

# TUBES 1.1. 2

**Avertissement :** les documents qui vont suivre, ne sont pas des cours, mais plutôt un ensemble de notes. Il est possible d'y rencontrer des erreurs que vous voudrez bien excuser et me signaler pour correction. La série sur les tubes est illimitée et sera complétée par des résultats expérimentaux.

( série 2.x.x ).

Si vous avez de votre côté des notes, elles pourront compléter cette base de données concernant la technique des tubes.

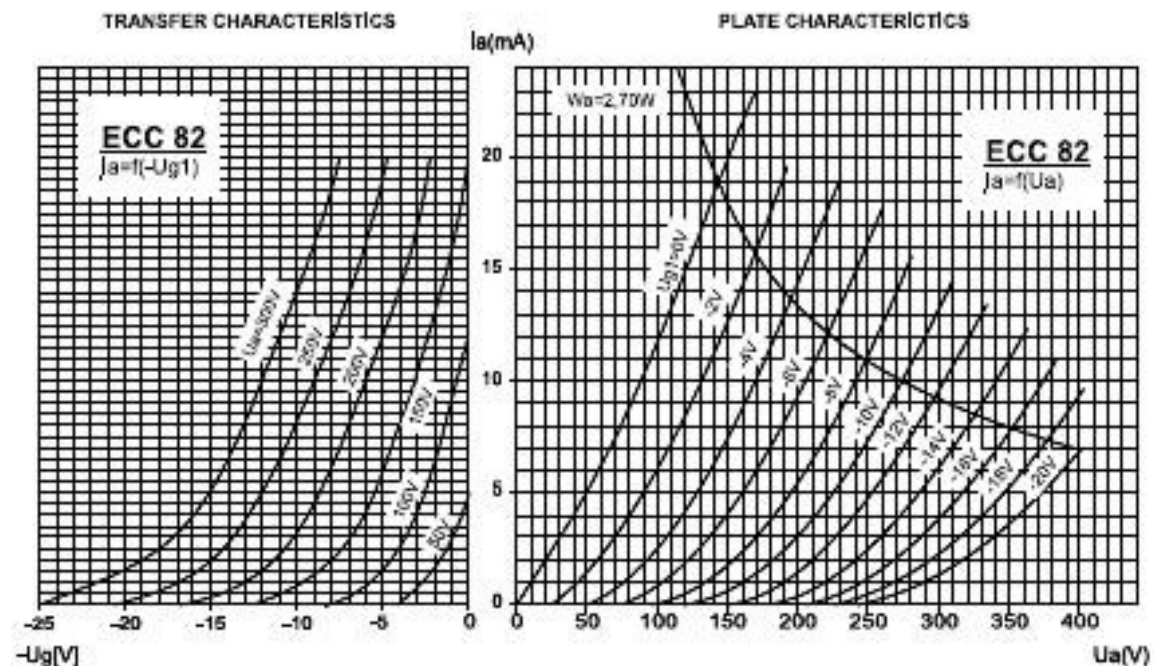
Envoyez vos documents en fichiers WORD et des schémas avec les coordonnées de l'auteur en haut à l'adresse indiquée ci-dessus. Merci pour votre participation.

PS : les documents peuvent être modifiés ou mis à jour à tout moment sans préavis, voir le numéro de version au troisième chiffre. Ex : T\_1.1.x

**LA TRIODE :** exemple qui utilise le tube 12AU7 ou ECC82.

=====

Réseaux grille et anode :



Quels sont les paramètres électriques appliqués au tube :

- la tension anodique  $V_a$  en volts V
- le courant anodique  $I_a$  en milliampères mA
- la tension grille  $V_g$  en volts V

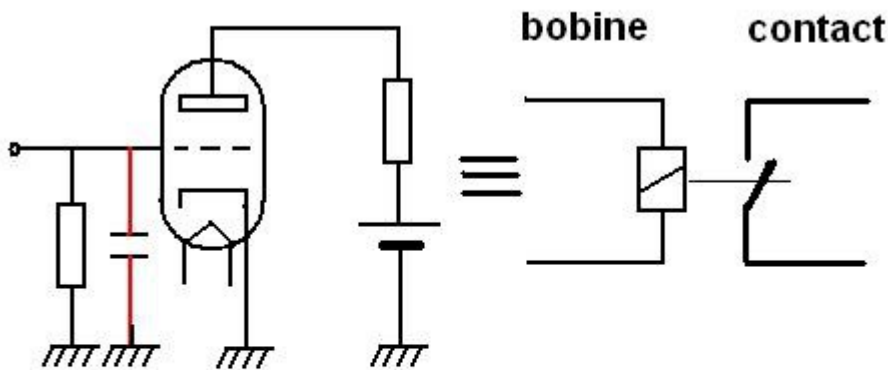
Remarques :

On ne parle pas du courant grille car la commande du tube est faite en tension.

On peut dire que l'électrode de Grille contrôle le courant d' Anode qui passe par le tube et par une charge. On va dire comme le robinet d'eau.

Deux fonctionnements possibles pour ce tube :

1--- Tout ou Rien : le courant d' Anode circule ou non suivant la tension Grille.  
( Fonction en relais).



**TRIODE (3 électrodes) cathode, grille, anode**  
**équivalente à un relais**

**Une petite énergie (côté grille) quasi nulle**  
**commande une puissance (côté anode)**

2--- Amplification des variations de tension Grille en variations de courant Anodique, dans le tube et dans la charge. ( Fonction amplificateur).

Si la charge est une résistance, les variations de courant produisent des variations de tension à ses bornes. Mêmes formes, car  $u = r \cdot i$

On peut diriger la tension de sortie vers un autre tube pour amplifier davantage on dira qu'il y a des étages amplificateurs successifs.

Petite explication qui va nous servir souvent :

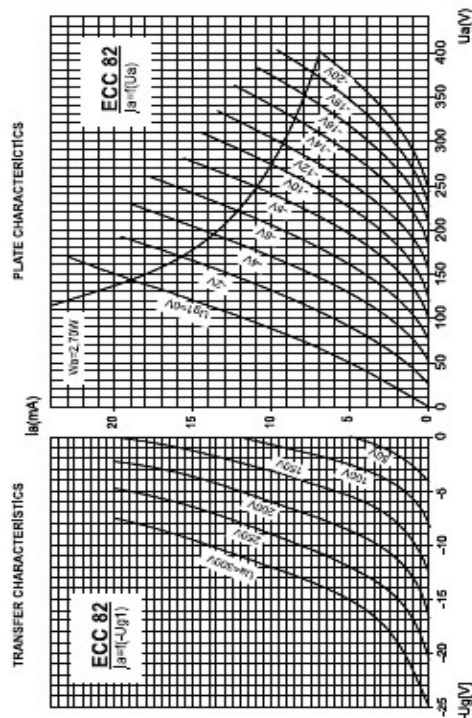
=====

C'est une image qui va permettre de comprendre, comment fonctionne un circuit électrique :

« Un randonneur en montagne commence à marcher dans les chemins, en quittant son point de départ : sa voiture sur un parking.

Il marche pendant des heures, monte et descend puis il arrive au sommet de sa randonnée et continue son circuit pour finalement revenir à sa voiture.

Le dénivelé est nul puisqu'il a autant monté que descendu ! »



## ECC82

**R. F. DOUBLE TRIODE**  
Base: NOVAL

$U_r = 6,3/12,6 \text{ V}$   
 $I_r = \text{ca. } 300/150 \text{ mA}$

### Typical characteristic:

$U_a = 250 \text{ V}$   
 $U_g = -8,5 \text{ V}$   
 $I_a = 10,5 \text{ mA}$   
 $S = 2,2 \text{ mA/V}$   
 $R_i = 7,7 \text{ k}\Omega$   
 $\mu = 17$

### Limiting values:

$U_a = 300 \text{ V}$   
 $W_a = 2,75 \text{ W}$   
 $I_a = 20 \text{ mA}$   
 $U_g = -50 \text{ V}$   
 $R_g = 1 \text{ M}\Omega$   
 $U_{kr} = 180 \text{ V}$   
 $R_{kr} = 150 \text{ k}\Omega$

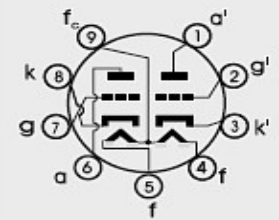
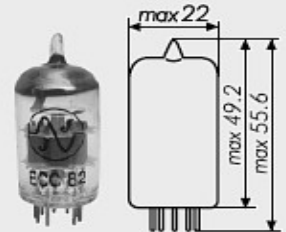
### Capacitances:

|          | system I | system II |
|----------|----------|-----------|
| $C_{gk}$ | 1,9      | 1,9 pF    |
| $C_a$    | 1,9      | 1,8 pF    |
| $C_{ga}$ | 1,63     | 1,63 pF   |

### As phase inverter:

|              | system I | system II           |
|--------------|----------|---------------------|
| $U_b$        | 250      | 350 V               |
| $I_a$        | 0,7      | 1,0 mA              |
| $I_r$        | 0,68     | 0,93 mA             |
| $U_o/U_{g1}$ | 11       | 11                  |
| $U_o$        | 15       | 24 V <sub>RMS</sub> |
| $d_{acc}$    | 1        | 1 %                 |

### Dimension and connections:



Le tube 12AU7 (ou ECC82 dénomination européenne) comporte dans son ampoule deux triodes composées chacune de :

- un filament pour le chauffage de la cathode.
- une cathode qui émet des électrons.
- une grille qui laisse passer plus ou moins ou pas du tout les électrons.
- une anode qui attire les électrons négatifs.

Un courant anodique circule dans le tube de la cathode K vers l' anode A et fait un circuit extérieur en passant par la charge R ou Z et par l'alimentation.

Attention : ce courant anodique est physiquement un déplacement des électrons par un phénomène électrostatique. La charge d'un électron est négative ( $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  coulomb) donc attirée par l'anode positive et repoussée par la grille qui sera à un potentiel négatif et qui joue un rôle de filtre ou de robinet.

Pour la suite des calculs électroniques, le sens du courant sera celui des physiciens, donc inverse par rapport à celui des électrons !

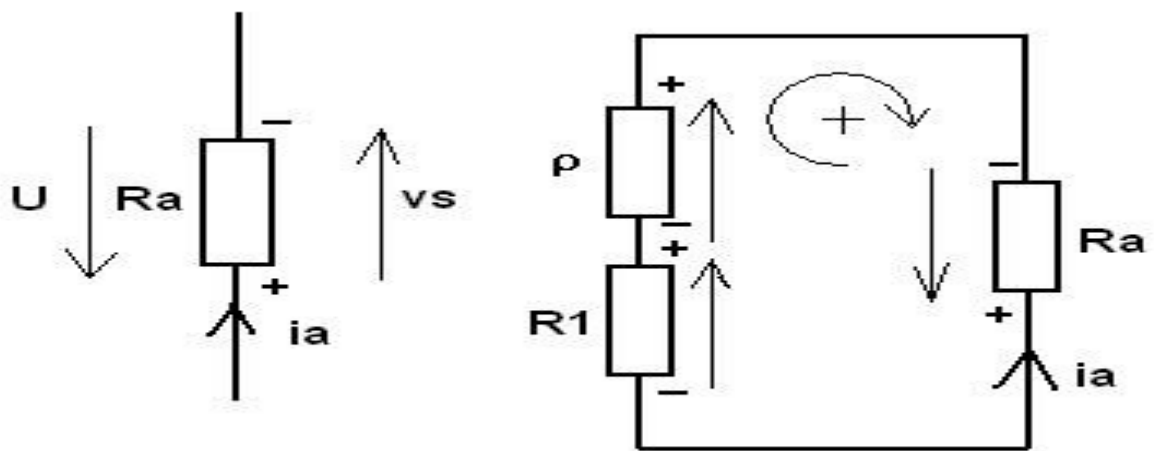
On prendra comme repère que le courant sort par la borne + de la pile ou de l'alimentation (générateur) et qu'il va créer une différence de potentiel dans une résistance R (tension en volts) avec la borne d'entrée du courant positive et la borne de sortie négative.

### Conventions des circuits :

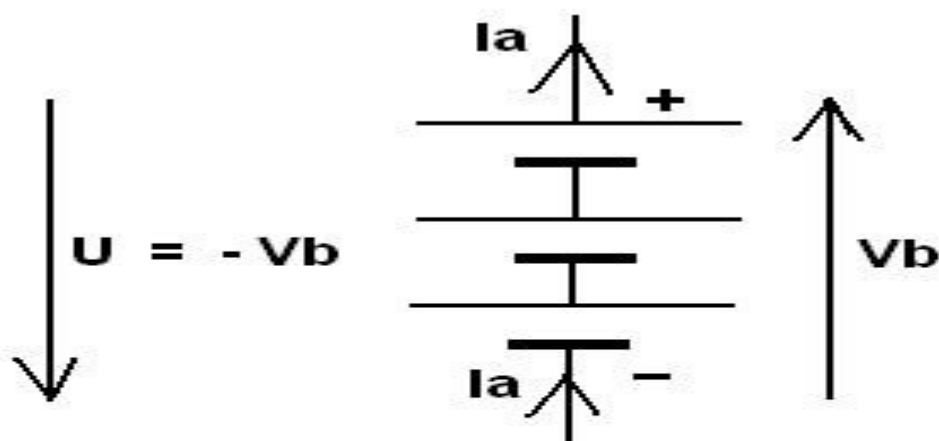
=====

- pour une résistance Ra le courant entre par la borne + , la tension U est positive et la tension vs est négative.

--- pour une source, le courant sort par la borne positive et suivant le sens de la flèche, la tension est positive ou négative.



**Conventions**



**Source de tension continue  $V_b$  à 3 éléments**

Une résistance traversée par un courant ( $i_a$ ) :

$$u = R_a \cdot i_a \quad \text{et} \quad v_s = - R_a \cdot i_a$$

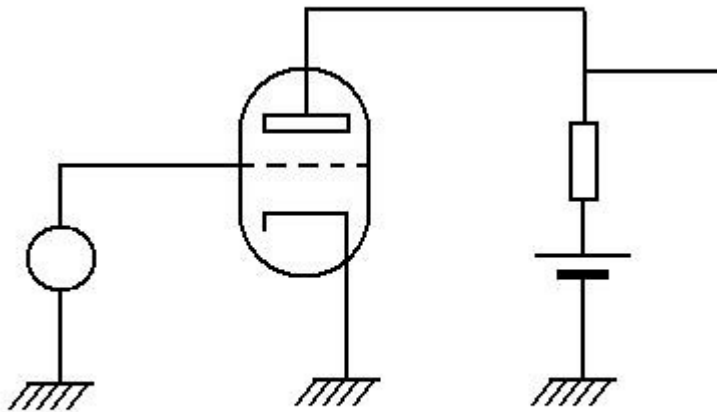
Pour un circuit électrique, partir d'un point et faire le tour dans un sens positif ou négatif et écrire la somme des tensions :

ex :  $+ R_1 \cdot i_a + \rho \cdot i_a + R_a \cdot i_a = 0$  la somme des tensions est nulle.

Schéma de base de la triode :

=====

un tube de verre, avec 3 électrodes dont on a fait le vide d'air et muni d'un filament pour le chauffage de la cathode.



Un circuit d'entrée sur une Grille, une Cathode, une Anode, une charge, un circuit de sortie et une source d'alimentation.

Caractéristiques statiques :

---

On peut établir des courbes points par points en faisant varier les paramètres de tension et en mesurant la valeur du courant.

Sur une feuille de papier millimétré, les axes sont :

---  $V_g$  -1 volt pour 5 mm

---  $V_a$  10 volts pour 5 mm

---  $I_a$  1 milliampère pour 10 mm

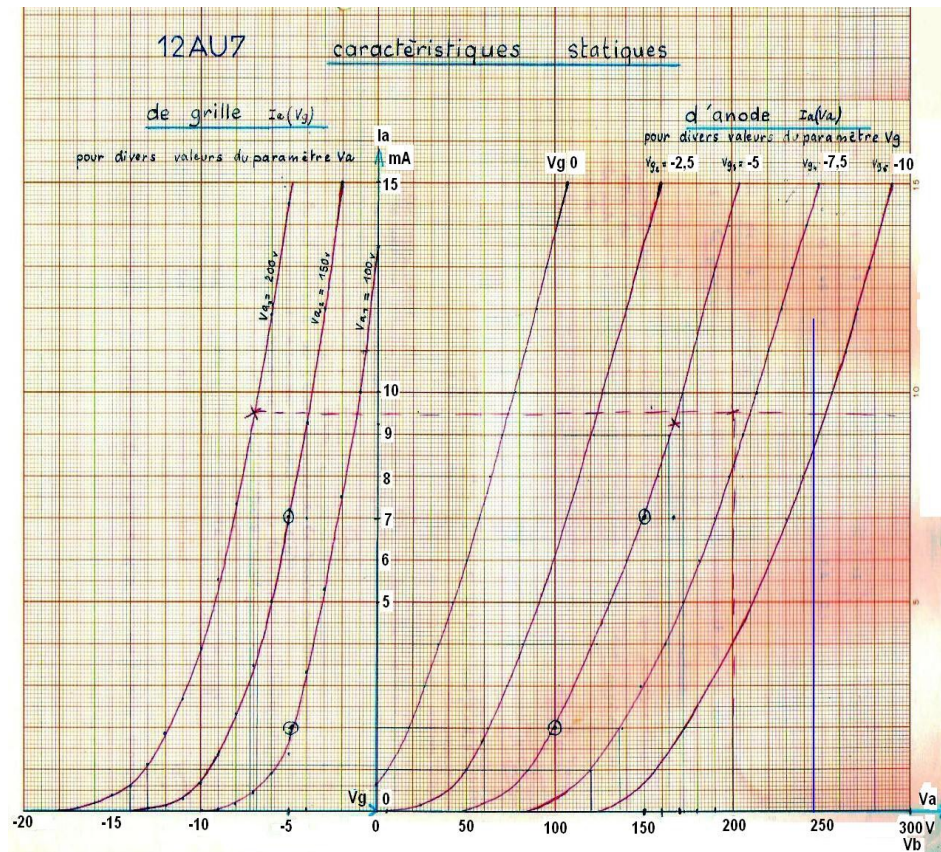
Un point de fonctionnement est repéré par les valeurs :

Côté grille  $I_a(V_g)$  :

exemple :  $I_a = 7 \text{ mA}$  ,  $V_g = -5 \text{ volts}$  et  $V_a = 150 \text{ volts}$

Côté anode  $I_a(V_a)$  :

exemple : retrouvez le point avec les mêmes paramètres.



Il faut bien comprendre que suivant les paramètres électriques (  $V_a$  et  $V_g$  et la charge  $R_a$  ), le courant prendra une certaine valeur  $I_a$  .

Il est facile de visualiser un « point de fonctionnement » sur les réseaux caractéristiques ci-dessus : (  $I_a$  ) fonction de  $V_a$  et  $V_g$  et (  $I_a$  ) fonction de  $V_g$  et  $V_a$ .

Exemples :

---placez les points sur le graphique réseaux grille et anode pour  $V_a = 150$  V,  $V_g = -5$  V et  $I_a = 7$  mA.

---placez les points pour  $V_a = 100$  V,  $V_g = -5$  V et  $I_a = 2$  mA

Ce sont des points statiques car les valeurs des paramètres électriques sont continues. (tensions et courants continus) .

Utilisations des lettres majuscules dans ce cas. Pour des valeurs variables, des lettres minuscules.

Les caractéristiques sont des « familles de courbes » avec des portions de droites. Il sera plus intéressant de placer les points de fonctionnement statiques sur les portions de droites, pour éviter les déformations entre signal d'entrée et signal de sortie amplifié : on dira qu'il y aurait « distorsions ».

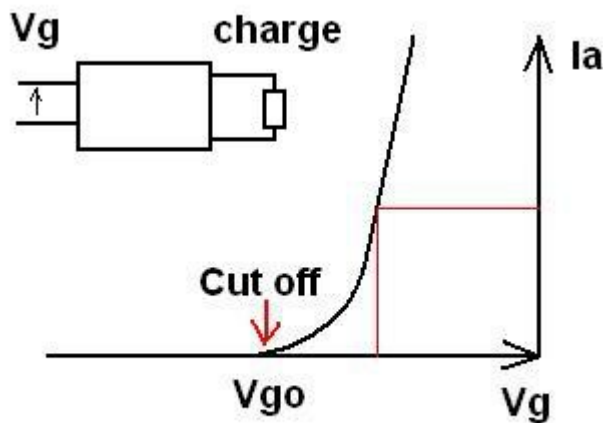
Suivant les tubes employés, les droites sont plus ou moins inclinées ! On peut définir les pentes et le facteur d'amplification pour ce tube.

Auparavant regardez comment va varier le courant anodique ( $I_a$ ) si dans l'exemple précédent, vous faites varier la tension de Grille entre :

-2,5 V et - 14 V ?

Maintenir  $V_a = 150$  V constant !

Conclusion : si la grille est plus négative, le courant diminue ou même il peut s'annuler ( c'est le point de « cut off » ).



A l'inverse si la grille est moins négative, le courant augmente et il faut tenir compte du pouvoir de dissipation de l'anode qui a une limite, sinon la chaleur va détruire le tube !

Le constructeur donne la valeur maximale de dissipation de la triode du tube : 2,8 watts

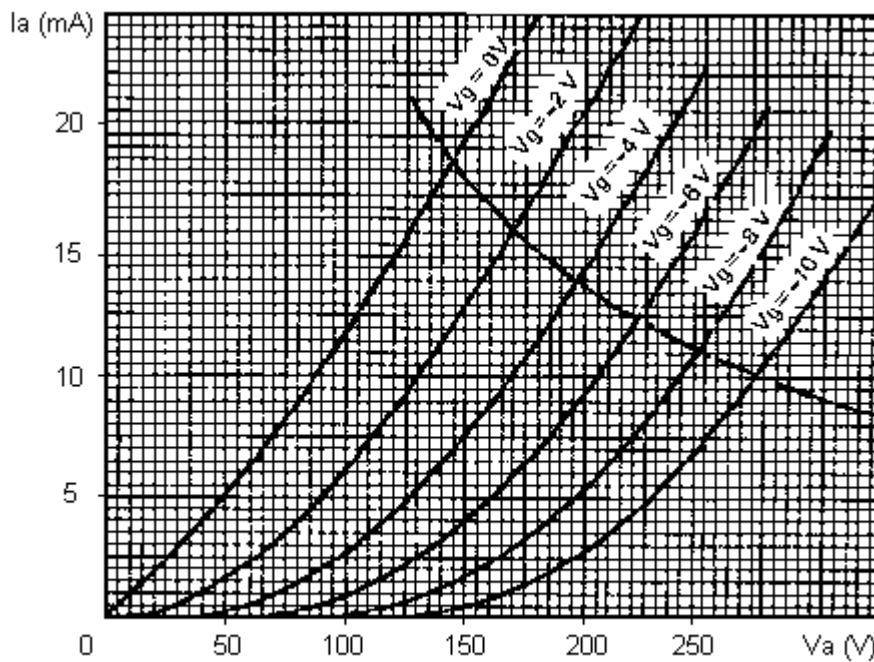
Note :

la tension est mesurée entre deux points d'un circuit, on dira « différence de potentiels ou ddp ».

le courant est mesuré en un point d'un circuit, comme si on avait coupé le fil pour insérer un appareil milliampèremètre.

Si un courant électrique traverse un circuit fermé en boucle, il a la même valeur en tout point du circuit.





b)

Fig. 4. - Caractéristiques anodiques d'une triode.

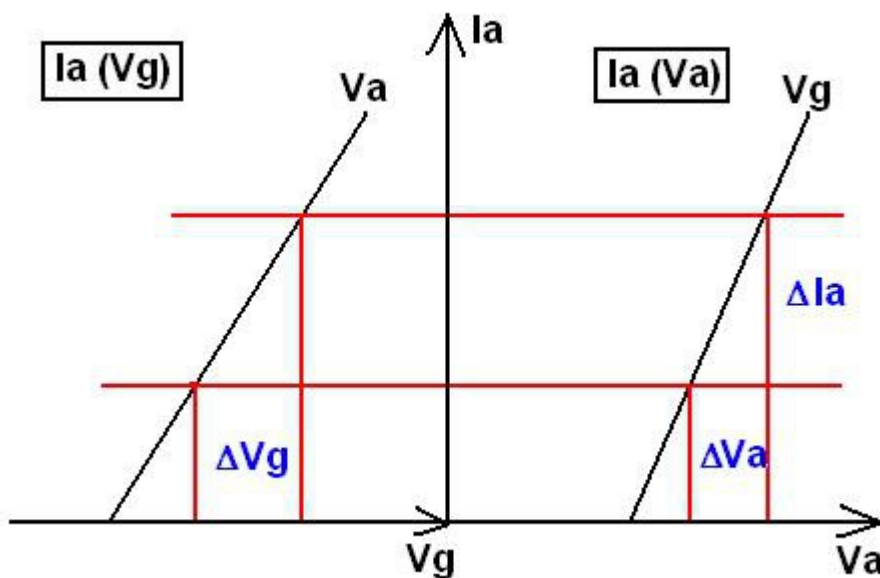
Tracez la courbe qui correspond au produit  $P = U \times I$  :

=====

$$P \text{ dissipation} = V_a \times I_a = 2,8 \text{ W} \quad \text{d'où} \quad I_a = 2,8 / V_a$$

Exemple : pour  $V_a = 200$  volts le point de dissipation maximal sera  
 $I_a = 2,8 / 200 = 0,014 \text{ A}$  ou  $14 \text{ mA}$

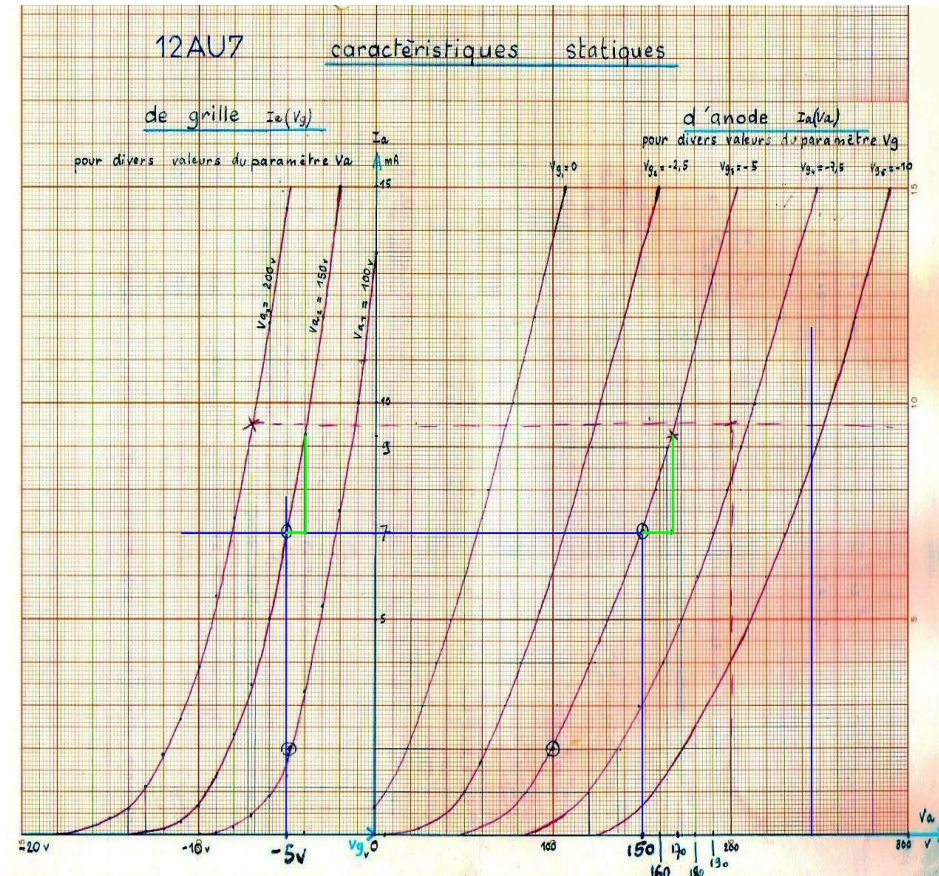
La courbe se trace alors point par point : c'est une hyperbole de dissipation.





Sur la figure ci-dessus : lire le graphe de la façon suivante,

Une petite variation de  $V_g$  ( $\Delta V_g$ ) entraîne une petite variation du courant ( $\Delta I_a$ ), donc une variation de  $V_a$  ( $\Delta V_a$ ) .



à  $I_a = \text{cte}$

$$\Delta I_a = \frac{\Delta V_a}{\rho}$$

$$\Delta I_a = s \cdot \Delta V_g$$

$$\frac{\Delta V_a}{\rho} = s \cdot \Delta V_g$$

$$\frac{\Delta V_a}{\Delta V_g} = s \cdot \rho = \mu$$

En fonctionnement dynamique, le point de fonctionnement instantané va se déplacer autour du point de fonctionnement statique !

Les choses se compliquent ! Alors qu'il était possible de mesurer les valeurs avec un simple contrôleur, il va falloir observer les signaux variables avec un oscilloscope ! On va utiliser un générateur de signaux variables.

$$\left. \begin{array}{l} \Delta V_a \\ \Delta V_g \\ \Delta I_a \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} \rho = \frac{\Delta V_a}{\Delta I_a} \text{ résistance interne} \\ \text{dans le réseau anode} \\ s = \frac{\Delta I_a}{\Delta V_g} \text{ dans le réseau grille} \end{array}$$

$$\rho \times s = \mu$$

$$\frac{\Delta V_a}{\Delta I_a} \times \frac{\Delta I_a}{\Delta V_g} = \frac{\Delta V_a}{\Delta V_g} = \mu$$

$\mu$  c'est le facteur amplificateur du tube

ne pas confondre la résistance interne et la  
résistance équivalente du tube qui est :

$$\frac{V_a}{I_a}$$

Equation de base pour l'étude de tous les montages à tubes :

=====

$$\Delta V_a \longrightarrow \Delta I_a = \frac{\Delta V_a}{\rho}$$

$$\Delta V_g \longrightarrow \Delta I_a = s \Delta V_g$$

$$\text{on pose } g = \frac{1}{\rho}$$

on pose l'équation suivante comme base :  $\Delta I_a = s \cdot \Delta V_g + g \cdot \Delta V_a$

avec les valeurs variables :  $I_a = s \cdot v_g + g \cdot v_a$

$$I_a = s \cdot v_g + \frac{1}{\rho} \cdot v_a$$

multiplie par  $\rho$

$$\rho \cdot I_a = s \cdot \rho \cdot v_g + v_a$$

avec  $s \cdot \rho = \mu$

$$\rho \cdot I_a = \mu \cdot v_g + v_a$$

$$\rho \cdot \Delta I_a = \mu \cdot \Delta V_g + \Delta V_a$$

**Définition :**

=====

Lorsque l'on produit simultanément les petits accroissements  $\Delta V_a$  et  $\Delta V_g$ , l'accroissement  $\Delta I_a$  est égal à la somme des accroissements

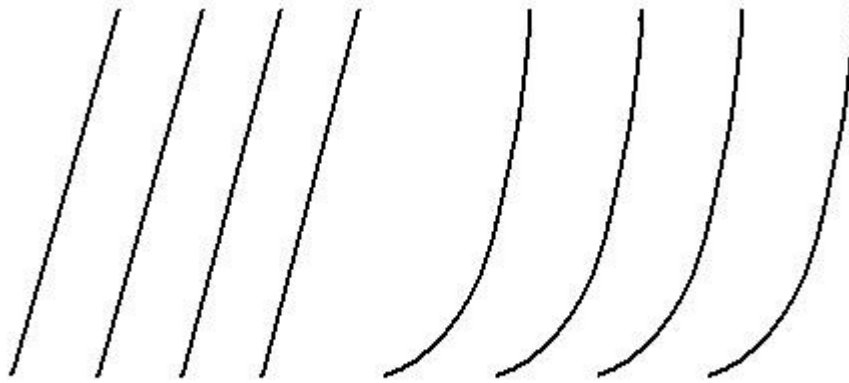
$$\Delta V_a / \rho + s \cdot \Delta V_g$$

C'est l'équation de base pour l'étude de tous les montages : il suffit de lui adjoindre les expressions des variations  $\Delta V_a$  et  $\Delta V_g$ , tenant compte dans chaque cas particulier des circuits associés au tube.

Pour des variations de faibles amplitudes de  $\Delta V_a$  et  $\Delta V_g$  l'équation donne le calcul de  $\Delta I_a$  et l'amplification du montage.

Pour des variations de fortes amplitudes, l'équation ne convient plus car  $\rho$  et  $\mu$  ne restent pas constants dans un domaine étendu. Il faut passer aux méthodes graphiques car il y a des distorsions.

D'où l'intérêt de fabriquer des tubes avec des parties de caractéristiques les plus rectilignes possibles :



**réseau rectiligne**

**réseau courbe non idéal**

Il est nécessaire de retirer de l'équation une constante sous forme de tension :  $U_0$

L'équation de base devient :  $\rho \cdot I_a = V_a + \mu \cdot V_g - U_0$

Remarques : pour trouver la valeur de  $V_g$  ( $V_{go}$ ) qui annule le courant du tube ( « cut off » ) il faut rendre de plus en plus négative la grille jusqu' à  $I_a = 0$

quand  $U_0 = 0$  et  $I_a = 0$  on a  $V_a + \mu \cdot V_g = 0$  d'où  $V_{go} = - V_a / \mu$

$V_{go}$  : cut off du tube Voir la figure ci-dessous

**Caractéristiques :**

=====

En ampli de tension :  $\mu$  élevé ,  $\rho$  élevé ,  $s$  faible

-----

En ampli de puissance :  $I_a$  élevé ,  $\rho$  faible ,  $s$  élevée ,  $\mu$  moyen ou faible

-----

**Caractéristique en charge :**

---

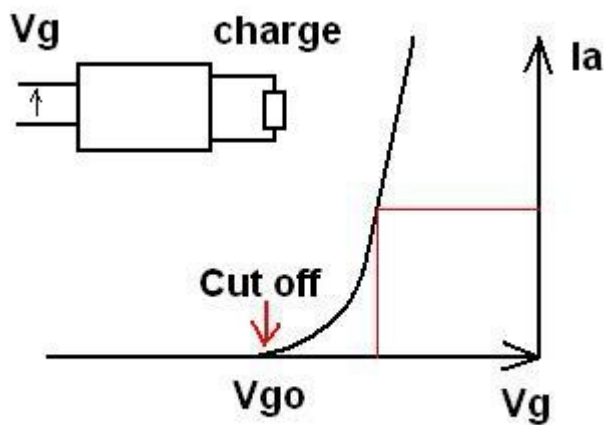
**Note :** on appelle « charge » le composant utile qui reçoit la puissance.

La charge est résistive  $R$  pure

ou résistive et inductive  $R + L$

ou résistive, plus inductive et capacitive.  $R + L + C$

Ex : bobine d'un relais



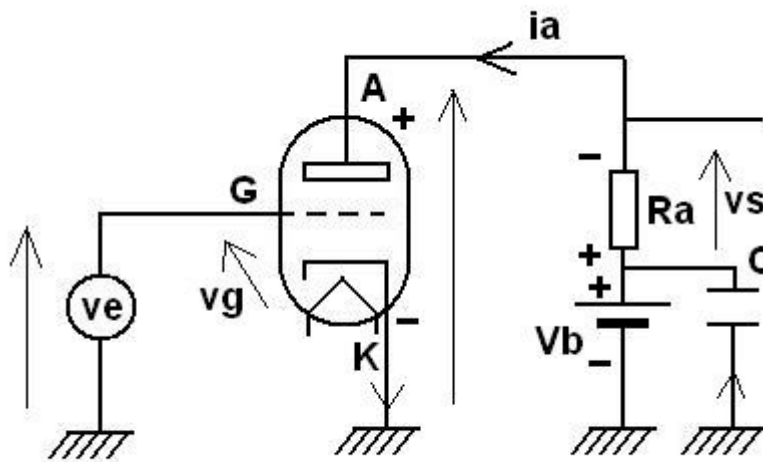
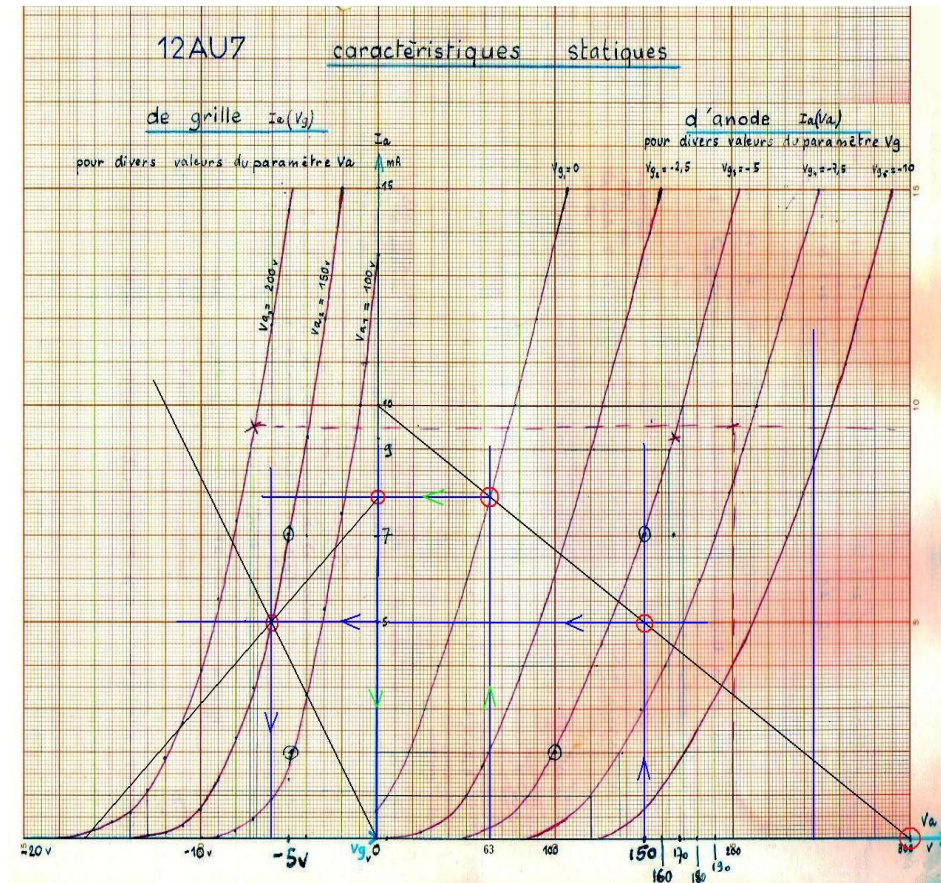
Les caractéristiques dynamiques sont différentes des caractéristiques statiques ( en courant continu) car la réactance intervient. ( présence de bobines et de condensateurs ).

Exemple :



Les célèbres 807 à « col doré »





équation du circuit :  $+V_b - R_a \cdot i_a - V_a = 0$  d'où

$$V_a = V_b - R_a \cdot i_a$$

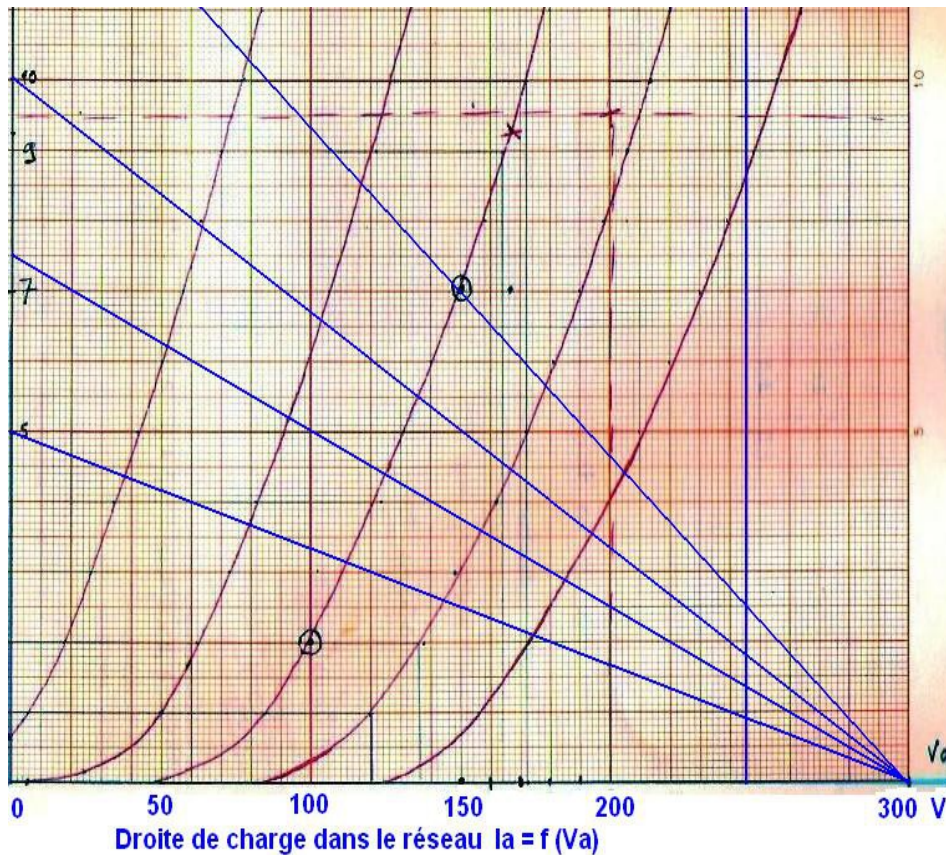
équation de la droite de charge : dans le réseau  $i_a = f(V_a)$

$$R_a \cdot I_a = V_b - V_a$$

$$\text{d'où } I_a = \frac{V_b}{R_a} - \frac{V_a}{R_a}$$

de la forme  $y = a \cdot x + b$  avec  $a = -1/R_a$  et  $b = V_b / R_a$

Exemple :



Droites suivant les valeurs de la résistance variable  $R_a$  :  $V_b = 300$  V

a---  $R_a = 30\,000$  ohms et  $V_a = 150$  V trouver l'équation de la droite de charge et les valeurs des courants  $I_a$  pour  $V_a = 0$  et  $V_a = 150$  V

On a écrit :

$$I_a = \frac{V_b}{R_a} - \frac{V_a}{R_a} = \frac{300}{30000} - \frac{150}{30000} = 0,005 \text{ A ou } 5 \text{ mA}$$

pour  $V_a = 0$  et  $I_a = 300 / 30000 = 0,010 \text{ A ou } 10 \text{ mA}$



b---  $R_a = 40\,000\text{ ohms}$  et  $V_a = 150\text{ V}$  même question

$$I_a = \frac{V_b}{R_a} - \frac{V_a}{R_a} = \frac{300}{40000} - \frac{150}{40000} = 0,00375\text{ A ou } 3,75\text{ mA}$$

$$\text{pour } V_a = 0 \text{ et } I_a = 300 / 40000 = 0,0075\text{ A ou } 7,5\text{ mA}$$

c---  $R_a = 60\,000\text{ ohms}$  et  $V_a = 150\text{ V}$  même question

$$I_a = \frac{V_b}{R_a} - \frac{V_a}{R_a} = \frac{300}{60000} - \frac{150}{60000} = 0,0025\text{ A ou } 2,5\text{ mA}$$

$$\text{pour } V_a = 0 \text{ et } I_a = 300 / 60000 = 0,005\text{ A ou } 5\text{ mA}$$

Les droites sont tracées sur le graphe ci-dessus.

Cherchons l'équation et la valeur de  $R_a$  pour la quatrième droite supérieure ?

Nous remarquons que  $I_a = 7\text{ mA}$  quand  $V_a = 150\text{ V}$

$$R_a \cdot I_a = V_b - V_a = 300 - 150 = 150\text{ V d'où on tire}$$

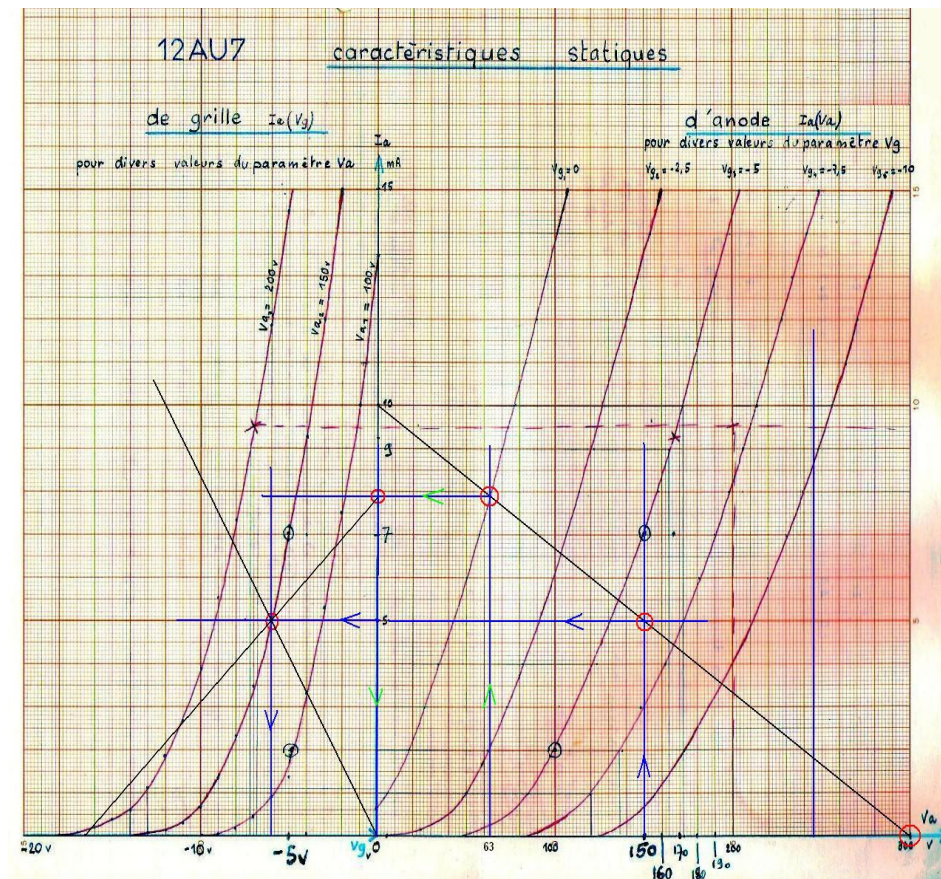
$$R_a = (V_b - V_a) / I_a = \frac{150}{0,007} = 21\,429\text{ ohms}$$

Question : on souhaite conserver le même courant de  $5\text{ mA}$  pour les 3 charges de  $30\text{ k}$ ,  $40\text{ k}$  et  $60\text{ K}$  et la même tension  $V_a$ , Quelles seraient les valeurs de la tension d'alimentation  $V_b$  dans les cas ( b ) et ( c ) ?

Petites variations des paramètres du tube :

Transformée de la droite de charge dans le réseau grille.

=====



**Construction graphique :**

=====

pour tracer une droite, il suffit de connaître deux points :

1--- premier point avec  $V_a = 63 \text{ V}$  et  $V_g = 0$

$$I_a = \frac{300}{30000} - \frac{63}{30000} = 0,0079 \text{ A ou } 7,9 \text{ mA}$$

le premier point  $I_a = 7,9 \text{ mA}$  et  $V_g = 0$

2--- second point avec  $V_a = 150 \text{ V}$  et  $I_a = 5 \text{ mA}$

le second point  $I_a = 5 \text{ mA}$  et  $V_g = -6 \text{ V}$

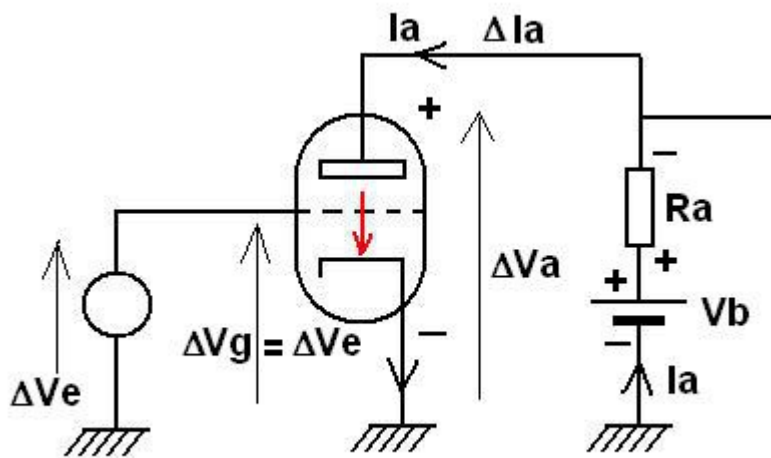
**Equation de la droite de charge côté grille :**

=====

de la forme  $y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot x + \frac{y_1 \cdot x_2 - y_2 \cdot x_1}{x_2 - x_1}$

$$I_a = \frac{5}{-6} \cdot \frac{7,9}{0} V_g + \frac{(7,9 \cdot -6) - (5 \cdot 0)}{-6 - 0} = 0,48333 \cdot V_g + 7,9$$

Accroissements du courant anodique produit par une variation du signal d'entrée sur la grille :



Une variation du signal d'entrée  $\Delta V_e$  produit une variation  $\Delta V_g$  :

$$V_a = V_b - R_a \cdot I_a$$

$$V_a + \Delta V_a = V_b - R_a (I_a + \Delta I_a)$$

$$\Delta V_a = V_b - V_a - R_a (I_a + \Delta I_a)$$

$$\Delta V_a = \cancel{V_b} - \cancel{V_b} + \cancel{R_a \cdot I_a} - \cancel{R_a \cdot I_a} - R_a \cdot \Delta I_a$$

$$\Delta V_a = - R_a \cdot \Delta I_a$$

Maintenir la tension d'alimentation constante  $V_b$  et la charge constante  $R_a$ .

On applique la tension d'entrée  $\Delta V_e$

$$\rho \cdot \Delta l a = \Delta V a + \mu \cdot \Delta V g$$

avec  $\Delta V_a = - R_a \cdot \Delta I_a$   
 avec  $\Delta V_g = \Delta V_e$

$$\rho \cdot \Delta l_a = \Delta V_a + \mu \cdot \Delta V_e$$

$$\rho \cdot \Delta l_a = - R_a \cdot \Delta l_a + \mu \cdot \Delta V_e$$

$$\rho \cdot \Delta l a + R a \cdot \Delta l a = \mu \cdot \Delta V e$$

$$\Delta I_a \cdot (\rho + Ra) = \mu \cdot \Delta V_e$$

$$\Delta l_a = \frac{\mu \cdot \Delta V_e}{(\rho + R_a)} = \boxed{\frac{\mu}{(\rho + R_a)} \cdot \Delta V_e = K \cdot \Delta V_e}$$

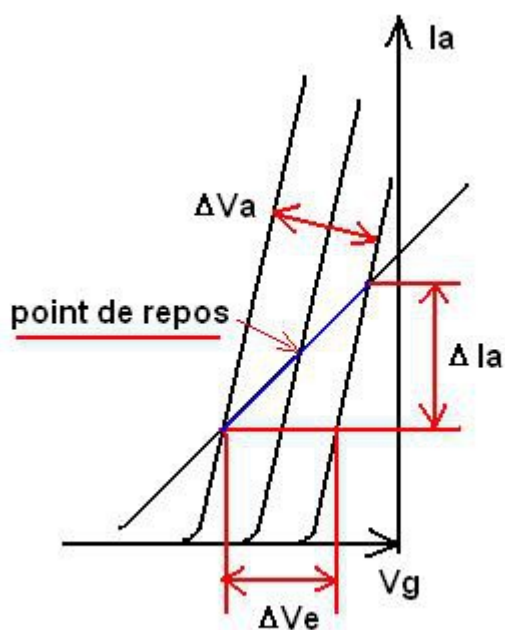
$$\mu = \frac{\Delta V_a}{\Delta V_e}$$

$$\Delta V_a = - R_a . \Delta I_a$$

$$A = \frac{\Delta V_a}{\Delta V_e} = \frac{-R_a \cdot \mu}{(\rho + R_a)} = \boxed{\frac{-\mu}{(1 + \frac{\rho}{R_a})}}$$

## Mesures des variations : avec un oscilloscope

=====



Mesure de la tension aux bornes de  $R_a$  :  $- R_a \cdot \Delta i_a$

Mesure de la tension d'entrée :  $\Delta V_e = \Delta V_g$

Mesure de la tension anodique :  $\Delta V_a$

Remarque : la formule de l'amplification  $A$  est valable pour les triodes, et aussi pour les tétrodes et les pentodes.

Le signe – indique un déphasage entre l'entrée et la sortie.

Exemple : 12AU7 avec  $\mu = 18$   $R_a = 20 \text{ kohms}$   $\rho = 10 \text{ kohms}$

$$\text{calcul du gain } A = \frac{- 18}{( 1 + 10/20 )} = - 12$$

Remarque :  $\Delta$  signifie « accroissement »

On peut exprimer les valeurs instantanées :  $R_a$

$$i_a = \frac{\mu \cdot V_e}{( \rho + R_a )}$$

Rappel : équations de base

=====



$$\Delta V_a \longrightarrow \Delta I_a = \frac{\Delta V_a}{\rho}$$

$$\Delta V_g \longrightarrow \Delta I_a = s \cdot V_g$$

$$\text{on pose } g = \frac{1}{\rho}$$

on pose l'équation suivante comme base :  $\Delta I_a = s \cdot \Delta V_g + g \cdot \Delta V_a$

avec les valeurs variables :  $I_a = s \cdot v_g + g \cdot v_a$

$$I_a = s \cdot v_g + \frac{1}{\rho} \cdot v_a$$

multiplie par  $\rho$

$$\rho \cdot I_a = s \cdot \rho \cdot v_g + v_a$$

avec  $s \cdot \rho = \mu$

$$\rho \cdot I_a = \mu \cdot v_g + v_a$$

$$\rho \cdot \Delta I_a = \mu \cdot \Delta V_g + \Delta V_a$$

Schéma équivalent d'une triode :

=====

$$I_a = \frac{\mu \cdot V_e}{(\rho + R_a)}$$

Fait le 8 mars 2016 par Alain Verbrugge F6AGV - BHAF - RAF  
A suivre, voir TUBE 1.2.x