

21/08/08

**Introduction**

Modéliser un amplificateur est une démarche délicate nécessitant réflexion et choix techniques. Pour illustrer cette démarche, j'ai choisi de modéliser le simplissime amplificateur SPARTANO, décrit récemment dans les colonnes de la revue Construire Hi Fi ( Italie). Cet article montre toutes les étapes préliminaires nécessaires à cette entreprise, puis la modélisation et enfin les résultats qu'il est possible d'en extraire, concernant le comportement et les performances de l'amplificateur.

**Modélisation des tubes**

Les tubes triodes sont modélisés par des sources de courant. Le modèle complet tient compte des capacités parasites inter-électrodes, comme indiqué sur la figure n° 1

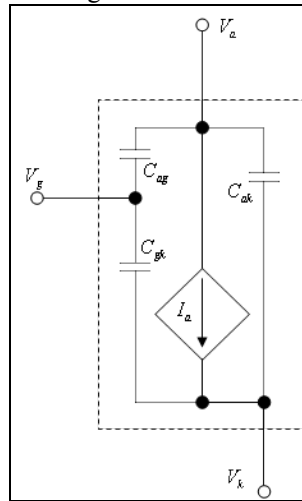


Figure n° 1 Modèle de triode

Le courant de la source de courant est donné par la formule analytique de Norman L. Koreen (1) pour  $V_{gk} \leq 0$

$$E_1 = \frac{V_{ak}}{t_1} \text{Log} \left[ 1 + \text{Exp} \left[ t_1 \left[ \frac{1}{t_2} + \frac{V_{gk}}{(t_3 + V_{ak}^2)^{0,5}} \right] \right] \right]$$

$$\text{Si } E_1 > 0 \text{ then } I_a = \frac{E_1^{t_4}}{t_5} \text{ else } I_a = 0$$

Où  $t_i, \forall i = 1, \dots, 5$  sont des paramètres à ajuster pour chaque type de triodes (2), (3).

Deux types de triodes sont utilisés dans l'amplificateur SPARTANO. La triode ECC82 pour les deux étages du driver et la triode 6080, pour l'étage de puissance. Les paramètres ajustables et les capacités parasites nécessaires à la modélisation, sont donnés dans le tableau n° 1

Triode type	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$C_{ag}$	$C_{gk}$	$C_{ak}$
ECC82	83,6	20,4	957	1,27	645	1,5p	1,8p	0,37p
6080	9,29	2,78	620	1,31	218	8,6p	5,7p	2,5p

Tableau n° 1 données sur les tubes triodes

**Modélisation du transformateur de sortie**

Le transformateur de sortie modélisé est représenté sur la figure n° 2. Il est du type à flux magnétique statique, auto compensé SC-OPT (4), idéal pour les amplificateurs Single Ended comme le SPARTANO. Le Noyau magnétique est constitué de tôles laminées fer-silicium à grains orientés, dont la perméabilité relative est donnée par la formule analytique de Paul Langevin modifiée.

21/08/08

$$\mu_{cr} = 1 + \frac{b}{H_c} \left[ \coth(aH_c) - \frac{1}{H_c} \right]$$

Avec

$$a = a_{\min} + (a_{\max} - a_{\min}) \operatorname{th}(c|H_c|)$$

Les paramètres  $a_{\min}$ ,  $a_{\max}$ ,  $b$  et  $c$  ajustables, ont pour valeur :

$$a_{\min} = 1,20E-2, a_{\max} = 8,90E-2, b = 1,67E6 \text{ et } c = 6,20E-2$$

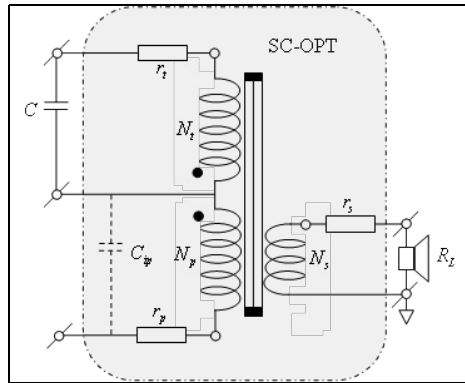


Figure n° 2 Transformateur du type SC-OPT

Le circuit magnétique d'un tel transformateur est complexe et conforme au schéma donné sur la figure n° 3

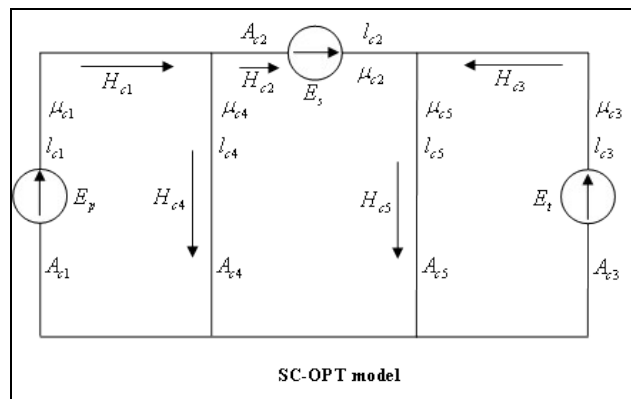


Figure n° 3 Schéma du circuit magnétique

Avec pour notation :

$N_p$	Nombre de spires au primaire
$N_t$	Nombre de spires au tertiaire
$N_s$	Nombre de spires au secondaire
$I_{a0}$	Courant d'anode au repos
$i_p$	Courant variable dans le circuit primaire
$i_t$	Courant variable dans le circuit tertiaire
$i_s$	Courant variable dans le circuit secondaire
$E_p = N_p(I_{a0} + i_p)$	Force magnétomotrice au primaire
$E_t = N_t(I_{a0} + i_t)$	Force magnétomotrice au tertiaire

21/08/08

$E_s = N_s i_s$	Force magnétomotrice au secondaire
$l_{ci} \forall i = 1, \dots, 5$	Longueur des différentes branches magnétiques
$A_{ci} \forall i = 1, \dots, 5$	Section des différentes branches magnétiques
$H_{ci} \forall i = 1, \dots, 5$	Intensité du champ magnétique dans les différentes branches magnétiques
$\mu_{ci} \forall i = 1, \dots, 5$	Perméabilité magnétique dans les différentes branches magnétiques
$l_c$	Longueur magnétique du noyau magnétique
$A_c$	Section du noyau magnétique

Les forces magnétomotrices du primaire et du tertiaire sont mises en opposition pour éliminer le flux magnétique résultant du courant de repos de l'anode de la triode de puissance.

La branche magnétique n° 5 représente la fuite magnétique nécessaire au bon fonctionnement du SC-OPT (4).

La branche magnétique n° 4 représente la fuite magnétique entre les enroulements primaire et secondaire.

Les équations résultant du schéma du circuit magnétique s'écrivent

$$H_{c1} l_{c1} + H_{c4} l_{c4} = E_p$$

$$H_{c2} l_{c2} + H_{c5} l_{c5} - H_{c4} l_{c4} = E_s$$

$$H_{c3} l_{c3} + H_{c5} l_{c5} = E_p$$

$$A_{c1} H_{c1} \mu_{c1} - A_{c4} H_{c4} \mu_{c4} - A_{c2} H_{c2} \mu_{c2} = 0$$

$$A_{c2} H_{c2} \mu_{c2} - A_{c5} H_{c5} \mu_{c5} + A_{c3} H_{c3} \mu_{c3} = 0$$

Auxquelles il faut ajouter les relations arbitraires mais réalistes suivantes pour les résoudre

$$l_{c3} = \frac{l_c}{2}$$

$$l_{c1} = l_{c2} = \frac{l_c}{4}$$

$$A_{ci} = A_c, \forall i = 1, \dots, 5$$

Le circuit électrique est conforme au schéma donné sur la figure n° 4

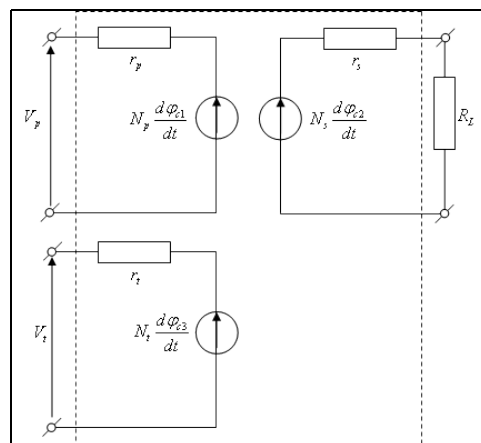


Figure n° 4 Schéma du circuit électrique

Les équations électriques de chacun des trois circuits s'écrivent

$$V_p - N_p \frac{d\phi_{c1}}{dt} = r_p (I_{a0} + i_p)$$

$$V_t - N_t \frac{d\phi_{c3}}{dt} = r_t (I_{a0} + i_t)$$

21/08/08

$$-N_s \frac{d\phi_{c2}}{dt} = (r_s + R_L)i_s$$

Avec, pour notation :

$V_p$	Tension aux bornes de l'enroulement primaire
$r_p$	Résistance de l'enroulement primaire
$V_t$	Tension aux bornes de l'enroulement tertiaire
$r_t$	Résistance de l'enroulement tertiaire
$r_s$	Résistance de l'enroulement secondaire
$R_L$	Résistance de charge au secondaire

La modélisation proposée, pour le transformateur, pourrait être modifiée afin de pouvoir tenir compte du phénomène d'hystérésis (2) dans le noyau magnétique. Ce raffinement n'est cependant pas utile, du moins dans un premier temps, compte tenu de notre propos initial.

Les principales caractéristiques géométriques et électriques du transformateur SC-OPT utilisé sur l'amplificateur SPARTANO sont données dans le tableau n° 2

$N_p$	1200	Nombre de spires du primaire
$r_p$	45 Ohm	Résistance du primaire
$N_t$	1200	Nombre de spires du tertiaire
$r_t$	45 Ohm	Résistance du tertiaire
$N_s$	94	Nombre de spires du secondaire
$r_s$	0,36 Ohm	Résistance du secondaire
$A_c$	6,24 cm <sup>2</sup>	Section du noyau magnétique
$l_c$	29 cm	Longueur de la ligne de force
$l_{c3} = \frac{l_c}{2}$	14,5 cm	Longueur de la branche magnétique n° 3
$l_{c1} = l_{c2} = \frac{l_c}{4}$	7,25 cm	Longueur des branches magnétiques n° 1 et 2
$l_{c4}$	0,30 m	Longueur de la branche magnétique n° 4
$l_{c5}$	1,20E-5 m	Longueur de la branche magnétique n° 5
$C_{ip}$	150 pF	Capacité parasite ramenée au x bornes du primaire
$C_1$	100 μF	Capacité shunt aux bornes du tertiaire
$R_L$	8 Ohm	Résistance de charge aux bornes du secondaire

Tableau n° 2 données géométrique et électrique du transformateur SC-OPT

### Point de fonctionnement et impédance de charge pour la triode de puissance

Ont été retenus pour la triode de puissance type 6080, les valeurs suivantes.

Point de fonctionnement

$$V_{ak0} = 130 \text{ Volt}$$

$$I_{a0} = 0,100 \text{ A}$$

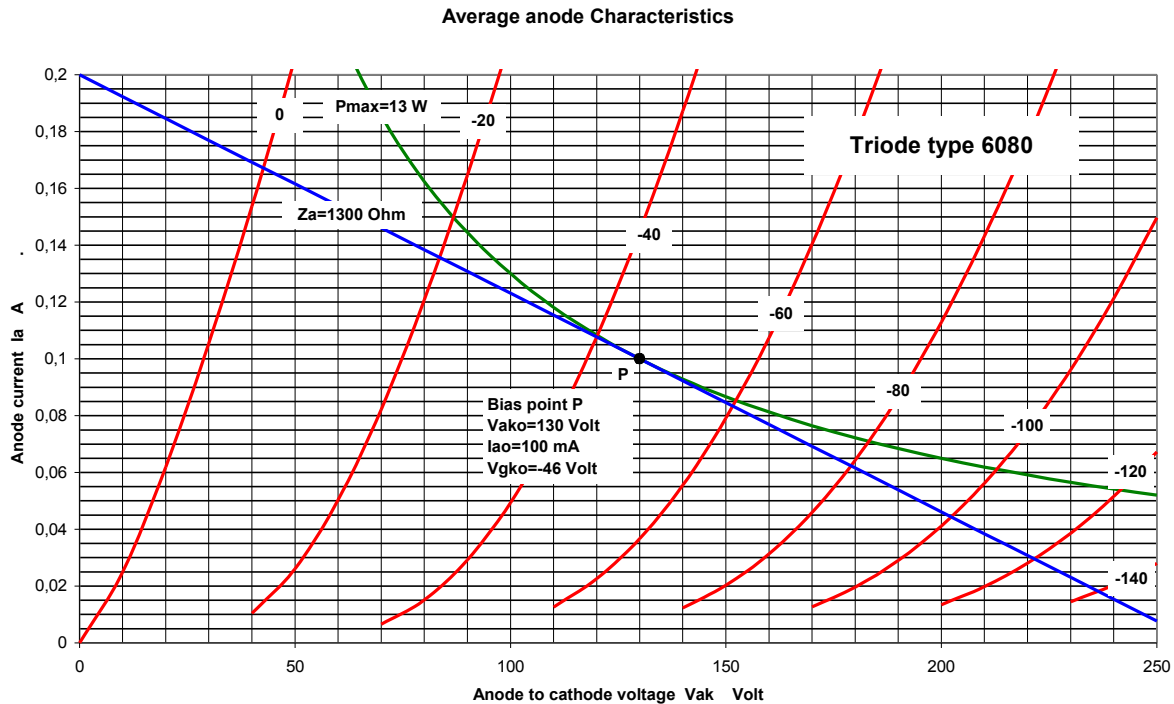
21/08/08

Impédance de charge

$$R_a = 1300 \text{ Ohm}$$

Ces choix sont reportés sur le graphe n° 1 des caractéristiques d'anode de la triode de puissance type 6080.

On voit en particulier que  $V_{gk0} = -46 \text{ Volt}$



Graphe n° 1 Point de fonctionnement et droite de charge pour la 6080

### Point de fonctionnement et résistance de charge pour la triode du premier étage du driver

Deux considérations ont été prises en compte pour cet étage. Elles conduisent à des valeurs, pour la résistance de charge d'anode et la résistance de cathode, différentes de celles proposées sur le schéma d'origine de l'amplificateur SPARTANO.

Ces considérations sont les suivantes :

1. Polarisation de grille à -2 volt pour augmenter la dynamique d'entrée du driver
2. Résistance d'anode de valeur raisonnable pour s'affranchir des problèmes de fortes courbures des caractéristiques d'anode.

Elles ont conduit à choisir une résistance d'anode  $R_a = 220 \text{ kOhm}$  et une résistance de cathode  $R_k = 2 \text{ kOhm}$ .

Pour le tube ECC82 qui présente un coefficient d'amplification de  $\mu = 17$  et une résistance interne de  $\rho = 7,7 \text{ kOhm}$ , le gain de cet étage, dans ces conditions, peut être estimé par la formule

$$G = \frac{\mu R_a}{\rho + R_a + R_k(\mu + 1)}, \text{ Soit } G = 14,2$$

### Point de fonctionnement et résistance de charge pour la triode du second étage du driver

Le second étage du driver est l'étage le plus délicat de l'amplificateur SPARTANO, car devant satisfaire les contraintes fonctionnelles suivantes :

1. La tension de cathode du second étage du driver doit être égale à la tension de l'anode du premier étage du driver, majorée de la valeur absolue de la polarisation de grille retenue pour le second étage du driver.
2. La chute de tension, dans la résistance d'anode du second étage du driver, doit correspondre à la polarisation de grille retenue pour la triode de puissance.

21/08/08

Ces contraintes ont une incidence sur la détermination des résistances d'anode et de cathode à prévoir pour le second étage du driver. La méthode à suivre pour déterminer ces résistances est la suivante.

Posons:

$R = R_a + R_k$	Somme des résistances d'anode et de cathode du second étage du driver
$R_a$	Résistance d'anode du second étage du driver
$R_k$	Résistance de cathode du second étage du driver
$V_{g0}$	Tension statique de la grille du second étage du driver
$V_{k0}$	Tension statique de la cathode du second étage du driver
$V_{gk0}$	Polarisation de grille du second étage du driver
$V_{ba0}$	Chute de tension dans la résistance d'anode du second étage du driver
$I_{a0}$	Courant d'anode du second étage du driver

Nous avons :

$$V_{k0} = V_{g0} + |V_{gk0}|$$

$$R_a I_{a0} = V_{ba0}$$

$$R_k I_{a0} = V_{k0}$$

Ce qui donne :

$$R_a = \frac{R}{(1 + \lambda)} \text{ et } R_k = \frac{\lambda R}{(1 + \lambda)} \text{ avec } \lambda = \frac{R_k}{R_a} = \frac{V_{k0}}{V_{ba0}}$$

Soit une valeur de  $R$ . Avec cette valeur, on détermine les valeurs de  $R_a$  et  $R_k$  puisque la valeur de  $\lambda$  est connue. Estimons une valeur pour  $I_a$ . Avec cette valeur, on peut déterminer  $V_{ak0}$  et puisque  $V_{gk0}$  est imposée, calculer le courant statique d'anode  $I_a$  par la formule analytique de Norman L. Koren. Cette dernière valeur est en général différente de celle estimée au début du calcul et une itération est nécessaire pour converger vers la bonne valeur du courant d'anode. Avec cette valeur du courant d'anode, on calcule  $V_k = R_k I_a$  et  $V_{ba} = R_a I_a$ .

Ce calcul est répété pour différentes valeurs de la résistance totale  $R$  ce qui permet de tracer graphiquement, en fonction de  $R$ , les valeurs des tensions  $V_k$  et  $V_{ba}$ . La bonne valeur de  $R$  est celle qui donne  $V_{k0}$  et  $V_{ba0}$ .

Ces calculs ont été effectués avec les valeurs suivantes :

$$V_{g0} = 49,2 \text{ Volt}$$

$$|V_{gk0}| = 6 \text{ Volt}$$

$$V_{ba0} = 46 \text{ Volt}$$

Ils sont indiqués sur le graphe n° 2 et conduisent à la solution :

$$R = 14 \text{ kOhm}$$

$$R_a = 6,36 \text{ kOhm}$$

$$R_k = 7,64 \text{ kOhm}$$

Une aussi faible résistance de charge  $R_a$  n'est pas très favorable au plan de la distorsion et il convient d'appliquer à cet étage une contre-réaction pour améliorer au mieux la situation. Cette contre-réaction est obtenue par découplage partiel de la résistance de cathode. La valeur non découplée retenue est  $R_k = 2 \text{ kOhm}$ .

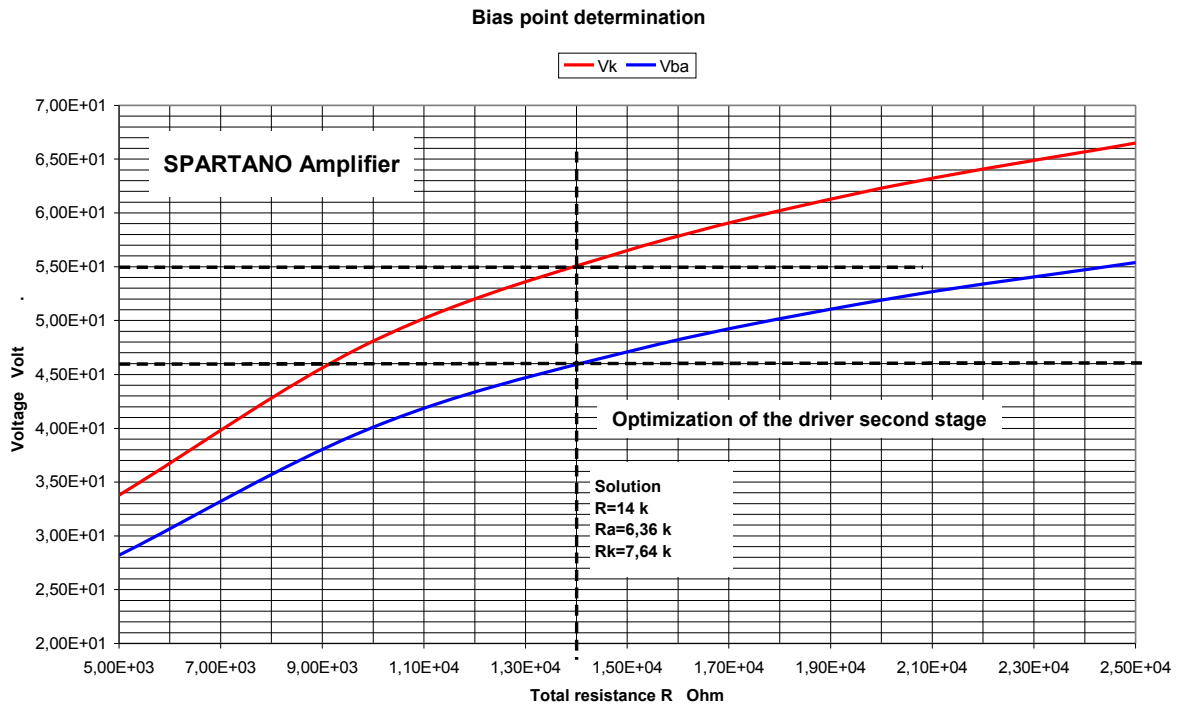
Pour le tube ECC82 qui présente un coefficient d'amplification de  $\mu = 17$  et une résistance interne de  $\rho = 7,7 \text{ kOhm}$ , le gain de cet étage, dans ces conditions, peut être estimé par la formule

$$G = \frac{\mu R_a}{\rho + R_a + R_k (\mu + 1)} \text{ Soit } G = 2,16$$

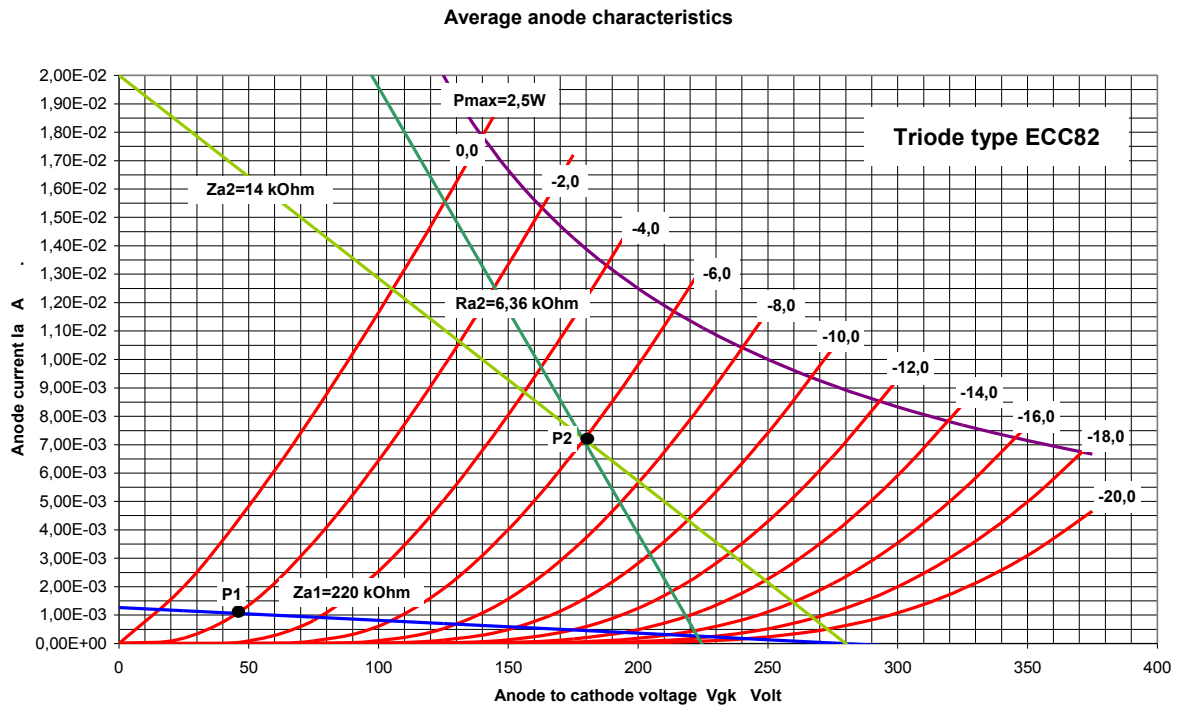
21/08/08

Le graphe n° 3 regroupe les différentes droites de charge et points de fonctionnement de chacun des 2 étages du driver. Il montre que :

1. La résistance d'anode de 220 kOhm, pour le premier étage du driver, permet bien de s'écarter des fortes courbures des caractéristiques d'anode.
2. La faible résistance d'anode du second étage du driver est bien la cause d'une forte distorsion qu'il conviendra de combattre.



Graphe n° 2 Détermination de R



Graphe n° 3 Points de fonctionnement et droites de charges des 2 étages du driver

21/08/08

**Schéma de l'amplificateur et notations**

Le schéma de l'amplificateur SPARTANO, utilisé pour effectuer la modélisation et définissant la notation des composants et leurs valeurs, est donné sur la figure n° 5.

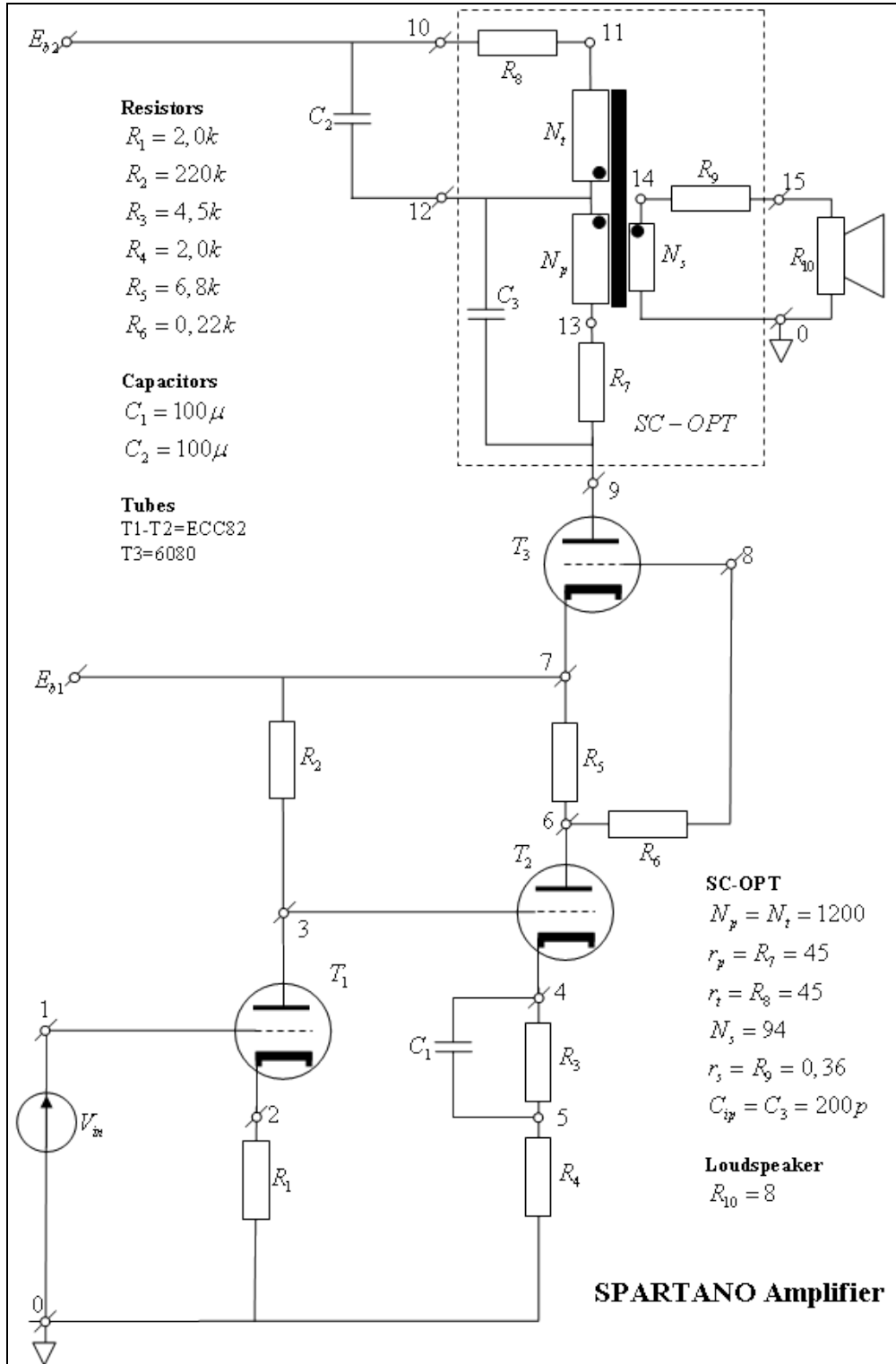


Figure n° 5 Schéma de l'amplificateur SPARTANO

21/08/08

**Modélisation de l'amplificateur SPARTANO**

L'amplificateur SPARTANO a été modélisé avec le Logiciel ESACAP (6). ESACAP est un logiciel permettant l'analyse de circuits linéaires et non linéaires en régimes continu, transitoire et périodique. De plus, il effectue l'analyse dans le domaine fréquentiel de circuits linéaires ou linéarisés dans lesquels les fonctions de transfert sont définies en représentation fréquentielles ou en pôles/zéros. Bien entendu, d'autres logiciels peuvent être utilisés. Nous donnons cependant, à titre d'exemple, le détail complet du modèle tel qu'écrit dans ESACAP.

```
# THE SPARTANO AMPLIFIER
$$DES
$FUN: limit(x,min,max);
limit=MIN(max,MAX(min,x));
END;

$FUN: pwrs(x,y);
IF(x.GT.0) THEN
pwrs=x**y;
ELSE
  IF(x.LT.0) THEN
    pwrs--((-x)**y);
  ELSE
    pwrs=0;
  ENDIF;
ENDIF;
END;

$CON:
# Sine input signal
A=1.414;           # Maximum(peak) amplitude
F=1k;             # Frequency
per=1/F;          # Period

# Tube type ECC82
# Norman L.Koren's model
t1=83.6;          # Tube parameter
t2=20.4;          # Tube parameter
t3=957;           # Tube parameter
t4=1.27;          # Tube parameter
t5=645;           # Tube parameter

# Tube type 6080
# Norman L.Koren's model
p1=9.29;          # Tube parameter
p2=2.78;          # Tube parameter
p3=620;           # Tube parameter
p4=1.31;          # Tube parameter
p5=218;           # Tube parameter

# Core geometry
Ac=6.24E-4;       # Cross section area
Lc=29E-2;         # Average magnetic path length
Lc1=Lc/4;         # Average magnetic path length for primary
Lc2=Lc/4;         # Average magnetic path length for
secondary
Lc3=Lc/2;         # Average magnetic path length for tertiary
Lc4=.3;           # Air gap length (Flux leakage)
Lc5=1.2E-5;       # Air gap length (SC-OPT)

# Primary winding
```

```

21/08/08
Np=1200;          # winding turns
Rp= 45;           # winding resistance
Cip=150p;        # stray capacitance

# Secondary winding
Ns=94;           # Winding turns
Rs=.36;          # Winding resistance
RL=8;            # Load resistance

# Tertiary winding
Nt=Np;           # Winding turns
Rt=Rp;           # Winding resistance

# Grain oriented silicon steel
Amin=1.2E-2;     # Fitting parameter
Amax=8.9E-2;     # Fitting parameter
A1=6.2E-2;       # Fitting parameter
A2=1.67E6;       # Fitting parameter
μo=4*PI*1E-7;   # Free space permeability
END;

$NET:
# Driver section
Ein(1,0)=A*SIN(2*PI*F*TIME); # Sine signal input
R1(2,0)=2k;
R2(7,3)=220k;
R3(4,5)=5.6k;
R4(5,0)=2k;
R5(7,6)=6.8k;
C1(4,5)=100u;

# HT supply
E1(7,0)=280;     # First HT DC supply

# First 1/2 ECC82
%Ut1=V(3,2)/t1*LOG(1+EXP(t1*(1/t2+V(1,2)/pwrs(pwrs(V(3,2),2)+t3,0.5)))));
%Vt1=limit(%Ut1,0,1E6);
Jat1(3,2)=pwrs(%Vt1,t4)/t5;
Cagt1(3,1)=1.5p;
Cgkt1(1,2)=1.8p;
Cakt1(3,2)=0.37p;

# Second 1/2 ECC82
%Ut2=V(6,4)/t1*LOG(1+EXP(t1*(1/t2+V(3,4)/pwrs(pwrs(V(6,4),2)+t3,0.5)))));
%Vt2=limit(%Ut2,0,1E6);
Jat2(6,4)=pwrs(%Vt2,t4)/t5;
Cagt2(6,3)=1.5p;
Cgkt2(3,4)=1.8p;
Cakt2(6,4)=0.37p;

# Power section
R6(6,8)=220;

# 6080
%Ut3=V(9,7)/p1*LOG(1+EXP(p1*(1/p2+V(8,7)/pwrs(pwrs(V(9,7),2)+p3,0.5)))));
%Vt3=limit(%Ut3,0,1E6);
Jat3(9,7)=pwrs(%Vt3,p4)/p5;
Cagt3(9,8)=8.6p;
Cgkt3(8,7)=5.7p;
Cakt3(9,7)=2.5p;

```

21/08/08

```

# HT supply
E2(10,7)=140; # second HT DC supply

# SC-OPT magnetic core
%EP=Np*I(R7);
%ES=Ns*I(R9);
%ET=Nt*I(R8);
%Hc1=%Hc1+%Hc1*Lc1+%Hc4*Lc4-%EP;
%Hc2=%Hc2-%Hc4*Lc4+%Hc2*Lc2+%Hc5*Lc5-%ES;
%Hc3=%Hc3+%Hc5*Lc5+%Hc3*Lc3-%ET;
%Hc4=%Hc4+%Hc1*%µc1-%Hc4*%µc4-%Hc2*%µc2;
%Hc5=%Hc5+%Hc2*%µc2-%Hc5*%µc5+%Hc3*%µc3;

%AHc1=Amin+(Amax-Amin)*TANH(A1*ABS(%Hc1));
%AHc2=Amin+(Amax-Amin)*TANH(A1*ABS(%Hc2));
%AHc3=Amin+(Amax-Amin)*TANH(A1*ABS(%Hc3));
%AHc4=Amin+(Amax-Amin)*TANH(A1*ABS(%Hc4));
%AHc5=Amin+(Amax-Amin)*TANH(A1*ABS(%Hc5));

%PHIc1=%Hc1*%µc1*Ac;
%PHIc2=%Hc2*%µc2*Ac;
%PHIc3=%Hc3*%µc3*Ac;
%PHIc4=%Hc4*%µc4*Ac;
%PHIc5=%Hc5*%µc5*Ac;

IF(ABS(%Hc1).LT.0.1) THEN
%µc1=µo*(1+A2*(Amin/3+(Amax-Amin)*A1*ABS(%Hc1)/3));
ELSE
%µc1=µo*(1+A2/%Hc1*(COSH(%AHc1*%Hc1)/SINH(%AHc1*%Hc1)-1/(%AHc1*%Hc1)));
ENDIF;
IF(ABS(%Hc2).LT.0.1) THEN
%µc2=µo*(1+A2*(Amin/3+(Amax-Amin)*A1*ABS(%Hc2)/3));
ELSE
%µc2=µo*(1+A2/%Hc2*(COSH(%AHc2*%Hc2)/SINH(%AHc2*%Hc2)-1/(%AHc2*%Hc2)));
ENDIF;
IF(ABS(%Hc3).LT.0.1) THEN
%µc3=µo*(1+A2*(Amin/3+(Amax-Amin)*A1*ABS(%Hc3)/3));
ELSE
%µc3=µo*(1+A2/%Hc3*(COSH(%AHc3*%Hc3)/SINH(%AHc3*%Hc3)-1/(%AHc3*%Hc3)));
ENDIF;
%µc4=µo;
%µc5=µo;

%D1=%PHIc1';
%D2=%PHIc2';
%D3=%PHIc3';

# Primary circuit
R7(13,9)=Rp;
Ep(12,13)=Np*%D1;
C3(9,12)=Cip;

# Tertiary circuit
R8(10,11)=Rt;
Et(11,12)=Nt*%D3;
C2(10,12)=100u;

# Secondary circuit
R9(14,15)=Rs;

```

21/08/08

```
R10 (15, 0)=RL;
Es (14, 0)=-Ns*%D2;
END;
```

Le modèle de l'amplificateur est décrit dans la section \$DES. La sous section \$FUN : limit(x,min,max) décrit la fonction limite. La sous section \$FUN : pwrs(x,y) décrit la fonction puissance. La sous section \$CON : donne les paramètres du signal d'excitation, des tubes triodes et du transformateur SC-OPT. La sous section \$NET : décrit le réseau de l'amplificateur.

## Résultat des différentes simulations

### Cartographie de l'amplificateur au repos

Cette cartographie est établie amplificateur sous tension, mais sans signal d'entrée. Elle donne la valeur des tensions et courants en tous les points du circuit et donc permet de vérifier les points de fonctionnement de tous les tubes triodes.

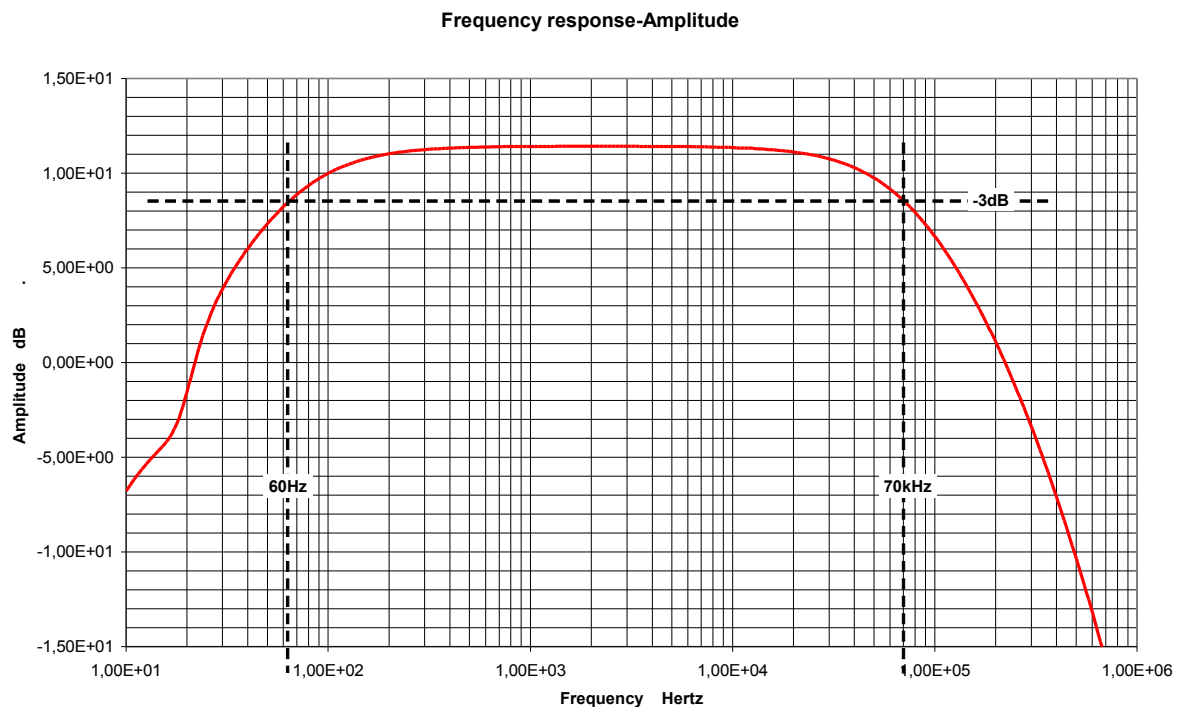
D.C. ANALYSIS

```
TIME= 0.000000E+00
V(1) : 0.000000E+00
I(Ein) : 0.000000E+00
V(2) : 2.097893E+00
V(7) : 2.800000E+02
V(3) : 4.923176E+01
V(4) : 5.504040E+01
V(5) : 1.448432E+01
V(6) : 2.307533E+02
I(E1) : -8.291104E-03
V(8) : 2.307533E+02
V(9) : 4.121793E+02
V(10) : 4.200000E+02
I(E2) : -8.689622E-02
I(R7) : 8.689622E-02
I(R9) : 0.000000E+00
I(R8) : 8.689622E-02
%Hc1 : 4.508426E+02
%Hc4 : 2.386313E+02
%Hc2 : 4.482997E+02
%Hc5 : 3.257304E+06
%Hc3 : 4.495712E+02
%µc1 : 4.540053E-03
%µc2 : 4.565137E-03
%µc3 : 4.552560E-03
%PHIc1 : 1.277234E-03
%PHIc2 : 1.277047E-03
%PHIc3 : 1.277141E-03
V(13) : 4.160897E+02
V(12) : 4.160897E+02
I(Ep) : 8.689622E-02
V(11) : 4.160897E+02
I(Et) : 8.689622E-02
V(14) : 0.000000E+00
V(15) : 0.000000E+00
I(Es) : 0.000000E+00
%Ut1 : 7.351708E-01
%Vt1 : 7.351708E-01
%Ut2 : 3.365956E+00
%Vt2 : 3.365956E+00
%Ut3 : 9.444051E+00
%Vt3 : 9.444051E+00
%EP : 1.042755E+02
%ES : 0.000000E+00
%ET : 1.042755E+02
```

21/08/08

% $\mu$ c4:	1.256637E-06
% $\mu$ c5:	1.256637E-06
%AHc1:	8.900000E-02
%AHc2:	8.900000E-02
%AHc3:	8.900000E-02
%AHc4:	8.900000E-02
%AHc5:	8.900000E-02
%PHIc4:	1.871207E-07
%PHIc5:	2.554187E-03
%D1:	0.000000E+00
%D2:	0.000000E+00
%D3:	0.000000E+00

## Réponse en fréquence



Graph n° 4 Réponse en fréquence de l'amplificateur SPARTANO

Avec un transformateur de sortie du type SC-OPT, la bande passante à -3 dB s'établit de 60 Hz à 70 kHz. La coupure basse peut sembler un peu élevée. Elle est due au principe même du SC-OPT qui demande, pour une bonne réponse en basse fréquence à être couplé à une triode de puissance présentant une résistance interne la plus faible possible. Elle est due également à la bonne simulation de la perméabilité relative du noyau magnétique. Ce problème n'existe pas avec le circuit original car celui-ci utilise un transformateur du type SC-SCC-SET (5), évolution du SC-OPT et destiné moyennant une légère complication du circuit de l'amplificateur, à améliorer considérablement la réponse en basse fréquence.

La réponse en haute fréquence est excellente. Cela est dû au faible nombre de spires de l'enroulement primaire et donc à la faible capacité parasite ramenée au primaire.

## Distorsion

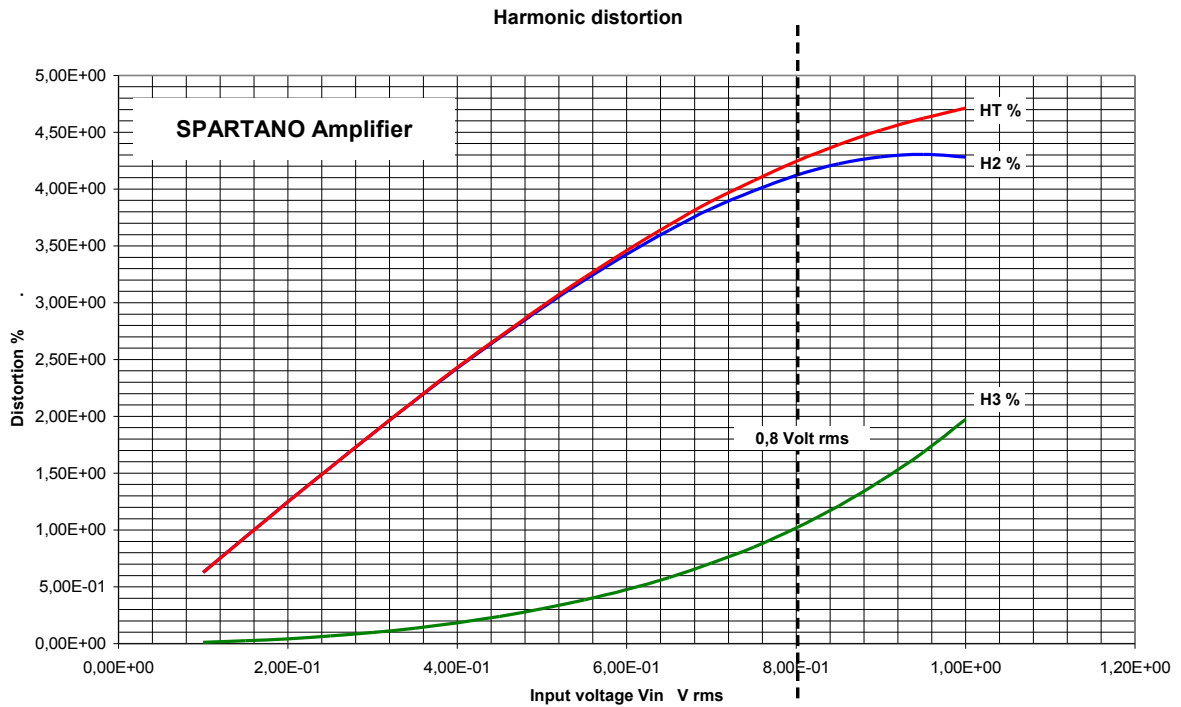
La distorsion sur ESACAP est calculée à partir d'une FFT effectuée sur le signal périodique de sortie, pour une entrée périodique d'amplitude et de fréquence bien définies.

Le signal d'entrée utilisé est sinusoïdal, de fréquence 1 kHz et d'amplitude variable de 0, jusqu'à 1 Volt rms. Les résultats sont regroupés sur le graphe n° 5. Il donne la distorsion par harmoniques 2 et 3 et la distorsion totale.

21/08/08

On voit sur ce graphe que pour une excitation sinusoïdale à 1 kHz d'amplitude 0,8 Volt rms, la distorsion totale par harmoniques est de l'ordre de 4,3% ce qui est tout à fait convenable compte tenu du choix de la triode de puissance du type 6080.

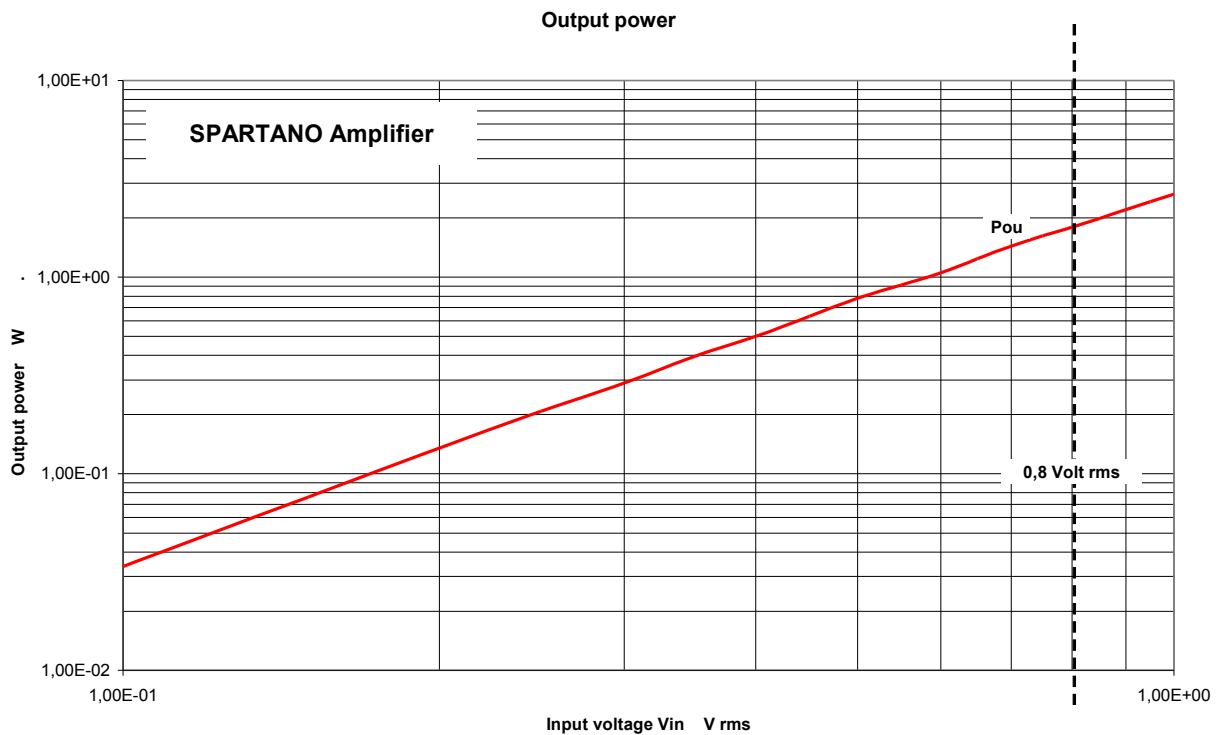
21/08/08



Graphe n° 5 Distorsion de l'amplificateur SPARTANO

**Puissance**

Pour un signal sinusoïdal d'entrée de fréquence 1kHz et d'amplitude variable de 0, à 1 Volt rms, la puissance disponible sur la charge de 8 Ohms au secondaire du transformateur SC-OPT, est donnée par le graphe n° 6. Ce graphe montre la linéarité de la puissance délivrée sur la charge en fonction de l'amplitude du signal d'entrée. Pour 0,8 Volt rms à l'entrée, on obtient 2 W musicaux sur la charge.

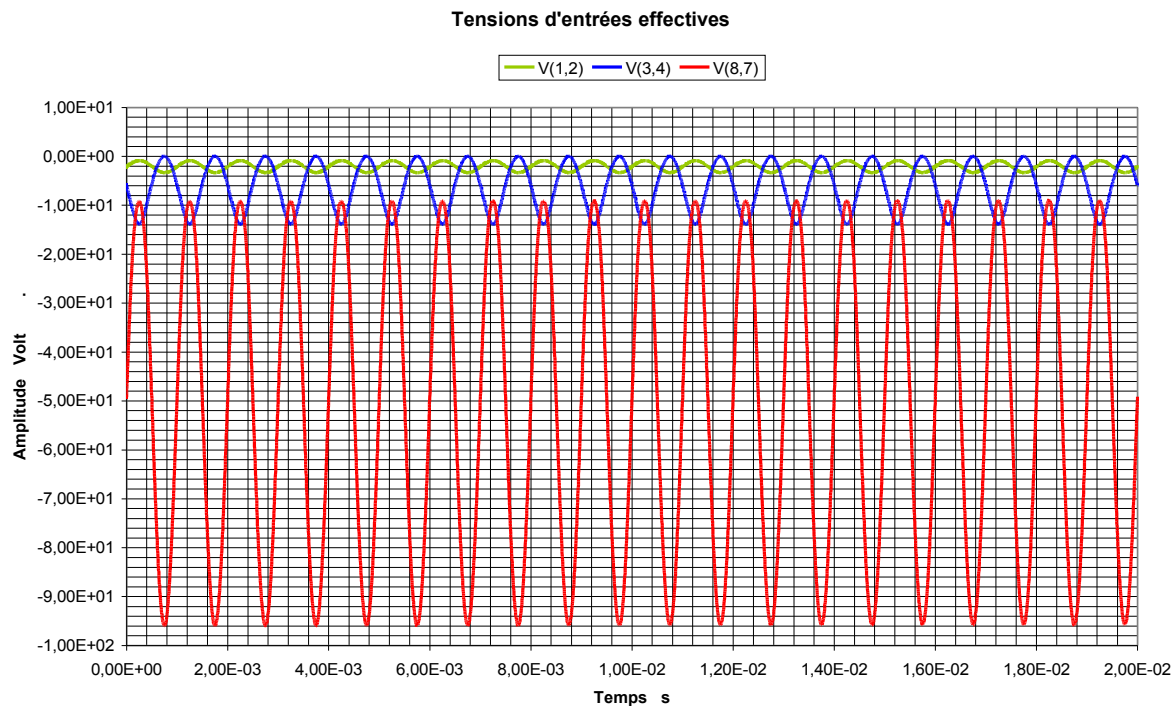


Graphe n° 6 Puissance de l'amplificateur SPARTANO

21/08/08

## Limitation

Les tensions effectives  $V_{gk}$  d'entrée des étages du driver et de l'étage de puissance doivent rester négatives pour assurer un fonctionnement convenable de l'amplificateur SPARTANO. Ces trois tensions effectives sont représentées en temporel sur le graphe n° 6, pour une tension sinusoïdale d'entrée de fréquence 1 kHz et d'amplitude 1 Volt rms.



Graphe n° 6 Tensions d'entrées effectives de l'amplificateur SPARTANO

Ce graphe montre que, pour cette excitation :

1. La tension effective d'entrée du premier étage du driver, reste négative, avec une marge de 0,85 Volt.
2. La tension effective d'entrée du second étage du driver, reste négative, avec une marge nulle
3. La tension effective d'entrée de l'étage de puissance, reste négative, avec une marge de 8,0 Volt

C'est donc le second étage du driver qui limite la tension d'entrée de l'amplificateur SPARTANO à 1 Volt rms maximum.

## Conclusion

L'objectif de cet article était de montrer que la modélisation d'un amplificateur, bien que délicate, n'est pas quelque chose d'insurmontable. En outre, cette modélisation terminée présente l'avantage de devenir un outil très puissant d'étude et de mise au point de l'amplificateur. Nous espérons qu'il donnera envie à bon nombre d'amateurs de tenter l'aventure. Ce sera sans aucun doute, à leur plus grand profit.

## Références

1. Norman L. Koren "Improved vacuum tube models for SPICE simulations". 05/96 Glass Audio.
2. Pierre Touzelet "Accurate non linear models of valve amplifiers including output transformers" AES preprint 6830, 120<sup>th</sup> AES Convention 2006, Paris, France.
3. Pierre Touzelet "Simple approximation of tube characteristics", 09/07 AudioXpress.
4. Aristide Polisois and Pierre Touzelet "The self compensated output power transformer (SC-OPT) Theory and properties" AES preprint 6346, 118<sup>th</sup> AES Convention 2005, Barcelona, Spain.
5. Aristide Polisois and Pierre Touzelet "Direct current offset and balance for audio transformers used with paralleled tubes or solid state devices" AES preprint 7151, 122<sup>nd</sup> AES Convention 2007, Vienna; Austria.
6. ESACAP General purpose network analysis program from StanSim Research Aps, Skovparken 9, 2990 Nivaa, Denmark.