

Caractéristique de transfert dynamique d'un push-pull

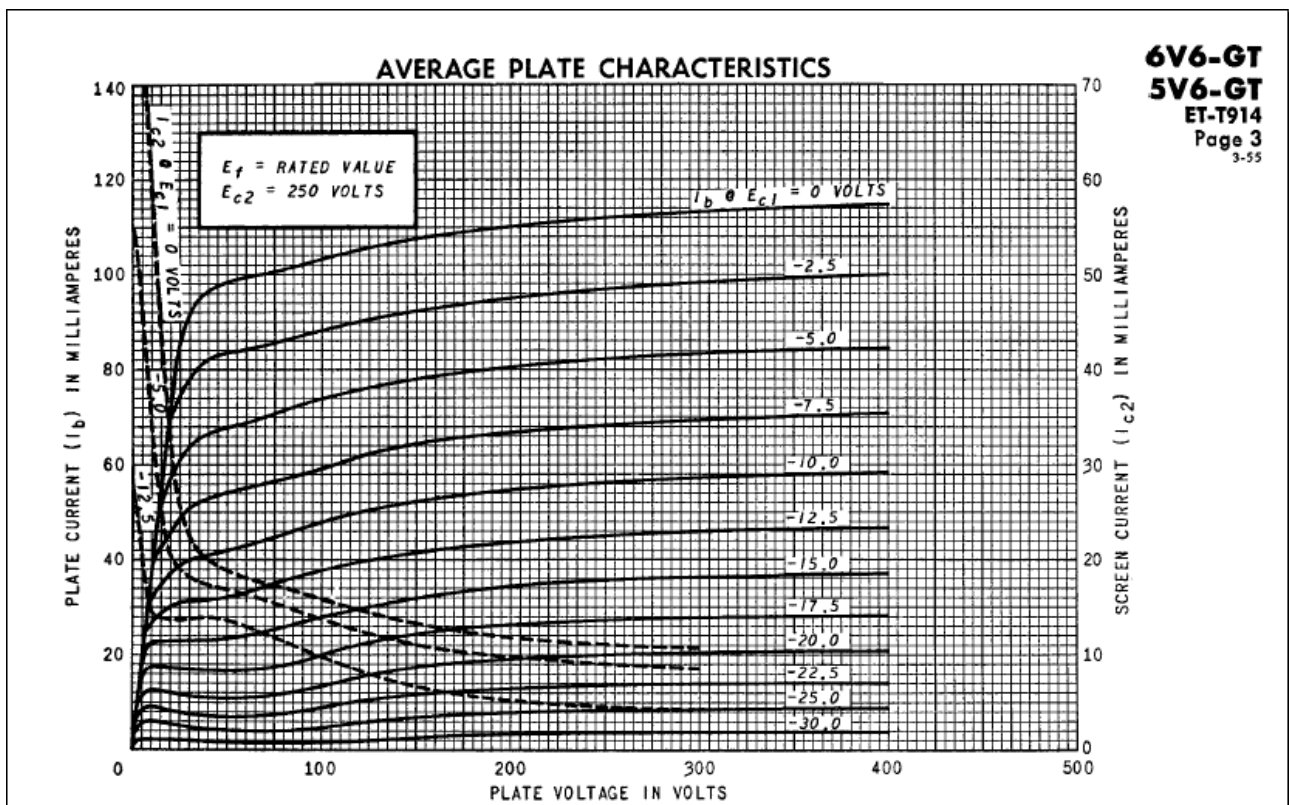
Introduction

Tracer les caractéristiques de transfert dynamique d'un étage push-pull est simple et révélateur du comportement qu'aura l'étage de puissance. On pourra en tirer des informations importantes qui permettront de l'adapter en fonction de l'utilisation (guitare, hifi...).

L'étage PP (push-pull) pourra être à triodes, tétrodes ou penthodes, le principe reste le même.

Push-pull de 6V6GT

Dans un premier temps, il nous faut trouver une caractéristique suffisamment précise pour tracer nos droites de charge. Prenons comme premier exemple un PP de 6V6GT. J'utilise une documentation "General Electric" et je choisis les caractéristiques $I_a=f(U_a)$ pour $U_{g2}=250V$. Ici, on dispose de suffisamment de courbes pour différentes tension de grille de commande pour pouvoir tracer une caractéristique de transfert précise.



⚠ Il faut savoir que ces courbes sont différentes et change en fonction de la tension U_{g2} .

Nous allons partir sur les recommandations de la datasheet pour tracer une première droite de charge.

Les données sont :

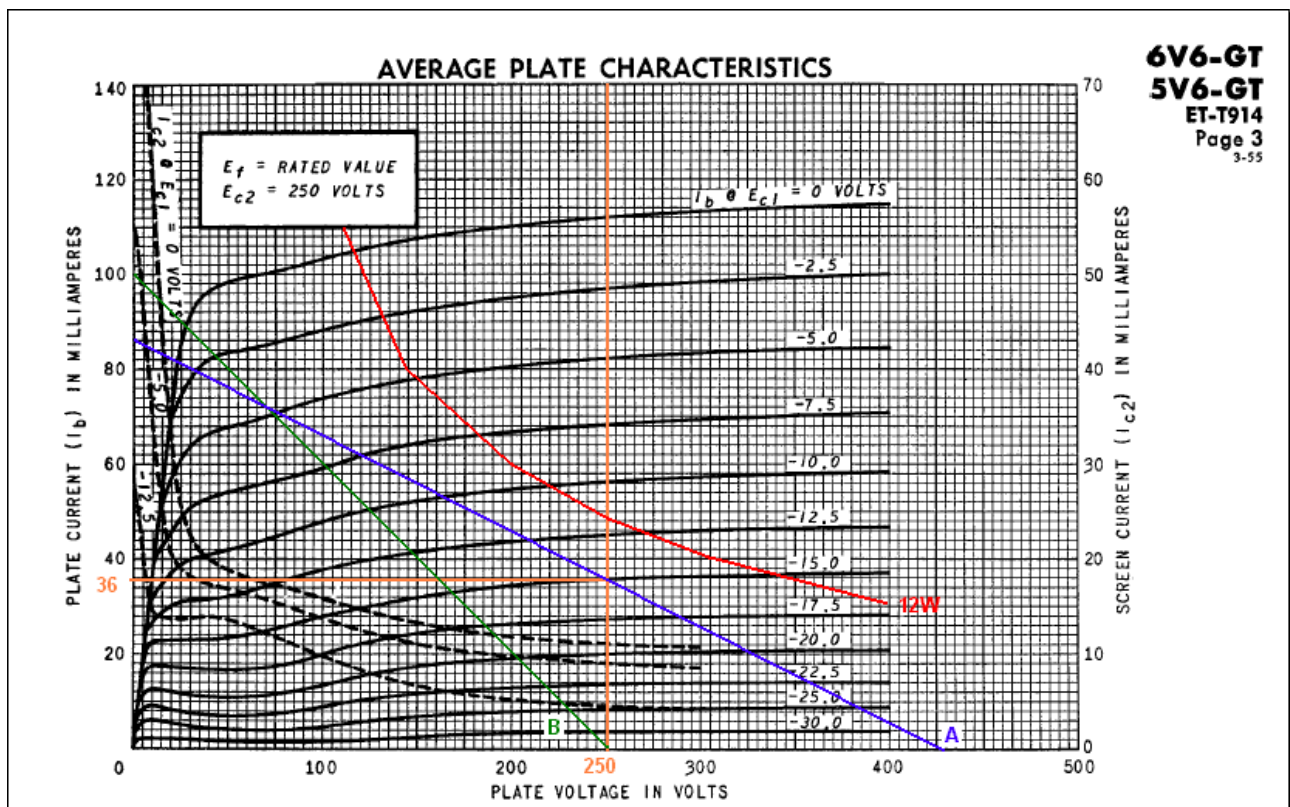
- $U_a = 250V$
- $U_{g2} = 250V$
- $U_{g1} = -15V$
- $I_{a0} = 35mA$ (par lampe)
- $Z_{a-a} = 10k\Omega$

Seules ces données nous intéressent pour tracer notre caractéristiques de transfert dynamique.

Traçons :

1. la courbe de dissipation maximale si elle n'existe pas (ici 12W)
2. une droite verticale à la tension $U_a = 250V$
3. une droite horizontale à $U_{g1} = -15V$, on trouve 36mA à la place de 35mA, rien de grave.
4. en vert la charge en classe B (2500 Ω)
5. en bleu la charge en class A (5000 Ω)

Voilà, rien de très compliqué. On obtient donc ceci :

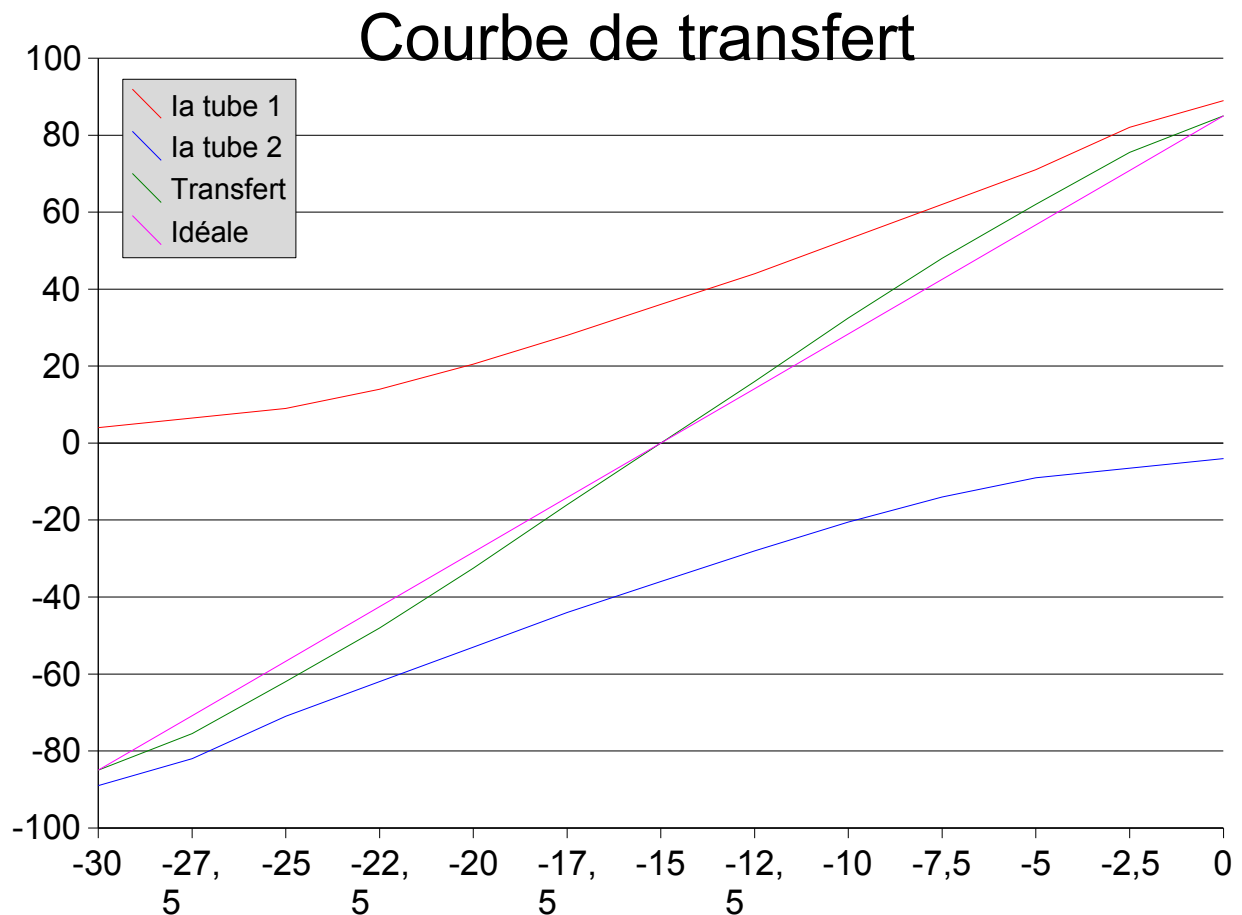


Il ne nous reste plus qu'à faire le relevé des courants I_a pour chaque tension de la grille de commande du tube que j'appellerai le "tube 1". Le "tube 2" fait normalement exactement l'inverse à savoir quand le tube 1 est à 4mA, le "tube 2" est à 88mA mais en sens inverse d'où le signe négatif. Il faut juste faire coïncider les courants d'anode pour la tension de repos (ici -15V).

	-30	-27,5	-25	-22,5	-20	-17,5	-15	-12,5	-10	-7,5	-5	-2,5	0
la tube 1	4	6,5	9	14	20,5	28	36	44	53	62	71	82	89
la tube 2	-89	-82	-71	-62	-53	-44	-36	-28	-20,5	-14	-9	-6,5	-4
Transfert	-85	-75,5	-62	-48	-32,5	-16	0	16	32,5	48	62	75,5	85
Idéale	-85	-70,83	-56,67	-42,5	-28,33	-14,17	0	14,17	28,33	42,5	56,67	70,83	85

Voilà donc le tableau, on peu voir à -15V que le courant dans le "tube 1" et le "tube 2" vaut respectivement 36mA et -36mA car ils sont en opposition ce qui donne bien un courant de repos nul dans le transformateur de sortie.

De ce tableau nous allons tracer maintenant la caractéristique de transfert dynamique de notre PP.



En rouge et bleu, ce sont les courants d'anode de chaque tube. La courbe violette et la droite idéale de transfert. On constate donc que la caractéristique de transfert (en vert pour ceux qui n'auraient pas compris) n'est pas une droite mais une sorte de S très allongé. Cette forme génère des harmoniques impaires. On a tout de même entre -40 et 40mA quelque chose d'assez linéaire pour ne pas engendrer de distortions audibles.

Pour finir avec ce PP, nous allons calculer la puissance de sortie de cette étage. On a un courant maximum de 85mA sur une charge de 2500Ω (et non pas 5000Ω). Donc on applique la loi d'ohm ($P=RI^2$) avec la formule :

$$P(W) = \frac{Z_{a-a}}{4} \cdot \left(\frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \right)^2 = \frac{Z_{a-a} \cdot I_{max}^2}{8}$$

Ce qui nous donne :

$$P(W) = \frac{10000 \times 0,085^2}{8} = 9W$$

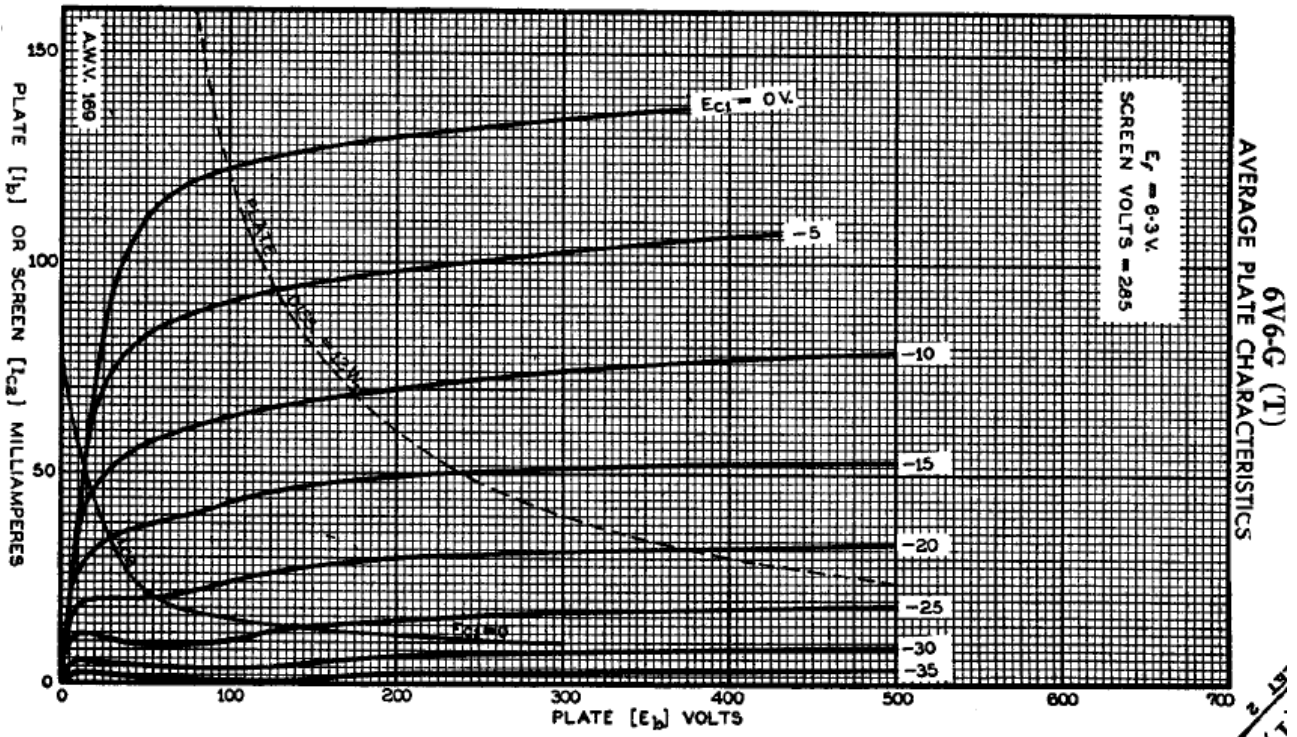
La datasheet annonce 10W donc rien d'incohérent.

Petite remarque en passant : on peut considérer que l'étage fonctionne en classe A car pour une tension de grille de 0V sur le "tube 1" le second n'est pas encore bloqué (il reste 4mA).

La classe A c'est bien, la classe AB c'est mieux

C'est bien sympa mais voilà, moi je veux faire de la HIFI donc il faut que ça soit très linéaire. C'est à ce moment là que le tracé des caractéristiques dynamique prend tout son intérêt.

Prenons notre documentation et regardons les applications recommandées. Pour 285V sur la grille 2 et l'anode, on a un THD (total harmonique distortion) de 3,5% contre 5% annoncé dans le cas précédent. Cette fois j'utilise une datasheet RADIOTRON pour tracer mes droites de charge.



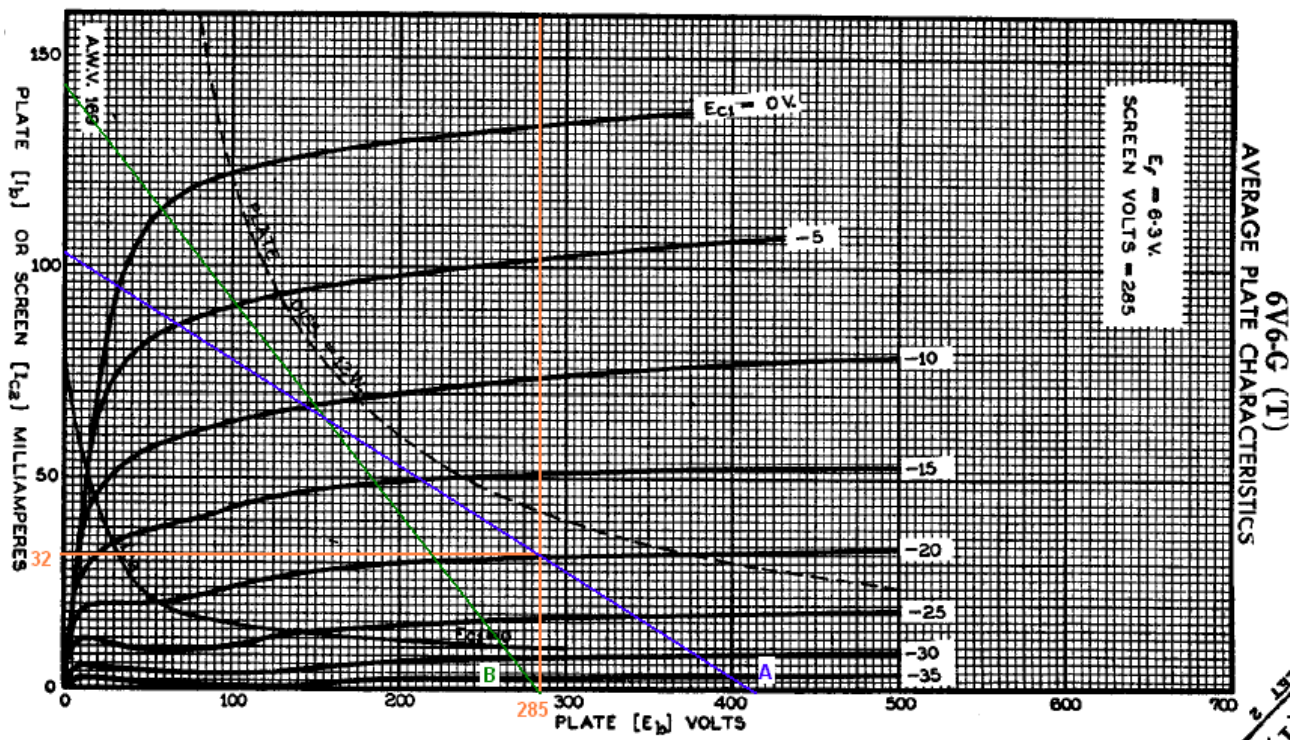
Elle donne un peu moins de points pour les tension de grille de commande mais c'est encore suffisant.

Dans la documentation, les spécifications sont :

- $U_a = 285V$
- $U_{g2} = 285V$
- $U_{g1} = -19V$
- $I_{a0} = 35mA$ (par lampe)
- $Z_{a-a} = 8k\Omega$

Pour simplifier, je prend une tension grille de -20V.

Et on recommence le tracé des droite de charge :

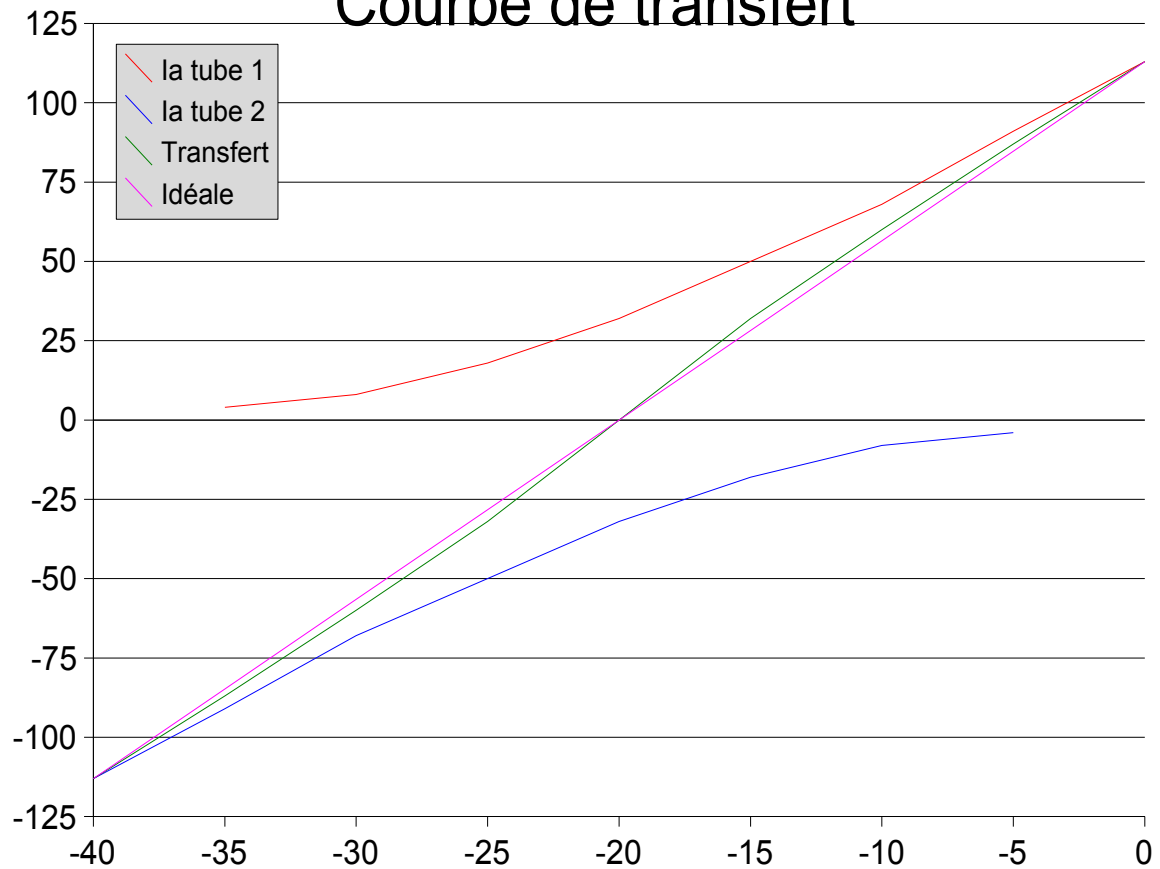


Par le graphique, je déduis que $I_a=32\text{mA}$ pour $V_{g0}=-20\text{V}$ et je remplis le tableau :

	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0
la tube 1		4	8	18	32	50	68	91	113
la tube 2	-113	-91	-68	-50	-32	-18	-8	-4	
Transfert	-113	-87	-60	-32	0	32	60	87	113
Idéale	-113	-84,75	-56,5	-28,25	0	28,25	56,5	84,75	113

On trace enfin la caractéristique de transfert du PP

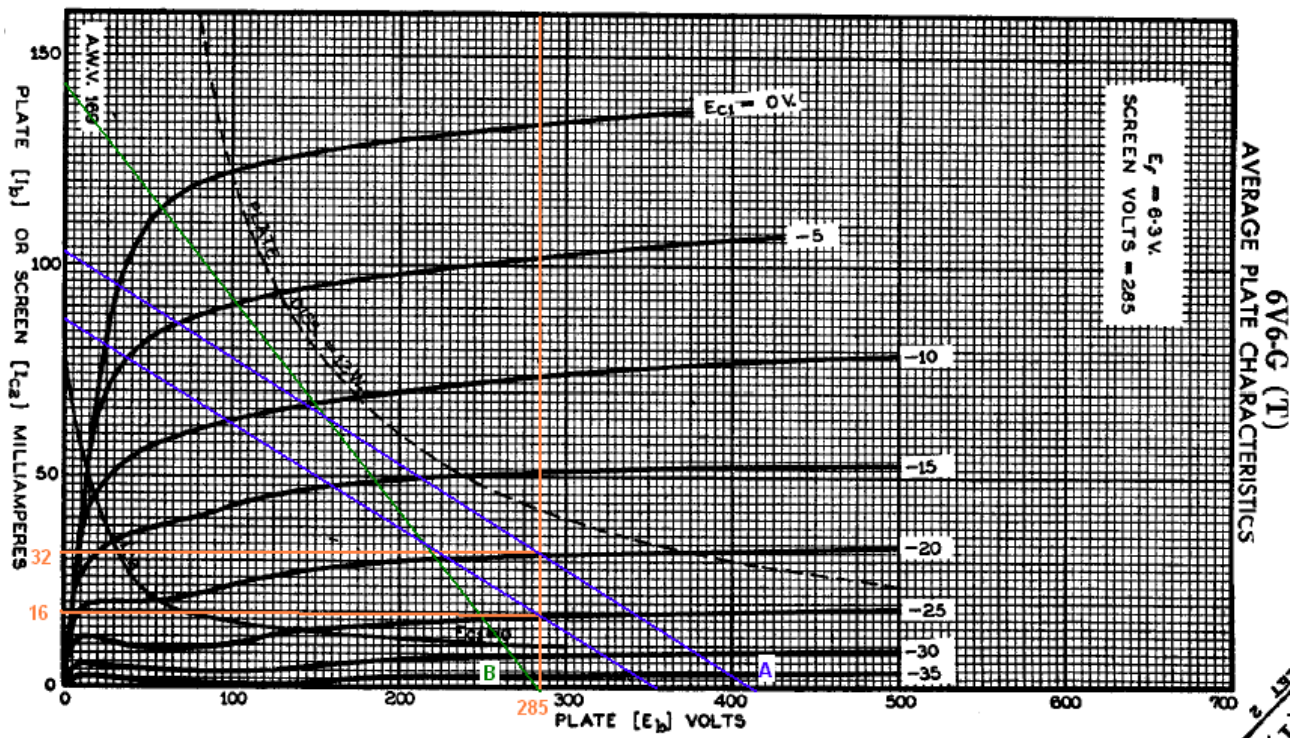
Courbe de transfert



La bonne surprise, c'est que la caractéristique est plus plate que précédemment.

Pourquoi ne pas essayer de changer la polarisation et descendre à -25V pour la tension grille ? Allons-y !

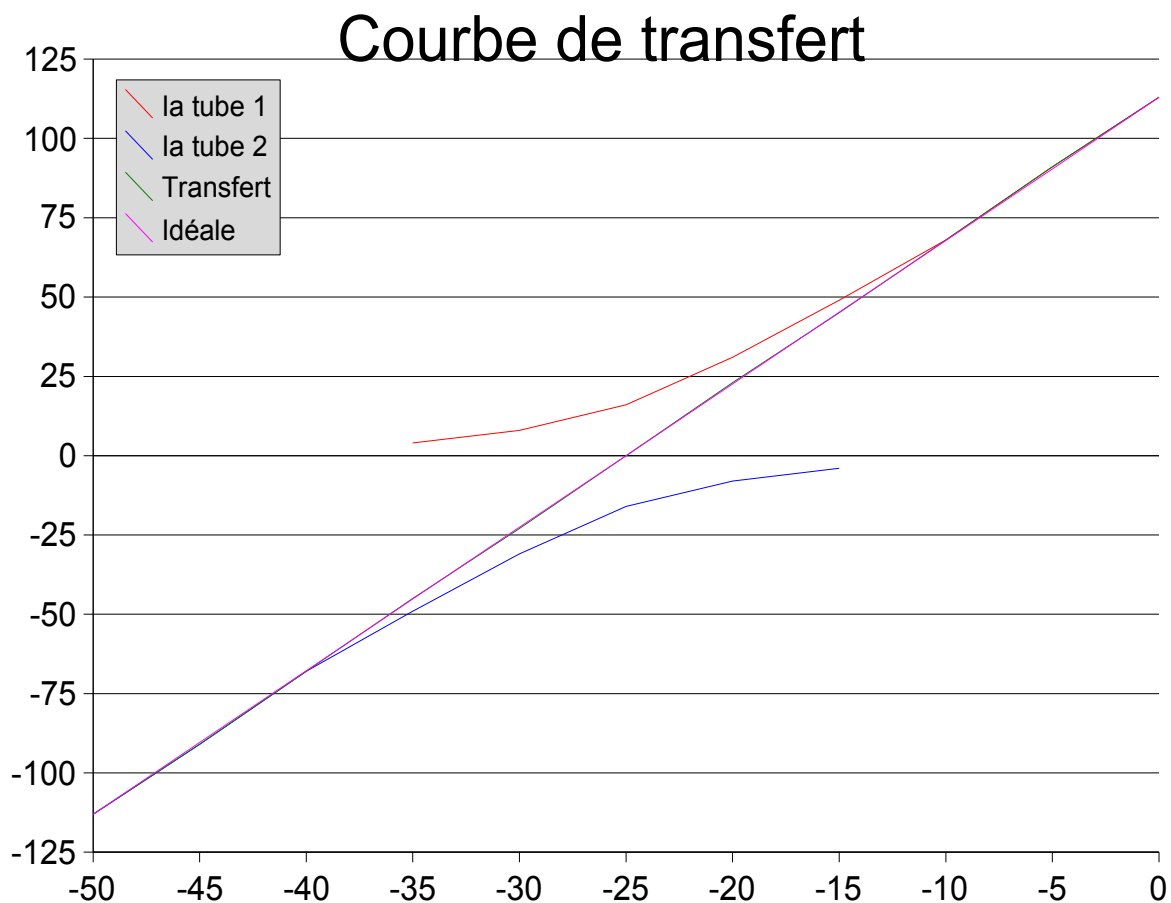
Droites de charge pour $V_{g1} = -25V$



Je viens de tracer une deuxième droite en bleu en dessous de la précédente et je recommence mon tableau

	-50	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0
la tube 1				4	8	16	31	49	68	91	113
la tube 2	-113	-91	-68	-49	-31	-16	-8	-4			
Transfert	-113	-91	-68	-45	-23	0	23	45	68	91	113
Idéale	-113	-90,4	-67,8	-45,2	-22,6	0	22,6	45,2	67,8	90,4	113

Et la nouvelle caractéristique de transfert ressemble à ça



Pas mal du tout ! Cette fois on se retrouve avec une droite quasi parfaite. On comprend donc que cette configuration nous donnera un THD extrêmement faible quelque soit le volume sonore et pourtant on se rapproche de la classe B ! La croyance populaire voudrait que la classe A soit plus linéaire que la classe AB mais c'est en fait l'inverse qui se produit. Si l'on continue à descendre la polarisation, la courbe prendra un forme de S inversé qui génère aussi des harmoniques mais je n'ai pas d'idée de l'impacte sur le son.

Nous n'avons pas parlé de la puissance de ces deux derniers PP . On reprend la formule et on obtient :

$$P(W) = \frac{8000 \times 0,113^2}{8} = 12,8 \text{ W}$$

On augmente la puissance et on diminue le taux de distortions ! C'est pas fabuleux ?

La doc donne 14W, on est un peu en dessous.

Les deux étages (celui polarisé à 32mA et celui à 16mA) fournissent la même puissance. C'est normal car le taux de classe A n'influe pas sur la puissance de l'étage tant qu'on reste en classe AB car l'un des tubes se bloque sur une demi-période.

A suivre...