# Mesures informatisées de résonateurs

Autor(en): **Sphicopoulos, T. / Gardiol, F.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **75 (1984)**

Heft 21

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904499

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

**Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

**http://www.e-periodica.ch**

# Mesures informatisées de résonateurs

T. Sphicopoulos et F. Gardiol

*La fréquence de résonance et le facteur de qualité d'un résonateur hyperfréquences sont déterminés automatiquement par la méthode décrite dans cet article. Un système de mesure, commandé par ordinateur, échantillonne la réponse en fréquence du résonateur. Les couples de valeurs mesurées (puissance, fréquence) sont mémorisées. La courbe théorique (raie de Lorentz) qui correspond le mieux aux valeurs mesurées est déterminée par un processus d'optimisation. On obtient ainsi les paramètres recherchés; comme ceux-ci résultent d'un grand nombre de mesures, la méthode est précise et sensible. On tire profit de cette dernière propriété pour mesurer la distribution du champ dans le résonateur, également de façon automatique.*

*Eine Methode zur automatischen Bestimmung der Resonanzfrequenz und des Qualitätsfaktors wird beschrieben. Ein computergesteuertes Messsystem tastet den Frequenzgang des Resonators ab. Die Paare von gemessenen Grössen (Leistung, Frequenz) werden gespeichert. Der theoretische Verlauf (Lorentz-Kurve), welcher den gemessenen Werten am besten entspricht, wird durch ein Optimierungsverfahren bestimmt. Damit werden die gesuchten Parameter erreicht. Weil diese Parameter aus einer grossen Anzahl Messungen berechnet sind, ist die Methode sehr genau und empfindlich. Diese letzte Eigenschaft wird für die Messungen der Feldverteilung im Resonator benützt, dies ebenfalls automatisch.*

Conférence présentée le 15 mai 1984 au «Spring Meeting, IEEE Swiss Section, Chapter on Electromagnetics and Microwaves».

**Adresse des auteurs**

Dr *T. Sphicopoulos* et professeur *F. Gardiol*, Laboratoire d'Electromagnétisme et d'Acoustique, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Chemin de Bellerive 16, 1007 Lausanne.

## 1. Introduction

Les résonateurs hyperfréquences peuvent être considérés soit de l'extérieur comme des éléments de circuit (oscillateurs, filtres, ondemètres) soit de l'intérieur comme dispositifs destinés au confinement du champ électromagnétique (chauffage, mesure de matériaux, étalons de fréquence atomiques, diverses applications en physique des plasmas, etc.). Dans le premier cas, des paramètres de circuits comme la fréquence de résonance, les facteurs de qualité et les coefficients de couplage sont suffisants pour caractériser le résonateur. Dans le second cas, la distribution du champ est un paramètre tout aussi important. Il est par ailleurs toujours intéressant de savoir si la réponse présente une distortion par rapport à la forme théorique d'une lorentzienne, expression mathématique du phénomène physique.

Lorsqu'il faut caractériser une résonance dans une cavité hyperfréquences, la technique conventionnelle consiste à mesurer la fréquence du maximum de puissance transmise – ou du minimum de puissance réfléchie – et des deux fréquences à demi-puissance [1; 2]. Cette mesure ne donne aucune information sur la forme de la raie: elle ne caractérise complètement une courbe de résonance que si celle-ci a une forme symétrique connue. En outre, si la raie est très étroite, un simple générateur de laboratoire, même programmable, n'est pas assez stable pour échantillonner convenablement la réponse en fréquence. La mesure basée sur trois points seulement peut alors s'avérer peu précise.

En théorie, on suppose que la résonance dans une cavité hyperfréquence correspond à une raie de Lorentz – l'inverse d'une parabole – réponse en puissance d'un filtre linéaire de deuxième ordre sous-amorti, avec un facteur de qualité élevé. En pratique, cependant, on observe souvent de légères déviatons de la réponse en fréquence par rapport à la forme lorentzienne. Des déformations asymétriques peuvent survenir si le facteur de qualité n'est pas assez élevé ou encore s'il existe des modes parasites adjacents ou dégénérés. Les déformations symétriques, de leur côté, sont généralement causées par des non-linéarités dans le système de mesure.

L'existence d'asymétries insoupçonnées peut avoir des conséquences néfastes. Lorsque le résonateur est utilisé comme élément de circuit, une déformation de la réponse en amplitude est l'indice d'une déformation correspondante de la réponse en phase; celle-ci joue un rôle essentiel si la cavité est destinée à stabiliser un oscillateur. Quand on utilise le résonateur comme agent de confinement du champ, l'excitation de modes indésirables par couplage parasite risque de perturber sérieusement la distribution des champs dans la cavité, alors qu'une grande homogénéité du champ est obligatoire dans certaines applications comme les étalons de fréquence atomiques.

Le présent article décrit une technique de mesure automatique de la réponse en fréquence, point par point. Elle permet d'échantillonner les raies de résonance les plus étroites et d'extraire les paramètres correspondants à la réponse mesurée par une procédure d'optimisation selon le critère des moindres carrés. Il s'agit, en effet, d'ajuster une lorentzienne théorique aux points expérimentaux. Toute distortion devient ainsi visible, par simple comparaison de la courbe théorique avec les valeurs mesurées. La détermination précise du facteur de qualité permet de déterminer la distribution du champ dans un résonateur ouvert: en introduisant une bille métallique dans le résonateur, on provoque une dégradation du facteur de qualité, qui est proportionnelle à l'amplitude

locale du champ électrique. Un système de mesure, contrôlé par ordinateur, permet de déterminer la distribution du champ aussi bien dans un résonateur ouvert que dans une cavité fermée. Il est basé sur la possibilité de suivre la déviation de la fréquence de résonance quand une bille diélectrique se déplace dans la cavité. Cette déviation de fréquence est proportionnelle au carré de l'amplitude du champ électrique à la position de la bille diélectrique. Des exemples d'application de ces techniques sont présentés pour le cas d'un résonateur ouvert confocal, du type Fabry-Perot, en bande X.

## 2. Détermination des paramètres de la réponse en fréquence

Le facteur de qualité de certains modes dans un résonateur Fabry-Perot, dans la bande de fréquences considérée, est de l'ordre de 100 000. Les raies de résonance sont donc très étroites et par conséquent la détermination de leurs paramètres par la méthode des trois points pose les problèmes mentionnés précédemment. Pour cette raison, un système automatique d'acquisition et de traitement de données, contrôlé par ordinateur, a été mis au point. Il permet d'échantillonner la réponse en fréquence du résonateur en un nombre donné de fréquences et d'extraire les différents paramètres de cette réponse par une procédure d'optimisation des valeurs mesurées. Une source très stable et programmable est nécessaire pour échantillonner la raie de résonance. A cet effet on peut utiliser un synthétiseur hyperfréquence ou un générateur à balayage couplé à un fréquencemètre à verrouillage (fig. 1). La fréquence du générateur est fixée par le fréquencemètre, lui-même piloté par ordinateur. Pour chaque fréquence de la source on mesure, avec un wattmètre programmable, la puissance transmise et la puissance réfléchie pour le résonateur; ces valeurs sont mémorisées. Au cas où un tel fréquencemètre ou un synthétiseur hyperfréquence ne serait pas disponible, le même résultat peut être obtenu avec un synthétiseur HF, une source stable et un mélangeur [3].

Une fois la mesure terminée, un processus d'optimisation non linéaire ajuste à l'ensemble de valeurs expérimentales de la fréquence et de la puissance transmise $\{f_i, p_i\}$, une lorentzienne théorique dont la forme générale est

$$P(f) = \frac{P_0}{1 + 4\left(\frac{f - f_0}{B}\right)^2} \qquad (1)$$

*où* $P_0$ est la puissance maximale transmise, $f_0$ la fréquence de résonance et $B$ la largeur de bande à demi-puissance. Pour ajuster les trois paramètres $P_0$, $B$ et $f_0$ à partir de $N$ points expérimentaux selon le critère des moindres carrés, les trois équations suivantes doivent être annulées simultanément:

$$\sum_{i=1}^{N} [p_i - P(f_i)] \frac{\partial P(f_i)}{\partial x} = 0$$

$$\text{où} \quad x \in \{B, f_0, P_0\} \qquad (2)$$

Ceci est obtenu par un algorithme d'optimisation [3]. Comme il s'agit d'une méthode itérative, les valeurs initiales de trois paramètres sont données par les points expérimentaux les plus proches du maximum et de la moitié de la puissance transmise.

Le programme fournit finalement la fréquence de résonance $f_0$, le facteur de qualité chargé $Q_L$ défini $Q_L = f_0/B$, les coefficients de couplage $\beta_1$ et $\beta_2$ entre le résonateur et les lignes aux deux accès, ainsi que le facteur de qualité non chargé $Q_0$ défini par $Q_0 = Q_L(1 + \beta_1 + \beta_2)$. Les coefficients de couplage sont obtenus à partir de la puissance réfléchie $P_r$, de la puissance transmise $P_t$ et de la puissance incidente $P_i$ à la résonance d'après les relations

$$\beta_2 = \frac{P_t}{P_i - P_r - P_t} \qquad \frac{P_t}{P_i} = \frac{4\beta_1\beta_2}{(1+\beta_1+\beta_2)^2} \qquad (3)$$

Les figures 2 et 3 montrent deux exemples d'applications de cette technique pour le cas de deux modes appartenant à la famille $TEM_{00q}$ d'un résonateur Fabry-Perot. La figure 2 montre que la courbe correspond bien aux mesures, d'où l'on peut déduire une précision meilleure que ±1%. La figure 3 permet de constater une légère

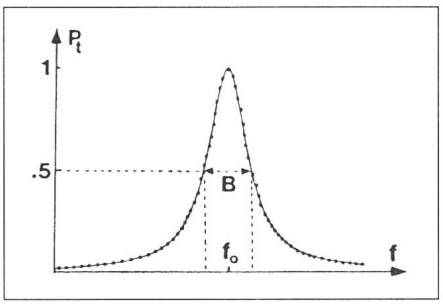


**Fig. 2 Réponse en fréquence du Mode $TEM_{0033}$ d'un résonateur Fabry-Perot en bande X**

| | |
|---|---|
| $P_t$ | Puissance transmise normalisée par rapport à sa valeur maximale |
| $f$ | Fréquence |
| $f_0$ | Fréquence de résonance |
| $B$ | Bande passante à demi-puissance |
| $\beta_1, \beta_2$ | Coefficient de couplage |
| $f_0$ | = 10 034 GHz |
| $Q_0$ | = 72 680 |
| $\beta_1$ | = 0,13 |
| $\beta_2$ | = 0,18 |
| ——— | Réponse optimisée |
| ..... | Valeurs mesurées |

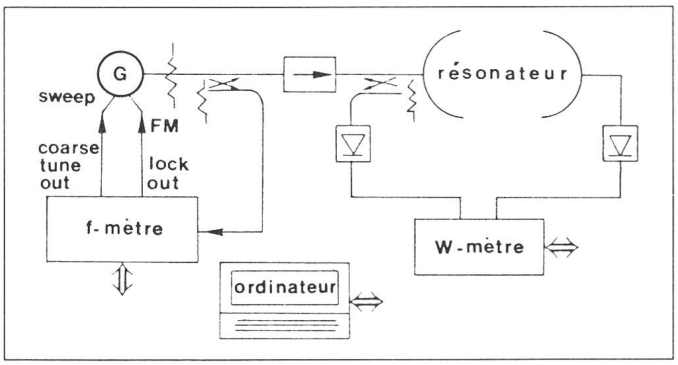


**Fig. 1**
**Banc d'essai utilisé pour la mesure automatique de la réponse en fréquence d'un résonateur**
f-mètre: Fréquencemètre
W-mètre: Wattmètre
G: Générateur

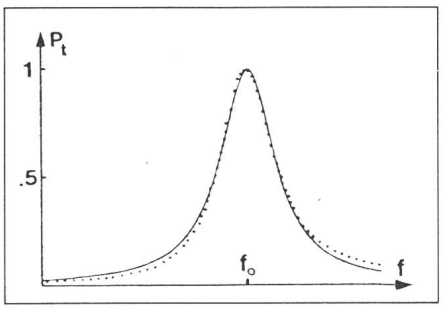


**Fig. 3 Réponse en fréquence du mode $TEM_{0040}$ d'un résonateur Fabry-Perot en présence d'un mode parasite**

Mêmes définitions que dans la figure 2.

| | |
|---|---|
| $f_0$ | = 12 129GHz |
| $Q_0$ | = 35 680 |
| $\beta_1$ | = 0,18 |
| $\beta_2$ | = 0,17 |
| ——— | Réponse optimisée |
| ..... | Valeurs mesurées |

distortion de la courbe expérimentale par rapport à la lorentzienne théorique. Cette dissymétrie résulte de la présence d'un mode parasite excité suite à un mauvais alignement des miroirs du résonateur. On a ainsi la preuve de l'efficacité de cette technique pour détecter des problèmes de ce type.

## 3. Mesure de la distribution du champ

La connaissance de la distribution du champ dans un résonateur est indispensable quand celui-ci est utilisé pour le confinement du champ électromagnétique. Elle peut aussi être utile pour identifier des modes ou encore pour détecter des modes parasites.

La technique présentée au paragraphe précédent peut aussi servir pour déterminer la configuration du champ dans un résonateur ouvert. En effet, si l'on déplace une bille métallique dans le résonateur, on peut montrer [4] que la variation relative du facteur de qualité, due à la diffraction du champ par la bille, est proportionnelle au carré de l'amplitude du champ électrique à la position de la bille:

$$\Delta Q/Q = C_1\, Q_0\, |\vec{E}(\vec{r})|^2 \qquad (4)$$

où $C_1$ est une constante de proportionnalité et $Q_0$ le facteur de qualité du résonateur avant l'introduction de la bille. Il est évident qu'une série de mesures du facteur de qualité pour plusieurs positions de la bille métallique permet de déterminer la distribution du champ dans le résonateur.

En pratique, les résonateurs utilisés en hyperfréquences sont le plus souvent des cavités fermées. Un système de mesure automatique a été conçu pour cette raison, permettant de déterminer la distribution du champ aussi bien dans un résonateur ouvert que fermé.

Le principe de la méthode repose sur le fait qu'on peut mesurer une déviation de la fréquence de résonance provoquée par une faible perturbation du champ dans le résonateur, due à l'introduction d'une bille diélectrique dans le résonateur [5...8]. Les dimensions de la bille doivent être négligeables devant celles du résonateur. Si la perturbation provient d'une sphère diélectrique de rayon $R$ et de permittivité relative $\varepsilon_r$, on peut montrer [6; 7] que le carré de l'amplitude du champ électrique à la position de la sphère est proportionnelle à la déviation de la fréquence de résonance qu'elle provoque:

$$|\vec{E}(\vec{r})|^2 \cong C_2 \left(\frac{f-f_0}{f_0}\right)\left(\frac{\varepsilon_r+2}{\varepsilon_r-1}\right) \qquad (5)$$

$C_2$ est une constante de proportionnalité, qui dépend du rayon de la sphère diélectrique et de l'énergie emmagasinée dans la cavité.

La configuration du champ peut être alors trouvée si on mesure la fréquence de résonance pour plusieurs positions de la bille. L'application de la technique précédente pour mesurer la fréquence de résonance à chaque position de la bille constituerait une procédure très longue. On a donc cherché à mesurer la fréquence de résonance en asservissant le générateur à la cavité à travers un discriminateur de fréquence. Comme la déviation de la fréquence est souvent beaucoup plus petite que la largeur de bande de la raie de résonance, des précautions particulières doivent être prises pour bien asservir le générateur au centre de la résonance [5; 9].

Le système de mesure comporte deux sous-ensembles, tous deux contrôlés par ordinateur. Un système automatique positionne la bille diélectrique [5]; il peut faire usage d'une table X-Y commandée par l'ordinateur [8]. La boucle d'asservissement du générateur (fig. 4) sert à mesurer la fréquence de résonance. Le générateur hyperfréquence est dans ce cas modulé en fréquence par un oscillateur basse fréquence, en vue d'engendrer un signal d'erreur.

Dans ce but, le signal transmis à travers la cavité est capté par un poste récepteur puis démodulé par un détecteur synchrone. Le signal d'erreur est ensuite intégré et réinjecté à l'entrée FM du générateur pour l'asservir à la fréquence de résonance de la cavité. Finalement, la fréquence est mesurée avec un fréquencemètre commandé par l'ordinateur.

La distribution du champ a été mesurée dans le résonateur de Fabry-Perot pour la même famille de modes que précédemment, avec les deux méthodes. La figure 5 montre un exemple de mesure de la distribution transverse du champ électrique d'un mode de la famille $TEM_{00q}$. On remarque que les deux méthodes donnent des résultats extrêmement proches.

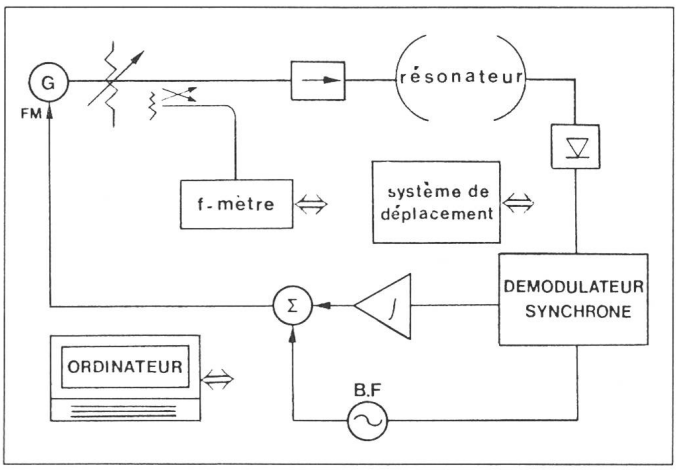


**Fig. 4**
**Banc d'essai utilisé pour la mesure automatique de la distribution du champ dans un résonateur**
f-mètre: Fréquencemètre
G: Générateur hyperfréquences
B.F.: Générateur basses-fréquences

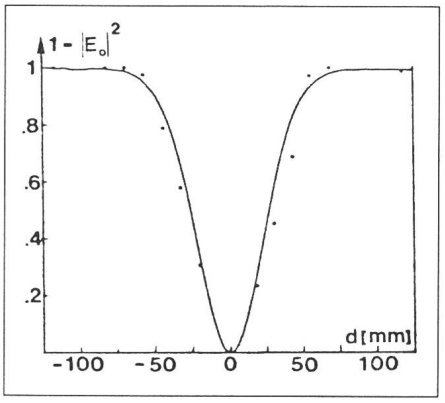


**Fig. 5 Représentation de la distribution transverse du champ électrique du mode $TEM_{0033}$ dans un résonateur Fabry-Perot**

| | |
|---|---|
| $E_0$ | Amplitude du champ électrique normalisée par rapport à sa valeur maximale |
| $d$ | Distance par rapport au centre de la cavité |
| ——— | Mesure du déplacement de fréquence dû à la perturbation par une bille diélectrique |
| ..... | Mesure de la variation du facteur de qualité due à la perturbation par une bille métallique |

## 4. Conclusion

La méthode présentée pour l'extraction des paramètres de la réponse en fréquence d'un résonateur hyperfréquence permet d'obtenir une grande précision à cause du nombre des points expérimentaux considérés et de la procédure d'optimisation. Elle devient particulièrement intéressante pour des raies de résonance très étroites. Par ailleurs, une série de mesures de ce type permet d'évaluer la configuration des champs dans le résonateur. Il est pourtant beaucoup plus rapide et plus facile d'utiliser dans ce but la seconde technique développée. La seule limite de cette dernière résulte de dimensions géométriques du résonateur, qui doit être beaucoup plus grand que la bille diélectrique. On peut cependant toujours étudier les champs d'un certain type de cavité en réalisant un prototype en simulation à une plus grande échelle.

### Bibliographie


[1] *M. Sucher:* Measurement of Q. In: Handbook of microwave measurements. Edited by M. Sucher and J. Fox. Third edition. New York/London, Polytechnic Press of the Polytechnic Institut of Brooklyn, 1963; vol. II, p 417...493.

[2] *M. Ney* and *F.E. Gardiol:* Automatic monitor for microwave resonators. IEEE Trans. IM 26(1977)1, p. 10...13.

[3] *L.-G. Bernier, T. Sphicopoulos* and *F. Gardiol:* Automatic determination of frequency response parameters and distortion in resonant microwave cavities. AEÜ 36(1982)11/12, p. 479...480.

[4] *A.L. Cullen* and *A. Kumar:* The absolute determination of extinction cross-sections by the use of an open resonator. Proceedings of the Royal Society of London, Series A 315(1970)1521, p. 217...230.

[5] *L.G. Bernier, T. Sphicopoulos* and *F.E. Gardiol:* An automatic system for the measurements of the field distribution in resonant cavities. IEEE Trans. IM 32(1983)4, p. 462...466.

[6] *A. Septier:* Mesure de la répartition des champs électromagnétiques dans une cavité résonnante. Journal de Physique et le Radium 16(1955)2, p. 108...114.

[7] *S.W. Kitchen* and *A.D. Schelberg:* Resonant-cavity field measurements. Journal of Applied Physics 26(1955)5, p. 618...621.

[8] *A. Battaglia, A. Grozzini* and *G. Boudouris:* Experimental study of confocal Fabry-Perot microwave resonators. Il Nuovo Cimento, serie decima 69B(1970)2, p. 121...151.

[9] *F.E. Grant:* An analysis of the sensing method of automatic frequency control for microwave oscillators. Proc. IRE 37(1949)8, p. 943...951.