordé. Ceci présente un inconvénient car la charge du générateur étant variable, l'adaptation du générateur change et donc aussi la tension appliquée aux bornes du quartz. C'est pourquoi, au cours de l'enregistrement du courant nous avons noté les valeurs de tension appliquée au quartz existant lorsque l'on est au minimum de courant et lorsque l'on est au maximum de courant.

4.3.2. - Résultats de mesure

Les résultats de nos mesures se présentent sous forme d'enregistrement dont un exemplaire est ci-joint. À partir de l'un de ces enregistrements nous avons calculé les valeurs de R_p correspondant aux maxima et aux minima. En effet, ces deux points sont les plus intéressants, ils caractérisent les valeurs extrêmes de la résistance de charge.

Dans le tableau de mesure ci-joint, les deux valeurs de R_p correspondent à un même réglage du générateur.

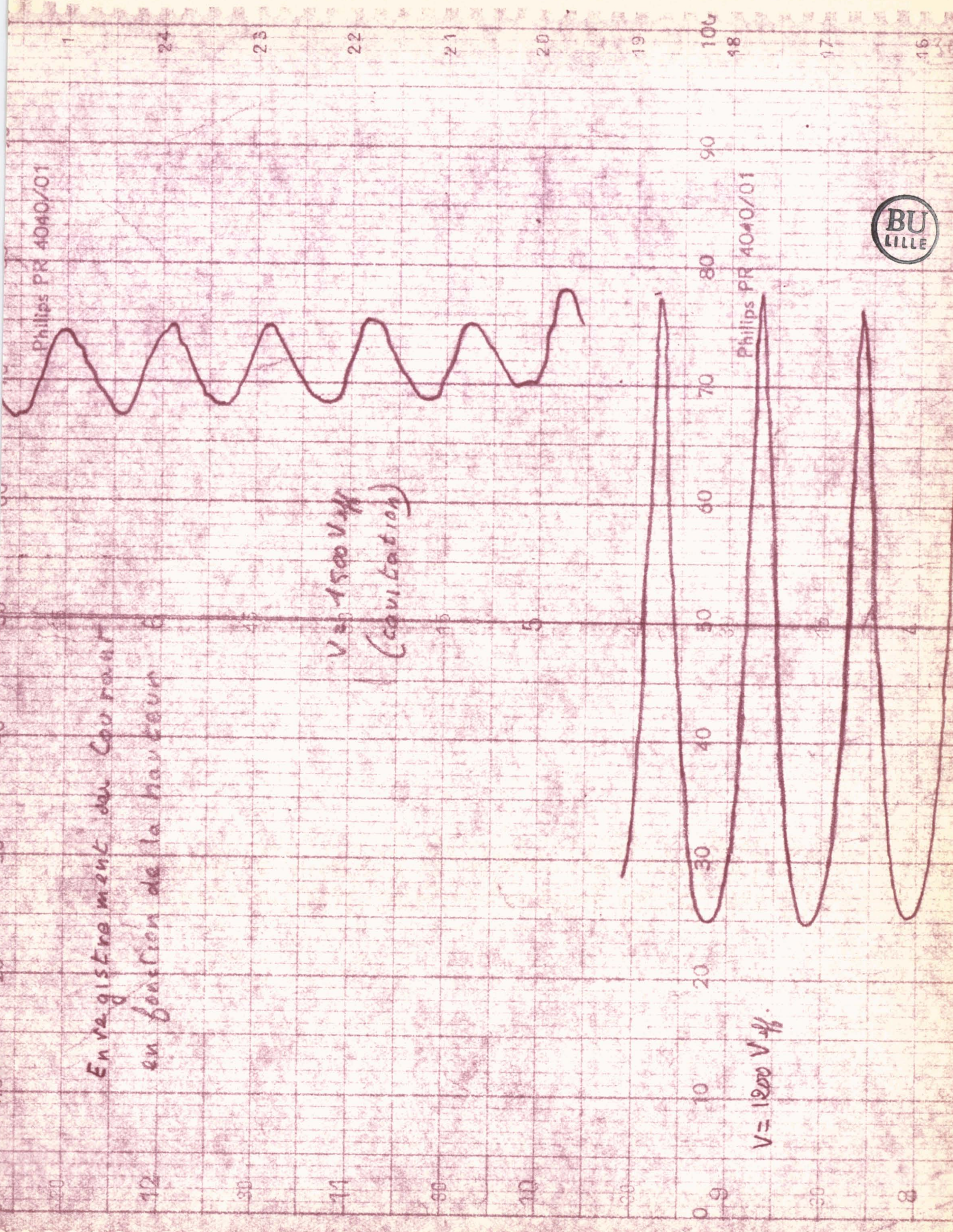
Philips PR 4040/01

Enregistrement du courant
en fonction de la hauteur

$V = 1500 \text{ V}$
(cavitation)

Philips PR 4040/01

$V = 1000 \text{ V}$



| | V en volts | I en mA | ρ K Ω | R_p en K Ω |
|---|---------------|------------|----------------------|------------------------|
| 1 | 440 | 3.95 | 110 | 133 |
| | 560 | 2.90 | 190 | 272 |
| 2 | 630 | 6.15 | 102 | 121 |
| | 840 | 3.60 | 230 | 363 |
| 3 | 770 | 8.65 | 90 | 105 |
| | 1 040 | 5.20 | 200 | 293 |
| 4 | 940 | 1.85 | 80 | 92 |
| | 1 360 | 6.80 | 200 | 293 |
| 5 | 1 620 | 11.65 | 140 | 180 |
| | 1 670 | 11.0 | 150 | 197 |
| 6 | 970 | 11.75 | 80 | 92 |
| | 1 300 | 6.5 | 200 | 293 |
| 7 | 1 100 | 8.9 | 123 | 152 |
| | 1 280 | 6.7 | 190 | 272 |
| 8 | 1 440 | 10.65 | 135 | 172 |
| | 1 510 | 9.8 | 155 | 205 |
| 9 | 1 850 | 13.4 | 140 | 180 |
| | 1 900 | 12.6 | 150 | 197 |



Ces résultats montrent trois choses essentielles.

1 - Les valeurs extrêmes en ondes stationnaires encadrent la valeur de R_p à même fréquence en ondes progressives (190 K Ω)

2 - Les écarts de R_p sont petits. A faible puissance le rapport des valeurs extrêmes atteint 100, ici il n'est au maximum que de l'ordre de 3. Cela provient du fait que le réflecteur est agité par les convections de l'eau provoquées par les ultrasons.

3 - Les mesures n°5 , 8 et 9 donnent des écarts quasi inexistant, ce fait est du à l'existence de la cavitation qui rend évidemment impossible le régime d'ondes stationnaires propre.

En effet l'apparition de bulles provoque la diffusion de l'onde la seconde moitié de l'enregistrement le montre parfaitement, l'aspect anguleux des enregistrements devrait être interprété comme une cavitation irrégulière dans le temps.

4.3.3. - Conclusion.

Il serait facile de réaliser un déplacement du réflecteur parallèlement au quartz par un dispositif adéquat ; cela permettrait théoriquement d'obtenir des écarts beaucoup plus importants entre maxima et minima. Il n'en reste pas moins cependant que la cavitation et les courants de convection de l'eau, à forte puissance, viennent toujours perturber le système d'ondes stationnaires. En conséquence, en ondes stationnaires les écarts seront nécessairement plus faibles qu'à faible niveau. Il est aussi fort probable qu'ici les gradients de température dus aux échauffements locaux viennent perturber la vitesse de propagation de l'onde et donc aussi le système d'ondes stationnaires.

5 - MESURES A 3 M Hz

5.1 - Introduction

Les mesures faites à 3 M Hz sont exactement semblables aux précédentes. Elles sont simplement rendues plus délicates pour des raisons technologiques, le matériel nécessaire à 3 M Hz étant plus délicat à réaliser que le matériel correspondant à 1 M Hz.

De plus la longueur d'onde des ultrasons dans l'eau à 3 M Hz est de 0,5 mm. Il sera donc beaucoup plus délicat de réaliser des **mesures** en ondes stationnaires à cette fréquence, tout phénomène parasite prenant relativement 3 fois plus d'importance que précédemment.

De plus les résultats en ondes stationnaires ne nous ont pas apporté énormément de renseignements c'est pour ces deux raisons que nous n'avons pas étudié des phénomènes à 3 MHz.

Enfin ayant étudié sur le fondamental l'influence des principaux paramètres sur le schéma équivalent du quartz nous n'avons pas jugé utile de refaire cette étude à 3 MHz. C'est pourquoi nous avons simplement étudié la variation de R_p en fonction de la fréquence.

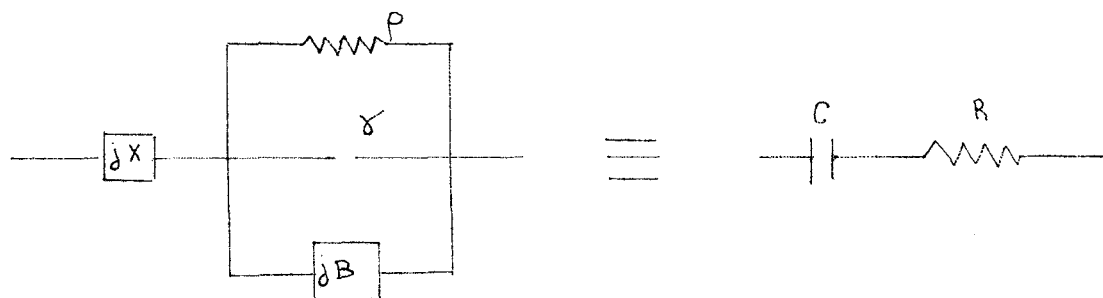
5.2. - Matériel réalisé.

5.2.1. - Calcul d'adaptation

Le générateur sur cette gamme est adapté lorsque l'impédance de charge est constituée par une résistance de 20 ohms en série avec une capacité de 300 pF.

Des mesures faites au Q mètre nous ont montré que l'impédance du quartz pouvait être représentée par une capacité de 40 pF en parallèle sur une résistance de 200 K Ω . Pour réaliser l'adaptation nous avons étudié le cas le plus général : brancher en parallèle sur le quartz une impédance de susceptance jB et en série une réactance jX .

Dans ces conditions, ces deux schémas peuvent être équivalents



ρ et δ représentent le quartz ($\rho = 200 \text{ K}\Omega$, $\delta = 40 \text{ pF}$)
 R en série avec C représente la charge adaptée
 pour le calcul on utilisera $g = \frac{1}{\rho}$

L'équivalence est obtenue si

$$R + \frac{1}{j C \omega} = j X + \frac{1}{g + j(\gamma \omega + B)}$$

$$\text{donc } R = \frac{g}{g^2 + (\gamma \omega + B)^2} \approx \frac{g}{(\gamma \omega + B)^2}$$

$$\text{ce qui donne } B = \sqrt{\frac{g}{R}} - \gamma \omega$$

$$\text{et } \frac{1}{C \omega} = -X + \frac{B + \gamma \omega}{g^2 + (\gamma \omega + B)^2}$$

$$\text{d'où } X \approx \sqrt{\frac{R}{g}} - \frac{1}{C \omega}$$

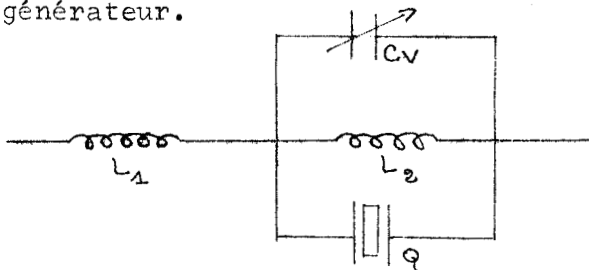
Avec les valeurs numériques données on trouve :

$$B = -3.6 \cdot 10^{-4} \text{ U}$$

$$X = 2400 \Omega$$

Ces deux impédances doivent être réalisées à l'aide de selfs. La première de $146 \mu\text{H}$, la seconde de $220 \mu\text{H}$. De telles valeurs de selfs sont difficiles à réaliser avec des coefficients de qualité intéressants

Nous l'avons quelque peu modifié. C'est pourquoi son impédance est adaptable à l'aide des éléments variables de l'impédance de sortie du générateur.



$$C_V = 30 \text{ pF}$$

$$L_1 = 95 \mu\text{H}$$

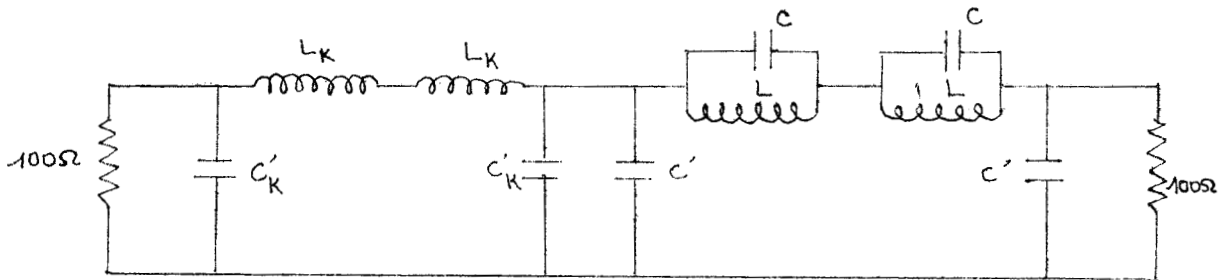
$$L_2 = 60 \mu\text{H}$$

Les selfs qui figurent dans le circuit sont maintenant réalisables avec des coefficients de qualité supérieurs à 250.



5.2.2. - Réalisation d'un filtre

Le filtre à réaliser est du même type que le précédent mais la cellule à fréquence infinie est accordée sur le 3ème harmonique (9 MHz) qui semblait ici plus gênant que le second. L'impédance image est toujours $R = 100 \Omega$; la fréquence de coupure à 3 dB pour une cellule est choisie égale à 4.5 MHz.



$$L_k = \frac{R}{\pi f_1} = 7,6 \mu\text{H}$$

$$C'_k = \frac{1}{\pi f_1 R} = 760 \text{ pF}$$

$$\text{avec } m = \sqrt{1 - \frac{1}{a^2}}$$

$$a = \frac{f_\infty}{f_1}$$

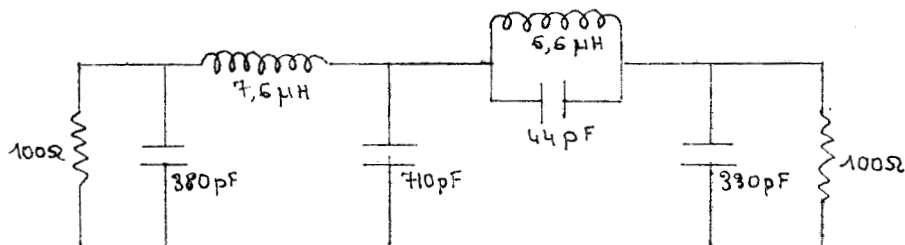
$$\mu = \frac{1}{4 m a^2}$$

$$L = m L_k = 6,6 \mu\text{H}$$

$$C = \mu C'_k = 44 \text{ pF}$$

$$C' = m C'_k = 660 \text{ pF}$$

On a donc le schéma final suivant :



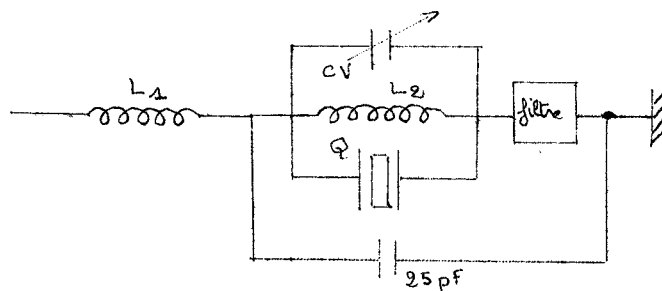
Ce filtre nous a donné des résultats satisfaisants avec en particulier 50 dB d'affaiblissement sur le 3ème harmonique. Les mesures de son impédance d'entrée Z_e (au pont général radio) les mesures d'affaiblissement à l'aide d'un voltmètre électronique (précision de 1 %) et le calcul de la quantité $A Z_e$ qui nous intéresse sont compris dans le tableau suivant :



| F KHz | Re Ω | Xe Ω | Z _e Ω | Ve V | Vs V | A | A Z _e Ω |
|----------|----------------|----------------|----------------------------|---------|---------|-------|------------------------------|
| 2 700 | 74 | 6.6. | 74.3 | 2.92 | 2.325 | 0.796 | 59.14 |
| 2 750 | 73 | 7 | 73.3 | | | | |
| 2 800 | 70.5 | 7.8 | 70.9 | 2.92 | 2.32 | 0.796 | 56.44 |
| 2 850 | 68.5 | 9.5 | 69.1 | | | | |
| 2 900 | 68 | 10.3 | 68.7 | 2.91 | 2.34 | 0.804 | 55.24 |
| 2 950 | 67 | 11 | 67.9 | | | | |
| 3 000 | 64.5 | 11.6 | 65.5 | 2.88 | 2.38 | 0.826 | 54.10 |
| 3 050 | 63 | 11.8 | 64 | | | | |
| 3 100 | 61.5 | 11.8 | 62.6 | 2.85 | 2.43 | 0.853 | 53.40 |
| 3 150 | 60 | 11.7 | 61.1 | | | | |
| 3 200 | 57.5 | 11.5 | 58.7 | 2.80 | 2.51 | 0.896 | 52.60 |
| 3 250 | 56 | 10.7 | 57 | 2.77 | 2.53 | 0.913 | 52.04 |
| 3 300 | 54.5 | 9.8 | 55.4 | 2.75 | 2.58 | 0.938 | 51.97 |

5.2.3. - Etude de la self d'accord

Pour réaliser nos mesures de courant il faut que la circuit comportant le quartz constitue un circuit bouchon accordé. D'autre part, l'adaptation est maintenue branchant en parallèle sur ce circuit accordé une capacité de 25 pF. Ceci nous amène donc au schéma complet suivant:



Afin d'évaluer le courant on mesure la tension aux bornes de la résistance de charge du filtre; on a ainsi la quantité $A Z_e i$; on mesure la tension haute fréquence appliquée au quartz aux bornes du circuit accordé. Pour atteindre la vraie valeur de R_p et de la puissance il faut comme précédemment faire intervenir la résistance parallèle de la self r_p . En vue de réaliser ces mesures nous avons dans le circuit précédent remplacé le quartz par une capacité de 40 pF, ce qui nous a permis de retrouver l'accord du circuit oscillant. Une première self utilisée uniquement à des fréquences supérieures à 3000 K Hz donne les résultats suivants :

| F en K Hz | V_{HF} volts | $A Z_e i$ mv | r_p K Ω |
|-----------|----------------|--------------|------------------|
| 3 008 | 680 | 66 | 556 |
| | 1 580 | 153 | 556 |
| 3 096 | 560 | 52 | 571 |
| | 1 220 | 115 | 566 |

Une seconde self nous permet de faire des mesures sur une plus large bande de fréquence, mais avec une résistance parallèle plus faible

| | | | |
|-------|-------|-----|-----|
| 2 918 | 920 | 147 | 343 |
| | 1 730 | 270 | 345 |
| 2 995 | 885 | 136 | 351 |
| | 1 710 | 262 | 353 |
| 3 100 | 1 320 | 177 | 397 |
| | 1 560 | 205 | 400 |
| 3 200 | 1 300 | 185 | 370 |
| | 1 230 | 175 | 370 |

5.3 - Résultats

Les résultats donnés dans le tableau suivant proviennent de mesures réalisées en un temps très long (1 jour et demi) : Ceci étant dû à la longueur des opérations de réglage du générateur. Nous pouvions nous attendre à avoir des résultats très peu cohérents ; les dernières mesures réalisées ne correspondant plus aux premières. Or nous avons constaté que ces résultats étaient tout à fait cohérents puisque quand nous avons eu terminé les mesures, nous avons recommencé les premières et nous avons retrouvé exactement les mêmes résultats.

Dans le tableau suivant, les résultats sont indiqués dans l'ordre où les mesures ont été faites.

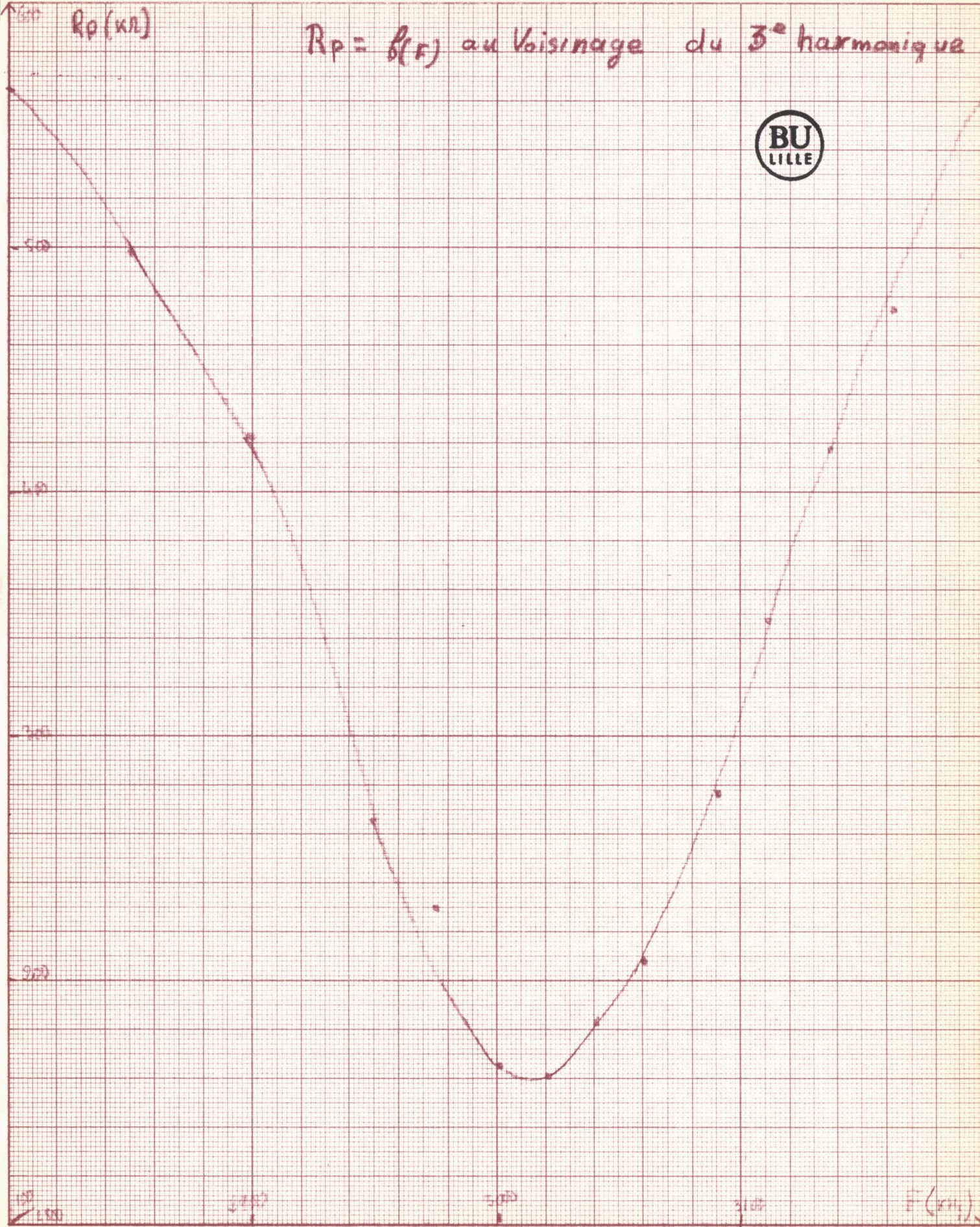
| F KHz | V _{HF} volts | A ZeI mv | I mA | R _{apparent} ^{=ρ} kΩ | R _P kΩ |
|----------|--------------------------|-------------|---------|---|----------------------|
| 3 000 | 1 830 | 790 | 14.6 | 125 | 161 |
| 2 950 | 1 900 | 585 | 10.7 | 171 | 262 |
| 3 023 | 2 680 | 1 300 | 24.1 | 111 | 159 |
| 2 974 | 1 520 | 602 | 11.0 | 135 | 227 |
| 2 904 | 1 320 | 380 | 6.90 | 191 | 420 |
| 2 850 | 2 780 | 755 | 13.6 | 205 | 494 |
| 2 805 | 1 430 | 365 | 6.6 | 216 | 563 |
| 2 749 | 800 | 160 | 2.75 | 287 | 1 592 |
| 2 898 | 1 350 | 255 | 4.3 | 314 | 3 000 |
| 3 042 | 1 870 | 735 | 13.7 | 137 | 180 |
| 3 061 | 2 780 | 980 | 18.3 | 151 | 205 |
| 3 090 | 2 770 | 795 | 14.9 | 185 | 273 |
| 3 110 | 2 470 | 710 | 13.3 | 186 | 345 |
| 3 135 | 2 520 | 665 | 12.5 | 201 | 414 |
| 3 162 | 2 430 | 610 | 11.5 | 211 | 472 |
| 3 200 | 2 100 | 495 | 9.4 | 223 | 559 |
| 3 252 | 950 | 217 | 4.17 | 227 | 617 |
| 3 342 | 1 720 | 378 | 7.3 | 235 | 714 |
| 3 010 | 1 730 | 850 | 15.7 | 111 | 160 |



Ces résultats nous permettent de tracer la courbe R_p en fonction de la fréquence au voisinage du 3ème harmonique du quartz. Cette courbe montre que la résonance mécanique du quartz a bien lieu à la fréquence triple de celle de fondamental et que de plus ici la valeur minimale de R_p est légèrement inférieure à celle trouvée pour le fondamental. Cette dernière constatation rejoint celle faite lors de l'étude à faible niveau de puissance.

$R_p(x\lambda)$

$R_p = \beta(f)$ au voisinage du 3^e harmonique



CONCLUSION

Des mesures analogues pourraient être faites sur les harmoniques supérieurs du quartz en particulier sur les 5ème et 7ème qui avaient été étudiés au Q-Mètre. Ceci ne pose d'autres difficultés que celles dûes à des problèmes technologiques.

Ce travail a finalement permis de vérifier dans des conditions normales de fonctionnement le schéma électrique équivalent d'un quartz émetteur d'ultrasons chargé par une impédance liquide d'un quartz émetteur d'ultrasons chargé par une impédance liquide dans le cas d'ondes progressives et en ondes stationnaires. Dans le premier cas le quartz est équivalent à une capacité fixe shuntée par une résistance variable avec la fréquence. Dans le second cas on a la même capacité fixe shuntée par une résistance variable avec le régime d'ondes et la fréquence. Tel était l'un de nos premiers buts.

Le second était de mettre au point une méthode de mesure de puissance transmise à un quartz. Celle-ci est rendue possible par l'adjonction d'une self shuntant le quartz et constituant avec lui un circuit bouchon accordé. La puissance qu'il absorbe est donnée par $V.I. \cos \varphi$ est égal à 1.

