

NON LINEARITES DES TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES

13 décembre 2002
Conservatoire National des Arts et Métiers - Amphithéâtre T

Intervention de Philippe LESAGE, Directeur Technique et fondateur de la société PHL AUDIO SA,
Expert français auprès de la CEI, Commission Electrotechnique Internationale.

MESURE NORMALISEE DES VALEURS LIMITES D'UTILISATION DES HAUT-PARLEURS ELEMENTAIRES

Introduction :

Avec le microphone, le haut-parleur élémentaire est l'un des dernier maillon analogique de la chaîne de reproduction sonore qui tend vers le tout numérique. A ce titre le haut-parleur présente des défauts de non linéarité et des limites de tenue en puissance qu'il est utile de bien cerner.

Pour ce faire, les deux principales méthodes de mesure normalisées de tenue en puissance sont explicitées en vue de leur mise en œuvre pratique.

Enfin, l'incidence majeure du paramètre thermique dans les non linéarités des haut-parleurs électrodynamiques et ses conséquences en terme de compression dynamique et de désadaptation à la charge acoustique sont analysés.



Sommaire :

1- Mesure normalisée de la puissance limite d'utilisation des haut-parleurs élémentaires.

1.1- Suivant la norme internationale CEI 268-5 :

- a) CEI 268-1 : Signal de simulation de programme et conditions climatiques.
- b) CEI 268-5 § 18.4 : Puissance nominale de bruit.

1.2- Suivant la recommandation de l'Audio Engineering Society AES2-1984 (r1997) :

- a) AES2-1984 : Equipement et conditions de test.
- b) AES2-1984 : Procédure de test.

2- Incidence du paramètre thermique dans les transducteurs électrodynamiques :

- a) Schéma équivalent.
- b) Incidence sur les paramètres électroacoustiques et sur la désadaptation de la charge acoustique associée.



1- MESURE NORMALISEE DE LA PUISSANCE LIMITE D'UTILISATION DES HAUT-PARLEURS ELEMENTAIRES

1.1- Mesure normalisée suivant la norme internationale CEI 268-5 :

a) CEI 268-1 : Signal de simulation de programme et conditions climatiques :

La CEI définit des conditions climatiques normales ainsi qu'un signal de test particulier appelé "Signal de simulation de programme". Ces deux points sont spécifiés dans la norme CEI 268-1, et se résument comme suit :

CEI 268-1 § 8 : Conditions climatiques :

Les mesures et les vérifications mécaniques doivent être effectuées dans les limites suivantes :

- Température ambiante: 15 °C à 35 °C, de préférence 20 °C
- Humidité relative : 25% à 75%
- Pression atmosphérique : 860 hPa à 1060 hPa (860 mbar à 1 060 mbar)

Si le constructeur estime devoir spécifier des conditions climatiques différentes de celles-ci, elles doivent être choisies parmi celles spécifiées dans la Publication 68 de la CEI.

CEI 268-1 § 7 : Signal pour simulation de programme :

La CEI définit le signal de test de puissance comme devant posséder une densité spectrale énergétique moyenne semblable à la moyenne des densités spectrales d'un large panel de programmes comportant à la fois musique et paroles de toutes sortes.

Ce signal est un bruit permanent gaussien pondéré, sans limitation d'amplitude, dont le spectre, mesuré en bande de tiers d'octave selon la Publication 225 de la CEI, correspond aux valeurs données par le tableau II et la figure 1, page 22.

Un tel signal peut être obtenu à partir d'une source de bruit rose suivie du filtre de pondération de la figure 2, page 22 :



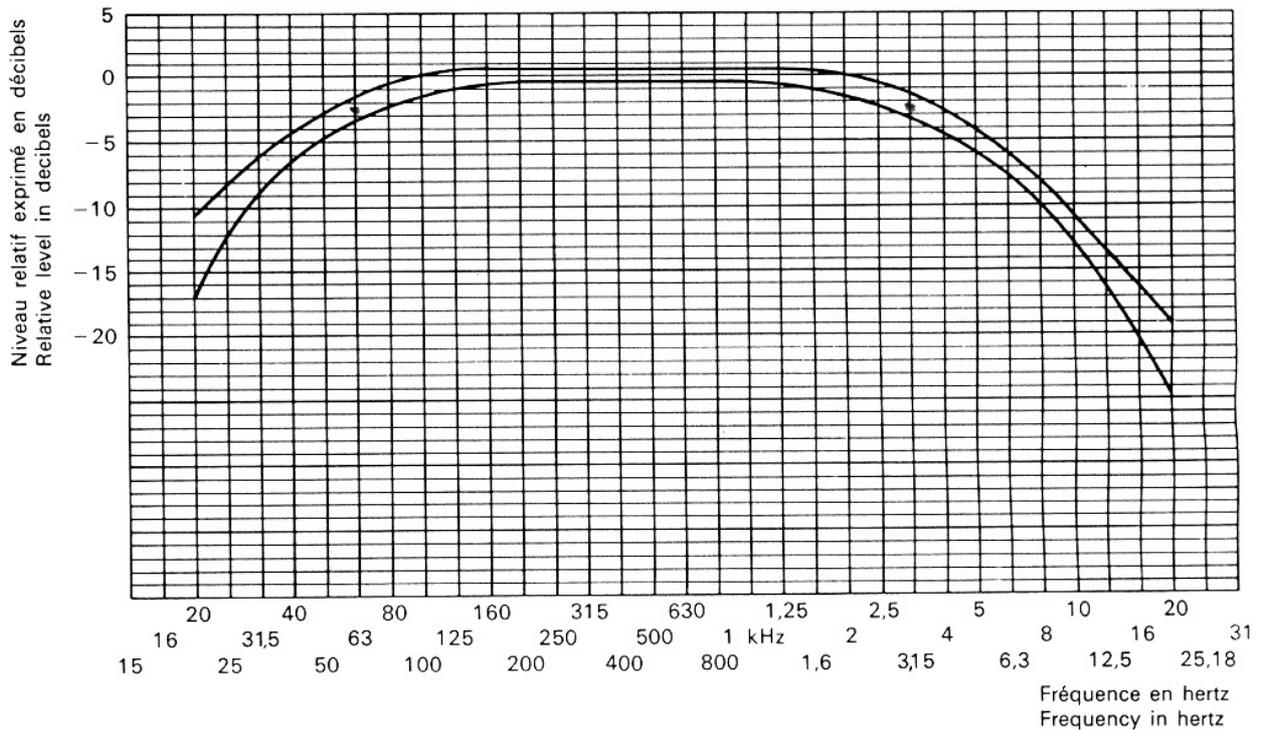
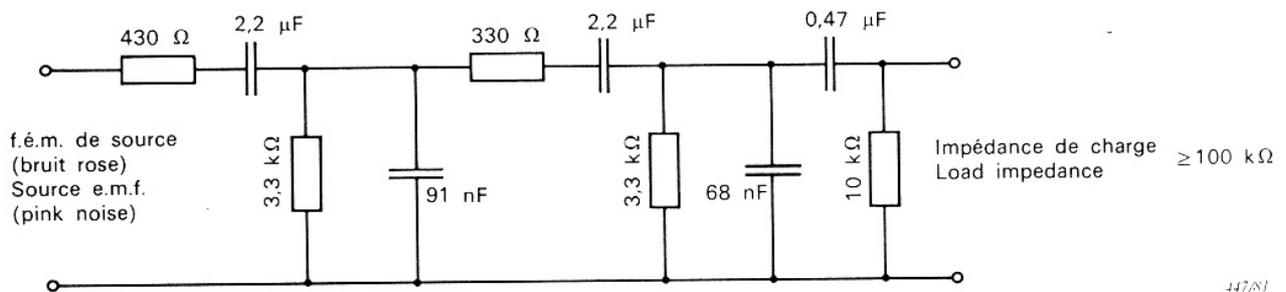


FIG. 1. — Spectre de puissance d'un signal pour simulation de programme.
Power spectrum of simulated programme signal.

446/81



447/81

La valeur de l'impédance de sortie de la source doit être comprise dans la valeur de la première résistance (430 Ω). L'effet de l'impédance de charge peut être pris en compte en réglant la valeur de la résistance de 10 kΩ.

Il convient que la tangente de l'angle de perte des condensateurs ne soit pas supérieure à 0,005.

The output impedance of the source shall be included in the value of the first resistor (430 Ω). The effect of the load impedance may be taken into account by adjusting the value of the 10 kΩ resistor.

The tangent of loss angle of the capacitors shall not exceed 0.005.

FIG. 2. — Filtre destiné au signal pour simulation de programme (source de bruit rose).
Filter for simulated programme signal (for pink-noise source).



b) CEI 268-4 § 18.4 : Puissance nominale de bruit :

La CEI définit la puissance nominale de bruit comme étant la puissance électrique calculée à partir de la tension nominale de bruit U_n et de l'impédance nominale R suivant la relation :

$$P = U_n^2/R$$

Avec R : Impédance nominale du haut parleur, soit 4, 8 ou 16 Ω

La définition de la tension nominale de bruit se trouve dans le paragraphe 17.4, comme suit :

"Tension indiquée par le constructeur, que le haut-parleur peut supporter en permanence sans dommage mécanique ou thermique lorsque l'on applique le signal de bruit simulant un programme en le limitant au domaine nominal de fréquences."

Le paragraphe 17.4.2 détaille la méthode de mesure visible à la Figure 4 reproduite ci-dessous :

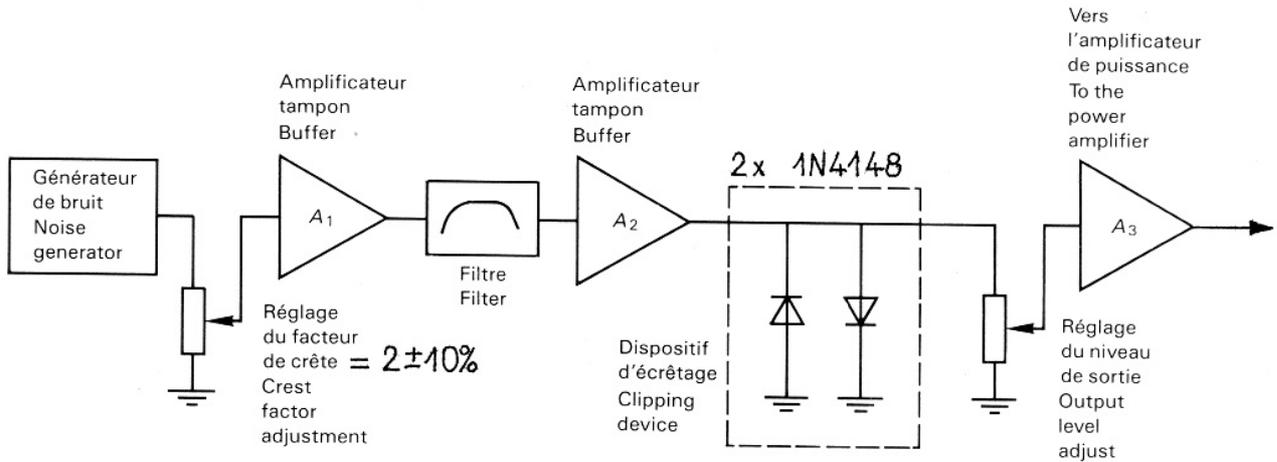
a) La chaîne de mesure comprend les éléments suivants :

- Un générateur de bruit rose.
- Un réseau de pondération conforme à celui de la CEI 268-1 permettant d'obtenir le signal de simulation de programme.
- Une chaîne d'amplification équipée d'un réseau d'écrêtage.
- le haut-parleur en essai. (les haut-parleurs élémentaires doivent être essayés non montés, sauf si une enceinte est spécifiée par le constructeur)

Nota : L'ordre dans lequel sont placés les éléments de la chaîne de la Figure 4. doit être respecté.

Il convient aussi de s'assurer que :

1. Si l'on essaie simultanément plusieurs haut-parleurs, leur interaction est négligeable.
2. Qu'un haut-parleur conçu pour fonctionner dans un domaine de fréquences limité est bien muni de son réseau de filtrage approprié. Ce réseau, utilisé pendant l'essai, doit être spécifié par le constructeur à la publication des résultats.

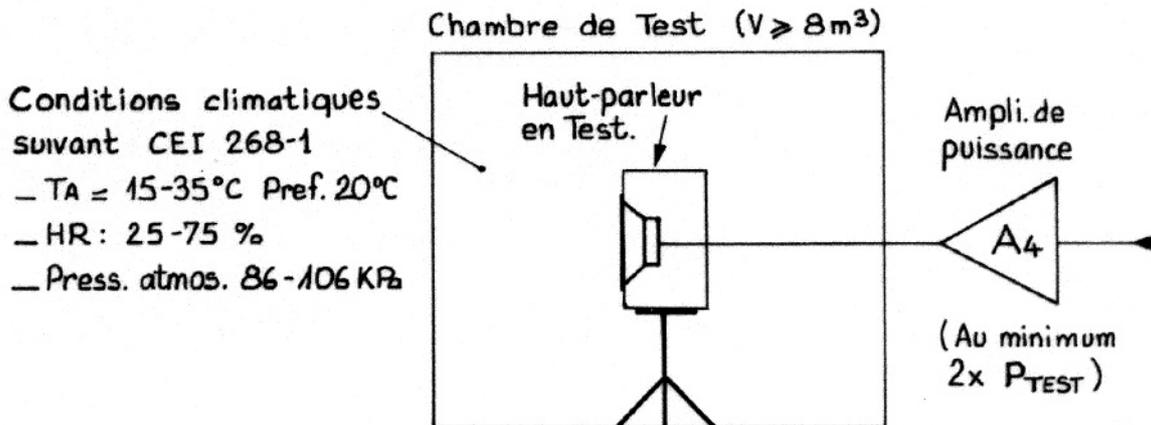


026/89

FIG. 4. — Réseau de filtrage et d'écrêtage (voir 17.4.2).
Restricting and clipping network (see 17.4.2).

Synoptique de la chaîne de traitement du signal de simulation de programme.

b) Le haut-parleur est placé dans une pièce d'au moins 8 m³, et les conditions climatiques spécifiées dans la CEI 268-1 sont maintenues durant toute la durée du test.



Vue schématique de la chambre de test de puissance qui gagnera à être convenablement isolée acoustiquement.

c) L'amplificateur de puissance doit satisfaire aux conditions suivantes :

- Réponse en fréquence (mesurée aux bornes du haut-parleur) constante à $\pm 0,5$ dB dans le domaine de fréquence 20 Hz à 20 000 Hz.
- La densité spectrale d'énergie spécifiée à l'article "Signal pour simulation de programme" de la CEI 268-1 doit être obtenue et le rapport entre la valeur de crête et la valeur efficace du signal doit être compris entre 1,8 et 2,2.
- Son impédance de sortie ne doit pas être supérieure au 1/3 de l'impédance nominale du haut-parleur.
- Sa capacité de tension de sortie doit être supérieure au double de la tension nominale de bruit U_n du test.
- La distorsion par harmonique totale mesurée en régime sinusoïdal, aux bornes du haut-parleur, ne doit pas dépasser 10%.

d) L'essai consiste à appliquer durant 100 h la tension nominale de bruit U_n spécifiée au haut-parleur en test.

e) Immédiatement après le test, une période de repos de 24 h doit être respectée dans des conditions climatiques normales avant d'effectuer les tests de qualification.

f) Le haut-parleur est considéré conforme aux spécifications si, à la fin de la période de repos, on ne constate pas de variation significative de ses caractéristiques électriques, mécaniques et acoustiques par rapport à la spécification du type, à l'exception de la variation de la fréquence de résonance dans une proportion acceptable.



1.2- Mesure normalisée de la puissance limite d'utilisation des haut-parleurs élémentaires suivant la recommandation AES2-1984 (r1997) de l'Audio Engineering Society :

a) AES2-1984 : Equipement et conditions de test :

L'AES définit les conditions de test de la manière suivante :

AES2-1984 § 4.5.1 Test Conditions and Equipment :

- Le haut-parleur élémentaire doit être placé en champ libre. (donc sans enceinte - voir note* ci-dessous)
- Son axe doit être horizontal.
- Il doit être éloigné de toute structure pouvant se comporter comme une charge acoustique.
- Il devra être excité en bruit rose sur une bande d'une décade s'étendant au dessus de la limite basse annoncée par le constructeur.
- Le signal de bruit devra être filtré à 12dB/Oct en passe bande de type Butterworth.
- Le facteur de crête du signal appliqué au haut-parleur en test sera de 2:1 (6 dB).
- Le constructeur communiquera les valeurs des fréquences de coupures (à -3 dB) hautes et basses choisies pour le signal de test.

***Note importante :**

L'adoption d'un montage sans charge acoustique pour le haut-parleur en test de puissance a donné lieu à d'intenses délibérations de la part du comité de normalisation de l'AES. Dans la pratique, cette condition est bien souvent contournée, les constructeurs annonçant que leurs tests de puissance ont été conduits dans une enceinte bass-reflex de x litres accordée à y Hz.

La figure C1 de l'annexe C ci-dessous montre le schéma de production du signal de test :

Deux méthodes sont possibles pour obtenir un facteur de crête de 2:1 :

- Ajuster le niveau de sortie de la source de bruit rose pour obtenir 0.32 Vrms aux bornes des diodes qui devront être maintenues à 25 ± 5 °C.
- Relever la tension efficace vraie Vrms à la sortie de l'amplificateur de puissance et sa valeur crête à l'aide d'un oscilloscope calibré. Ajuster le niveau de sortie de la source de bruit rose pour obtenir le facteur de crête de 2:1 ou 6 dB.



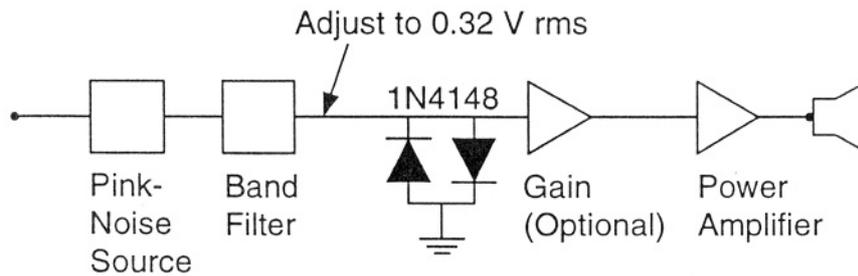


Fig. C1. Circuit préconisé pour obtenir un facteur de crête de 6 dB.
Notez la dépendance thermique des diodes.

b) AES2-1984 : Procédure de test :

- La puissance appliquée au haut-parleur en test sera augmentée par paliers successifs ; la durée de chaque palier permettant au haut-parleur d'atteindre son équilibre thermique (approximativement 2 h**).

** dans certains cas cette durée n'est pas suffisante pour que le hp atteigne son équilibre thermique. Dans tous les cas, ce paramètre devra être vérifié avant d'établir le protocole de test.

- La puissance appliquée sera calculée suivant la relation :

$$P = V_{\text{rms}}^2 / Z_{\text{min}}$$

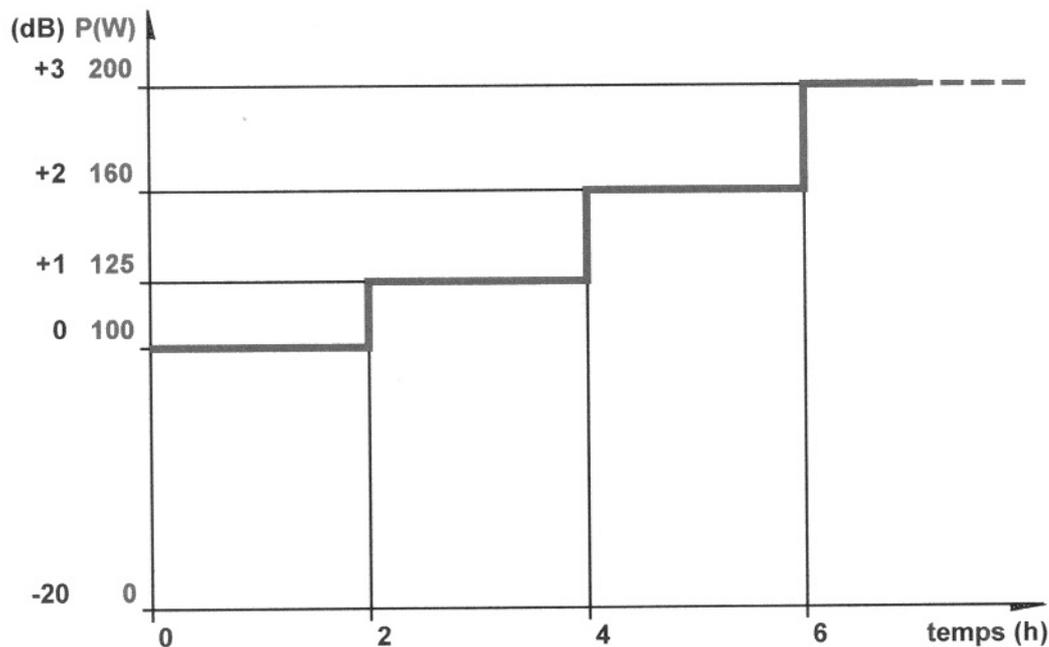
Avec Z_{min} : Module de l'impédance minimal que le haut parleur présente dans sa bande nominale de fréquence.

Nota : L'impédance minimale d'un haut-parleur Z_{min} est généralement le premier minimum d'impédance situé après la fréquence de résonance F_s . Sa valeur est plus basse que celle de l'impédance nominale du haut-parleur considéré.

Par exemple, une valeur de $Z_{\text{min}} = 6.4 \Omega$ à 300Hz sera relevée pour un haut-parleur de 8Ω d'impédance nominale.

- La puissance nominale du haut-parleur sera définie comme étant celle qu'il peut supporter sans altération permanente de ses caractéristiques acoustiques, mécaniques ou électriques excédant 10%.





Graphique d'un test de puissance AES avec paliers en progression par pas de 1dB.

Notez la durée des paliers (ici de 2 heures) ; durée qui doit être supérieure au temps mis par le haut-parleur pour atteindre son équilibre thermique.



2- INCIDENCE DU PARAMETRE THERMIQUE DANS LES TRANSDUCTEURS ELECTRODYNAMIQUES

a) Schéma équivalent :

Le schéma ci-dessous est une "vision électrique" d'un haut-parleur électrodynamique alimenté par un amplificateur de puissance.

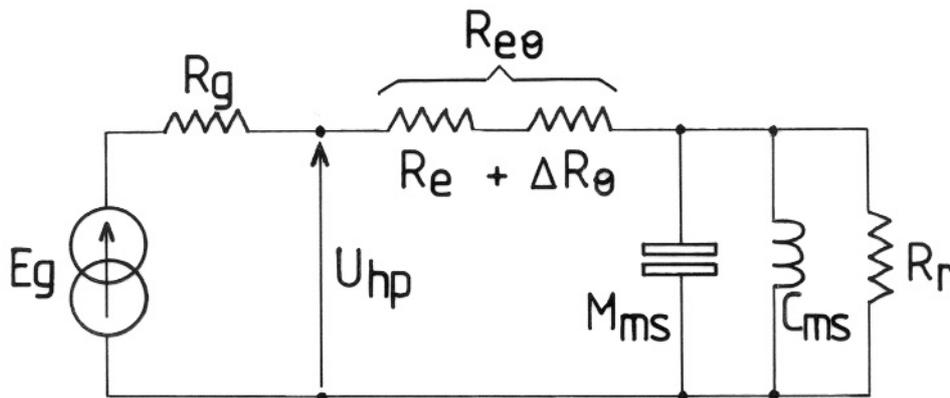


Schéma équivalent électrique simplifié d'un haut-parleur électrodynamique.

- E_g représente la force électromotrice du générateur ;
- R_g est sa résistance interne ;
- U_{hp} est la tension appliquée aux bornes du haut-parleur ;
- R_e est la résistance au courant continu à température ambiante du hp ;
- ΔR_θ est la résistance additionnelle au courant continu due à l'augmentation de température de la bobine mobile du haut-parleur ;
- M_{ms} représente la masse de l'équipage mobile du haut-parleur ;
- C_{ms} est la représentation de la raideur de ses suspensions et
- R_r symbolise la résistance électrique correspondant au rayonnement acoustique du hp.

Nous allons nous intéresser à $R_{e\theta}$ qui représente la résistance de la bobine mobile au courant continu à la température θ °C.

En effet, la bobine mobile des haut-parleurs électrodynamiques est l'objet de pertes par effet joule dues au passage du courant de modulation issu de l'amplificateur de puissance.

Ces pertes sont même prépondérantes car seule la fraction de l'énergie traversant R_r est transformée en énergie acoustique, celle traversant R_e étant perdue par effet joule.

R_r valant 1/10^e dans le meilleur des cas, mais plus souvent 1/100^e de la valeur de R_e explique pourquoi le rendement énergétique des haut-parleurs électrodynamiques est si bas, soit 10% dans les meilleurs cas, mais le plus souvent voisin de 1%.



Si le rendement énergétique d'un haut-parleur vaut 1%, cela veut dire que 99% de l'énergie apportée par l'amplificateur est transformée en chaleur dans la résistance au courant continu de la bobine du haut-parleur. En clair, la bobine chauffe et monte en température, d'autant plus que l'amplificateur débite plus de puissance.

La limite de cette effet est atteinte quand les vernis de maintien et d'isolation des spires de la bobine carbonisent. Cette limite est située vers 300°C pour les bons vernis actuels.

C'est cette limite thermique qui conditionne souvent la tenue en puissance d'un haut-parleur.

Réalisée par bobinage, la bobine mobile d'un haut-parleur fait appel le plus souvent à du fil de cuivre et dans certains cas d'aluminium, métaux qui tous deux, présentent des coefficients de température positifs :

$$\text{Cuivre : } \alpha_{20} = + 3.80 \cdot 10^{-3} / \text{K}$$

$$\text{Aluminium : } \alpha_{20} = + 3.90 \cdot 10^{-3} / \text{K}$$

Cela signifie - pour une bobine en cuivre dont la température s'est élevée de $\Delta\theta = 125^\circ\text{C}$ au dessus de l'ambiante - que sa résistance au courant continu R_e est augmentée d'un terme ΔR_θ valant :

$$\Delta R_\theta = (\Delta\theta \times \alpha_{20}) R_e$$

soit :
$$\Delta R_\theta = (125 \times 0.0038) R_e = 0.475 R_e$$

ou encore :
$$R_{e\theta} = R_e + \Delta R_\theta$$

d'ou l'on tire :
$$R_{e\theta} = [1 + (\Delta\theta \times \alpha_{20})] R_e$$

A titre indicatif, l'augmentation de résistance ΔR_θ n'est pas négligeable, représentant déjà presque 1/2 R_e pour une élévation de température $\Delta\theta$ de seulement 125°C au dessus de l'ambiante, soit pour une température de bobine de 20 + 125 = 145°C

Notons que l'augmentation de résistance ΔR_θ égale R_e quand le terme $(\Delta\theta \times \alpha_{20})$ vaut 1, soit pour $\Delta\theta = 265^\circ\text{C}$ pour le Cuivre et 255°C pour l'Aluminium.

Quand on sait que ces élévations de température sont couramment atteintes par certaines bobines de haut-parleurs, et qu'à ces températures la résistance au courant continu a doublée, il faut prendre conscience que ce phénomène est la principale cause de non linéarité temporelle dont est affecté le haut-parleur électrodynamique.

Dans notre exemple de doublement de la résistance au courant continu, notre haut-parleur de 8 Ω , n'est pas seulement devenu un 16 Ω , mais étant attaqué à tension constante par l'amplificateur, le courant qu'il draine à été divisé par deux, conduisant à une perte de niveau de 6dB à mettre sur le compte de la compression thermique.

Cet effet compression thermique n'est pas instantané, et n'affecte pas seulement la bobine mobile, mais aussi le circuit magnétique dans son ensemble, faisant intervenir des constantes de temps dépendantes des capacités thermiques des composants.



Pour illustrer l'effet de ces constantes de temps thermiques, voici un relevé de températures effectué durant un test de puissance :

Test thermique d'un haut-parleur de 20 cm

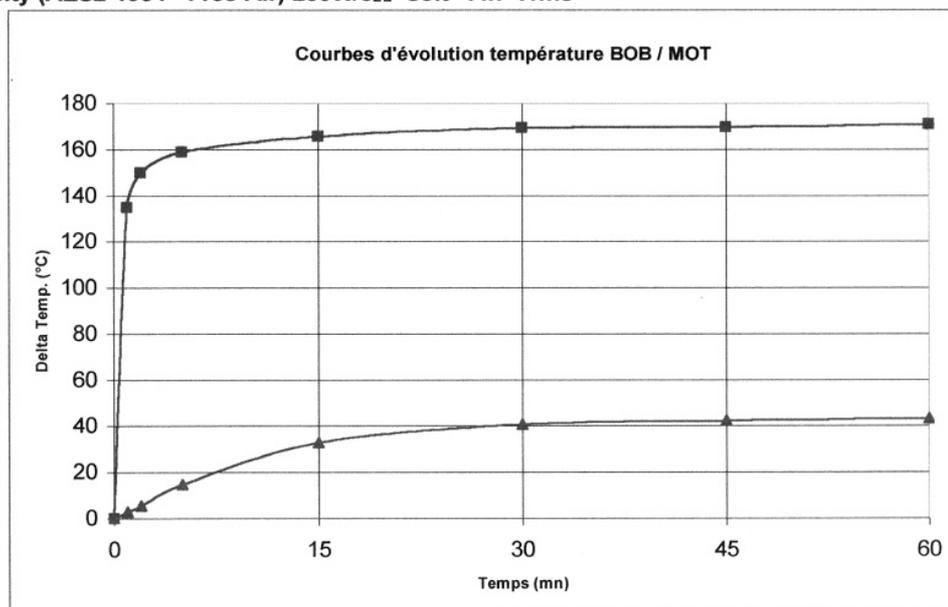
Power Handling Capacity (AES2-1984 - Free-Air) 250W/8Ω soit 44.7 Vrms

Ta: 22.7 °C

HP en Test : SP2400-S1

Tableau des relevés :

Temps (mn)	k	Δ Temp. (°C)	
		BOB	MOTEUR
0	1.00	0	0
1	1.53	135	2.8
2	1.56	150	5.5
5	1.60	159	14.8
15	1.63	166	33.0
30	1.64	169	40.8
45	1.65	170	42.5
60	1.65	171	43.5



L'élévation de température de la bobine mobile, mesurée tout au long du test, est tracée en rouge. L'élévation de température du circuit magnétique est, quant à elle tracée en bleu.

On constate que le temps de montée de la bobine est beaucoup plus court que celui du circuit magnétique.

Pour cette bobine de 51 mm de diamètre, on relève un temps de montée de l'ordre de la minute, pour environ 30 minutes pour le circuit magnétique.

Ces valeurs dépendent du type de haut-parleur et de la taille de la bobine mobile. Pour les bobines mobiles, des temps de montée compris entre 10 secondes et 2 minutes sont couramment rencontrés, alors qu'avec les circuits magnétiques, on relève des temps de montée compris entre 10 minutes et 4 heures et plus.

Il faut imaginer que, suivant l'enveloppe énergétique du message musical avec leur constantes de temps respectives, la bobine mobile et le circuit magnétique vont être modulés thermiquement, conduisant à un effet de compression lent affectant la sensibilité et la balance tonale du transducteur considéré, mais affectant aussi d'autres paramètres parmi lesquels on citera les "Thiele & Small parameters" qui vont influencer, eux de manière significative sur l'accord de la charge acoustique.



b) Incidence sur les paramètres électroacoustiques et sur la désadaptation de la charge acoustique associée :

Le schéma équivalent électrique simplifié d'un haut-parleur électrodynamique montre que l'effet de la température peut se modéliser, en première approximation, par l'introduction d'un terme résistif supplémentaire ΔR_{θ} en série avec R_e .

Ce terme supplémentaire va affecter principalement le Facteur de surtension électrique Q_{ES} de la manière suivante :

$$Q_{ES}(\theta) = [1 + (\Delta\theta \times \alpha_{20})] Q_{ES}$$

Ou, si $k(\theta) = 1 + (\Delta\theta \times \alpha_{20})$:

$$Q_{ES}(\theta) = k(\theta) \cdot Q_{ES}$$

Le tableau suivant montre comment évoluent les principaux paramètres déterminant la charge acoustique, en fonction de la température de la bobine mobile.

Driver type: B383-8		SP : 5050	Fs : 38	Vas : 180	n = 4	n = 5.7	n = 8	n = 11							
Temp.	R _{DC} (Ω)	k	Q _{es}	Q _{ms}	Q _{ts}	F _b (Hz)	Vas.Q _t ² (Lts)	QB3	B4	C4 (±0.3dB)	C4 (±1dB)				
								V _b	F ₋₃						
@ 20°C:	5.60	1.000	0.270	4.3	0.254	58.3	11.6	46	75	66	63	93	53	128	45
@ 100°C:	7.30	1.304	0.352	4.3	0.325	45.5	19.1	76	58	109	49	153	41	210	35
@ 150°C:	8.37	1.494	0.403	4.3	0.369	40.2	24.5	98	52	140	43	196	36	269	31
@ 200°C:	9.43	1.684	0.455	4.3	0.411	36.0	30.4	122	46	173	39	243	33	335	28
@ 250°C:	10.49	1.874	0.506	4.3	0.453	32.7	36.9	148	42	210	35	295	30	406	25

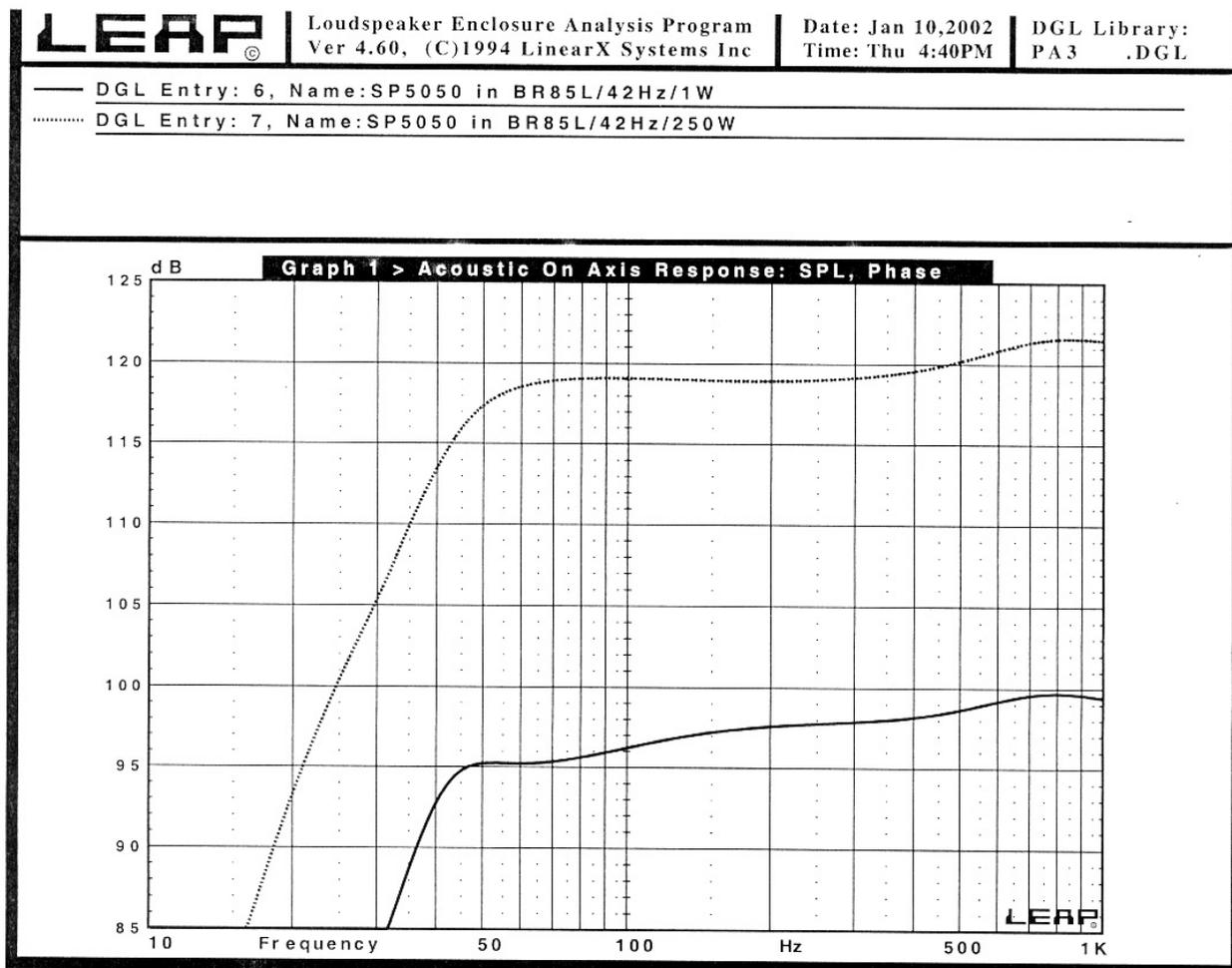
Charge acoustique calculée d'après les travaux de P. J. SNYDER.

On remarque que le coefficient de surtension électrique Q_{ES} varie proportionnellement à $\Delta\theta$. Q_{TS} varie dans une proportion moindre du fait que Q_{MS} reste constant. C'est comme si le Facteur de force du circuit magnétique s'amenuisait avec l'augmentation de température de la bobine.

Ainsi, si une charge Bass-Reflex de 66 litres accordée à 58 Hz constitue la meilleure choix pour un fonctionnement à température ambiante, il faudrait que l'enceinte grossisse et que l'évent permette un accord plus bas en fréquence quand la température de fonctionnement de la bobine s'élève... Cela n'est évidemment pas possible, mais si l'on choisi un volume V_b de 85 litres accordé à $F_b = 42$ Hz, on constate qu'a froid on a quelque chose d'intermédiaire entre un B4 et C4 pour devenir un QB3 plus arrondi à la coupure entre 100 et 150°C.

Notons que les F_{-3} annoncés dans ce tableau sont très approximatives, et que ce n'est qu'en simulant cette charge dans le logiciel LEAP que l'on pourra vraiment se rendre compte de l'évolution de la fonction de transfert avec la température, comme le montre la simulation suivante.





Le graphe ci-dessus montre le résultat de la simulation d'un haut-parleur de 38 cm type SP5050 chargé par une enceinte Bass-Reflex de 85 litres accordé à 42 Hz :

- La trace inférieure représente la réponse pour 1 W appliqué. La bobine est à la température ambiante de 20°C.
- La trace supérieure représente la réponse pour 250 W appliqués correspondant à une température de bobine de 145°C.

La réponse à 1W qui correspond en tous points à celle attendue en fonction des paramètres de Thiele & Small publiés ; est bien de type C4 (Tchebychev 4^{ème} ordre avec ondulations de ± 0.3 dB) et présente une Fréquence à -3dB (F_{-3}) de 40Hz environ.

La réponse à 250W, quant à elle, montre une allure proche du type QB3 (Quasi-Bessel du 3^{ème} ordre) avec F_{-3} situé vers 45Hz.

Comme nous nous y attendions, la F_{-3} est plus élevée que pour la réponse à 1W, et comme une charge de type QB3 est moins demandeuse en terme de déplacement dans le grave, on voit qu'il est tout de même possible de trouver un bon compromis pour le choix d'une charge Bass-Reflex malgré la présence de la forte non linéarité d'origine thermique qui affecte les haut-parleurs électrodynamiques, à moins que les paramètres du haut-parleur n'aient été choisis dans ce but...