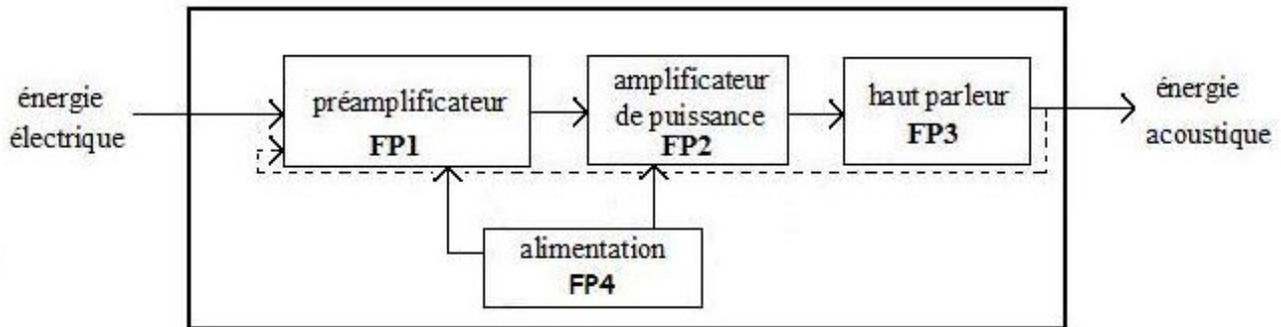


I introduction

Notre projet part sur un constat : dans n'importe quel studio d'enregistrement ou concert, les signaux passent à coup sûr par des tubes. Ceux ci furent les premiers composants actifs de l'histoire de l'électronique. Née il y a plus d'un siècle et disparu complètement dans les années 70 avec l'avènement du semi-conducteur.

A l'air du numérique, il est devenue très difficile de se documenter sérieusement sur ce composant devenu obsolète dans presque tous les domaines et les seules livres intéressants encore disponibles à son sujet se comptent sur les doigts de la main.

schéma bloc d'un amplificateur :



La conception d'un amplificateur audio tel qu'il soit comporte obligatoirement tous ces éléments mais on trouve parfois (surtout en Hi-Fi) une boucle de contre-réaction partant de la sortie de l'ampli de puissance et allant sur le pré-amplificateur

-**FP1** : le pré-amplificateur : son rôle est d'amener le signal électrique d'entrée de l'ordre du mV à un niveau plus élevé dit de ligne de l'ordre du volt. Il va également modifier le signal d'entrée via un correcteur de tonalité, produire de la distorsion harmonique...
On retrouve toujours dans celui ci un étage d'adaptation d'impédance avec une impédance d'entrée forte pour éviter les pertes par rapport à la source (de tension).

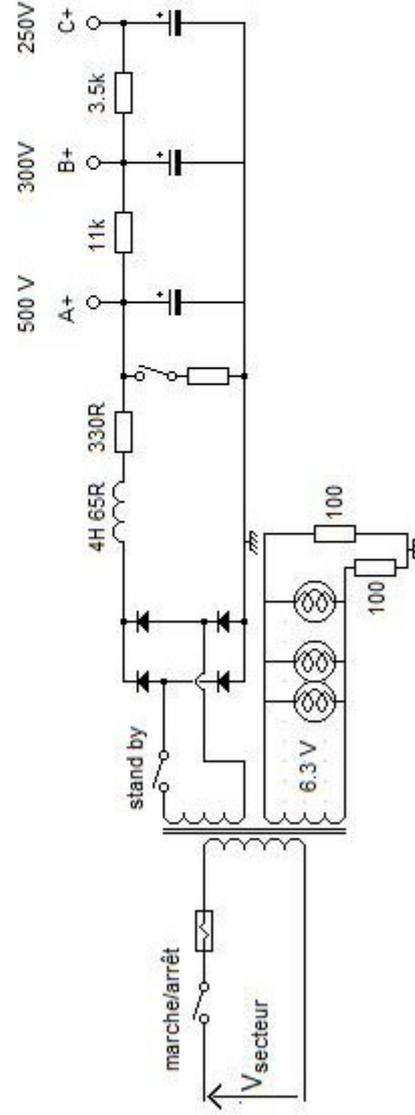
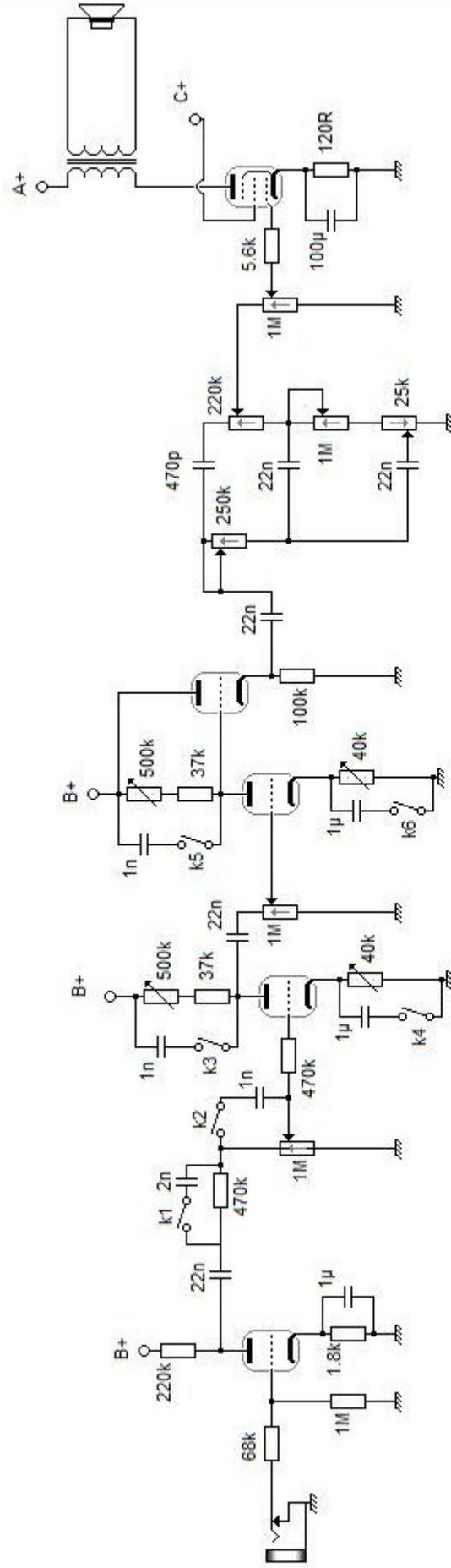
-**FP2** : l'amplificateur de puissance : Il produit les forts courants nécessaires pour faire bouger la membrane des hauts parleurs. Dans ce but il va falloir fournir au signal audio l'énergie issue de l'alimentation. Pour la conception d'un ampli de puissance plusieurs choix de type d'amplification s'offrent : classe A1,A2,AB.....

-**FP3** : Le Haut Parleur à partir de l'amplificateur de puissance convertit le signal électrique en énergie mécanique (=transducteur électromécanique) produisant l'onde sonore.

-**FP4** : l'alimentation fournit l'énergie électrique au montage. Elle comporte deux parties distinctes réparties sur deux enroulements sur le secondaire : la partie haute tension qui est continu (généralement supérieur au secteur) et la partie alimentation des filaments qui s'effectue en alternatif ou en continu.

-L'interaction simple entre pointillé entre la sortie du haut parleur et l'entrée du pré-amplificateur est l'effet larsen : c'est une contre réaction acoustique intervenant lorsque le son émit par le haut parleur est capté par le micro de la guitare qui le retransmet amplifié au haut parleur en créant ainsi une boucle infinie entre ces éléments, produisant un signal qui augmente progressivement en fréquence et en intensité jusqu'à atteindre les limites du matériel utilisé, avec le risque de l'endommager ou même de le détruire.

Ce son est très aiguë et strident. Sa fréquence dépend de plusieurs facteurs : les fréquences de résonances des composants, la distance séparant émetteur et récepteur, les propriétés acoustiques du lieu.



PROJET TECHNO EEA2

05/2009

par Mickael KERJEAN et
Mathieu FARETIE

II Les tubes électroniques

Par analogie avec les semi-conducteurs, les diodes à jonctions PN trouvent leurs équivalents aux tubes à vides, les transistors à jonction NPN ou effet de champ de canal N à la triode, tétrode ou penthode, mais les PNP ou les MOS à canal P n'ont quant à eux pas d'équivalence.

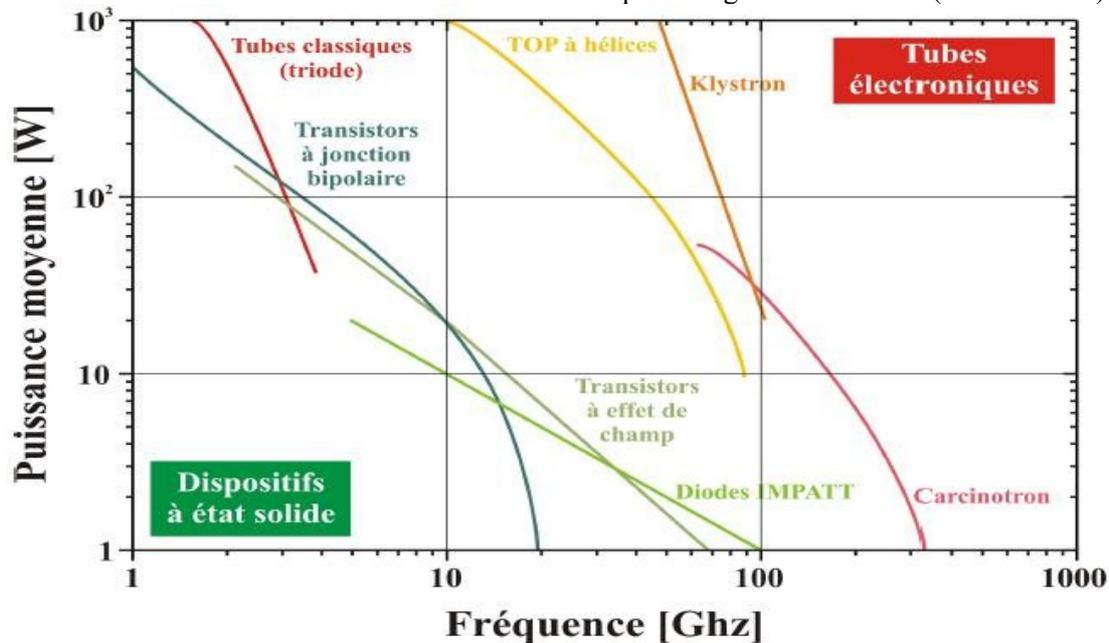
A- Pourquoi utilise t'on encore des tubes?

Dans l'amplification audio on trouve deux grandes classes technologiques :

- les amplificateurs analogiques utilisant comme composants actifs des tubes ou des transistors (JFET) représentant la majorité des amplificateurs du commerce.
- les amplificateurs numériques, encore inconnus il y a 5ans, se développent très vite. Le signal analogique est convertit en signal numérique afin de le traiter grâce à des algorithmes.

Le tube électronique à longtemps été le seul composant actif existant et a été abandonné au fur et à mesure avec l'avènement du transistor mais il reste cependant quelques domaines où les tubes sont largement préférés par rapport à leurs homologues transistors notamment dans tous les cadres audiophiles ne nécessitant pas de puissance démesurée.

De part leur bande passante inégalée par les semi-conducteurs, l'amplification hyperfréquence très utilisée dans le domaine des télécommunications se fait uniquement grâce à des tubes (KLYSTRON).



INCONVENIENTS

- Les tubes sont chers : une dizaine d'euros minimum pour un tube de pré amplification et une quinzaine d'euros minimum pour un tube d'amplification (on trouve des tubes à plus de 400 euros comme par exemple le plus luxueux: le we300).
- très gourmand en énergie
- encombrant
- fragile (enveloppe en verre)
- sensible aux vibrations
- ses caractéristiques μ Ri et S ne sont jamais fixe (à l'origine d'une distorsion harmonique)
- faible durée de vie.

AVANTAGES

- Ils réagissent bien mieux à des pics de courant que les transistors et génèrent naturellement une distorsion harmonique très recherchée dans le domaine de l'audio : dans le domaine musical on parle de la compression naturelle des lampes.
- facilement interchangeable
- robuste

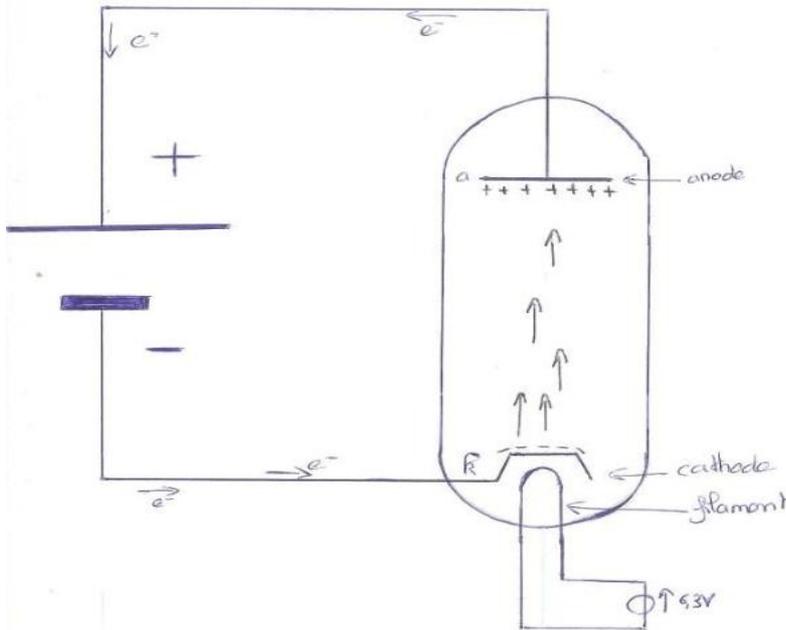
Info : Il existe un transistor utilisé dans des cadres audiophiles permettant de simuler " l'effet lampes ". Ce sont des transistors à effet de champs sont de technologie jfet.

B- principe physique de fonctionnement

La théorie du tube électronique n'étant pas tenable en quelques pages on a exposé uniquement les principes fondamentaux indispensables à la compréhension du projet et ainsi volontairement omis d'exposer beaucoup de cette théorie.

1) Le tube à vide

Un tube à vide est composé de l'anode formée par la plaque dans laquelle se trouve la cathode qui entoure le filament chauffant.



Le fonctionnement du tube est régi par trois phénomènes physiques:

- l'effet thermoionique ou effet Edison : Si un corps conducteur est chauffé, l'agitation de ses atomes devient telle que des électrons libres sont expulsés à l'extérieur de l'électrode. Le conducteur se trouve alors entouré d'un "nuage d'électrons" appelé charge d'espace.
- Deux charges de même signe se repoussent alors que deux charges de signe contraire s'attirent
- Les électrons portent une charge négative.

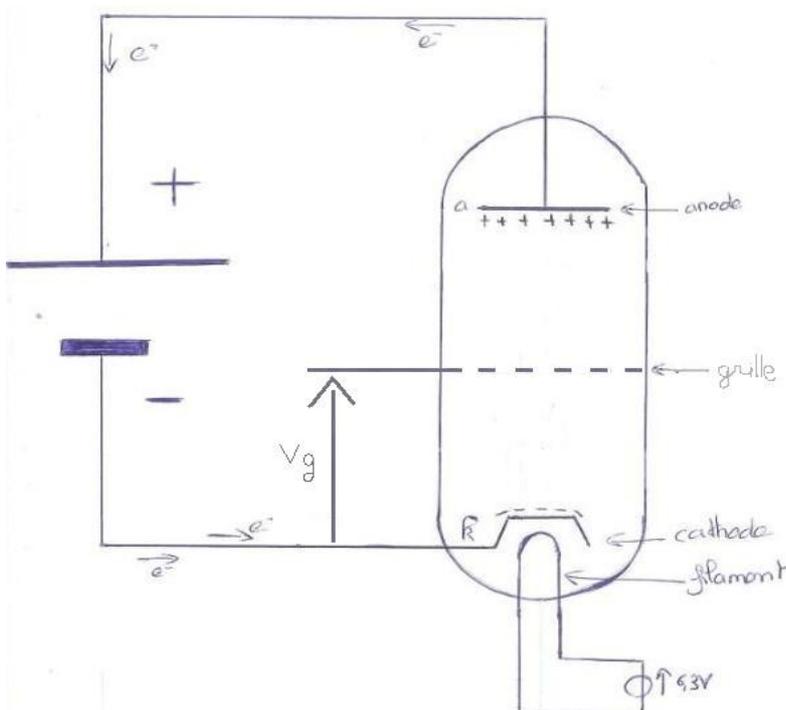
Grâce à l'effet Edison quand le filament s'échauffe, les électrons quittent la cathode mais ceux-ci sont attirés vers l'anode à cause du champ électrique imposé par le potentiel d'anode (de charge positive).

C'est ce déplacement d'électron qui est à l'origine du courant qui traverse le tube courant ($i = dq/dt$)

2) fonctionnement d'une triodes

Lee de Forest eut l'idée en 1906 de placer dans un tube à vide une autre électrode appelée grille de commande : le premier composant actif de l'histoire de l'électronique était né.

Le rôle de la grille est de moduler le débit des électrons et donc le courant qui circule entre la cathode et l'anode.



- Plus la grille est portée à un potentiel négatif, moins les électrons iront dans l'anode car les électrons sont repoussés par la grille de même charge qu'elle. (on appelle la valeur de cut off la valeur pour laquelle la grille est tellement négative que plus aucun électron n'arrive à aller sur l'anode)

- Moins le potentiel de grille est négatif plus les électrons iront vers l'anode.

On comprend par ailleurs que si la tension de grille est positive, une partie des électrons sera happée par la grille générant une distorsion pas du tout musicale : la blocking distorsion.

3) Les autres tubes audios :

3.1 Préliminaire:

Il existe d'autres tubes mais le principe de fonctionnement reste le même que pour les triodes. On les distingue par leur nombre de grilles supplémentaires. On distingue ainsi:

-Les tétrodes qui sont des triodes auxquels on a rajouté une grille s'appelant grille écran et devant être portée à un fort potentiel positif constant. Mais ce tube n'est pas utilisé en audio puisque sa distorsion harmonique (dû au nombre d'électrons absorbés par la grille écran) n'est pas du tout musical.

-Les pentodes qui ne sont que des triodes auxquels on a rajouté deux autres grilles : la grille écran devant être placée à un fort potentiel constant et la grille de suppression ou d'arrêt devant être connectée directement sur la cathode.

3.2 Pourquoi d'autres grilles?

La présence de ces grilles pallie au phénomène d'émission localisée qui peut s'expliquer comme cela : Lorsque les électrons partent de la cathode, ils sont attirés vers la plaque aussi fortement que le potentiel d'anode est fort et que le potentiel de grille est nul : dans ces circonstances le champ électrique aux quels ils sont portés peut devenir très intense et l'énergie cinétique qu'ils acquièrent est telle qu'ils peuvent arracher les électrons déjà présents sur l'anode perturbant ainsi le fonctionnement du tube.

En rajoutant des grilles on canalise le flux et on le contrôle pour que les électrons n'acquièrent jamais une énergie cinétique trop grande.

3.3 récapitulatif de l'ordre des électrodes

de l'intérieur vers l'extérieur :

-le filament chauffant

-la cathode enfermant le filament chauffant : c'est lui qui éjecte les électrons (charge négative)

-la grille de commande ou est appliqué le signal à amplifier

-la grille écran présente sur les tétrodes et les pentodes que l'on place à un fort potentiel positif constant (charge positive)

-la grille d'arrêt ou de suppression présente sur les pentodes devant être relié à la cathode (charge négative)

-l'anode ou la plaque qui entoure toutes ces électrodes ou on applique la haute tension (charge positive)

3.4 Comportement des électrons dans la tétrode et la pentode

En partant de la cathode qui est chargée négativement, les électrons sont attirés vers la grille écran

-dans le cas des tétrodes, une grande partie des électrons est absorbée par cette grille car la grille écran ainsi que l'anode sont chargés positivement : produisant une distorsion non agréable à l'écoute.

-dans le cas des pentodes, une fois les électrons sur la grille écran ceux-ci sont de nouveau attirés par la grille d'arrêt de charge négative et vont au final sur l'anode de charge positive sans que dans des conditions normales d'utilisation les électrons ne soient absorbés par une grille

La plupart du temps, les tubes de préamplification sont des triodes et les tubes de puissances des pentodes.

On utilise principalement sur le préamplificateur des ecc81, ecc82, ecc83 et pour l'amplificateur de puissances des e134, 6L6, KT88 ou EL84.

C- Caractéristiques des tubes

Un tube se caractérise par 4 paramètres :

- W_a est la puissance maximale conseillée : sa valeur est donnée dans le datasheet et est représentée par l'hyperbole dans les droites des caractéristiques. Si on polarise le tube tel qu'il dissipe plus que W_a celui-ci s'use prématurément.

-sa résistance interne R_i (en ohm)

-son facteur d'amplification μ (adimensionnel)

- S (en mA/V ou mS) est la transconductance ou résistance dynamique du tube : ce paramètre traduit l'efficacité de la variation d'une tension de grille sur le courant d'anode.

La connaissance de ses paramètres nous permettra de connaître précisément : l'amplification, les impédances de cathode et d'anodes.

Le transistor voit son amplification noté β fixe (à part si on modifie la température de celui-ci), avec les tubes c'est différent car leurs caractéristiques varient dès que l'on touche à un seul paramètre (que ce soit la tension d'anode, tension de grille ou résistance de plaque).

- R_i se définit comme le rapport : $\frac{dU_a}{dI_a}$ = pente de la tangente de la courbe plate characteristics du datasheet

- S se définit comme le rapport : $\frac{dI_a}{dU_g}$ = pente de la tangente de la courbe transfer characteristics

- μ se définit par la relation $R_i \cdot S = \mu$

Pour retrouver ses paramètres on peut utiliser les graphes expérimentaux fournis dans les datasheets permettant de retrouver directement R_i , S et donc μ en traçant les tangentes.

Ce travail n'étant pas vraiment très instructif on a essayé de retrouver le modèle mathématique du tube afin de retrouver ses caractéristiques simplement par l'utilisation d'un programme.

MODELISATION IDENTIFICATION

1- première méthode d'identification

Pour trouver le modèle du tube, on devrait utiliser l'équation de Poisson dont il vient après une bonne page de calcul la loi exposant 3/2 qui régit théoriquement le comportement du tube:

$I_a = K \cdot U^{\frac{3}{2}}$ ou k est une constante. La démonstration n'apportant rien au projet nous ne l'avons pas développé.

Dans le cas de la triode la loi exposant 3/2 se traduit par : $I_a = k \cdot (U_g + D \cdot U_a)^{\frac{3}{2}}$

Nous avons donc voulu retrouver les paramètres k et D à partir des courbes trouvées dans le datasheet.

En utilisant deux points expérimentaux on trouve k et D pour $U_g = -2V$.

Le constructeur nous dit qu'au point $U_a = 250V$ $I_a = 1,2mA$ on a $R_i = 62500\Omega$ $S = 1,6mA/V$ et $\mu = 100$

À partir des paramètres k et D obtenus on trouve en faisant quelques dérivés $R_i = 65000\Omega$, $S = 1mA/V$
 $\mu = 1/D = 62$ $\mu = R_i \cdot S = 64$

Conclusion : notre équation de départ ne nous donne pas l'allure exacte de notre courbe mais une courbe approchée inexploitable si on veut en extraire les caractéristiques du tube.

De plus cette courbe n'est même pas définie pour des $U_g < 1V$

Il a donc fallu trouver une autre méthode et une autre approche.

La solution retenue n'est pas du tout élégante mais possède l'avantage de pouvoir s'appliquer à n'importe quelle situation.

2- méthode bourrin

La première méthode s'étant soldé par un échec on a procédé autrement :

- On a pris tout les points possibles à U_g constant et on les a mis dans un tableur (open office calc).
- En utilisant la méthode des moindres carrés à l'ordre 6 on trouve un polynôme dont la courbe représentative passe au mieux par les points que l'on pris.
- On réitéré la manipulation pour tous les U_g et on obtient ainsi autant de polynômes que de courbes.

$$I_a = a_0 + a_1 U_a + a_2 U_a^2 + a_3 U_a^3 + a_4 U_a^4 + a_5 U_a^5$$

	a0	a1	a2	a3	a4	a5
$U_g=0$	201,165214626E-6	152,537672046E-7	169,398146090E-9	-239,804220684E-11	138,259386464E-13	-265,913324184E-16
$U_g=0,5$	360,618256201E-8	878,955009131E-8	-438,138400439E-10	141,181705588E-11	-781,884905236E-14	140,819702890E-16
$U_g=1$	-184,999203223E-7	327,480973347E-8	-665,240188161E-10	123,960869029E-11	-475,620337049E-14	602,965680078E-17
$U_g=1,5$	379,797448935E-9	-243,095176508E-8	307,623398395E-10	301,786620528E-13	272,934149684E-15	-716,006371746E-18
$U_g=2$	-179,194088059E-5	442,486743069E-7	-426,096349149E-9	192,322032041E-11	-350,347954485E-14	225,611561499E-17
$U_g=2,5$	996,810191282E-5	-190,468138840E-6	137,914693266E-8	-473,367779696E-11	772,974445004E-14	-437,475063746E-17
$U_g=3$	-139,675529649E-11	346,180260813E-7	-471,026708665E-9	229,484773437E-11	-475,299675140E-14	376,720258688E-17
$U_g=3,5$	-636,080811503E-12	-676,039667269E-8	118,087313261E-9	-747,544505464E-12	196,485694739E-14	-169,682743698E-17
$U_g=4$	110,716523455E-10	-107,341641342E-5	126,800661207E-7	-561,094242180E-10	110,168264485E-12	-808,945134576E-16

On voulait ré appliquer un moindre carré sur chaque coefficient du polynôme pour avoir une seule et même expression fonction de U_g et U_a mais on obtient de très mauvais résultats.

$$\frac{d I_a}{d U_a} = a_1 + 2 a_2 U_a + 3 a_3 U_a^2 + 4 a_4 U_a^3 + 5 a_5 U_a^4$$

$$\implies R_i = \frac{1}{a_1 + 2 a_2 U_a + 3 a_3 U_a^2 + 4 a_4 U_a^3 + 5 a_5 U_a^4}$$

on devrait faire la même chose sur la courbe u_g en fonction de I_a mais on n'a pas pris le temps de le faire.

D théorie fondamentale

polarisation d'un tube

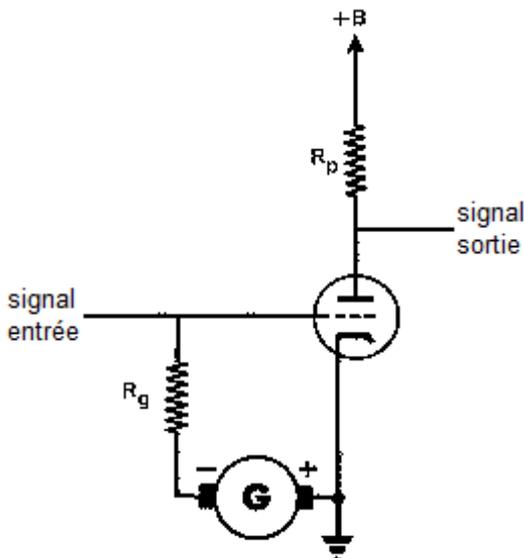
Pour faire fonctionner un tube, de la même manière qu'un transistor, il faut le polariser : c'est à dire produire diverses tensions électriques nécessaires pour fixer son point de fonctionnement et donc régler la valeur du courant continu traversant le tube. Pour cela, la tension de grille (qui correspond par abus de langage à la tension entre le potentiel de grille et celui de cathode) doit être négative.

Le choix de la polarisation du tube détermine sur le signal de sortie :

- sa dynamique c'est à dire l'amplitude du signal d'entrée qui peut être appliqué avant que le signal de sortie ne soit écrêté.
- l'amplification de l'étage (ou le gain) qui est donné comme le rapport entre l'amplitude du signal de sortie sur l'amplitude du signal d'entrée
- son taux de distorsion
- la classe d'amplification (classe A1, A2 etc...)
- sa puissance

On distingue deux méthodes de polarisation :

-Polarisation fixe :



<== schéma de principe

On utilise un enroulement de transformateur que l'on redresse et filtre à la tension voulue

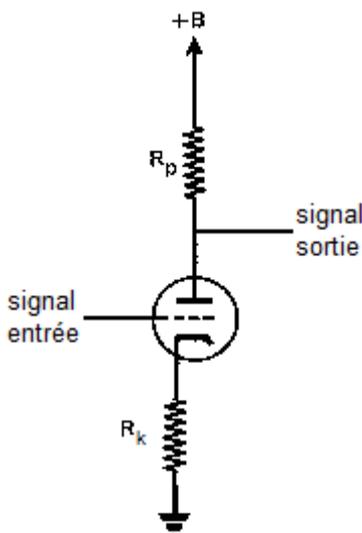
Le point de polarisation sera alors fixé par la valeur de la résistance de plaque R_p et la valeur de la tension continue modélisées sur le schéma par le générateur G.

Remarque :

Le moins du générateur n'est pas relié physiquement à la masse car le transformateur permet une isolation galvanique entre les différents secondaires.

Si c'était le cas le générateur serait court-circuité et l'ensemble ne fonctionnerait pas.

-Polarisation automatique : C'est la plus utilisée et c'est celle que nous allons utiliser.



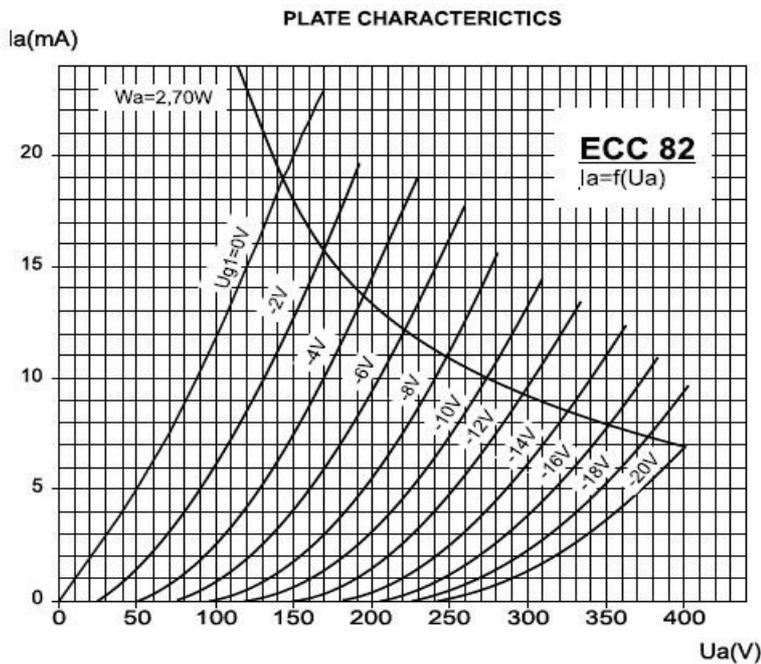
<== schéma de principe

L'ajout d'une résistance sur la cathode (R_k) produit une chute de tension proportionnelle au courant qui lui est traversé. Ainsi la cathode devient positive par rapport à la masse, rendant la grille négative par rapport à la cathode.

Il existe 3 façons d'appréhender le signal de sortie : une méthode graphique, une méthode calculatoire et l'utilisation de logiciel de simulation (comme spice).

méthode graphique

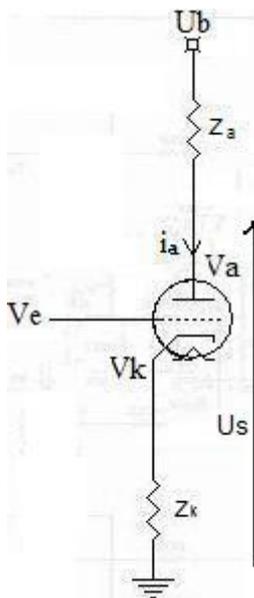
Cette méthode est basée sur l'exploitation du réseau de courbe donné dans la datasheet.



On va sur cette courbe tracer la droite de charge de notre circuit et placer un point de polarisation

Remarque :

- Comme on l'a dit précédemment la tension de grille (Ug) n'est pas la tension entre grille et masse mais la tension entre le potentiel de grille et celui de cathode
- la courbe coupant les autres représente la puissance maximale que peut dégager notre tube : on veillera a ne pas placer notre droite de charge à l'intérieur de celle ci.



Ce type de montage est celui que l'on retrouve dans la majorité des circuits :

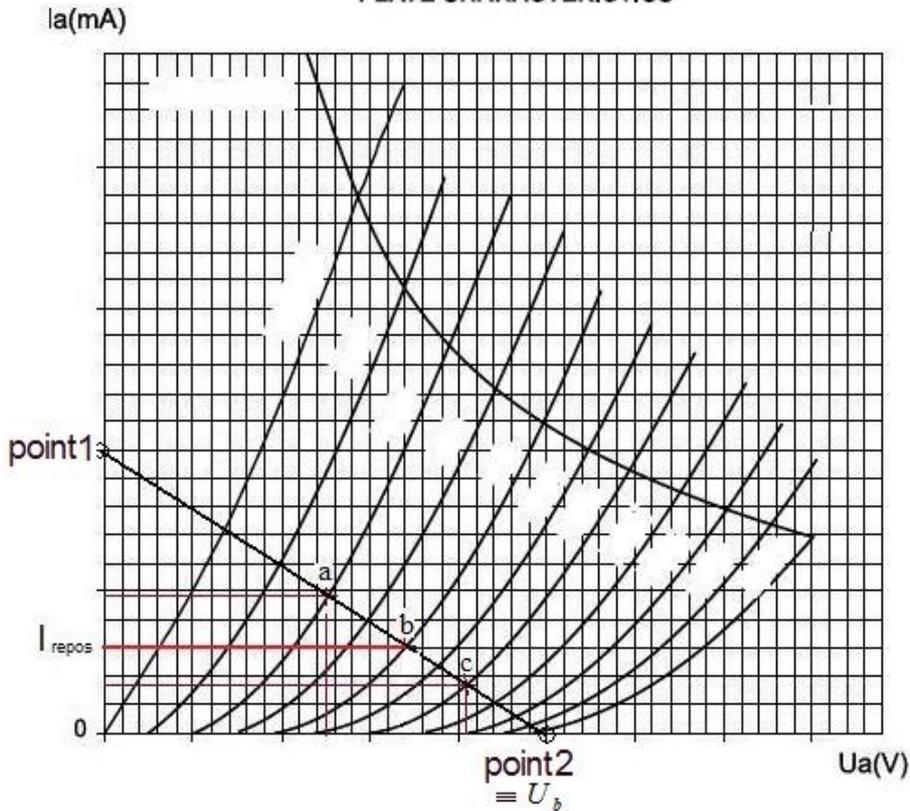
Pour tracer la droite de charge, on part de la loi des mailles

On applique la loi des mailles : $U_b = (Z_a + Z_k) I_a + V_{ak}$

on en déduit
$$I_a = \frac{U_b}{Z_a + Z_k} - \frac{V_{ak}}{Z_a + Z_k}$$

Le premier terme étant l'ordonnée a l'origine et le terme $-1/(Z_a+Z_k)$ représente la pente de la droite de charge.

PLATE CHARACTERISTICS



Au point 1 on a :

$$I_a = \frac{U_b}{Z_a + Z_k}$$

Au point 2 on a : $I_a = U_b$

Après avoir tracer la droite de charge, il nous reste à positionner le point de fonctionnement qui déterminera le courant de repos, c'est à dire le courant qui passera dans le tube en régime statique

On prend le point de fonctionnement b sur une des courbes à $U_{gk} = \text{cte}$

Une fois l'étude statique du tube

achevée, la stabilité du point de fonctionnement ne sera pas assurée en régime dynamique puisque celui ci va se promener sur la droite de charge.

Explication :

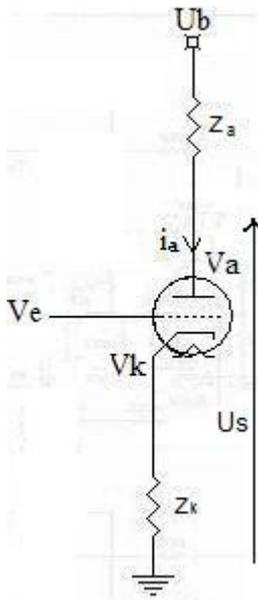
la tension de grille module le courant de plaque donc toute modification de la tension de grille entrainera une variation du courant de plaque et donc de la tension de cathode.

Pour éviter des fluctuations du courant de repos, on place en parallèle à la résistance d'anode un condensateur permettant à la tension continue de rester relativement constante et de court-circuiter ainsi la tension alternative du signal à la masse.

Ainsi on fait tomber à zéro l'influence de l'impédance de cathode sur l'amplification.

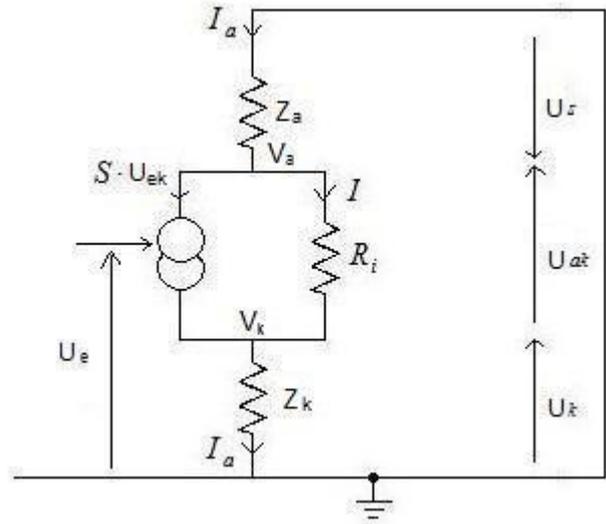
méthode numérique

1- Calcul de l'amplification théorique



En régime dynamique le schéma équivalent est \implies

(ce qui est continu sert à la polarisation, donc, pour faire le schéma équivalent en dynamique on court circuite la source de tension)



D'après la loi des nœuds : $I_a = S \cdot U_{ek} + \frac{U_{ak}}{R_i}$

Comme $R_i \cdot S = \mu$ il vient :

D'après la loi d'ohm : $U_s = -Z_a \cdot I_a$ et $U_k = Z_k \cdot I_a$

$$\implies U_k = \frac{-U_s \cdot Z_k}{Z_a} \quad (1)$$

$$\implies U_s = -Z_a \left(S \cdot U_{ek} + \frac{U_{ak}}{R_i} \right) \text{ on en sort } U_{ak}:$$

$$U_{ak} = -R_i \left(\frac{U_s}{Z_a} + S \cdot U_{ek} \right) \quad (2)$$

En appliquant la loi des mailles $U_s = U_k + U_{ak}$, il vient avec (1) + (2) :

$$U_s = \frac{-U_s \cdot Z_k}{Z_a} - \frac{U_s \cdot R_i}{Z_a} - R_i \cdot S \cdot U_{ek} \text{ comme on donne } R_i \cdot S = \mu$$

$$U_s \left(1 + \frac{Z_k + R_i}{Z_a} \right) = -\mu \cdot U_{ek}$$

$$U_s = \frac{-\mu \cdot U_{ek} \cdot Z_a}{Z_a + Z_k + R_i} \quad (3)$$

on sait que $U_s = -Z_a \cdot I_a$

donc en reprenant (3) $I_a = \frac{-\mu \cdot U_{ek}}{Z_a + Z_k + R_i}$

comme $U_{ek} = U_e - U_k$, $I_a = \frac{U_e - U_{ek}}{Z_k} \implies U_e = U_{ek} + \frac{\mu \cdot U_{ek} \cdot Z_k}{Z_a + Z_k + R_i}$

d'où $U_e = \frac{U_{ek} (Z_a + R_i + Z_k (\mu + 1))}{Z_a + Z_k + R_i}$ (4)

en faisant $\frac{(4)}{(3)}$ on exprime l'amplification A telle que :

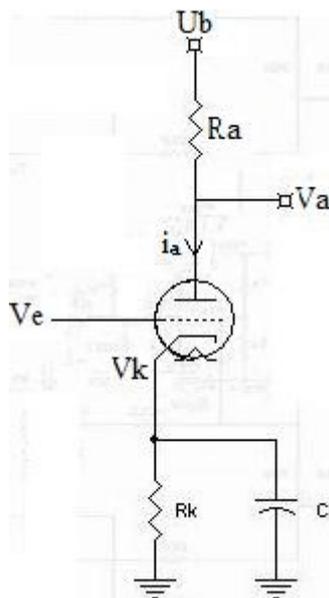
$$A = \frac{U_s}{U_e} = \frac{-\mu \cdot Z_a}{Z_a + R_i + Z_k (\mu + 1)}$$

Remarque : Le signe moins indique que U_s et U_e sont en opposition de phase

2- Calcul des fréquences de coupures induites par la capacité de découplage de cathode ou la capacité sur l'anode

Le fait de mettre des capacités sur le chemin du signal induit un filtrage que l'on a caractérisé :

-cas 1: Z_a est purement résistif et Z_k est à la fois résistif et capacitif



$$A = \frac{U_s}{U_e} = \frac{\mu \cdot R_a}{R_a + R_i + Z_k (\mu + 1)}$$

avec $Z_k = \frac{R_k}{\sqrt{1 + (R_k C_k \omega)^2}}$

A est max quand $\omega \implies +\infty$
A est nul quand $\omega \implies 0$

la capacité de cathode va donc atténuer les basses fréquences et amplifier les hautes fréquences.

l'amplification maximale du montage est :

$$A = \frac{V_s}{V_e} = \frac{-\mu \cdot R_a}{R_a + R_i}$$

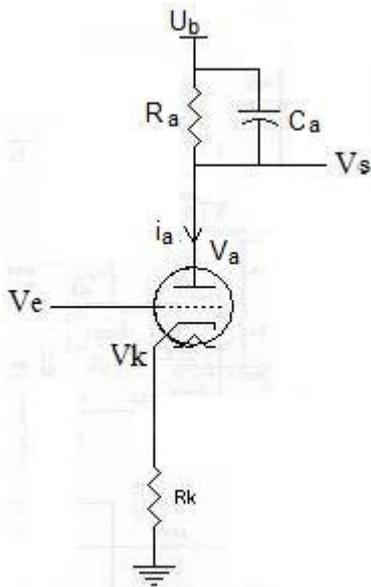
On en sort d'après la définition de la bande passante et quelques calculs :

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_k C_k} \sqrt{\left(\frac{(\mu + 1) R_k}{(R_i + R_a)(\sqrt{2} - 1)}\right)^2 - 1}$$

plus C_k est grand moins on filtre les basses fréquences et inversement.

En pratique toutes nos capacités de découplage sont de 1μ , en se plaçant dans des conditions données par le constructeur en exemple : $U_b = 250V$ $R_a = 45k$ $R_k = 1,2k$ on a $I_a = 1,2mA$ $\mu = 100$ $R_i = 62,5k$ et $S = 1,6mA/V$.
 $f_c = 336Hz$.

-cas 2 : R_k est purement résistif et Z_a est à la fois résistif et capacitif



On repart de l'expression générale

$$A = \frac{U_s}{U_e} = \frac{\mu \cdot Z_a}{Z_a + R_i + R_k(\mu + 1)}$$

avec $Z_a = \frac{R_a}{\sqrt{1 + (R_a C_a \omega)^2}}$

A est max quand $\omega \rightarrow 0$

A est nul quand $\omega \rightarrow +\infty$

la capacité d'anode va donc atténuer les hautes fréquences et laisser passer les basses fréquences

l'amplification du montage devient :

$$A = \frac{V_s}{V_e} = \mu \quad \text{On en sort d'après la définition de la bande passante}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi C_a R_a} \sqrt{\left[\frac{(\sqrt{2}-1) R_a}{R_i + R_k(\mu+1)} \right]^2 - 1}$$

ou encore $C_a = \frac{1}{2\pi f_c R_a} \sqrt{\left[\frac{(\sqrt{2}-1) R_a}{R_i + R_k(\mu+1)} \right]^2 - 1}$

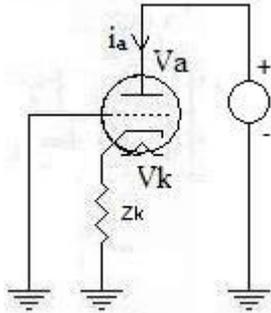
-le cas où on découple en même temps l'anode et la cathode n'est pas étudié puisque le calcul de la fréquence de coupure était trop lourd mais de l'étude précédente on voit que l'on forme un filtre passe bande.

3- Calcul des impédances de sorties

Comme point de sortie deux choix s'offrent à nous : sortie par l'anode ou sortie par la cathode : chaque possibilité influant sur le gain et l'impédance de sortie de l'étage.

-sortie par l'anode

Pour déterminer l'impédance d'anode, on effectue le montage suivant :



On vérifie toujours la loi des mailles énoncé : $U_s = U_k + U_{ak}$ (1)

On utilise la formule issue de la loi des nœuds précédemment :

$$I_a = S \cdot U_{ek} + \frac{U_{ak}}{R_i}$$

Comme $V_e = 0$, on en sort $U_{ak} = R_i \cdot I_a + \mu \cdot V_k$ (2)

$$V_k = Z_k \cdot I_a \quad (3)$$

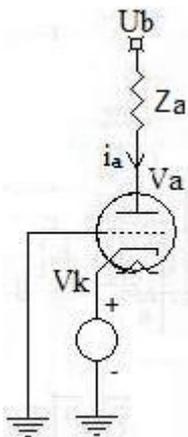
$$(2)+(3) \Rightarrow U_s = Z_k \cdot I_a + R_i \cdot I_a + \mu V_k \quad (4)$$

(3) et (4) $\frac{V_a}{I_a} = Z_k(\mu + 1) + R_i$ Cette impédance est à mettre en parallèle avec la résistance d'anode.

L'impédance résultante correspond à l'impédance de sortie de nos étages d'amplification.

-sortie par la cathode

Pour déterminer l'impédance de cathode, on effectue le montage suivant :



Comme : $U_s = -Z_a \cdot I_a$ (5)

$$(5) - (2) \Rightarrow V_k = -Z_a \cdot I_a - R_i \cdot I_a - \mu \cdot V_k$$

sans trop forcer $\frac{V_k}{I_a} = \frac{-(Z_a + R_i)}{\mu + 1}$ (4) Le signe moins est dû au fait que le courant d'anode est opposé à la source de tension de la cathode.

L'impédance obtenue est également à mettre en parallèle avec la résistance de cathode.

Une sortie sur la cathode assure une impédance de sortie relativement faible mais implique un gain égale à 1.

(Une meilleure démonstration a été faite dans l'étude de FP1 sur l'explication de FS16)

E- DISTORSION DES TUBES

théorie musicale

-On appelle gamme diatonique l'ensemble des notes bien connue : do, ré, mi, fa, sol, la, si ; formant une octave qui comprend l'ensemble des 12 notes séparées de 12 demis tons :

do, do dièse, ré , ré dièse, mi , fa , fa dièse , sol , sol dièse, la, la dièse, si

Il existe ainsi une multitude d'octave comprenant cette même gamme diatonique.

-D'un point de vue physique chaque note possède sa fréquence propre telle que :

pour aller d'une note a une autre note plus aigüe on multiplie cette fréquence par $2^{1/12}$ pour aller d'une note aigüe à la note en dessous un peu plus graves on divise la fréquence par $2^{1/12}$

Ainsi pour passer d'une octave a une autre plus aigüe on multiplie la fréquence 2 (ou on divise par deux pour aller a l'octave plus grave).

On en déduit le tableau de correspondance notes / fréquences sur 4 octaves :

Note	DO	DO #	RE	RE#	MI	FA	FA #	SOL	SOL #	LA	LA #	SI
Fréquence	262Hz	277Hz	294Hz	311Hz	330Hz	349Hz	370Hz	392Hz	415Hz	440Hz	466Hz	494Hz
	523Hz	554Hz	587Hz	622Hz	659Hz	698Hz	740Hz	784Hz	831Hz	880Hz	932Hz	988Hz
	1,05kHz	1,11kHz	1,17kHz	1,24kHz	1,32kHz	1,40kHz	1,48kHz	1,57kHz	1,66kHz	1,76kHz	1,86kHz	1,97kHz
	2,09kHz	2,22kHz	2,35kHz	2,49kHz	2,64kHz	2,79kHz	2,96kHz	3,14kHz	3,32kHz	3,52kHz	3,73kHz	3,95kHz

(Les colonnes correspondent aux octaves différentes d'une même note)

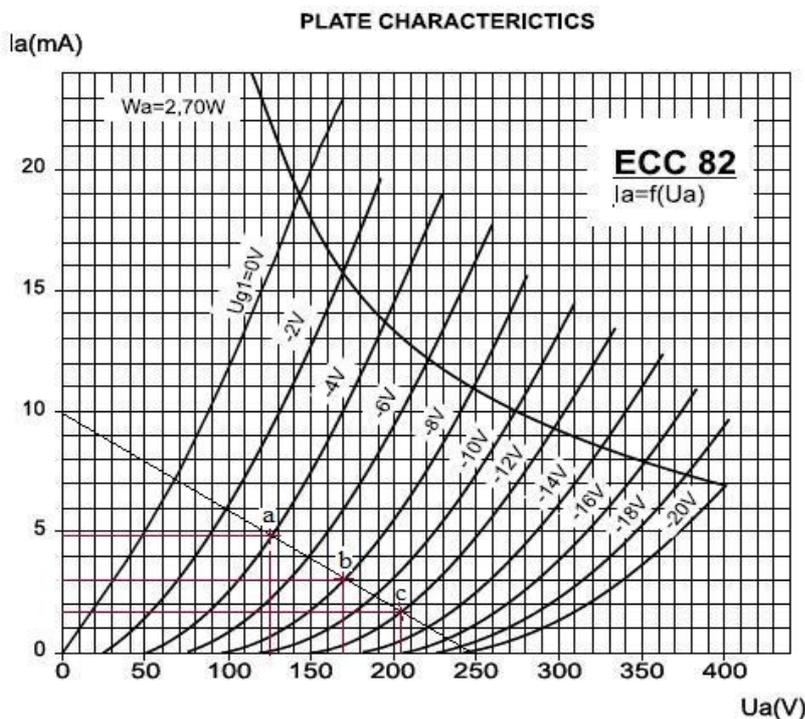
-Un homme perçoit le rapport entre les fréquences d'un signal audio et non la différence entre ses composantes fréquentielles.

Exemple : si un signal audio contient deux harmoniques : 50 et 100Hz on percevra différemment ce signal qu'un signal sinusoïdal pur de 50Hz ou de 100Hz alors qu'un signal composé de 2 harmoniques de 15000 et 15050Hz sera perçu de la même façon qu'un signal sinusoïdal pur de 15000Hz ou de 15050Hz.

Visualisation graphique de la distorsion

1-premier type de distorsion

Dans le montage amplificateur classique, il existe une distorsion plus ou moins forte variant en fonction de la tension de polarisation. On peut la visualiser graphiquement grâce à la droite de charge tracer précédemment :



On place en entrée un signal sinusoïdal pur d'amplitude 2V et on étudie la distorsion créé par ce montage amplificateur.

-Quand le potentiel appliqué sur la grille est nul : $V_g = 0V$: on est au point b

-Quand $V_g = -2V$: $U_a = 125V$ (on est au point a) \implies la variation de la tension d'anode entre b et a est de 45V (dI_a/dU_a augmente donc $dU_a/dI_a = R_i$ baisse par rapport au point b)

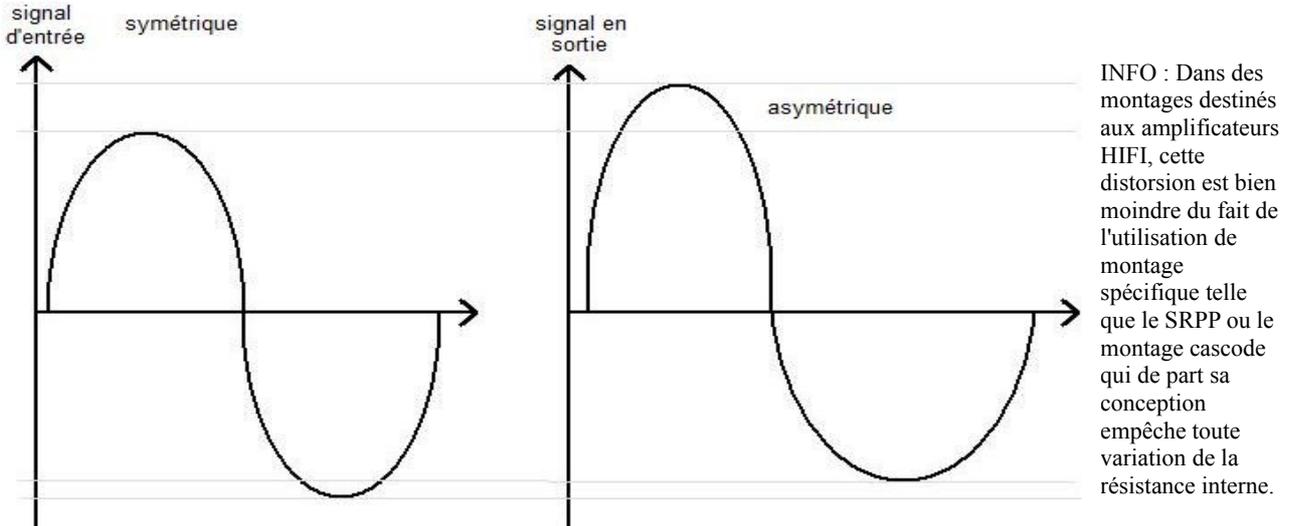
-Quand $U_{g1} = -2V$: $V_a = 205V$ (on est au point c) \implies la variation de la tension d'anode entre b et c est de 35V (dI_a/dU_a baisse donc $dU_a/dI_a = R_i$ augmente par rapport au point b)

Ainsi, si on place en entrée un signal parfaitement sinusoïdal d'amplitude de 2V, le signal de sortie possèdera une partie positive de 45V et une partie négative de 35V.

De plus les variations de la résistance interne du tube provoquent également une distorsion asymétrique (= partie positive différente de la partie négative).

En conséquence, le signal de sortie possèdera des alternances positives plus courtes que ces alternances négatives

Graphiquement on obtient une courbe avec une alternance positive grande et étroite et une alternance négative aplati et large



D'un aspect fréquentiel, cette distorsion provoque l'apparition d'harmoniques.

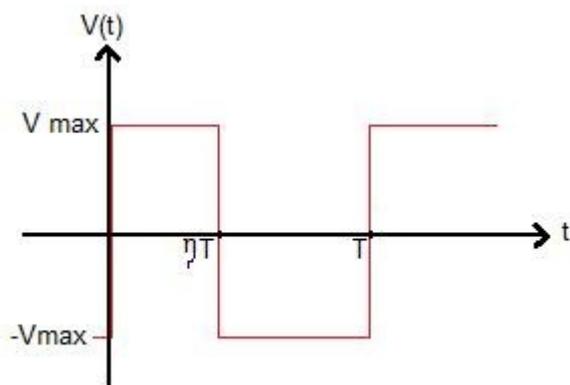
Avec PSIM, on a trouvé que cette déformation est caractérisé par la présence d'une harmonique de rang deux. On a pris une fondamentale en sinus et une harmonique de rang 2 en cosinus par rapport au fondamental et on a retrouvé cette déformation dans les proportions trouvés graphiquement à la page précédente.

-Fourier nous a démontré que n'importe quelle signal périodique peut se décomposer comme une somme de signaux sinusoïdaux telle que :

$$g(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n \cdot \omega t) + b_n \sin(n \cdot \omega t)) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \xi_n \cdot \cos(\omega \cdot n t + \phi_n)$$

ou $\xi_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \implies$ l'amplitude des harmoniques

Pour mettre en évidence l'apparition d'harmonique dut aux variations de la résistance interne du tube, on a calculer la décomposition en série de fourrier d'un signal carré dont on fait bouger le rapport cyclique.



$$\eta = \frac{t_h}{T} \quad (\text{définition du rapport cyclique})$$

on considère cette fonction :

$$f(t) = \begin{cases} V_{max} & t \in [0, \eta T] \\ -V_{max} & t \in [\eta T, T] \end{cases}$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(\omega n t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(\omega n t) dt$$

On trouve $a_0 = V_{max}(2\eta - 1) \implies$ quand le rapport cyclique est de 0,5 a_0 est nul.

$$a_n = \frac{2V_{max} \sin(2\pi\eta n)}{n\pi} \implies \text{quand le rapport cyclique est de } 0,5 \text{ } a_n \text{ est nul}$$

Pour une fonction impaire ($-f(t)=f(-t)$) les coefficients de Fourier a_0 et a_n sont nuls.

Quand le rapport cyclique est de 0,5 notre fonction est impaire et les coefficients a_0 et a_n sont bien nuls.

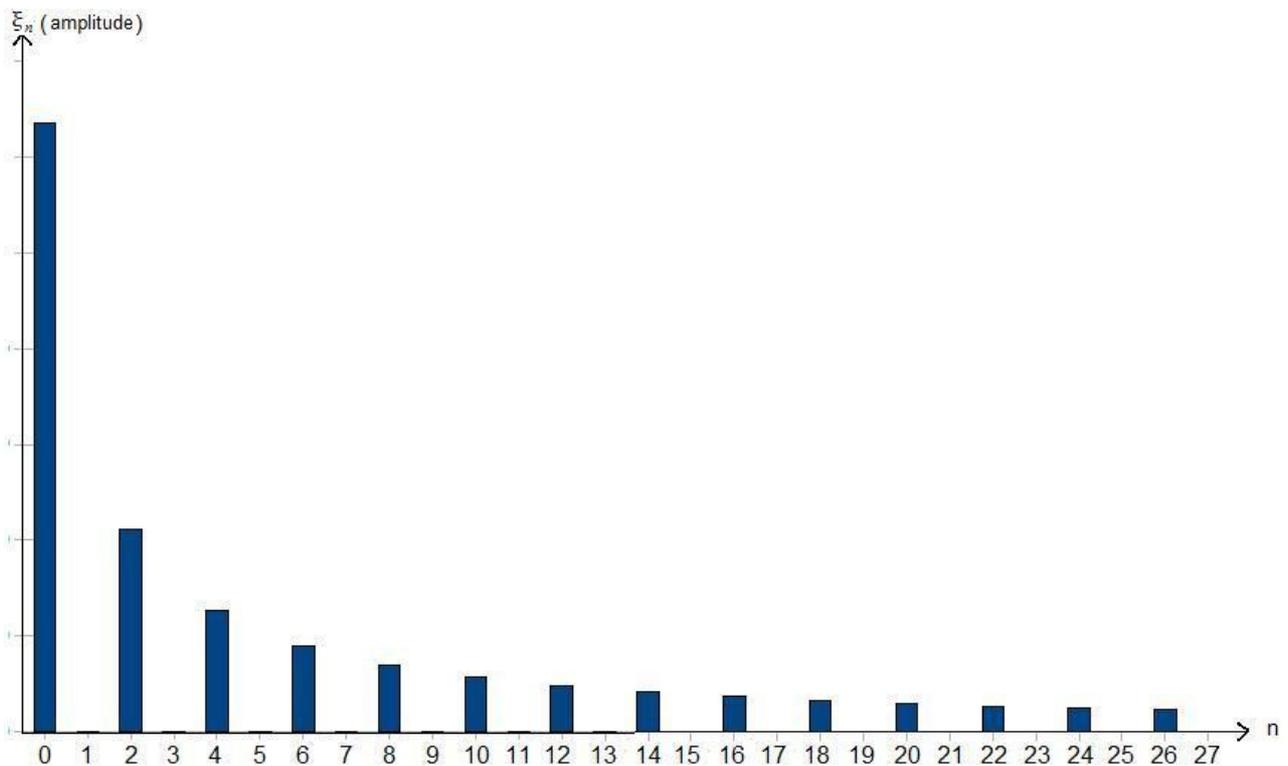
$$b_n = \frac{2V_{max}}{\pi n} (1 - \cos(2\pi\eta n))$$

on trouve finalement :

$$\xi_n = 4\eta V_{max} |\text{sinc}(\pi n \eta)|$$

pour un signal carré de rapport cyclique $\frac{1}{2}$ on n'a que des harmoniques impairs d'amplitude décroissante dont

les raies spectrales ont pour amplitude : $\frac{4V_{max}}{\pi n}$



Pour un signal de rapport cyclique différent de 0,5 le spectre est entièrement modifié.

2- seconde type de distorsion

Le premier type de distorsion dépend uniquement des caractéristiques du tube.

Suivant le positionnement du point de polarisation, deux autres types de distorsion apparaissent :

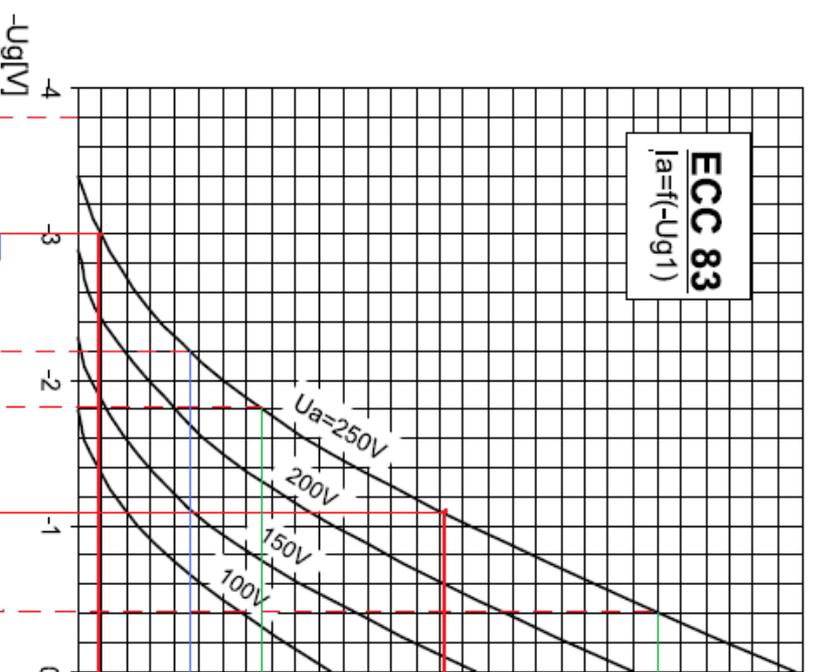
- la blocking distorsion apparaît quand la tension entre la grille et la cathode devient positive. Il apparaît alors un courant de grille.
- la distorsion de cut off qui apparaît quand la tension de grille est trop négative.

TRANSFER CHARACTERISTICS

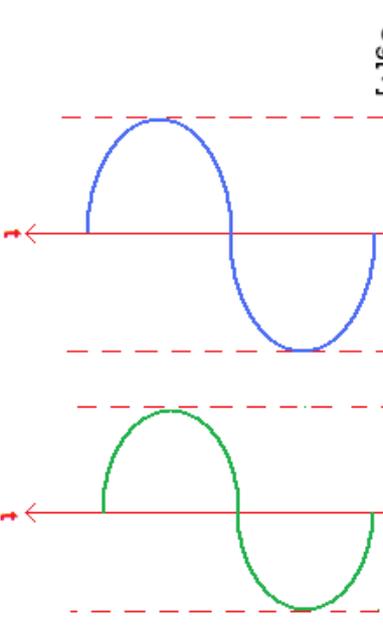
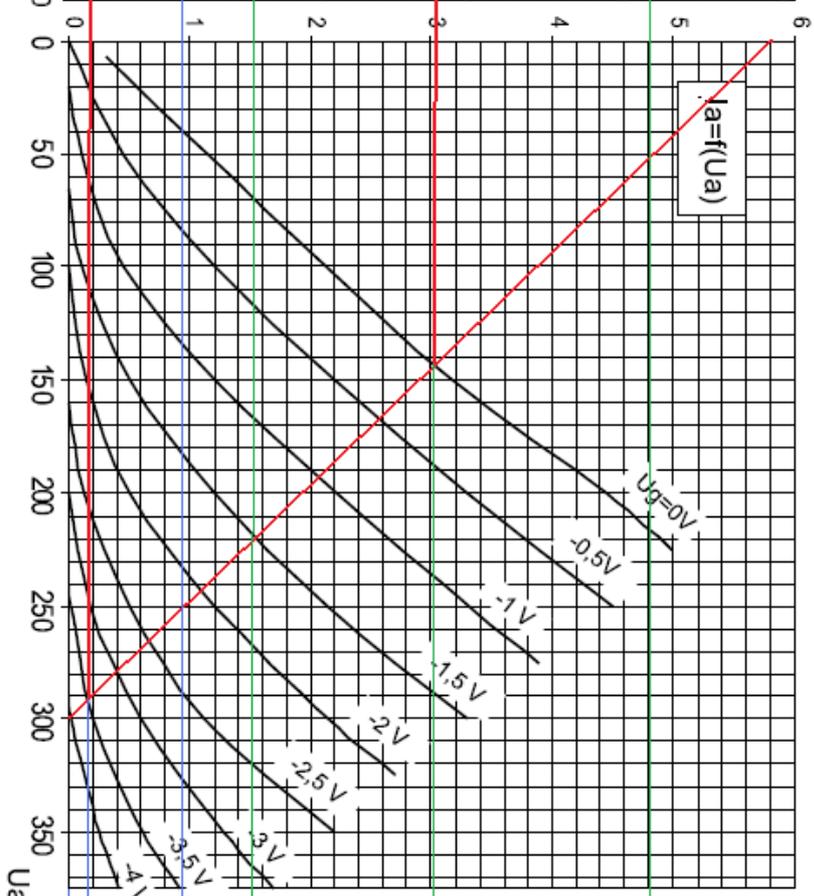
i_a (mA)

PLATE CHARACTERISTICS

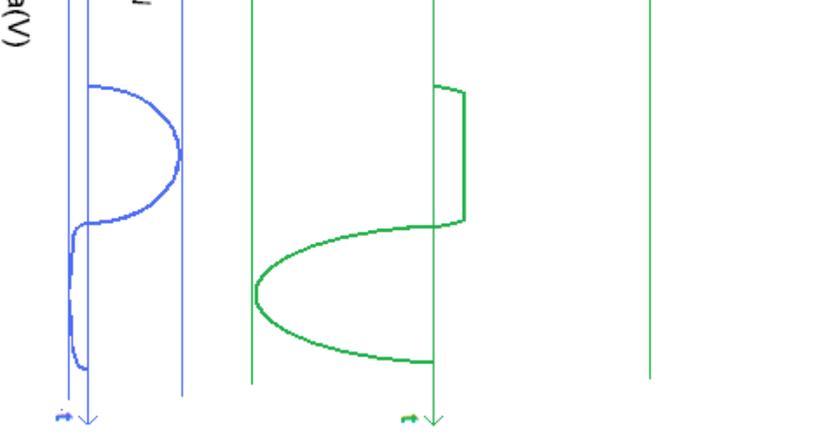
ECC 83
 $i_a = f(-U_{g1})$



$i_a = f(U_a)$



- distorsion de cut off
- blocking distorsion



Conclusion

Le transistor s'il est polarisé correctement, permet d'amplifier un signal dans des taux de distorsion très faible alors que le tube, même polarisé d'une façon optimum aura toujours tendance à distordre le signal d'entrée en rajoutant des harmoniques.

C'est ce phénomène de distorsion qui fait croire que d'un point de vue sonore, un ampli utilisant comme composant de base actif des transistors sonne froidement puisque qu'il se contente de respecter scrupuleusement le support de lecture et qu'un un ampli à tube est rond, riche et qu'il apporte résolument une qualité d'écoute plus appréciable.