

Approche expérimentale de la notion d'adaptation d'impédance électrique

par J.M. BAUDÉ
L.T. - 59500 Douai
et D. SCACHE
Rectorat - 59000 Lille

INTRODUCTION

L'approche macroscopique des phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement du haut-parleur est complexe ; l'emboîtement fonctionnel des différentes notions relatives à la mécanique, l'électricité et l'acoustique, leur interaction restent pourtant l'œuvre de la physique qui ne peut se limiter à l'étude de faits disjoints, sous peine de se refuser à l'accès au réel, qu'elle prétend pourtant expliquer. C'est cependant ce qui a été réalisé dans cette étude, essentiellement expérimentale, restreinte aux conditions de transfert maximal d'énergie électrique vers des circuits classiques, type $\{R ; L ; C\}$ série, partiellement voisins du schéma équivalent complet du haut-parleur.

Sur le plan des contenus, la problématique s'est donc articulée autour de la notion d'adaptation d'impédance électrique, adaptation en vue de transférer le maximum de puissance électrique à une charge. L'examen et l'exploitation des documents montrent notamment que, dans un circuit $\{R ; L ; C\}$ série excité par un générateur de tension sinusoïdale, la puissance maximale est transférée de la source vers le récepteur lorsque la condition de résonance d'intensité est satisfaite et que la résistance totale de la charge est égale à celle du générateur.

Quant à l'aspect méthodologique, la comparaison suivie de l'accord entre les résultats des mesures de puissance au wattmètre d'une part, et ceux fournis par le dispositif informatique d'autre part, nous ont autorisés à privilégier le second outil, plus performant, quitte à convertir certaines grandeurs physiques en «leurs images électriques» ; dans cet esprit, la structuration des différentes phases de l'étude, pour une charge donnée, fait apparaître d'abord l'acquisition informatisée des points expérimentaux puis le modèle ajusté par l'ordinateur à partir

de ceux-ci et enfin, le modèle théorique établi à partir de l'équation électrique.

Nous nous proposons de déterminer les conditions d'obtention de la puissance maximale P_M fournie par un générateur (f.é.m. e_G fonction sinusoïdale du temps, impédance interne purement résistive R_G), à une charge résistive $\{R_u\}$ puis à un circuit $\{R ; L ; C\}$ série.

Nous montrerons aussi que dans certaines conditions un transformateur peut permettre cette adaptation, quand la charge est imposée.

L'étude des transferts d'énergie à partir d'un générateur d'impédance interne complexe pourrait être envisagée de manière similaire.

1. DÉBIT DANS UNE CHARGE RÉSISTIVE

1.1. La charge R_u est variable

1.1.1. Objectif

Montrer, à fréquence constante, que le maximum de puissance P_M dans la charge R_u sera obtenu pour l'adaptation d'impédance, c'est-à-dire lorsque $R_u = R_G$.

1.1.2. Principe

Étudier la puissance active P consommée dans la charge R_u quand celle-ci varie.

1.1.3. Schéma du montage

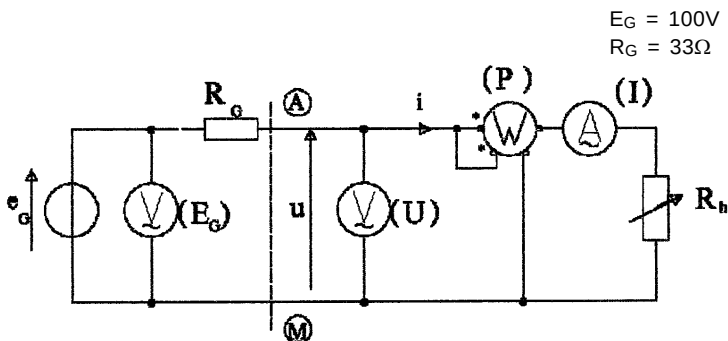


Figure 1

Remarque : Le wattmètre (montage amont) indique la puissance active P consommée par son propre circuit intensité (R_{aW}), l'ampèremètre (R_a) et par le rhéostat R_h ; on appellera R_u la résistance totale équivalente : $R_u = R_{aW} + R_a + R_h$.

1.1.4. Étude théorique de la puissance dissipée dans la charge R_u

$$P = R_u I^2 = R_u \times \frac{E_G^2}{(R_u + R_G)^2} = \frac{E_G^2}{\left(\sqrt{R_u} + \frac{R_G}{\sqrt{R_u}} \right)^2}$$

si : $R_u = R_G$

alors : $P = P_{\max} = \frac{E_G^2}{4R_G}$

Application numérique : $R_u = R_G = 33 \, \Omega$; $P = P_{\max} = 75,7 \, W$ lorsque $U = 50 \, V$.

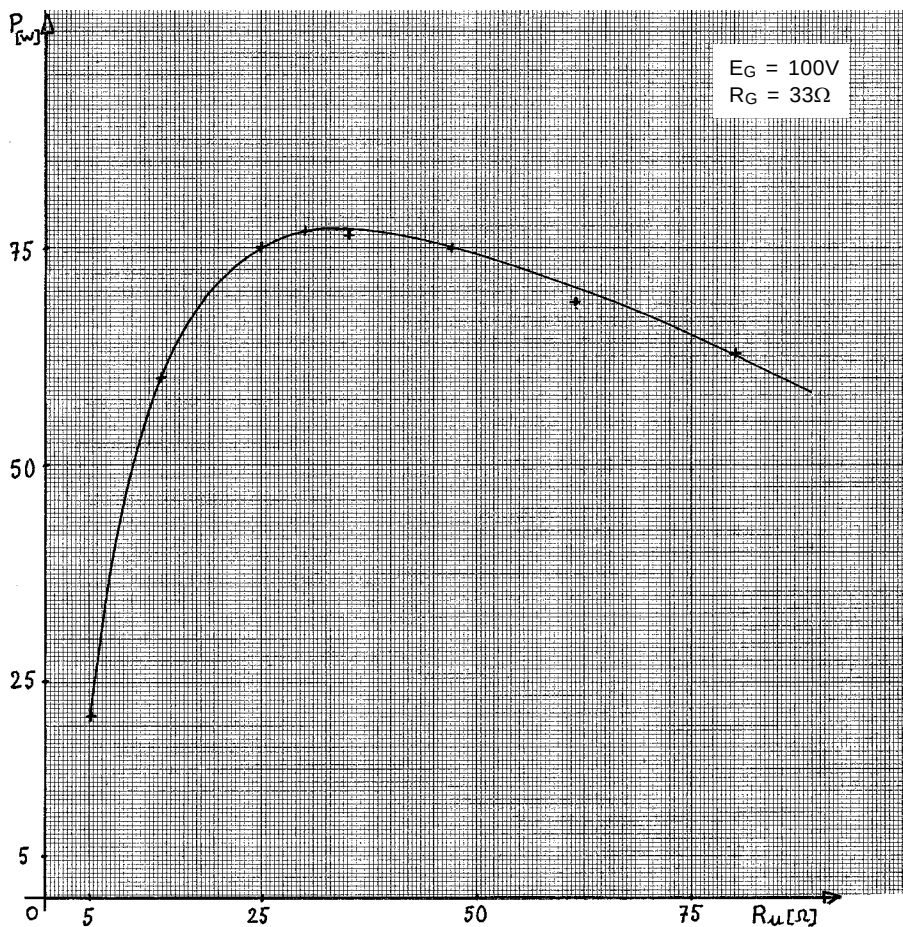
Matériel utilisé

- 1 autotransformateur monophasé (e_G),
- 1 rhéostat $33 \, \Omega$; $3,1 \, A$ (R_G),
- 1 rhéostat $100 \, \Omega$; $1,8 \, A$ (R_h),
- 2 voltmètres magnétoélectriques avec redresseur ($10\,000 \, \Omega \cdot V^{-1}$; cl.1),
- 1 ampèremètre magnétoélectrique avec redresseur (cl.1),
- 1 wattmètre électronique et son alimentation
(calibres intensités : $120 \, mA$, $300 \, mA$, $600 \, mA$, $1,2 \, A$;
calibres tensions : $30 \, V$, $60 \, V$ et $120 \, V$) 180 divisions sur l'échelle
de lecture ; circuit tension $R_v = 1000 \, \Omega \cdot V^{-1}$.

1.1.5. Expérimentations

- Étudier $P = f(R_u)$, avec E_G , R_G et f fixées.
- Représenter $P = f(R_u)$: document n° 1.
- Comparer le maximum obtenu expérimentalement avec le maximum théorique. Conclusion.

Remarque : L'impédance interne de l'alternostat qui délivre e_G est de quelques dixièmes d'ohms, donc négligeable devant celle du circuit, l'autotransformateur étant un bon générateur de tension ; néanmoins, il faut veiller à maintenir E_G constante.



Document 1 : $P = f(R_u)$.

1.2. La charge résistive R_u est imposée : adaptation d'impédance à l'aide d'un transformateur

1.2.1. Objectif

Montrer qu'un transformateur intercalé entre une alimentation donnée $\{e_G ; R_G\}$ et une charge constante R_u peut être un moyen de réaliser l'adaptation en puissance entre les deux parties du circuit, s'il possède un rapport de transformation m convenable.

1.2.2. Principe

Etudier la variation de la puissance active P consommée dans la charge R_u en fonction du rapport de transformation m .

1.2.3. Étude théorique

Schéma équivalent du circuit avec charge R_u ramenée au primaire, dans le cas d'un transformateur idéal.

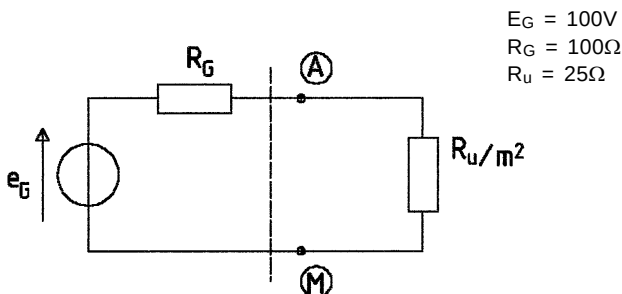


Figure 2

Suivant le résultat de l'étude théorique précédente, la charge, purement résistive, consommera la puissance active maximale P_M lorsque :

$$R_G = \frac{R_u}{m^2} \text{ soit pour } m = \sqrt{\frac{R_u}{R_G}}$$

alors :

$$P_M = \frac{E_G^2}{4R_G}$$

Application numérique : $m = 0,50$ et $P_M = 25 \text{ W}$.

1.2.4. Schéma du montage

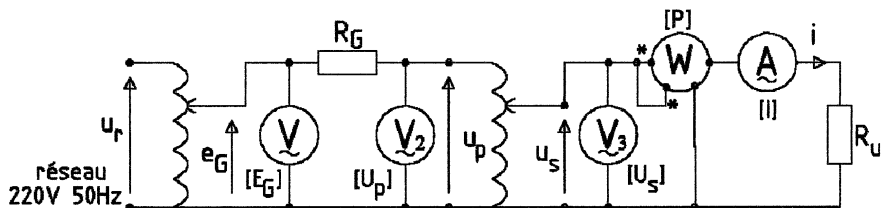


Figure 3

Matériel supplémentaire utilisé

- 1 autotransformateur monophasé délivrant $u_s(t)$;
(l'utilisation d'un autotransformateur triphasé permettrait d'obtenir une tension image de m , afin de tracer la courbe $P = f(m)$ à l'ordinateur),
- 1 voltmètre magnétoélectrique avec redresseur.

1.2.5. Expérimentations

Nous étudions $P = f(m)$ pour R_G , R_u et f fixées. m est calculé à partir des valeurs de U_s et U_p , mesurées avec $\textcircled{V_2}$ et $\textcircled{V_3}$:

$E_G = 100 \text{ V}$
 $f = 50 \text{ Hz}$

U_p (V)	93,0	82,0	69,0	57,5	47,0	32,0	26,5	22,0	19,0	15,5
U_s (V)	9,3	16,5	21,0	23,0	23,6	22,5	21,2	20,0	19,0	17,4
m	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,70	0,80	0,91	1,00	1,10

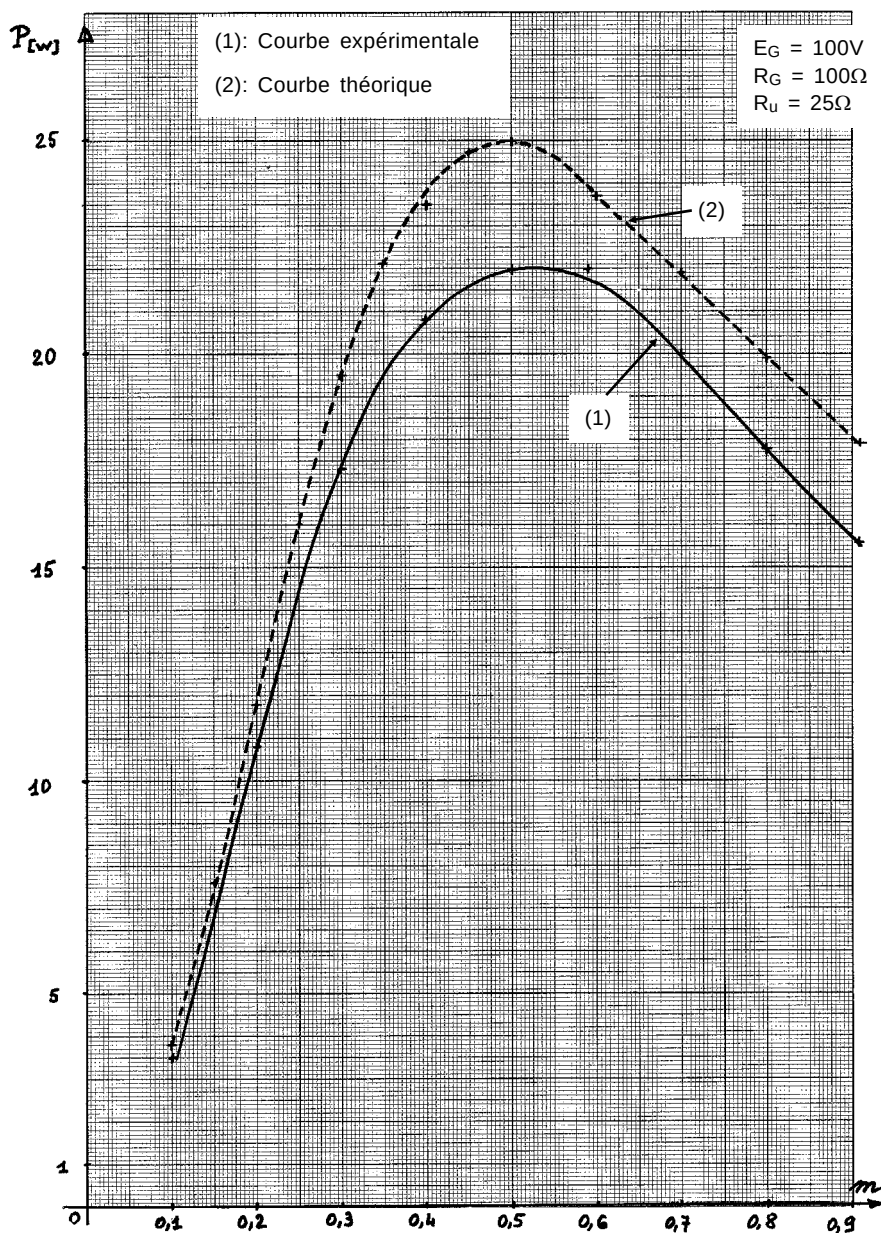
Nous représentons $P = f(m)$; existence d'un maximum (document n° 2, courbe (1)).

1.2.6. Comparaison théorie - expérience

Le modèle théorique, établi à partir de l'équation électrique :

$$P = \frac{R_u}{m^2} \times \frac{E_G^2}{\left(R_G + \frac{R_u}{m^2}\right)^2}$$

permet le tracé de la courbe théorique dans le cas d'un transformateur idéal (document n° 2, courbe (2)).

Document 2 : $P = f(m)$.

Les courbes expérimentale et théorique présentent un maximum pour $m = 0,50$ correspondant à $R_G = \frac{R_u}{m^2}$, compatible avec les résultats du paragraphe 1.1.

Les écarts entre les maximums des courbes théorique et pratique sont liés essentiellement :

- aux pertes dans le fer (par hystérésis et courants de Foucault) fonction de l'amplitude du champ magnétique et de la fréquence ; elles peuvent être déterminées par un essai à vide pour chaque valeur de u_p ,
- aux pertes dans le cuivre, mesurables par un essai en court-circuit, pour chaque valeur de I .

Le schéma équivalent représenté plus haut ne rend donc pas compte de ces différents facteurs qui interviennent dans le bilan de puissance global.

Remarque : Afin d'isoler la charge (R_u) du secteur, l'autotransformateur, de rapport $m = \sqrt{\frac{R_u}{R_G}}$, peut être remplacé par un transformateur à deux enroulements de même rapport de transformation.

2. DÉBIT DANS UN CIRCUIT {R ; L ; C} SÉRIE

2.1. Objectif

Montrer que dans un circuit {R ; L ; C} excité par un générateur de tension sinusoïdale (e_G ; R_G) l'adaptation d'impédance a lieu lorsque la condition de résonance d'intensité $L\omega = \frac{1}{C_0\omega}$ est satisfaite ET que la résistance totale de la charge R_u est égale à celle du générateur R_G .

2.2. Méthode

En se limitant au cas d'un générateur d'impédance interne purement résistive de résistance R_G constante, deux cas seront envisagés :

- variation de la puissance active en fonction de la fréquence f pour trois valeurs de R_u , soit $P = g(f)$,
- variation de la puissance active P en fonction de la charge R_u , soit $P = f(R_u)$, à la résonance d'intensité.

2.3. Étude théorique

Cas général

$$\underline{Z}_G = R_G + j X_G$$

$$\underline{Z}_u = R_u + j X_u$$

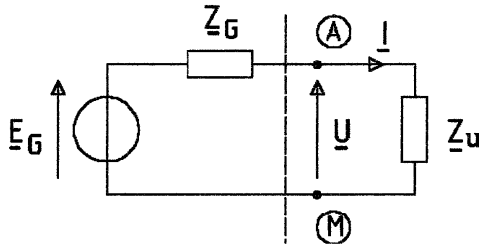


Figure 4

Expression de la puissance active P absorbée par le récepteur seul :

$$P = R_u I^2 = R_u \frac{E_G^2}{(R_G + R_u)^2 + (X_G + X_u)^2}$$

Expression de l'impédance de charge $\underline{Z}_u$, fonction de R_G , pour laquelle la puissance active P sera maximale (adaptation d'impédance) :

$$X_u = -X_G$$

et

$$R_u = R_G$$

Condition d'adaptation d'impédance : la puissance maximale dissipée dans la charge est obtenue pour :

$$\underline{Z}_u = \underline{Z}_G^*$$

et a pour expression :

$$P_M = \frac{E_G^2}{4R_G}$$

Cas particulier

$\underline{Z}_G = R_G$; l'adaptation sera obtenue pour :

$$X_u = 0 \text{ (résonance du circuit \{R-L-C\})}$$

et

$$R_u = R_G$$

2.4. Étude expérimentale

2.4.1. Schéma du montage

Schéma de principe

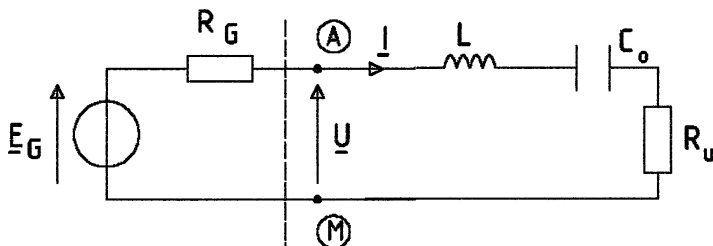


Figure 5

Une source de tension de fréquence réglable (G.B.F) alimente un circuit résonateur, de type $\{R ; L ; C\}$.

Schéma du montage réel

Le dispositif précédent est complété par :

- un étage de puissance, indispensable si on souhaite que le circuit résonateur soit traversé, comme dans les cas précédents, par des courants d'intensité I de quelques dixièmes d'ampères, ce que ne peut débiter le G.B.F seul,
- un étage à A.op, permettant de supprimer la distorsion de croisement, due aux seuils de conduction des transistors.

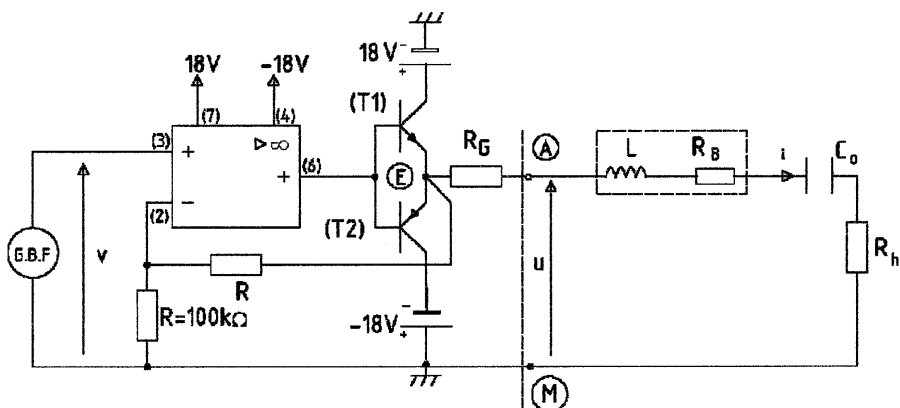


Figure 6

2.4.2. Acquisitions à l'aide d'un wattmètre

«Zoom» du circuit résonateur

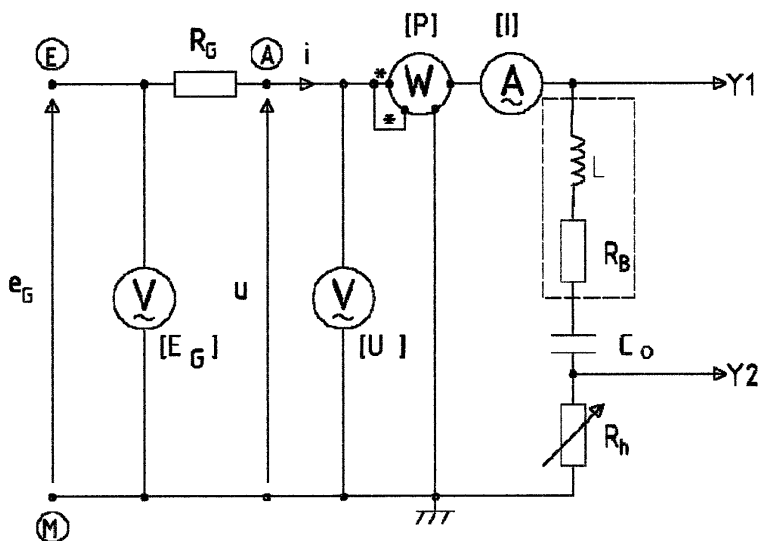


Figure 7

– R_B représente la résistance fixe de la bobine,

– R_h représente la charge résistive réglable.

On pose $R_u = R_B + R_h + R_{aW} + R_a$ (R_{aW} et R_a sont les résistances internes des appareils : circuit intensité du wattmètre et ampèremètre).

Matériel

– G.B.F,

– 2 alimentations stabilisées réglables (± 20 V, débit maximum ≥ 1 A) pour le circuit $\{R ; L ; C\}$ et l'A.op,

– 1 fréquencemètre,

– 1 A.op TL81,

– 1 boîte de condensateurs ($C_0 = 10 \mu\text{F}$; $U_{\text{max}} \geq 25$ V),

– 1 transistor T_1 NPN 2N3055,

– 1 transistor T_2 PNP BDX18,

- 1 bobine de transformateur démontable (500 sp, $R_B = 1,3 \Omega$, $L = 10,30 \text{ mH}$, $I_M = 6 \text{ A}$),
- 4 rhéostats :
 - 1 rhéostat de 33Ω réglé à $R_G = 15 \Omega$,
 - rhéostats de 33Ω , 100Ω , 1000Ω pour la charge R_h ,
- 2 voltmètres et 1 ampèremètre de type magnétoélectrique avec redresseurs (cl. 1 ; B.P. 10 kHz),
- 1 oscilloscope,
- 1 wattmètre disposant de faibles calibres en tension 30 V, en intensité 60 mA ; 120 mA ; 240 mA (précision maximale 2,5 % pleine échelle ; B.P. : 1 kHz).

Expérimentations

Les valeurs de E_G et de R_G sont définitivement fixées :

$$R_G = 15 \Omega \quad E_G = 12 \text{ V}$$

Les courbes expérimentales figurant sur les documents (3a) et (4a) représentent respectivement :

- $P = f(R_u)$ à la résonance, avec réajustement de la fréquence f_0 à chaque point de mesure,
- $P = g(f)$ pour $R_u = 5 \Omega$; 15Ω ; 60Ω

Exploitations des résultats

- $P = f(R_u)$
 - Confirmation d'un maximum P_M à la résonance pour une valeur de R_u ($14,5 \Omega$) correspondant à celle de R_G à 3,3 % près,
 - Constat d'un écart relativement important entre théorie et expérience, aux faibles valeurs de R_u devant R_G .

- $P = g(f)$

– Études des coordonnées du maximum

$R_u [\Omega]$		5,0	15	60
$P_M [W]$	valeur théorique	1,80	2,40	1,54
	valeur expérimentale	1,80	2,35	1,52
$f_0 [Hz]$	valeur théorique	496	496	496
	valeur expérimentale	491	491	477

Les écarts relatifs $\left(\left| \frac{\text{valeur théorique} - \text{valeur expérimentale}}{\text{valeur théorique}} \right| \right)$ sont compris : pour P_M entre 0 % et 2,1 %, pour f_0 entre 1,0 % et 3,8 %.

Ces écarts s'expliquent essentiellement par la précision des mesures.

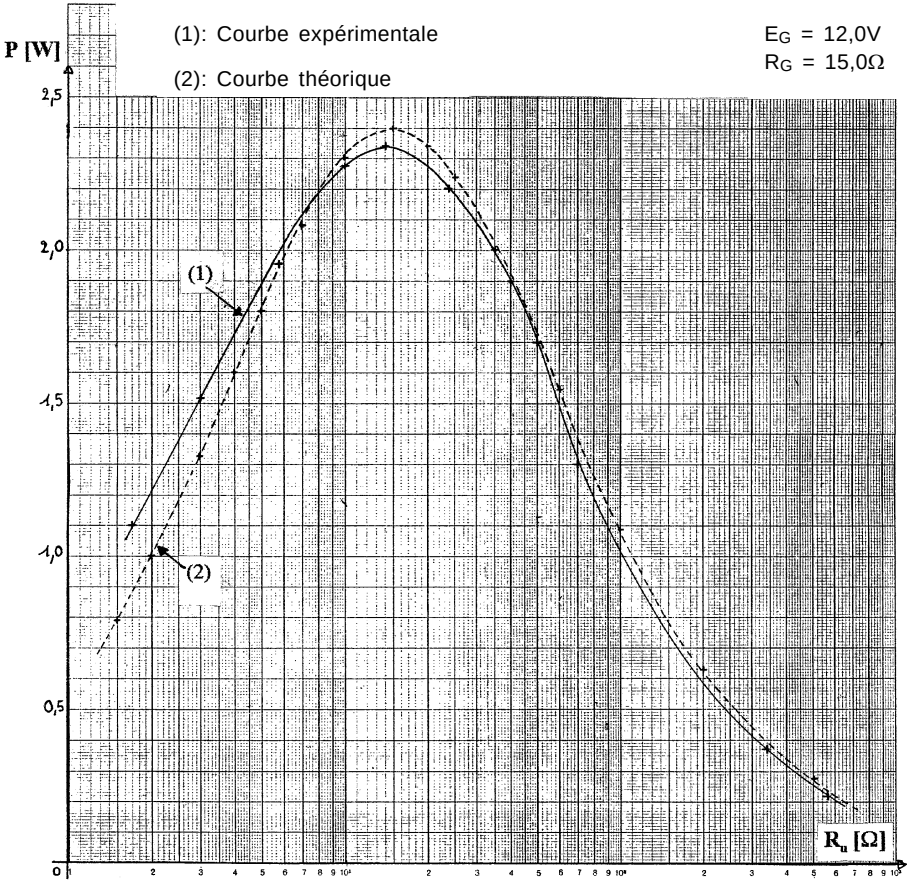
La diminution de la fréquence de résonance f_0 lorsque la charge croît de $R_u = 15 \Omega$ à $R_u = 60 \Omega$ est due à l'augmentation de l'inductance du rhéostat de charge.

– Étude de la bande passante

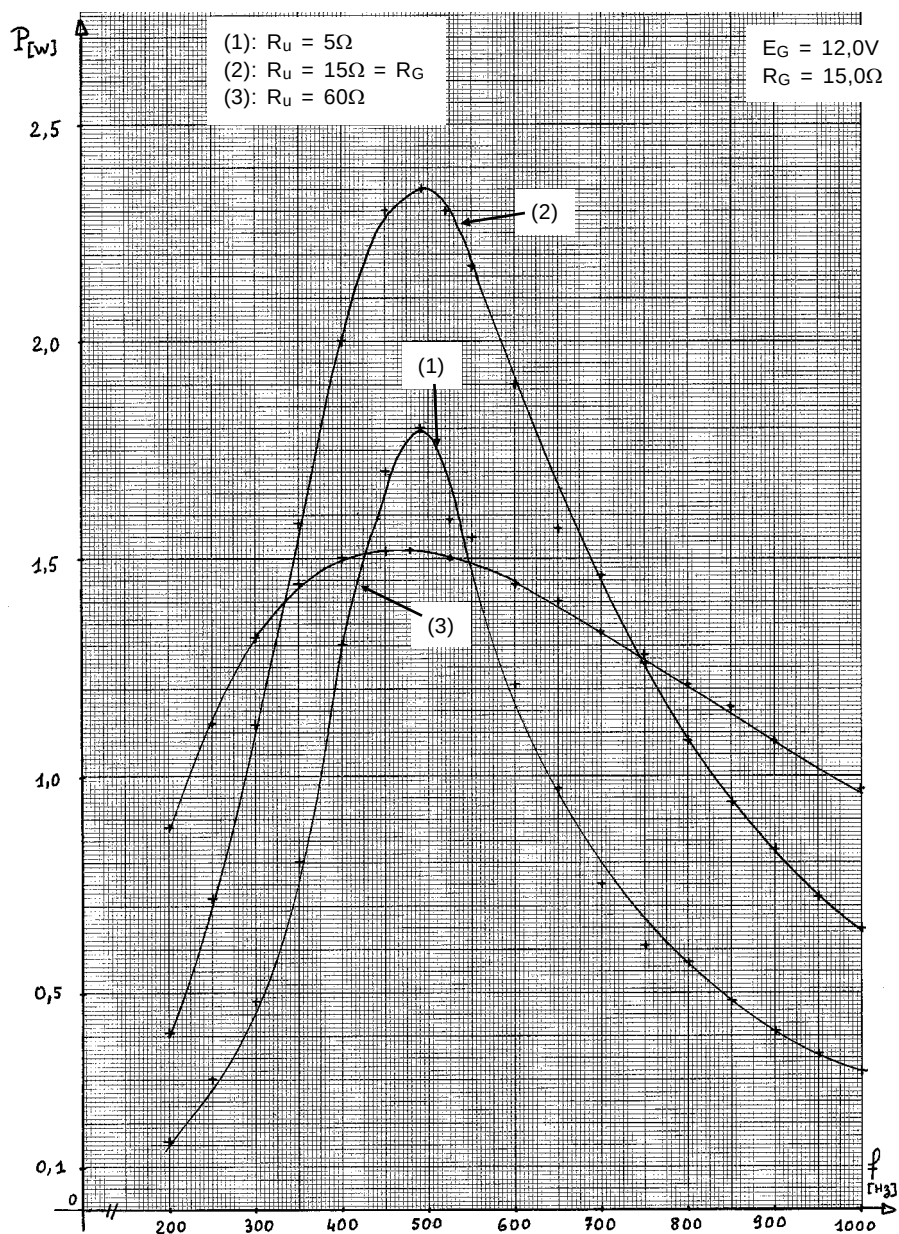
La bande passante à -3 dB est la zone de fréquence pour laquelle P reste supérieure à $0,5 P_M$. L'étude théorique montre que $B.P. = f_0/Q_0$ avec $Q_0 = L\omega_0/(R_G + R_u)$.

$R_u [\Omega]$	15,0	5,0
Q_0	1,07	1,60
B.P. théorique [Hz]	464	310
B.P. expérimentale [Hz]	465	300

Les valeurs théoriques sont vérifiées à 3,2 % près par les valeurs expérimentales.



Document 3a : $P = f(R_u)$ à la résonance d'intensité.

Document 4a : $P = g(f)$ pour différentes charges R_u .

2.4.3. Acquisitions par l'ordinateur

Schéma du montage

Le dispositif de la figure 6 est complété de la manière suivante :

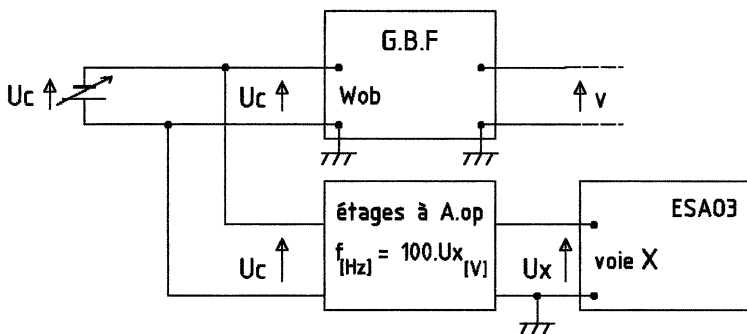


Figure 8

• Convertisseur tension-fréquence

La fréquence f de la tension $v(t)$ est liée à la tension continue réglable U_C (entre 0 et -4 V), appliquée à l'entrée de wobulation du G.B.F par une relation affine (donnée constructeur : $f = 200-200 U_C$).

Un circuit, à base d'étages à A.op, élabore, à partir de U_C , une tension continue U_x , image simple de la fréquence :

$$U_x = 10^{-2} \times f_{[Hz]} \quad (\text{cf. Annexe 1})$$

• Convertisseur puissance-tension

L'image U_y de la puissance active P consommée par le circuit $\{R ; L ; C\}$, ($U_y = k \times P$ avec $k = 1 \text{ V/W}$), est obtenue en sortie d'un convertisseur puissance-tension basé sur l'utilisation d'un circuit analogique multiplicateur (cf. Annexe 2).

Matériel

- informatique : ordinateur, interface ESA03 (L.S.B. : 10 mV cal. 2,5 V), logiciel ACTILAB,
- électronique : (cf. Annexes 1 et 2),
- électrique : G.B.F avec entrée de wobulation, résistor étalon ($R_0 = 1 \Omega ; 1,5 \text{ A}$).

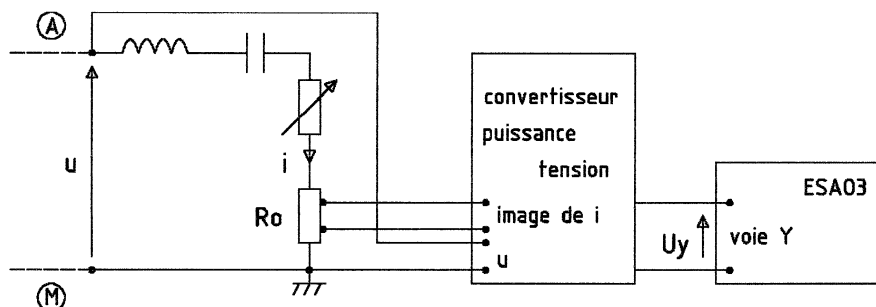


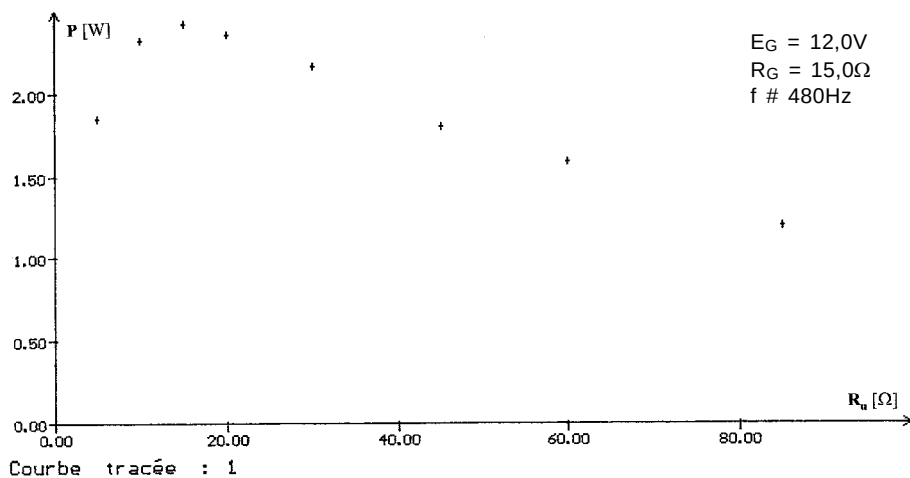
Figure 9

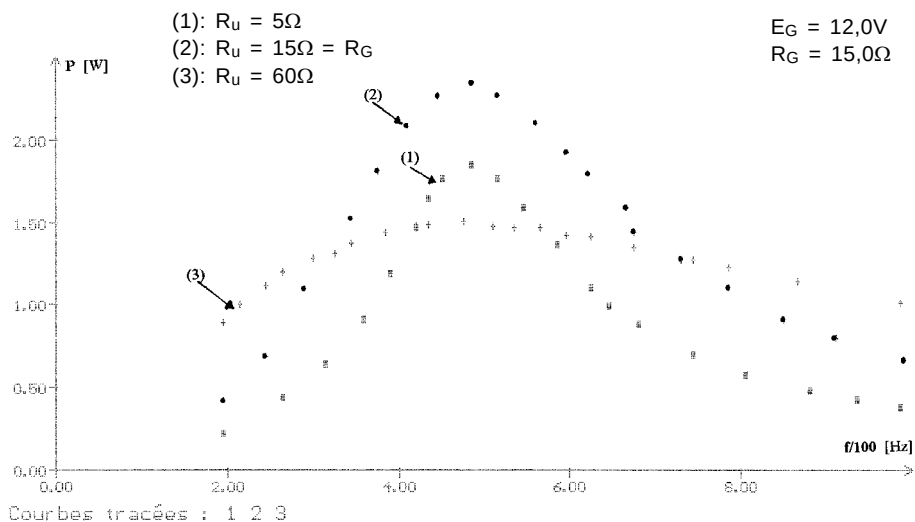
Expérimentations

Les points expérimentaux précisés sur les documents (3b) et (4b) correspondent respectivement aux acquisitions :

$P = f(R_u)$ à la résonance (les valeurs de $R_u = R_h + R_o + R_B$ ont été entrées au clavier et contrôlées par le quotient U/I)

$P = g(f)$ pour $R_u = 5 \Omega$; 15Ω et 60Ω .

Document 3b : $P = f(R_u)$ à la résonance d'intensité.



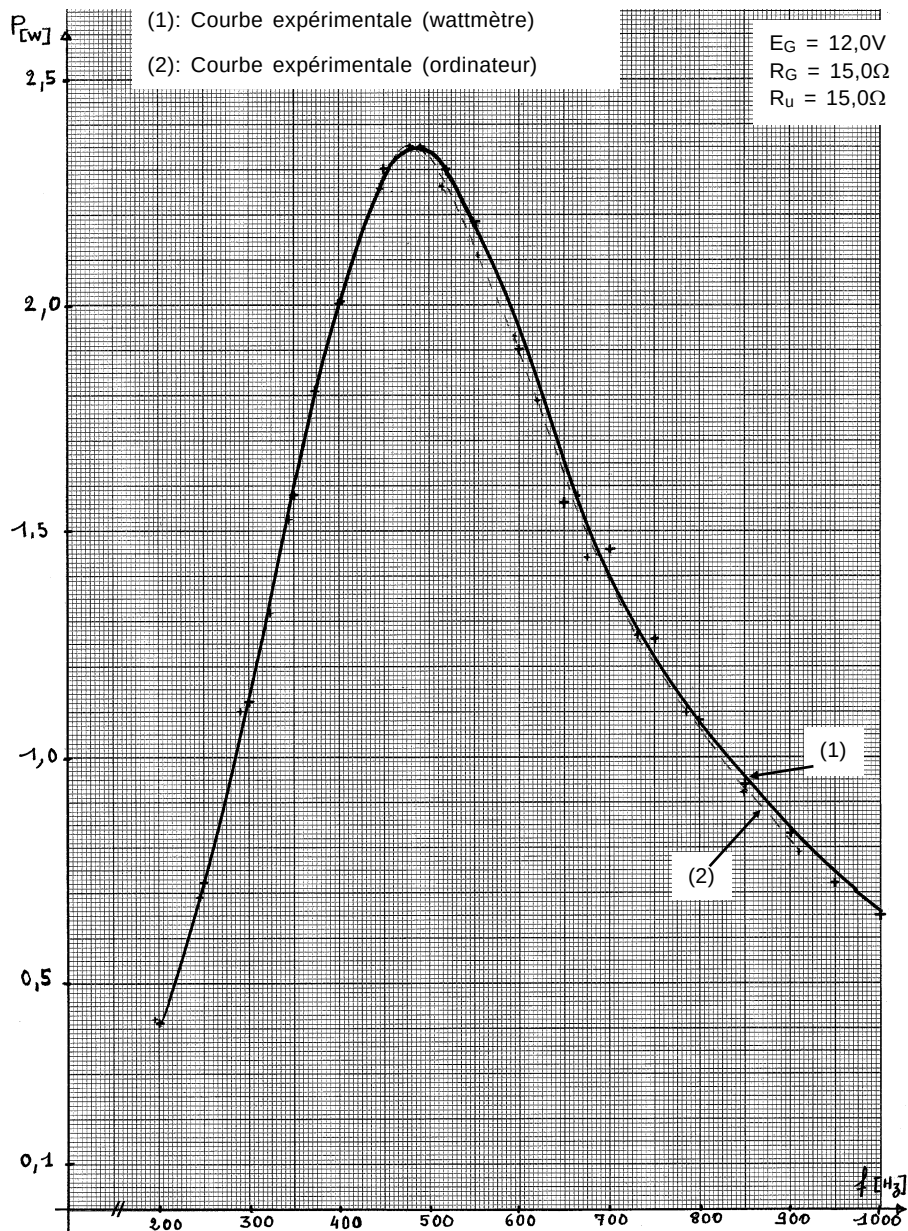
Document 4b : $P = g(f)$ pour différentes charges R_u .

Exploitations des résultats

- Comparaison des acquisitions
 (wattmètre ; ordinateur et convertisseurs)

Le document (4c), rassemblant les résultats expérimentaux $P = g(f)$ pour $R_u = R_G = 15\Omega$, montre qu'il y a identité «presque parfaite» entre les résultats fournis par ces deux dispositifs de mesures ; il en est de même avec les deux autres courbes $P = g(f)$ ainsi que celle relative à $P = f(R_u)$, non représentées sur un même document.

A partir de ce constat, l'étude a été uniquement poursuivie à partir des acquisitions de l'ordinateur en vue d'une exploitation plus performante.

Document 4c : $P = g(f)$ pour $R_u = R_G = 15 \Omega$.

• Élaboration du modèle ajusté

Le logiciel d'acquisitions et de traitements de données ACTILAB permet de déterminer l'équation mathématique du **modèle ajusté**. Pour qu'il en soit ainsi, une relation mathématique issue de l'étude électrique du circuit doit lui être fournie.

Premier exemple : $P = f(R_u)$ à la résonance

P Équation électrique : $P = \frac{R_u \times E_G^2}{(R_u + R_G)^2}$ (§ 2.3) avec $X_G = -X_u$ à la résonance.

P Équation fournie à l'ordinateur :

$$Y = \frac{X \times A^2}{(X + B)^2} \quad \text{avec : } Y = P \quad \text{et} \quad X = R_u \quad (1)$$

A et B sont deux paramètres reconnus par le logiciel ; celui-ci pourra chercher leur valeur numérique de sorte que la courbe modélisée soit la plus proche des points expérimentaux acquis.

La relation électrique montre que : $A = E_G$ et $B = R_G$.

P Résultats

Le document (3c) comprend les points expérimentaux du document (3b) complété par le modèle théorique élaboré à partir de la relation (1).

Courbe n° 1

Formule : Valeurs mesurées (Canal C)

Minimum : 1.20 Maximum : 2.43 Moyenne : 0.00

Courbe n° 2

Formule : Modèle ajusté : $A * A * X / ((X + B) * (X + B))$

Minimum : 1.23 Maximum : 2.43 Moyenne : 0.00

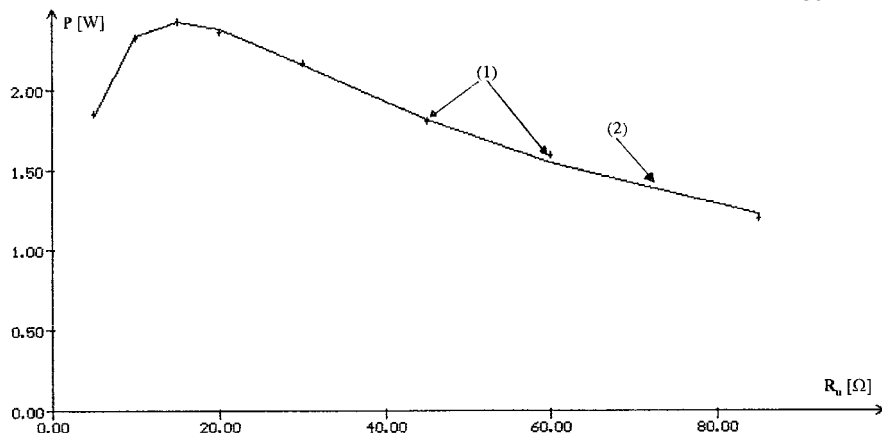
Valeurs des paramètres :

$a = 12.01 \pm 0.07$ $b = 14.9 \pm 0.2$

Méthode : Moindres carrés, S^2 ou $\chi^2 = 3.186E-03$ Nombre de points : 8

(1): Points expérimentaux

(2): Modèle ajusté

 $E_G = 12,0V$ $R_G = 15,0\Omega$ $f \# 480Hz$ 

Courbes tracées : 1 2

Document 3c : Adaptation d'impédance $P = f(R_u)$ à la résonance d'intensité.**P** Tableau comparatif

	A = E_G [V]	B = R_G [Ω]
Valeur théorique	12,0	15,0
Valeur du modèle	12,0	14,9

P Comparaison

Les valeurs de A et de B obtenues valident le modèle proposé en relation (1).

Remarque : L'aspect anguleux de la courbe (2) provient du nombre limité et insuffisant de points expérimentaux.

Deuxième exemple : $P = g(f)$ à $R_u = R_G = 15 \Omega$

- Élaboration du modèle ajusté

P Relation électrique :

$$P = R_u \times \frac{E_G^2}{(R_G + R_u)^2 + (X_G + X_u)^2} = \frac{P_M}{1 + \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)^2 \times Q_0^2}$$

avec :

$$P_M = R_u \times \frac{E_G^2}{(R_u + R_G)^2}$$

et :

$$Q_o = \frac{L \omega_o}{R_u + R_G} = \frac{1}{(R_u + R_G) C_o \omega_o}$$

P Relation fournie à l'ordinateur :

$$Y = \frac{A}{1 + \left(\frac{X}{B} - \frac{B}{X} \right)^2 \times C^2} \quad \text{avec } Y = P ; X = f/100 \quad (2)$$

et les trois paramètres : $A = P_M$

$$B = f_o / 100$$

$$C = Q_o \quad (\text{ne pas confondre avec la capacité } C_o !)$$

P Résultats :

Le document (4d) comprend les points expérimentaux du document (4b) complété par le modèle théorique élaboré à partir de la relation (2).

Courbe n° 1

Formule : Valeurs mesurées

Minimum : 0.41 Maximum : 2.31 Moyenne : 0.00

Courbe n° 2

Formule : Modèle ajusté : $A/(1 + ((X/B - B/X) * (X/B - B/X) * C * C))$

Minimum : 0.41 Maximum : 2.31 Moyenne : 0.00

Valeurs des paramètres :

$$a = 2.315 \pm 0.008 \quad b = 4.811 \pm 0.007 \quad c = 1.045 \pm 0.007$$

Méthode : Moindres carrés, S^2 ou $\chi^2 = 1.552E-02$ Nombre de points : 58

P Tableau comparatif :

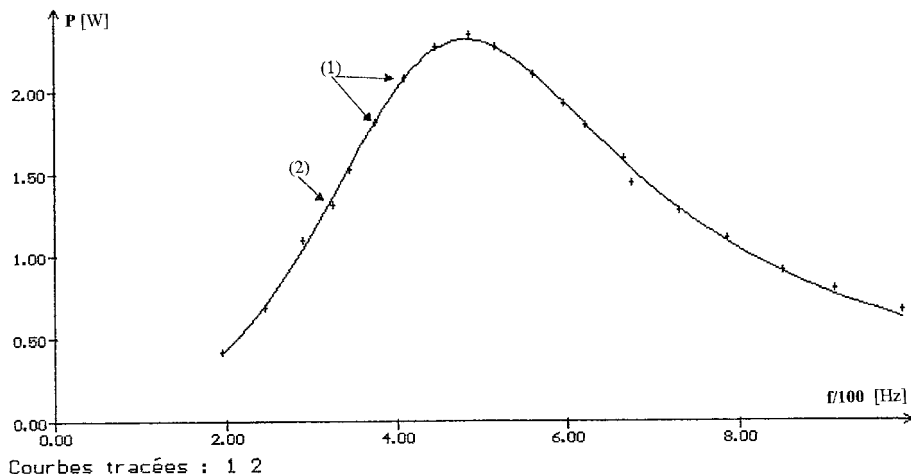
	$A = P_M$ [W]	$B = f_o/100$ [Hz]	$C = Q_o$
Valeur théorique	2,40	4,96	1,07
Valeur du modèle	2,32	4,81	1,05

Les valeurs de A, B et C obtenues valident là aussi le modèle proposé.

(1): Points expérimentaux

 $E_G = 12,0V$

(2): Modèle ajusté

 $R_G = 15,0\Omega$ $R_u = 15,0\Omega$ **Document 4d** : $P = g(f)$ pour $R_u = R_G = 15 \Omega$.

Synthèse

Le document 4e, explicité ci-après, permet la comparaison entre la disposition des points expérimentaux, le modèle élaboré par l'ordinateur et la courbe théorique.

Courbe n° 1

Formule : Valeurs mesurées

Minimum : 0.41 Maximum : 2.31 Moyenne : 0.00

Courbe n° 2

Formule : Modèle ajusté : $A/(1+((X/B-B/X)*(X/B-B/X)*C*C))$

Minimum : 0.41 Maximum : 2.31 Moyenne : 0.00

Valeurs des paramètres :

$a = 2.315 \pm 0.008$ $b = 4.811 \pm 0.007$ $c = 1.045 \pm 0.007$

Méthode : Moindres carrés, S^2 ou $\chi^2 = 1.552E-02$ Nombre de points : 58

Courbe n° 3

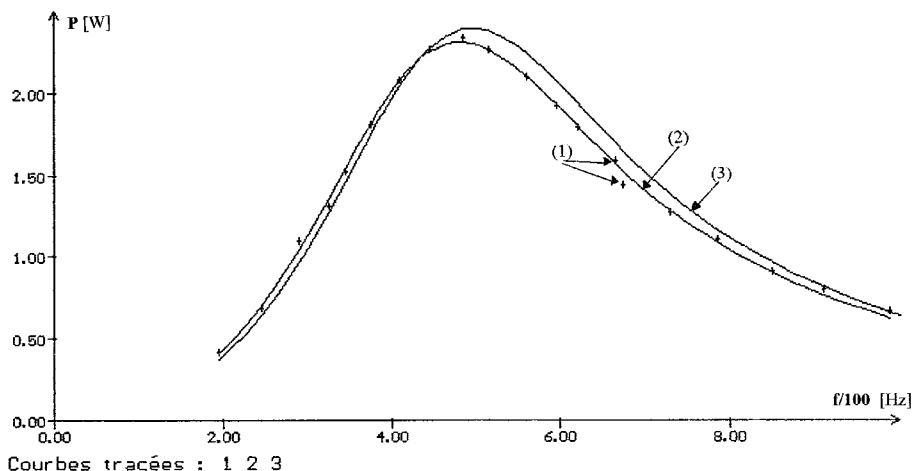
Formule : $2,40/(1+((X/4,96-4,96/X)*(X/4,96-4,96/X))*1,17)$

Minimum : 0.37 Maximum : 2.40 Moyenne : 0.00

(1): Points expérimentaux

(2): Modèle ajusté

(3): Courbe théorique

 $E_G = 12,0V$ $R_G = 15,0\Omega$ $R_u = 15,0\Omega$ Document 4e : $P = g(f)$ pour $R_u = R_G = 15 \Omega$.

CONCLUSION

La puissance active, fournie par un générateur de tension sinusoïdale (impédance interne $\underline{Z}_G$; f.é.m. E_G fixée), à une charge (impédance $\underline{Z}_u$) est maximale lorsque $\underline{Z}_u = \underline{Z}_G^*$. Dans la pratique, l'impédance $\underline{Z}_G$ est souvent de nature inductive, l'adaptation d'impédance nécessite une charge de nature capacitive.

L'étude entreprise présente un caractère essentiellement expérimental, avec comparaison notamment des outils et des méthodes de mesure employés lors de l'étude du circuit $\{R ; L ; C\}$ série ; pour chaque type de charge, un écart entre études théorique et expérimentale a été envisagé à l'aide de méthodes informatisées. Les courbes expérimentales obtenues confirment les approches théoriques.

L'objectif initial était de mieux cerner les phénomènes complexes, essentiellement d'ordre vibratoires, qui interfèrent dans le haut-parleur ; mais, une expérimentation systémique s'est rapidement révélée hors de portée compte tenu des moyens (et des compétences...) à mettre en jeu.

C'est donc la seule dimension données expérimentales / modèle qui a été prise en compte ici, court-circuitant ainsi celle phénomène / données expérimentales.

Les équations différentielles reliant les grandeurs mécaniques, électriques et acoustiques présentent une analogie formelle, de type structurelle, suggérant certaines possibilités de transposition. Nous avons réalisé une approche expérimentale de la notion d'adaptation d'impédance électrique en régime sinusoïdale forcé. Un haut-parleur électrodynamique présente une impédance acoustique et mécanique équivalente à un réseau $\{R ; L ; C\}$ série et une impédance électrique à un réseau $\{R ; L ; C\}$ parallèle en série avec une résistance ; la détermination des «paramètres équivalents» est également possible d'un point de vue expérimental.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. MONFORT et J. RICART : Électricité (Manipulations, fascicule II). Paris, Éditions Foucher, 1971.
- [2] J. MORNAND : Technologie d'électronique. Paris, Éditions Dunod, 1965.
- [3] P. THUREAU et D. LECLER : Vibrations (régimes linéaires). Paris, Éditions Dunod, 1971.
- [4] Y. ROCARD : Dynamique générale des vibrations. Paris, Éditions Masson, 1971.
- [5] R. GABILLARD : Vibrations et phénomènes de propagation. Paris, Éditions Dunod, 1969.

Annexe 1

ÉLABORATION DE U_X IMAGE DE f

Le générateur wobulé utilisé est tel que : $f = 200 - 200 \times U_C$ (avec [Hz]

$U_C < 0$ donnée du constructeur). Afin d'obtenir la relation simple :

$f = 100 \times U_X$ il est nécessaire d'élaborer une tension U_X telle que :

$$U_X = 2,0 - 2,0 \times U_C$$

Le schéma du dispositif est le suivant :

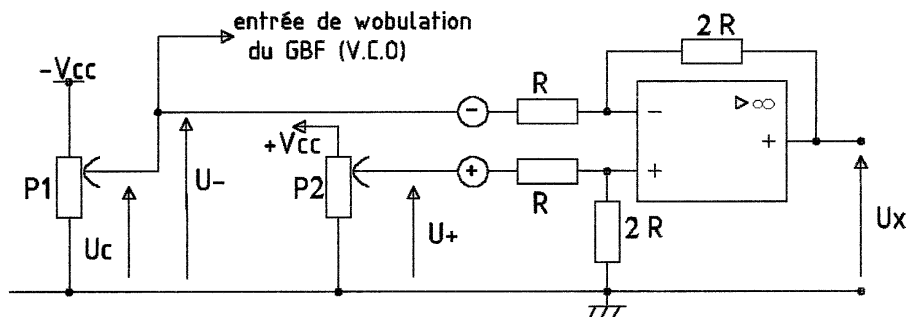


Figure 10

L'étage de différence à A.op. délivre : $U_X = 2 \times (U_+ - U_-)$ avec $U_+ = 1,0 \text{ V}$ et $U_- = U_C$.

Matériel

- A.op. TL 81,
- $R = 100 \text{ k}\Omega$; P_1 et P_2 : potentiomètres multitours $1 \text{ k}\Omega$; 3W ,
- voltmètre numérique (couplage DC ; cal. 10 V) ;
- fréquencemètre.

Annexe 2

CONVERTISSEUR PUISSANCE-TENSION

Il délivre la tension continue U_y image de la puissance active P dissipée dans le dipôle A M : $U_y = k \times P$ avec $k = 1 \text{ V/W}$.

Le schéma du dispositif est le suivant :

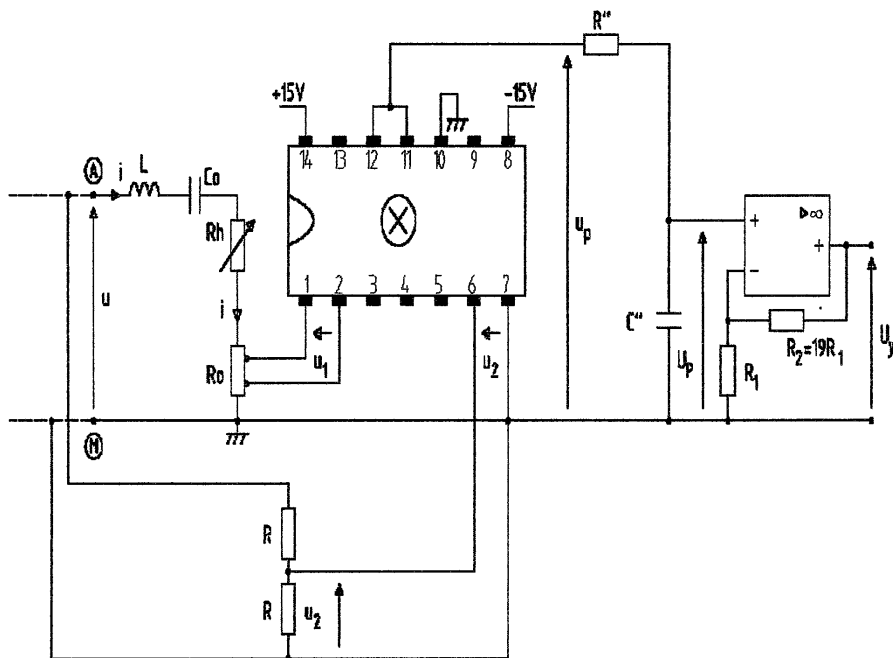


Figure 11

Le circuit multiplicateur analogique soumis aux tension $u_1 = R_0 \times i$ et $u_2 = 0,5 \times u$, délivre la tension $u_p = a \times u_1 \times u_2$ (donnée constructeur : $a = 0,10 \text{ V}^{-1}$) ; soit : $u_p = a \times R_0 \times i \times 0,5 \times u = 0,5 \times a \times R_0 \times u \times i$; u_p est l'image de la puissance instantanée $p(t) = u(t) \times i(t)$.

Le circuit ($R'' - C''$) permet le filtrage de $u_{p(t)}$ pour en sélectionner la valeur moyenne $U_p = \langle u_{p(t)} \rangle$ à condition que $\tau = R''C'' \gg \frac{1}{f}$ (ex : $R'' = 100 \text{ k}\Omega$ et $C'' = 1 \text{ }\mu\text{F}$; $\tau = 100 \text{ ms}$; $\frac{1}{f_{\text{mini}}} = 5 \text{ ms}$) U_p est donc l'image de la puissance active P dissipée par le dipôle AM.

L'étage non inverseur amplifie U_p de 20.

En résumé

$$U_y = 20 \times U_p ; U_y = 20 \times 0,5 \times a \times R_o \langle u_{(t)} \times i_{(t)} \rangle ; U_y = 10 \times a \times R_o \times P$$

$$\text{avec } \begin{cases} a = 0,10 \text{ V}^{-1} \\ \text{et} \\ R_o = 1 \text{ }\Omega \end{cases}$$

$$\text{soit : } U_v = k \times P \quad \text{avec } k = 1 \text{ V/W}$$

Matériel

- multiplicateur analogique (ex. AD 534 J),
- A.op. TL81,
- trois résistances de $100 \text{ k}\Omega$; $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 190 \text{ k}\Omega$,
- $C'' = 1 \text{ }\mu\text{F}$, 25 V.