

SOLVEUR TRIODE

1 Introduction

L'objectif de l'outil décrit ici est de déterminer les paramètres d'un modèle de triode (modèle de Norman Koren) sur la base de données numérisées. Une fois déterminés, ces paramètres peuvent être implantés sous LTSpice pour les besoins de nos simulations.

Ce document sert de manuel utilisateur pour faire fonctionner cet outil.

2 Pré-requis

On supposera que l'on dispose des données numérisées de la triode étudiée. L'obtention de ces données a déjà été traitée dans le document précédent.

3 Présentation de la méthode

Le modèle de Norman Koren (KN) repose sur 5 paramètres qui permettent de calculer le courant de plaque en fonction de la tension de plaque et de la tension de grille.

D'un côté, nous disposons des caractéristiques numérisées $I_a=f(V_a,V_g)$

De l'autre, un modèle dont les 5 paramètres permettent de calculer $I_a=f(V_a,V_g)$

L'idée est de déterminer ces 5 paramètres afin que le modèle KN soit le plus proche des courbes numérisées.

Le modèle KN natif ne comporte pas d'élément permettant de calculer le courant de grille. Cependant, sur certains exemples sous LTSpice, on voit que ce courant a été modélisé par l'ajout d'une diode en série avec une résistance entre la grille et la cathode. N'ayant pas d'information pour dimensionner la résistance, je n'ai pas reproduit ce comportement.

4 En pratique

En pratique, adapter un modèle sur des valeurs n'est pas si simple: Pour donner une image, on essaye de trouver le point le plus bas d'une surface biscornue en se promenant en x et en y. En toute logique, on devrait partir d'un point x,y puis, en ce point calculer la tangente locale la plus forte et se diriger suivant sa direction. Cela suppose de mettre en oeuvre tout un arsenal d'outils mathématiques (dérivées partielles, plan osculateur, etc....) que je ne maîtrise plus vraiment (pour autant que je les ai maîtrisés un jour) et qui nécessite au moins 10 pages de calculs avant d'y arriver. Comme ici il est question d'une surface un peu spéciale composée non pas des deux variables x et y mais de 5 variables (nos fameux paramètres), le calcul serait donc ardu. De plus, j'ai bon espoir d'utiliser cette moulinette pour les pentodes dont le modèle est fondé sur 27 paramètres ! Alors....

Alors en pratique, j'ai choisi une méthode plus simple.

La méthode implémentée est des plus archaïque. Cette méthode nécessite un grand nombre d'itérations car elle converge lentement. Néanmoins, avec un peu d'expérience, on arrive à un résultat satisfaisant.

La méthode consiste donc à faire varier ces paramètres et à calculer l'écart entre le modèle KN et les données numérisées (DN). Pour cela, on part d'une valeur initiale pour les 5 paramètres puis, on teste l'effet d'une variation infime de chacun. La variation qui offre la plus grande minimisation de l'écart KN – DN indique dans quel sens faire évoluer le « vecteur » des 5 paramètres. On modifie les paramètres en conséquence. Ce processus est répété jusqu'à ce que l'on atteigne un minimum. A ce stade, on dit que la solution a convergé et les 5 paramètres sont déterminés.

La qualité des DN et le choix du vecteur paramètre de départ influence bien entendu le résultat final. Il n'est malheureusement pas rare que le solveur « patine » sans converger ou converge vraiment trop lentement. Dans ce cas, relancer le calcul avec des valeurs initiales différentes.

Faire « coller » au mieux les points calculés sur un ensemble de points numérisés peut parfois conduire à un résultat décevant car la contrainte imposée au modèle est telle que le résultat final n'est pas probant. Cela est d'autant plus vrai que les points numérisés ne sont pas tous dignes de foi. Concernant les caractéristiques des tubes, il est clair que les valeurs proches du courant de plaque nul sont sujettes à caution. N'oublions pas que ces courbes ont été pour la plupart tracées « à la main ». Par ailleurs, il n'est pas judicieux de contraindre le modèle à respecter des points qui, pratiquement, ne font pas partie des points de fonctionnement habituels d'un tube. C'est la raison pour laquelle j'ai pris le parti d'introduire une pondération basée sur la droite de charge présumée du tube.

En clair, j'accorde plus d'importance aux points numérisés situés dans un voisinage proche de la droite de charge présumée.

5 L'outil

L'outil se présente sous la forme d'un programme en C. Cet outil est capable de faire deux choses: D'une part l'optimisation des paramètres et d'autre part le tracé des courbes et la création d'un fichier .inc utilisable sous LTSpice.

Il existe un flag dans le fichier de configuration pour choisir le mode de fonctionnement.

6 Les fichiers

Le paramétrage du programme se fait grâce à des fichiers de configurations et des fichiers de données.

D'une manière générale, les noms des fichiers sont basés sur le nom du tube employé.

7 Fichiers d'entrée

Il y a 3 fichiers d'entrée. Le premier est dans le répertoire du programme et sert à indiquer dans quel répertoire et sur quel tube on va travailler.

Fichier config.cfg

Fichier de config du programme simu_tube
--

```
répertoire dans lequel se trouve le tube à traiter (ne pas oublier le slash final)
#chemin
/home/phil/ETUDES_TUBES/triode/12AX7/

nom du tube à traiter
#tube
12AX7
```

Dans le répertoire de travail on doit avoir deux fichiers, l'un concernant les données numérisées du tube, l'autre les paramètres de la modélisation que l'on souhaite réaliser.

Le fichier des données numérisées est issu d'une moulinette décrite dans un précédent document. Ce fichier s'appelle « tube.dat », tube étant le nom du tube sur lequel on travaille.

Le fichier de configuration du tube se nomme « tube.cfg », en voici le détail:

```
Modélisation de triode par le modèle Norman Koren

paramètres employés
mu          gain du tube
expo        exposant (d'après Langmuir-Child) 3/2
kg1         influence de la tension de grille par rapport à la tension de
plaque
kp          raideur de passage à zéro
kvb

nombre de paramètres
#nbparam
5

valeurs de départ
#paramètre
1
1
1
1
1

optimisation+tracé ou tracé seul ?
mettre 1 pour optimisation + tracé
mettre 0 pour tracé seul (dans le cas ou les paramètres sont déjà bons)
#optimise
1

Valeur de la droite de charge prévue (sert de pondération aux points de
controle)
Vamax      tension de plaque max à courant de plaque nul (en V)
Iamax      courant de plaque max à tension de plaque nulle (en A)
Poids      coefficient de pondération pour la droite de charge
           mini 0: toutes les courbes ont égale influence
           maxi >0: les points des courbes proches de la droite de charge ont
plus d'influence

#charge
450
```

```

0.0025
1

capacités parasite en picoF
grille-anode
#cgp
1.7

anode-cathode
#ccp
1.9

grille-cathode
#ccg
1.8

```

Remarques importantes:

Dans cet exemple, les paramètres de départ sont fixés à 10 (ne pas les fixer à 0 sinon ils sont inopérants). On peut les remplacer par les paramètres optimisés afin de réduire le temps de convergence des optimisations futures ou tout simplement pour obtenir des résultats avec une droite de charge différente.

La droite de charge (DDC) à deux rôles: Dans l'optimisation (#optimise=1) et dans le calcul des courbes mutuelles. Dans l'optimisation, le modèle tentera de coller au mieux aux points situés proches de cette DDC. Dans le calcul des courbes mutuelle, c'est la résistance de cette DDC qui est prise en compte. On peut parfaitement optimiser sur une DDC et calculer sur une autre DDC.

8 Fichiers de sortie

Le programme créer un bon nombre de fichiers de sortie.

tube.chg	Ce sont les valeurs prises par le tube le long de la droite de charge
<pre> -0.00500501 1.98986 91.825 -63.8069 -0.01001 1.98809 92.1444 -63.8995 -0.015015 1.98631 92.4647 -64.0843 -0.02002 1.98452 92.7859 -64.2716 -0.025025 1.98273 93.108 -64.4512 -0.03003 1.98094 93.431 -64.6298 </pre>	Vg(V) Ia(mA) Va(V) dVa/dVg(V/V)

tube.mut	Ce sont les caractéristiques $I_a=f(V_g)$ à $V_a=cste$
<pre> 50 0 1.15587 50 -0.00500501 1.14985 ... 50 -4.98999 0 50 -4.99499 0 50 -5 0 </pre>	Va(V) Vg(V) Ia(mA)
	séparateur (ligne vide)

100 0 2.1573 100 -0.00500501 2.14909 100 -0.01001 2.14087	
--	--

tube.prm (c'est le résultat de l'optimisation)

Optimisation des paramètres Norman Koren du tube 12AX7

paramètres de départ

#depart

100

1.5

10

10

10

conditions d'optimisation

droite de charge

tension plaque max pour courant plaque nul (V)

#Va0

450

courant plaque max pour tension plaque nulle (A)

#Ia0

0.0025

résistance de charge (Ohms)

#resist

180000

coefficient de pondération de la droite de charge

#coef

1

somme des carrés des écarts du modèle aux paramètres initiaux (mA**2)

#ecart

2.5763e+11

nombre d'itérations

3554

somme des carrés des écarts du modèle aux paramètres optimisés (mA**2)

#ecart

2.38987

paramètres optimisés

#optimise

107.282

0.900255

870.263

875.025

6112.42

tube.tmp (résultats partiels de l'optimisation pris toutes les 100 itérations)

itération, erreur, liste des 5 paramètres

```
[100 7.21709e+08] (0) 100 (1) 0.554594 (2) 10 (3) 10 (4) 10
[200 7.3205e+07] (0) 100 (1) 0.342346 (2) 16.7769 (3) 10 (4) 10
[300 9.92599e+06] (0) 100 (1) 0.342346 (2) 45.3784 (3) 10 (4) 10
[400 1.32755e+06] (0) 100 (1) 0.342346 (2) 122.74 (3) 10 (4) 10
[500 171092] (0) 100 (1) 0.342346 (2) 331.989 (3) 10 (4) 10
[600 19980.3] (0) 100 (1) 0.338922 (2) 889.077 (3) 10 (4) 10
[700 1899.26] (0) 100 (1) 0.332178 (2) 2357.41 (3) 10 (4) 10
[800 370.512] (0) 100 (1) 0.243255 (2) 4683.91 (3) 10 (4) 10
[900 348.339] (0) 100 (1) 0.114472 (2) 3643.25 (3) 10 (4) 10
[1000 343.571] (0) 100 (1) 0.0502096 (2) 3040.34 (3) 10 (4) 10
[1100 342.404] (0) 100 (1) 0.019917 (2) 2805.46 (3) 10 (4) 10
[1200 342.071] (0) 100 (1) 0.0140106 (2) 2722.13 (3) 18.5321 (4) 10
...
...
...
```

Fichiers générés pour le tracé avec Gnuplot	
cmde	Fichier de commande pour Gnuplot Dans un terminal, taper gnuplot cmde pour obtenir les courbes et générer les images des courbes.
tube_chg.gnu	Droite de charge
tube_err.gnu	Carte des erreurs
tube_mod.gnu	Réseau des caractéristiques du modèle
tube_num.gnu	Réseau des caractéristiques numérisées
tube_pwm.gnu	Puissance max admissible

tube_philbob.inc (fichier du modèle pour LTSpice)

```
*-----
*      12AX7      [modèle Norman Koren paramètres philbob]
*-----
.subckt 12AX7_philbob 1 2 3;(anode grille cathode)
+ params:
+ mu   = 107.282
+ ex   = 0.900255
+ kg1  = 870.263
+ kp   = 875.025
+ kvb  = 6112.42
+ ccg  = 1.8e-12
+ cgp  = 1.7e-12
+ ccp  = 1.9e-12
e1 7 0 value=
+{v(1,3)/kp*log(1+exp(kp*(1/mu+v(2,3)/sqrt(kvb+v(1,3)*v(1,3)))))}
rel 7 0 lg
g1 1 3 value= {(pwr(v(7),ex)+pwrs(v(7),ex))/kg1}
rcp 1 3 lg
```

```

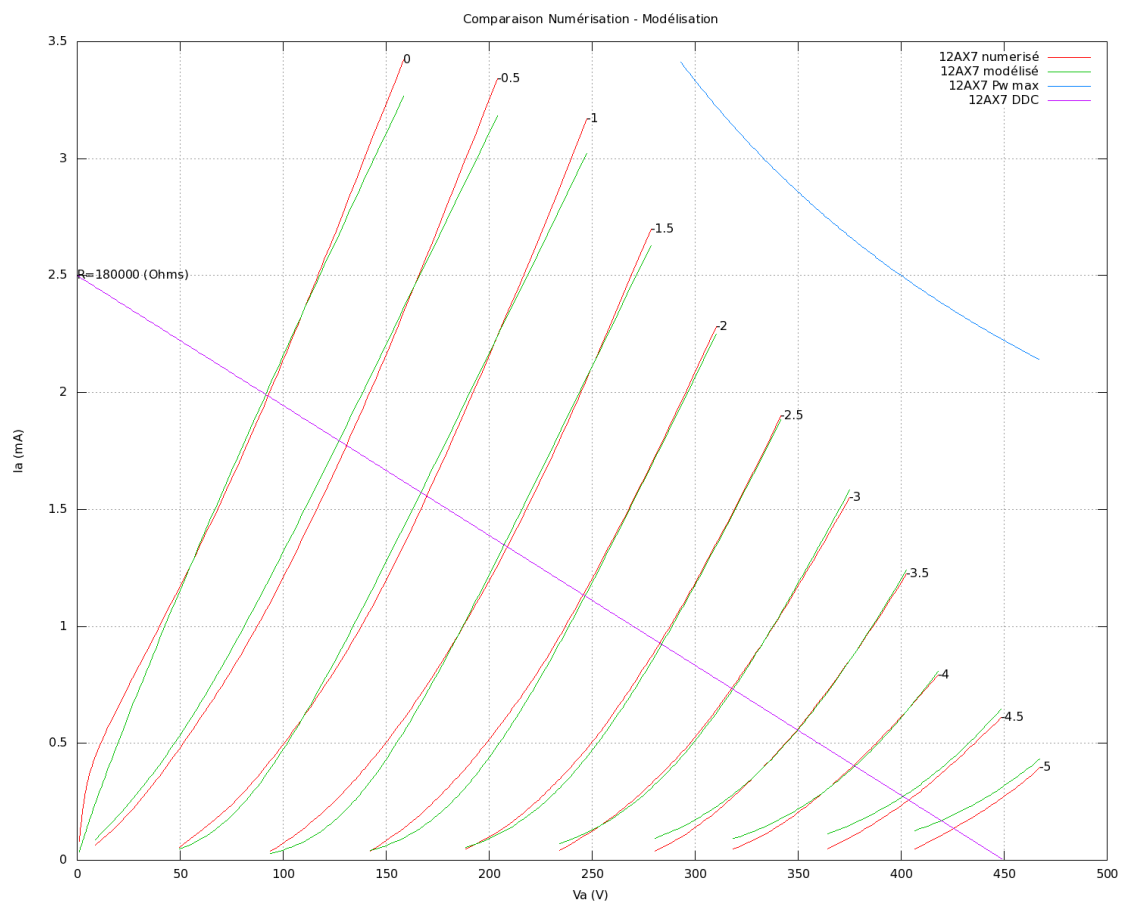
c1 2 3 {ccg}
c2 1 2 {cgp}
c3 1 3 {ccp}
.ends
*-----

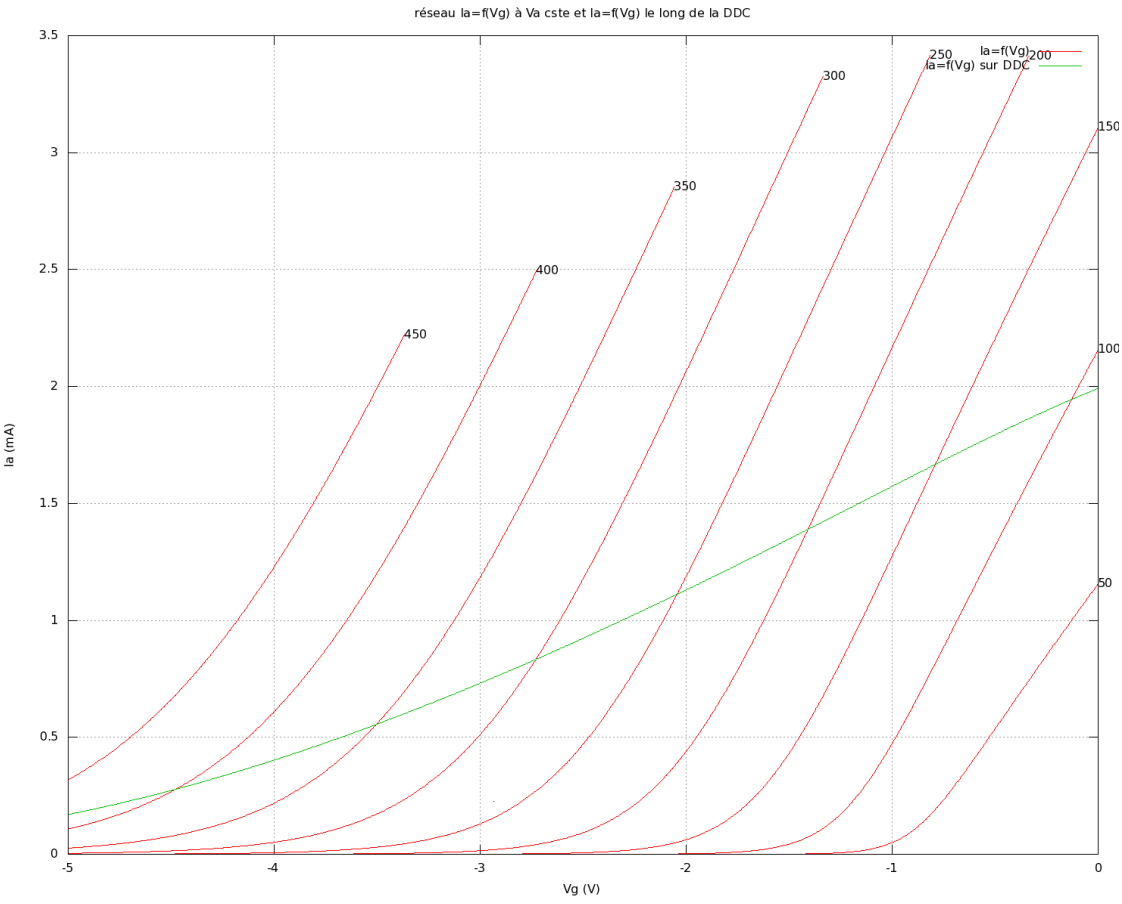
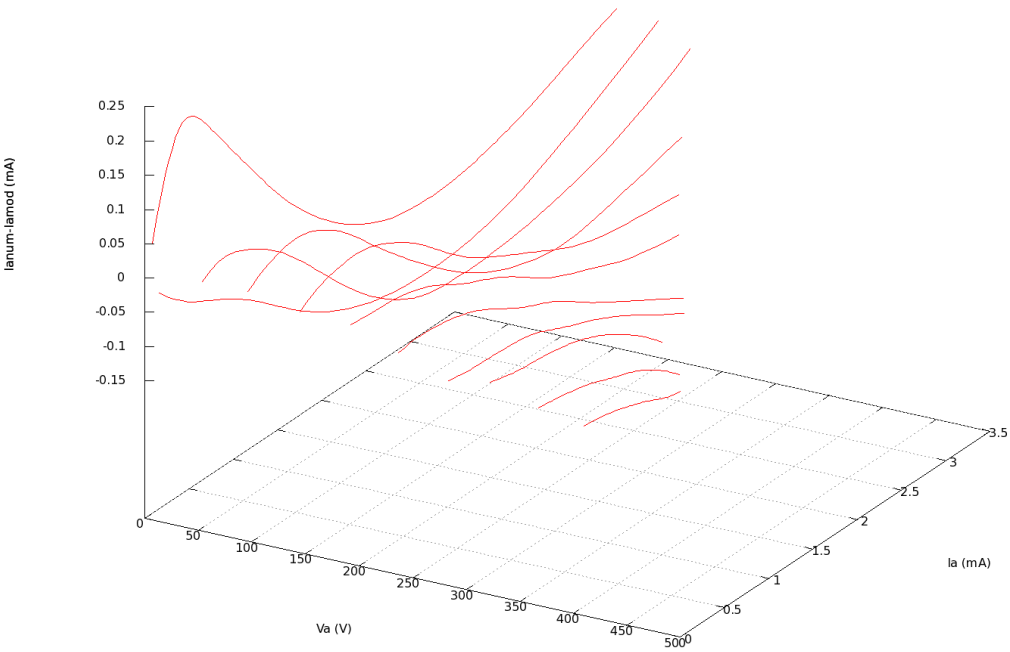
```

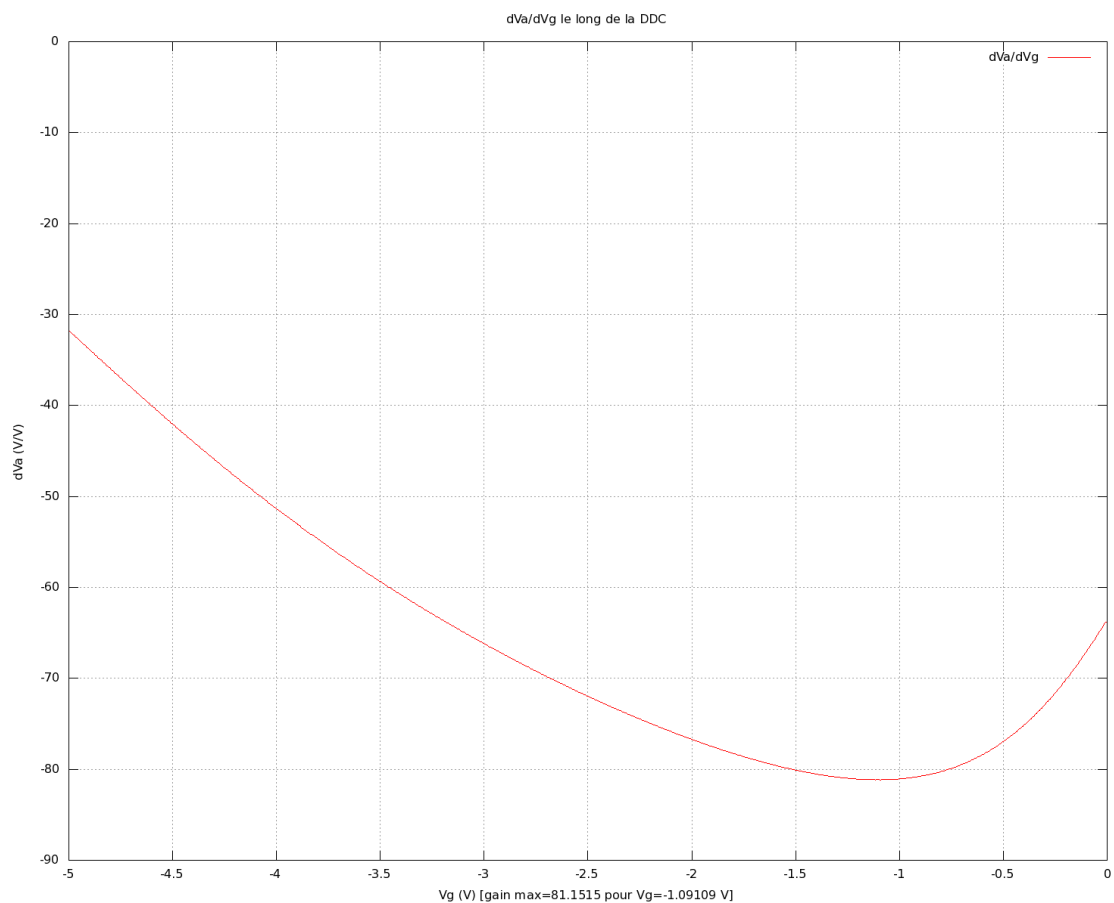
9 Exemple 12AX7

C'est cet exemple que j'ai utilisé pour écrire les chapitres ci dessus. Je ne rappelle donc pas les fichiers 12AX7.prm et 12AX7_philbob.inc

Voici les sorties pour le tube 12AX7. (commande gnuplot cmde lancée dans un terminal)







10 Exemple 6SN7GT

Voici le fichier de configuration. Au départ, j'indique un μ de 20, valeur attendue d'après la datasheet. Je fixe également 1,5 pour l'exposant. Pour le reste je fixe les paramètres à 10.

6SN7GT.cfg

Modélisation de triode par le modèle Norman Koren

paramètres employés

mu gain du tube

expo exposant (d'après Langmuir-Child) 3/2

kg1 influence de la tension de grille par rapport à la tension de

plaque

kp raideur de passage à zéro

kvb

nombre de paramètres

#nbparam

5

valeurs de départ

#paramètre

20

```

1.5
10
10
10

optimisation+tracé ou tracé seul ?
mettre 1 pour optimisation + tracé
mettre 0 pour tracé seul (dans le cas ou les paramètres sont déjà bons)
#optimise
1

Valeur de la droite de charge prévue (sert de pondération aux points de
controle)
Vamax      tension de plaque max à courant de plaque nul (en V)
Iamax      courant de plaque max à tension de plaque nulle (en A)
Poids      coefficient de pondération pour la droite de charge
            mini 0: toutes les courbes ont égale influence
            maxi >0: les points des courbes proches de la droite de
charge ont plus d'influence
#charge
400
0.02
1

capacités parasite en picoF
grille-anode
#cgp
4

anode-cathode
#ccp
0.8

grille-cathode
#ccg
2.8

```

Instantané du déroulement du programme C:

```

...
...
...
0000+ 49.0103 [6.58261e-08] 1.06112e-05
0000+ 49.0103 [5.91349e-08] 1.06112e-05
0000+ 49.0103 [5.24434e-08] 1.06112e-05
0000+ 49.0103 [4.5752e-08] 1.06112e-05
0000+ 49.0103 [3.906e-08] 1.06112e-05
0000+ 49.0103 [3.23679e-08] 1.06112e-05
0000+ 49.0103 [2.5676e-08] 1.06112e-05
0000+ 49.0103 [1.89835e-08] 1.06112e-05
0000+ 49.0103 [1.22909e-08] 1.06112e-05
0000+ 49.0103 [5.59826e-09] 1.06112e-05
00000 49.0103 [0] 1.06112e-05

optimisation terminée

```

```
erreur initiale (somme des carrés en mA**2)
5.92443e+11
erreur finale (somme des carrés en mA**2)
49.0103
nombre d'itérations
5205

p[0] 20 ---> 21.5304
p[1] 1.5 ---> 1.33935
p[2] 10 ---> 1329.29
p[3] 10 ---> 147.535
p[4] 10 ---> 1043.41
Vgmax Vgmin 0 -24
tracé de la caracteristique mutuelle
tracé de la dérivée
gain max 16.091 pour polar à -1.75375 (V)

----- fin -----
```

A noter qu'il y a eu 5205 itérations pour converger.

Les paramètres optimisés sont visibles dans le fichier 6SN7GT.prm

```
6SN7GT.prm

Optimisation des paramètres Norman Koren du tube 6SN7GT

paramètres de départ
#depart
20
1.5
10
10
10

conditions d'optimisation

droite de charge

tension plaque max pour courant plaque nul (V)
#Va0
400

courantt plaque max pour tension plaque nulle (A)
#Ia0
0.02

résistance de charge (Ohms)
#resist
20000

coefficient de pondération de la droite de charge
#coef
1

somme des carrés des écarts du modèle aux paramètres initiaux (mA**2)
#ecart
5.92443e+11
```

```
nombre d'itérations
5205

somme des carrés des écarts du modèle aux paramètres optimisés (mA**2)
#ecart
49.0103

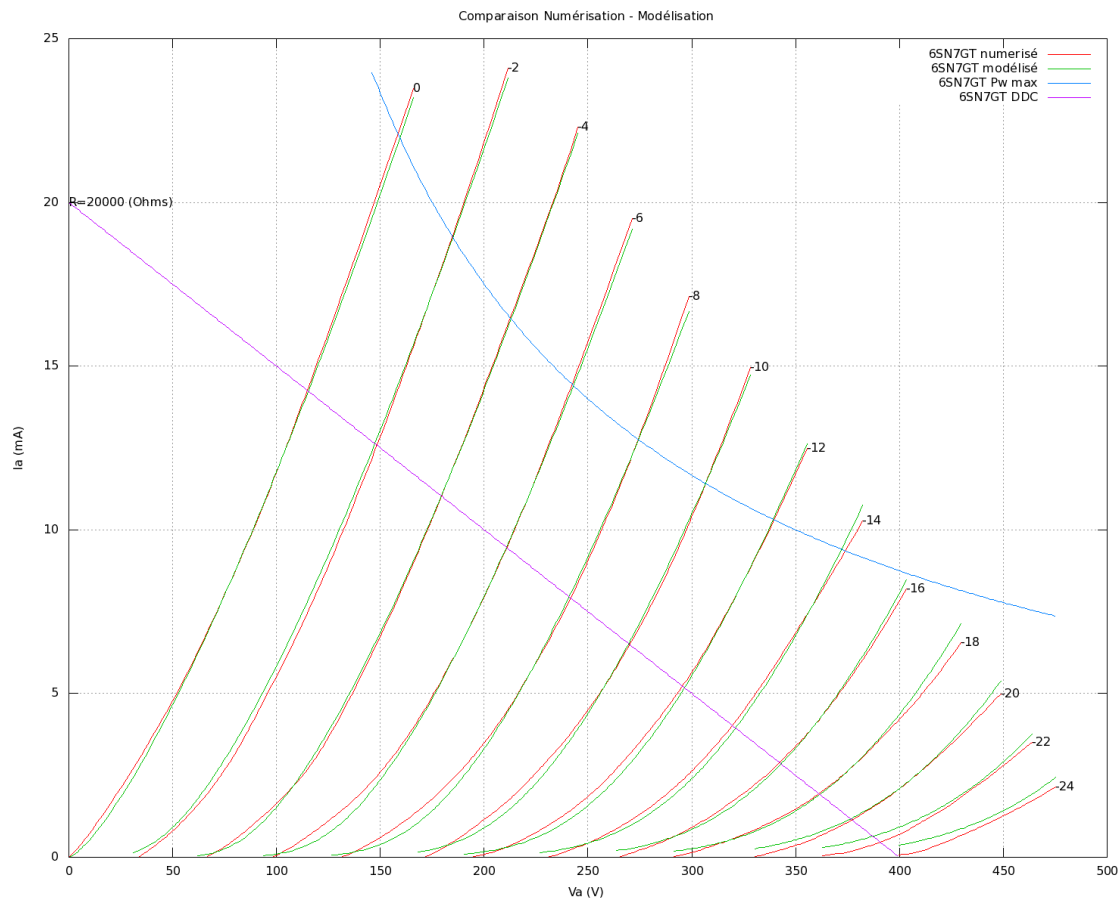
paramètres optimisés
#optimise
21.5304
1.33935
1329.29
147.535
1043.41
```

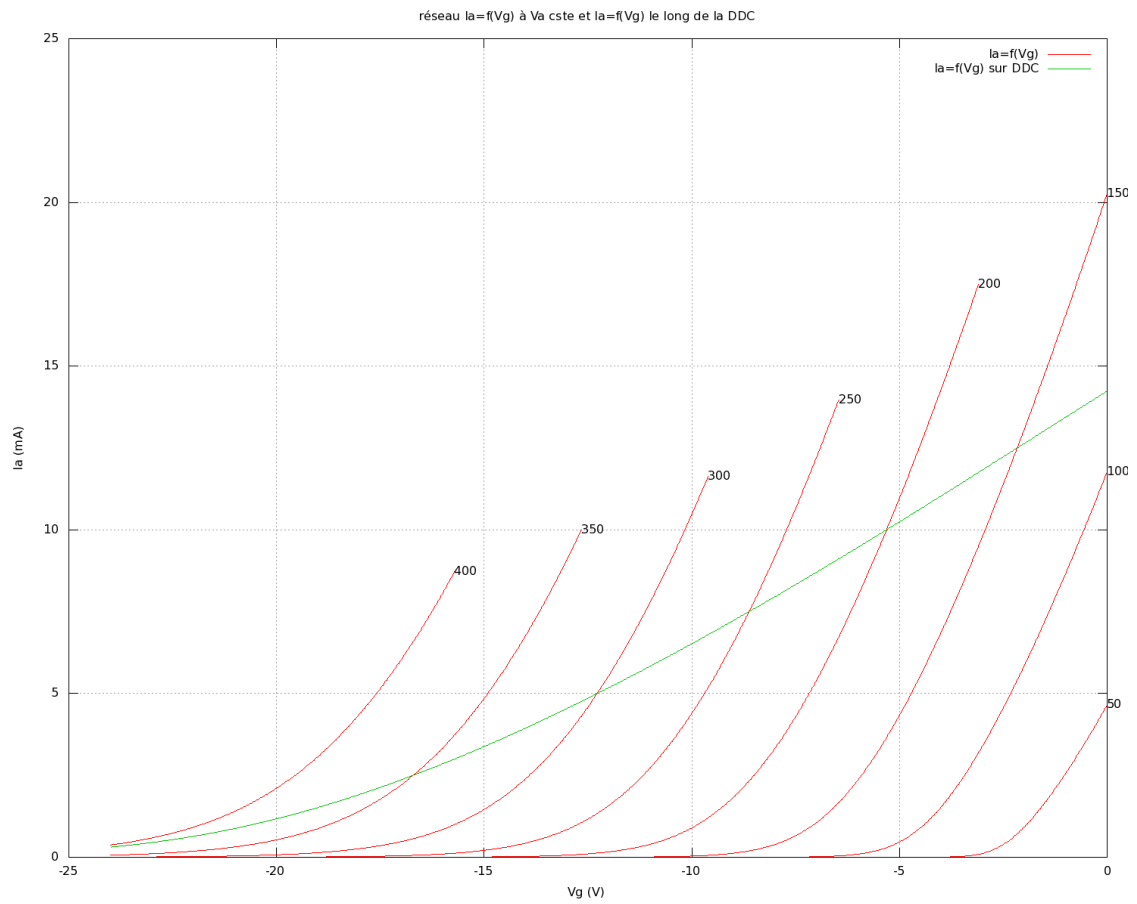
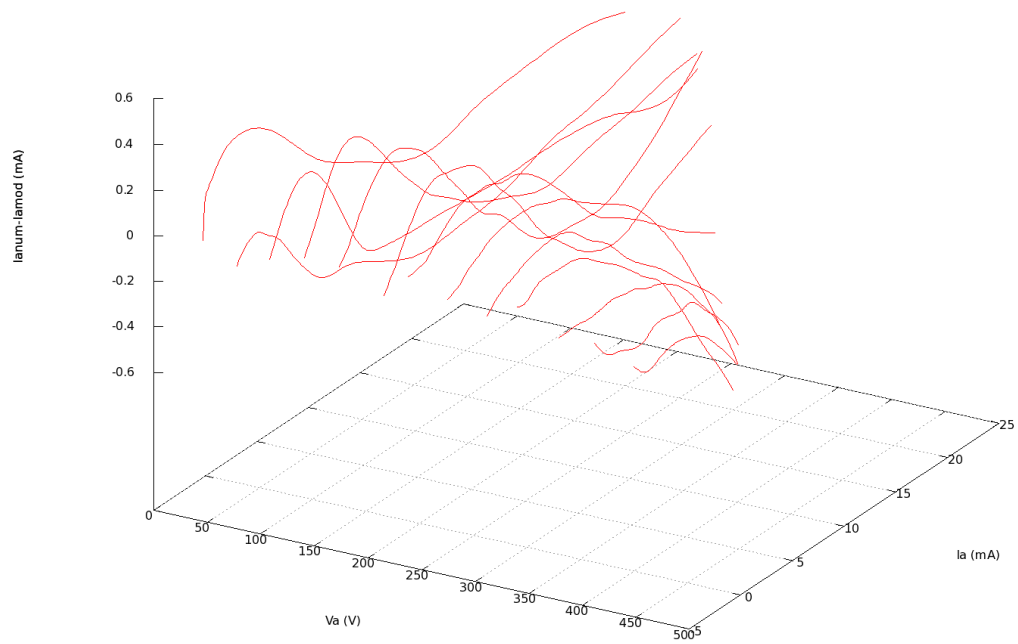
Et voici le fichier du modèle pour LTSpice

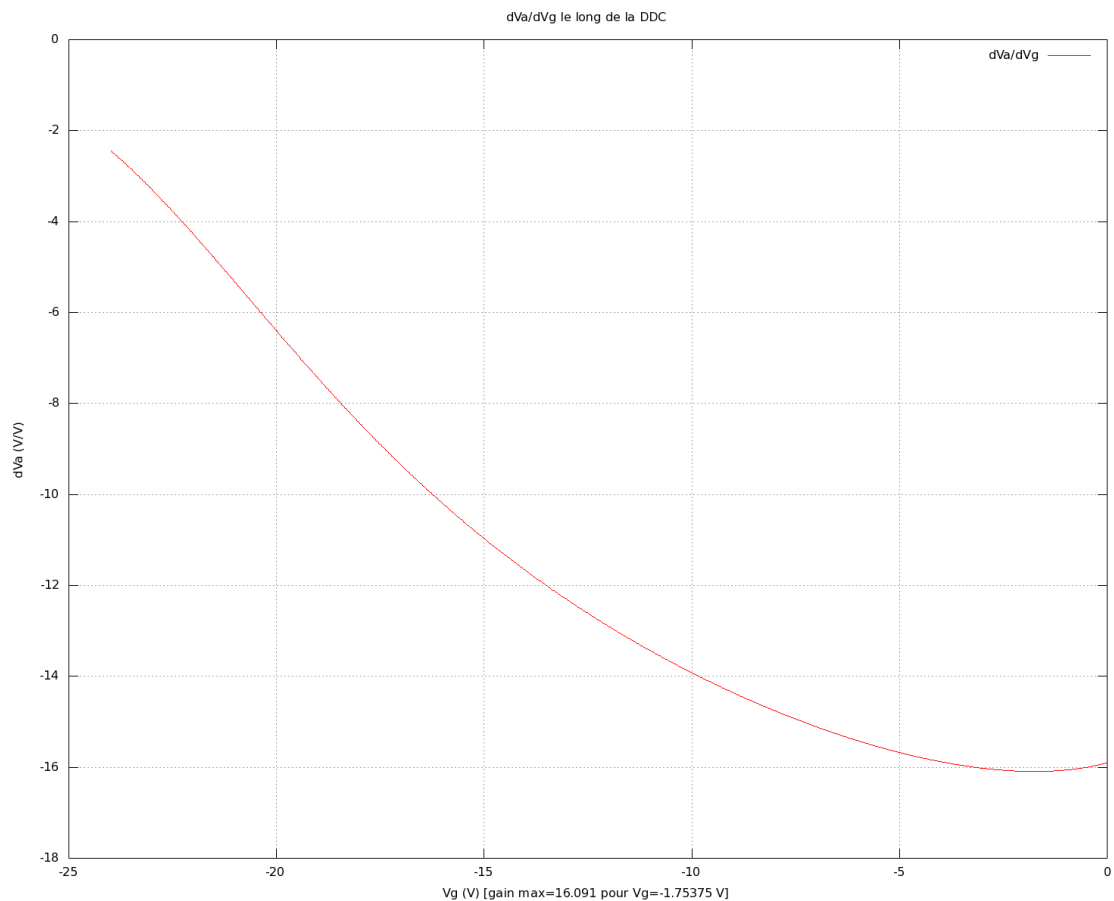
6SN7GT_philbob.inc

```
* -----
*      6SN7GT      [modèle Norman Koren paramètres philbob]
* -----
-----
.subckt 6SN7GT_philbob 1 2 3;(anode grille cathode)
+ params:
+ mu  = 21.5304
+ ex  = 1.33935
+ kg1 = 1329.29
+ kp  = 147.535
+ kvb = 1043.41
+ ccg = 2.8e-12
+ cgp = 4e-12
+ ccp = 8e-13
e1 7 0 value=
+{v(1,3)/kp*log(1+exp(kp*(1/mu+v(2,3)/sqrt(kvb+v(1,3)*v(1,3)))))}
re1 7 0 lg
g1 1 3 value= {(pwr(v(7),ex)+pwrs(v(7),ex))/kg1}
rcp 1 3 lg
c1 2 3 {ccg}
c2 1 2 {cgp}
c3 1 3 {ccp}
.ends
* -----
-----
```

Détails des caractéristiques:







11 Exemple 300B

Même démarche avec une triode de puissance

300B.cfg

Modélisation de triode par le modèle Norman Koren

paramètres employés

mu gain du tube

expo exposant (d'après Langmuir-Child) 3/2

kg1 influence de la tension de grille par rapport à la tension de plaque

kp raideur de passage à zéro

kvb

nombre de paramètres

#nbparam

5

```

valeurs de départ
#paramètre
4
1.5
10
10
10

optimisation+tracé ou tracé seul ?
mettre 1 pour optimisation + tracé
mettre 0 pour tracé seul (dans le cas ou les paramètres sont déjà bons)
#optimise
1

Valeur de la droite de charge prévue (sert de pondération aux points de
contrôle)
Vamax      tension de plaque max à courant de plaque nul (en V)
Iamax      courant de plaque max à tension de plaque nulle (en A)
Poids      coefficient de pondération pour la droite de charge
            mini 0: toutes les courbes ont égale influence
            maxi >0: les points des courbes proches de la droite de
charge on plus d'influence
#charge
500
0.1
100

capacités parasite en picroF
grille-anode
#cgp
15

anode-cathode
#ccp
4.1

grille-cathode
#ccg
8.5

```

300B.prm

Optimisation des paramètres Norman Koren du tube 300B

```

paramètres de départ
#depart
4
1.5
10
10
10

conditions d'optimisation

droite de charge

tension plaque max pour courant plaque nul (V)
#Va0
500

```



```

courantt plaque max pour tension plaque nulle (A)
#Ia0
0.1

résistance de charge (Ohms)
#resist
5000

coefficient de pondération de la droite de charge
#coef
100

somme des carrés des écarts du modèle aux paramètres initiaux (mA**2)
#ecart
3.0127e+13

nombre d'itérations
5924

somme des carrés des écarts du modèle aux paramètres optimisés (mA**2)
#ecart
277571

paramètres optimisés
#optimise
4.07737
1.45191
1379.53
50.032
1787.88

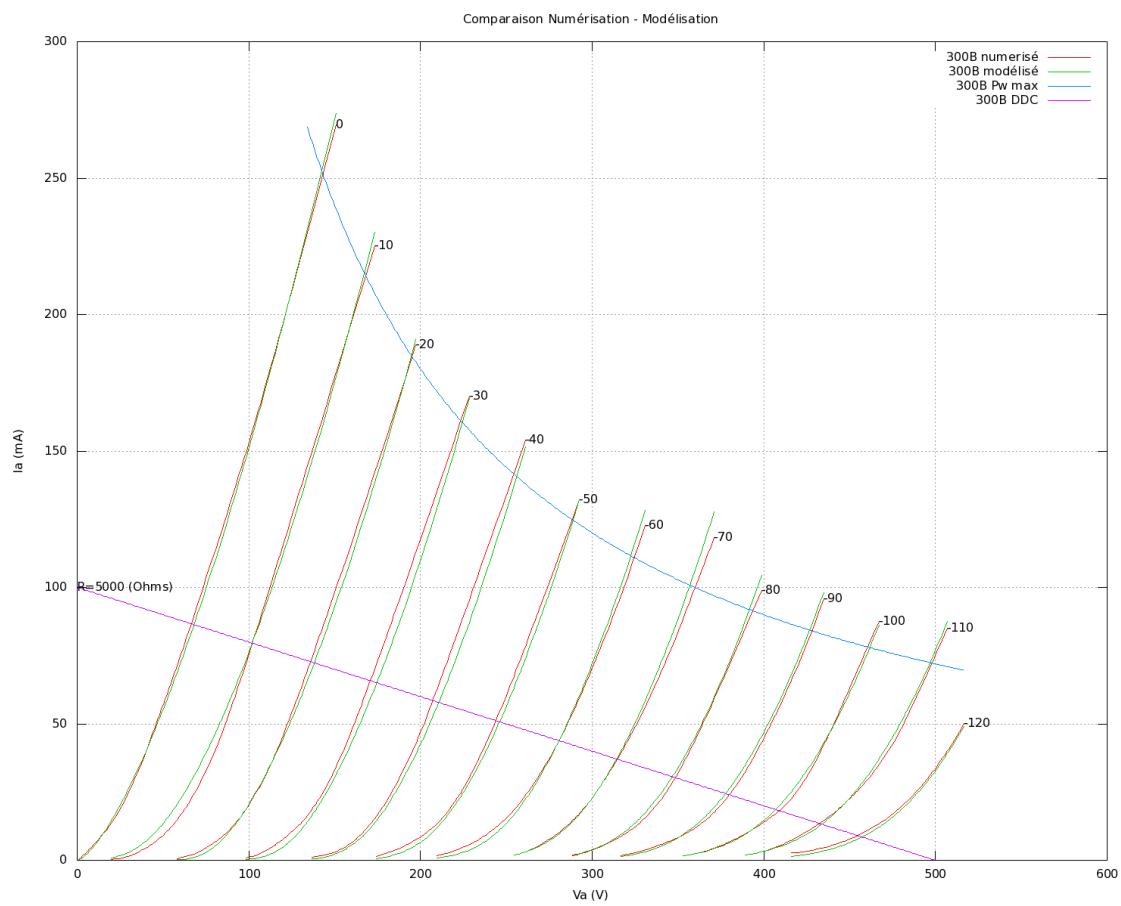
```

300B_philbob.inc

```

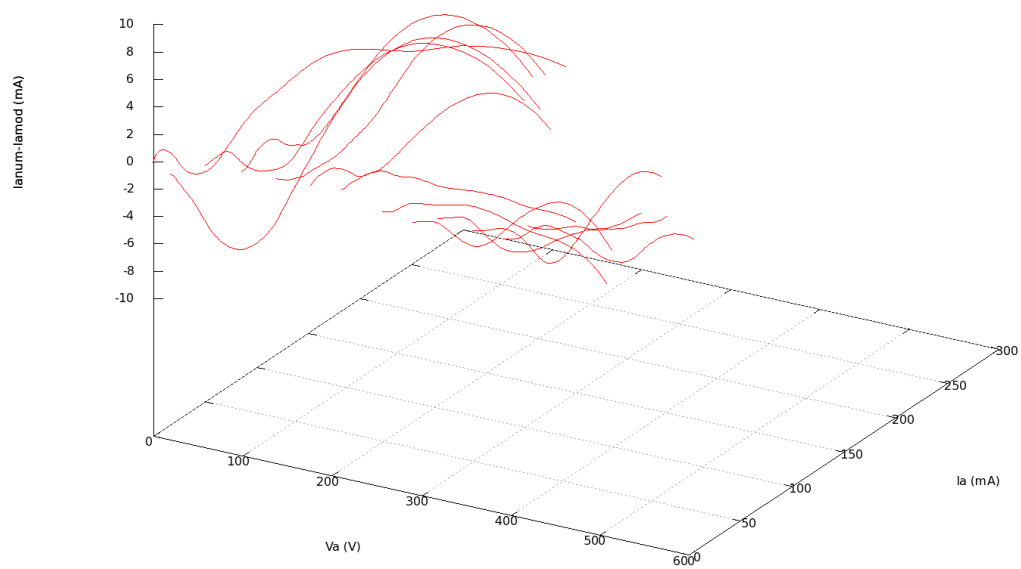
*-----
*
*      300B      [modèle Norman Koren paramètres philbob]
*-----
*
*-----
.subckt 300B_philbob 1 2 3;(anode grille cathode)
+ params:
+ mu   = 4.07737
+ ex   = 1.45191
+ kg1  = 1379.53
+ kp   = 50.032
+ kvb  = 1787.88
+ ccg  = 8.5e-12
+ cgp  = 1.5e-11
+ ccp  = 4.1e-12
e1 7 0 value=
+{v(1,3)/kp*log(1+exp(kp*(1/mu+v(2,3)/sqrt(kvb+v(1,3)*v(1,3)))))}
rel 7 0 lg
g1 1 3 value= {(pwr(v(7),ex)+pwrs(v(7),ex))/kg1}
rcp 1 3 lg
c1 2 3 {ccg}
c2 1 2 {cgp}
c3 1 3 {ccp}
.ends
*-----
*
*-----

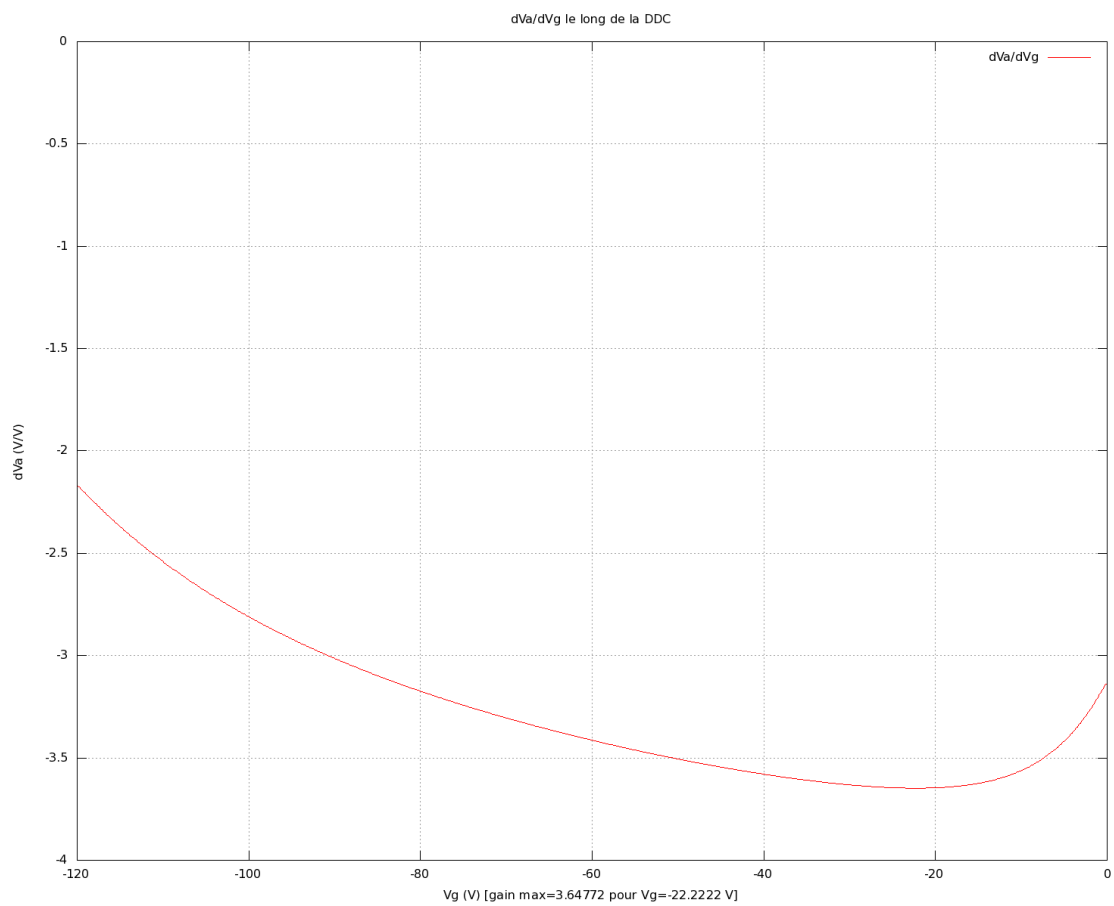
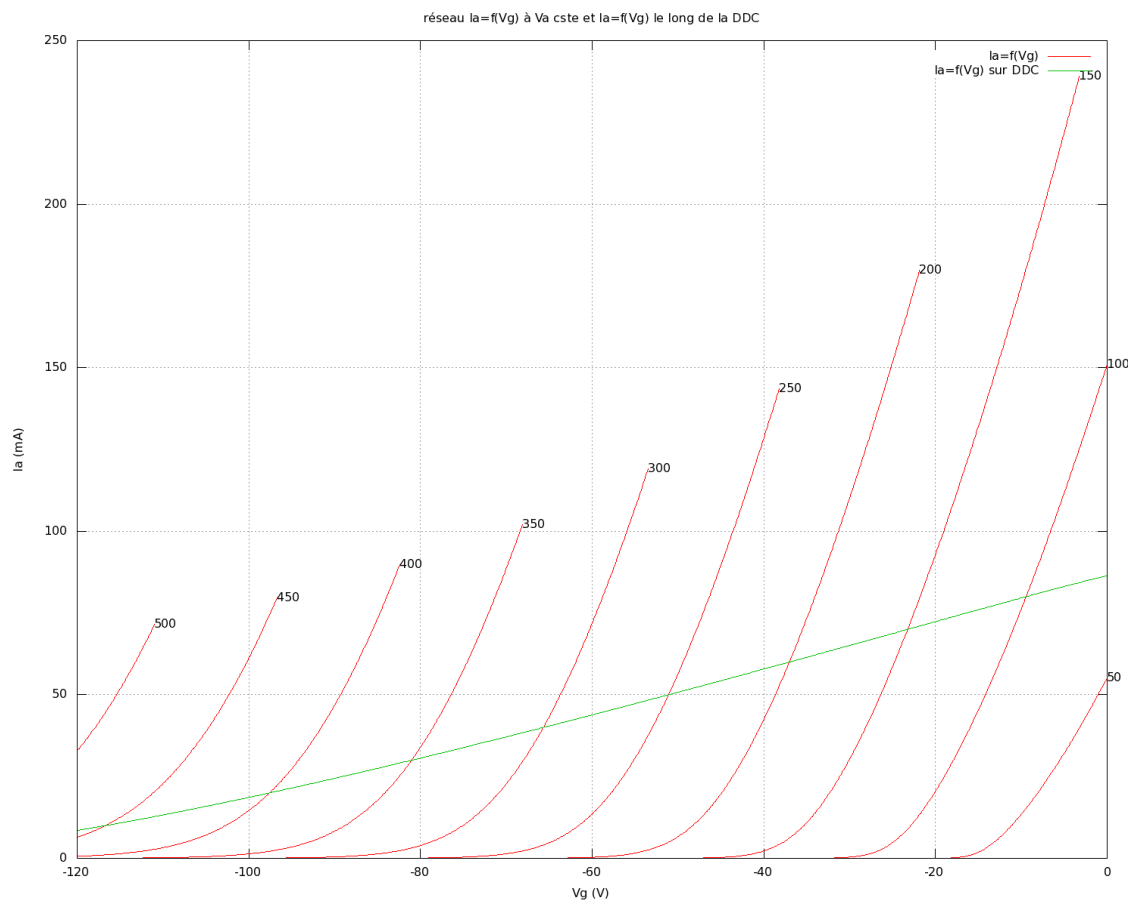
```



Ecart Numérisation-Modélisation

300B ecart





12 Conclusion

L'outil permet de déterminer sans trop de difficultés les paramètres du tube suivant le modèle établi par Norman Koren. Le fichier *.inc permet de tester rapidement le modèle sous LTSpice. L'acuité du modèle réside à la fois dans les données numérisées ainsi que dans les choix d'optimisation (droite de charge).

Concernant les tubes de sortie, la notion de DDC n'est utile que pour la pondération entre les points numérisés et les points calculés. En effet, un transformateur de sortie ne se comporte pas comme une charge purement résistive.

Le courant de grille n'est pas simulé. Il peut l'être par une diode en série avec une résistance entre grille et cathode. La valeur de cette résistance restant bien entendu à déterminer