

Caractéristique de transfert dynamique d'un push-pull

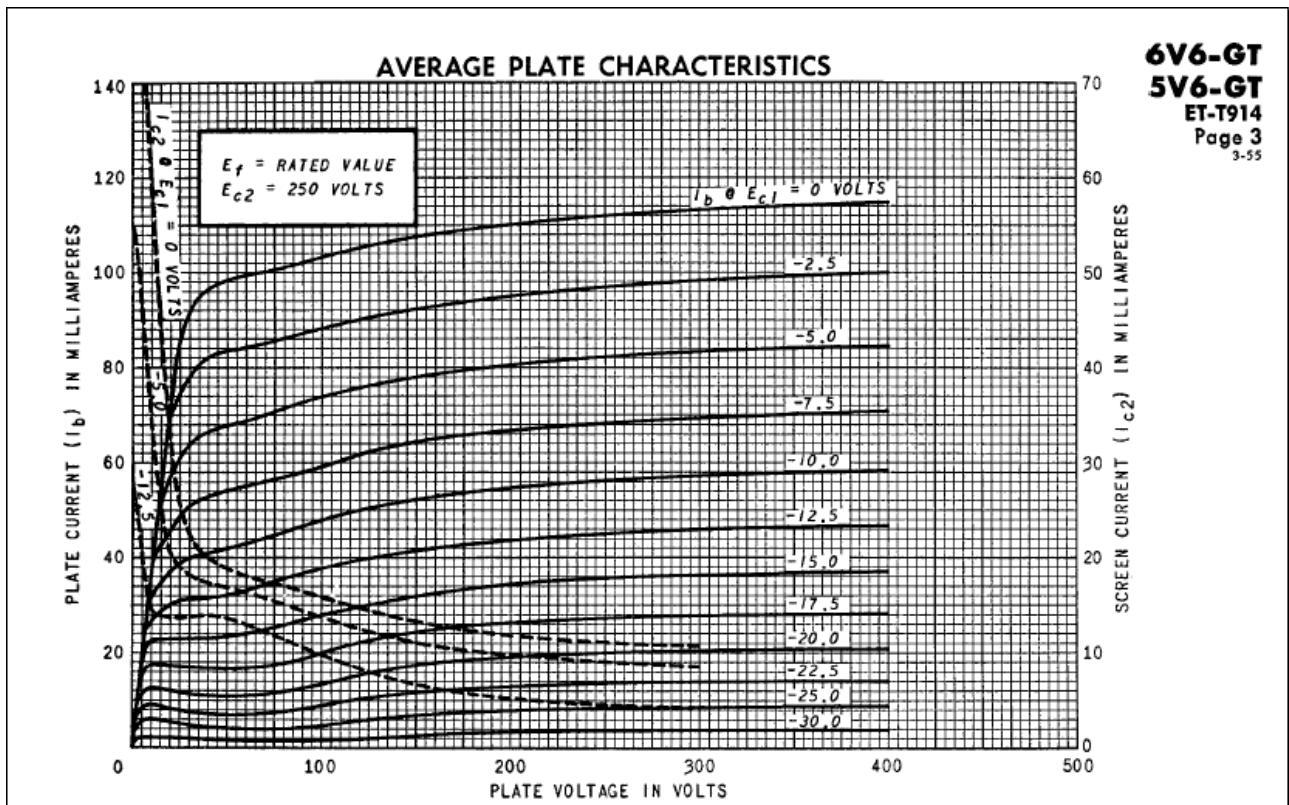
Introduction

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 changent 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 :

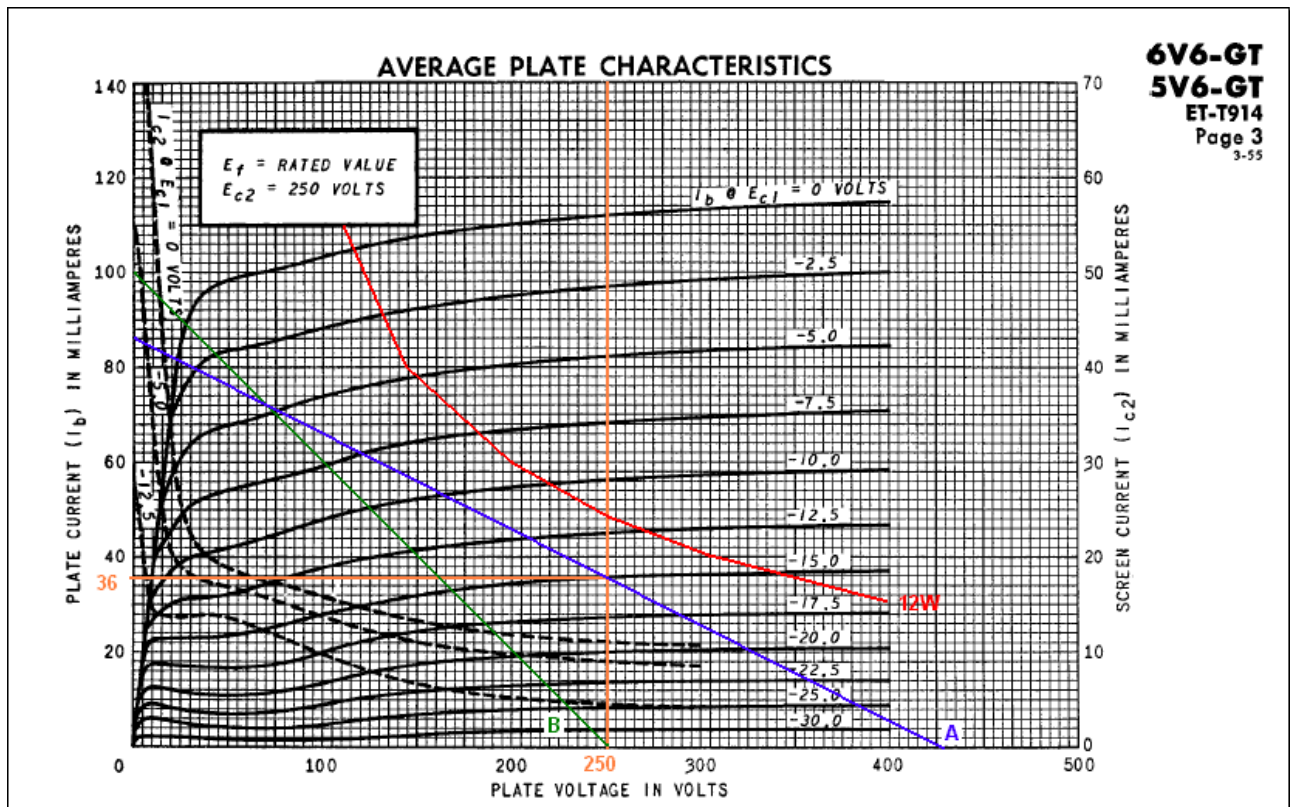
- $U_a = 250V$
- $U_{g2} = 250V$
- $U_{g1} = -15V$
- $I_{a0} = 35mA$ (par lampe)
- $Z_{a-a} = 10k\Omega$

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 (2500Ω)
5. en bleu la charge en class A (5000Ω)

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

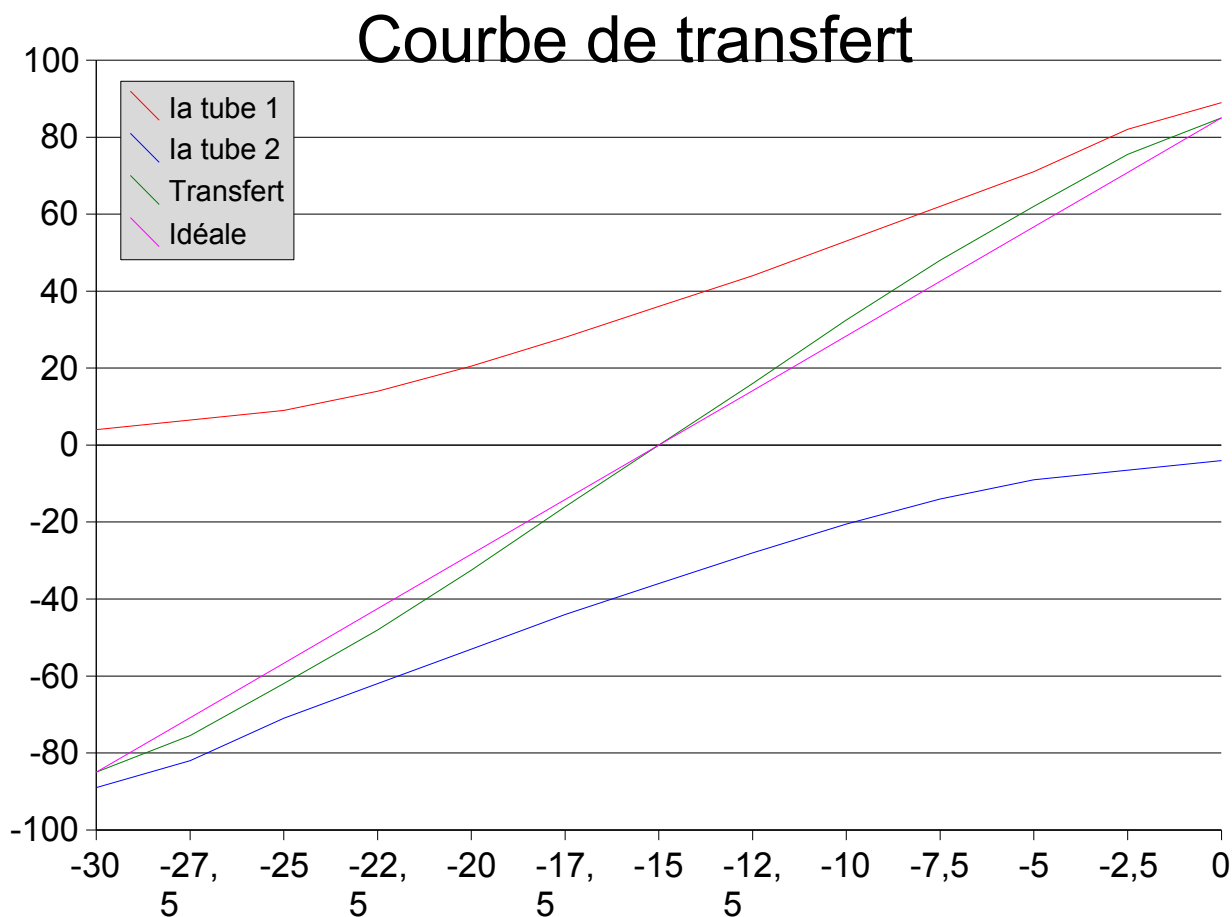


Il ne nous reste plus qu'à faire le relevé des courants I_a pour chaque tension de la grille de commande du tube que j'appellerai le "tube 1". Le "tube 2" fait normalement exactement l'inverse à savoir quand le tube 1 est à 4mA, le "tube 2" est à 88mA mais en sens inverse d'où le signe négatif. Il faut 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 peut 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 :

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

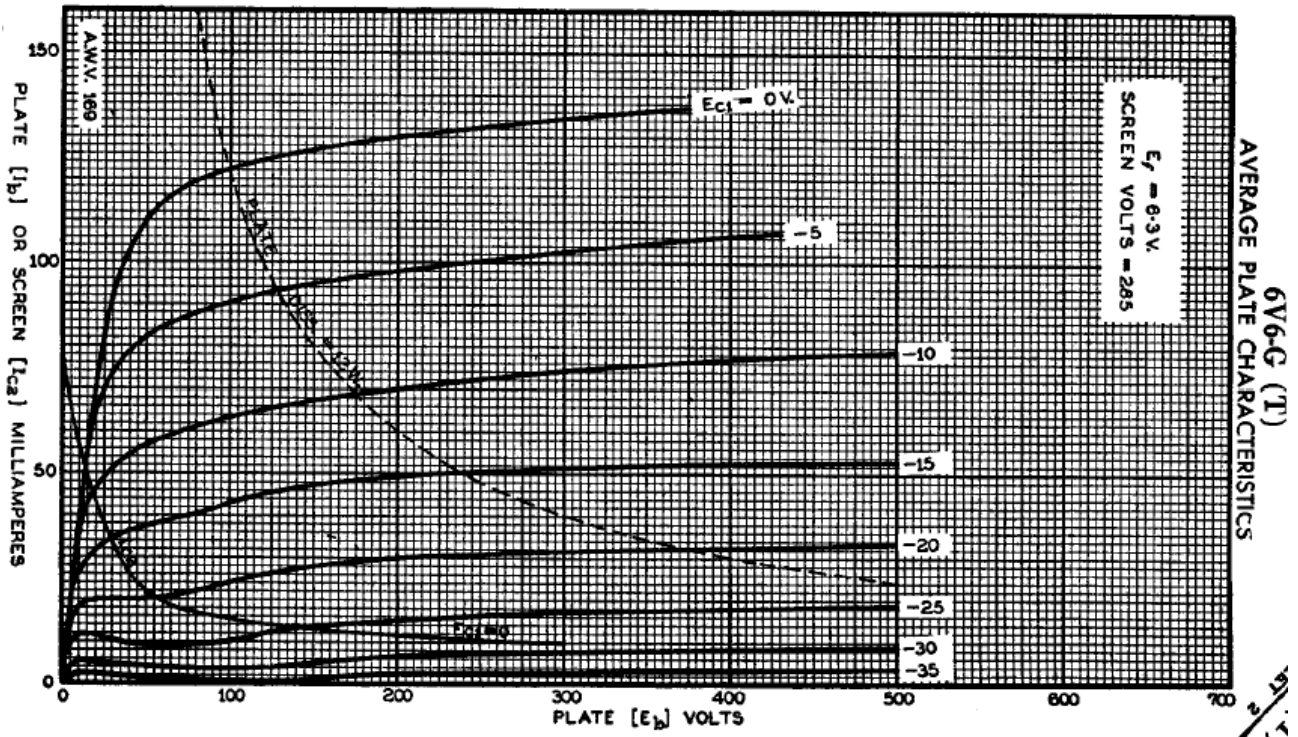
La datasheet annonce 10W donc rien d'incohérent.

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.



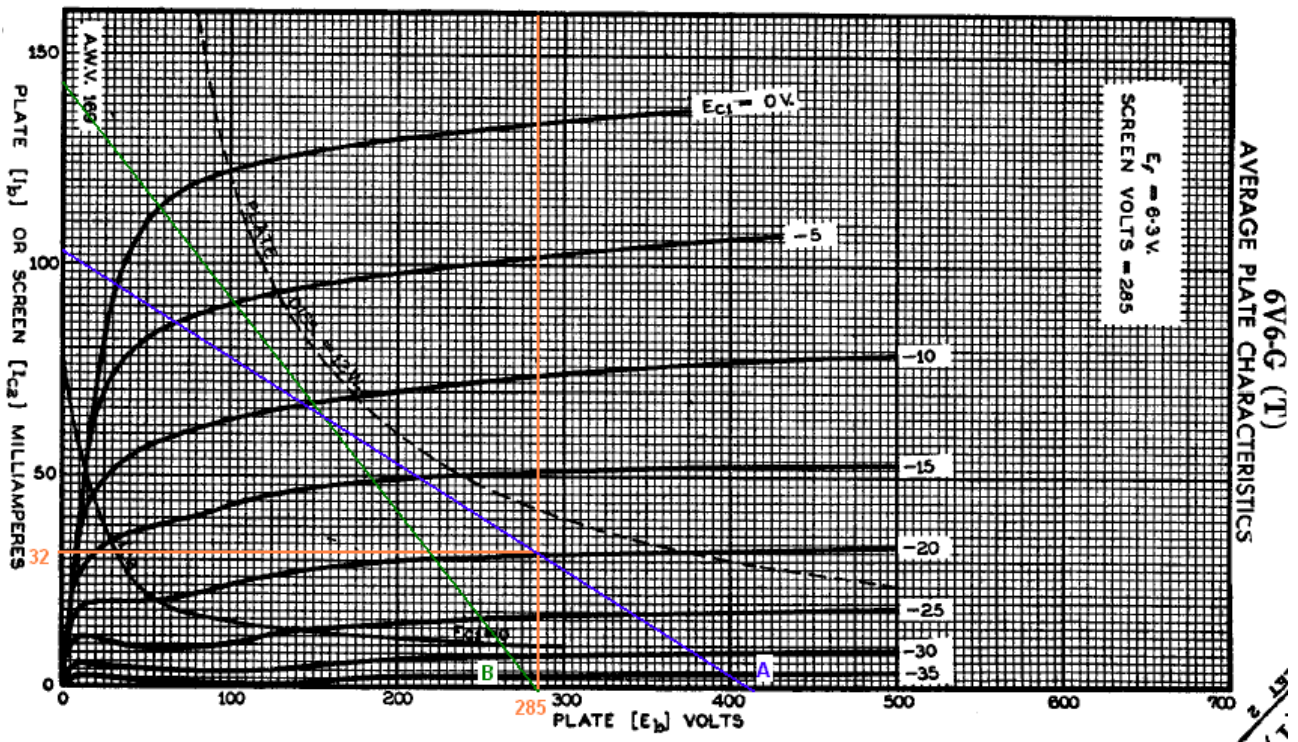
Elle donne un peu moins de points pour les tension de grille de commande mais c'est encore suffisant.

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 :

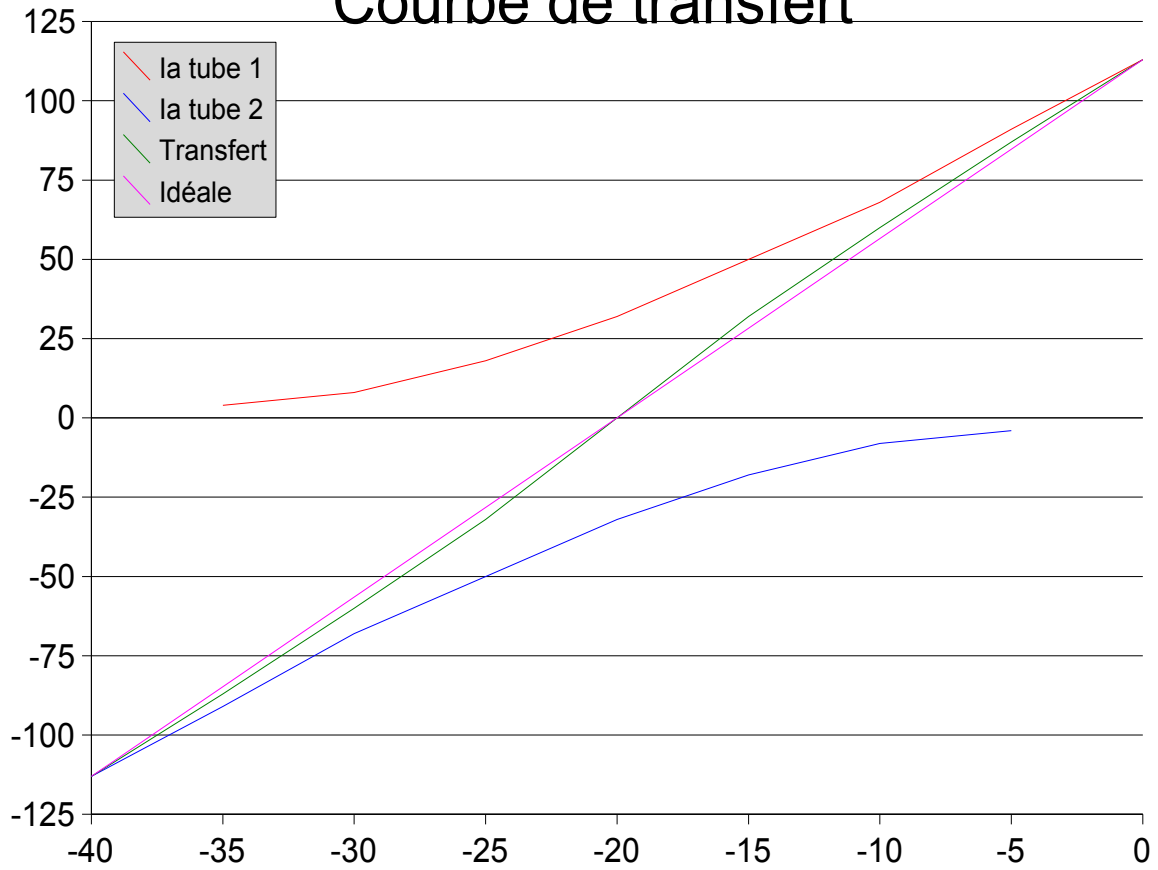


Par le graphique, je déduis que $I_a=32\text{mA}$ pour $V_{g0}=-20\text{V}$ et je remplis le tableau :

	-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

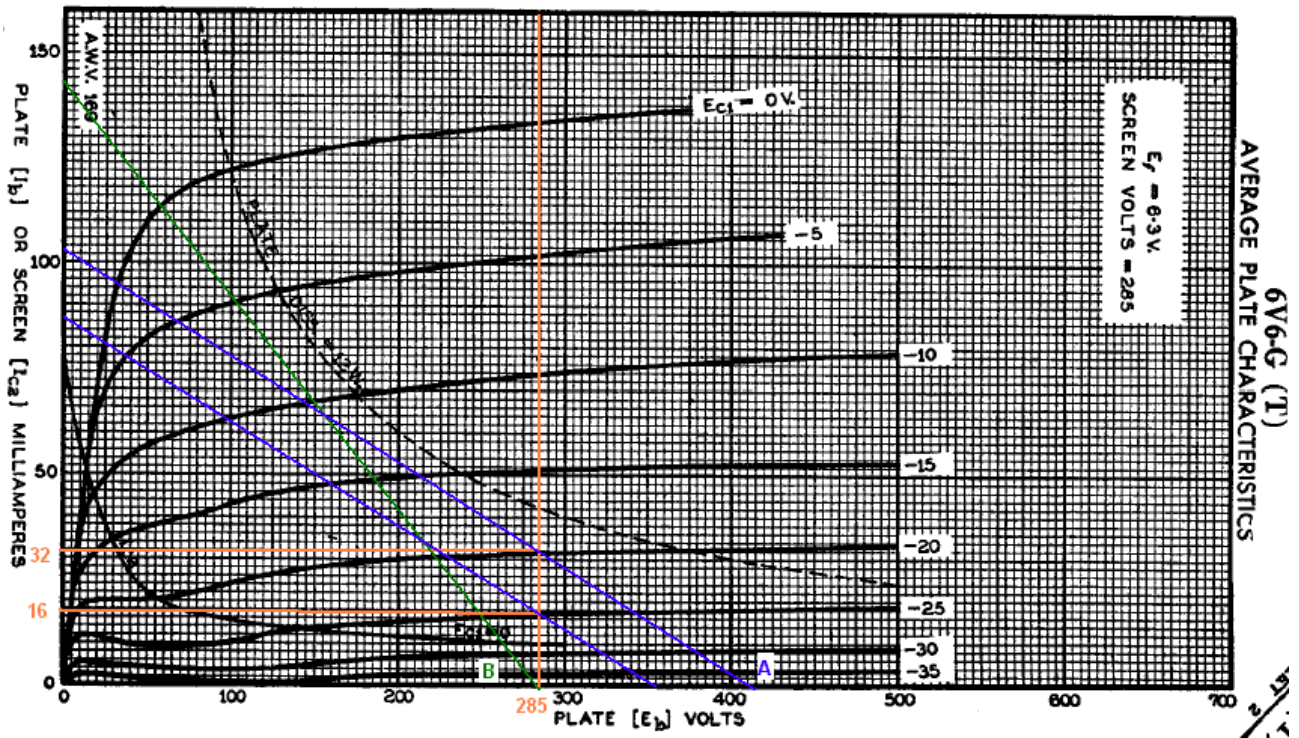
On trace enfin la caractéristique de transfert du PP

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 !

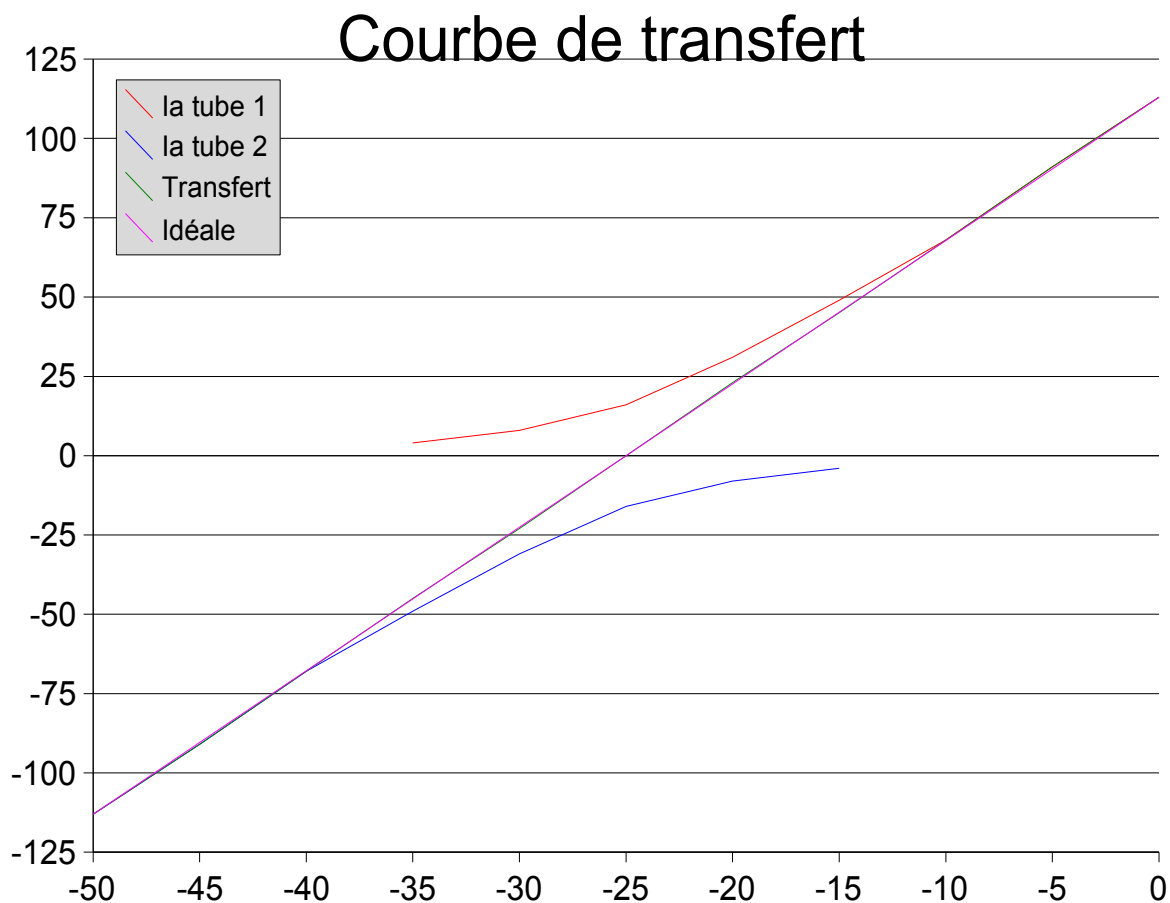
Droites de charge pour $V_{g1} = -25V$



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 :

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

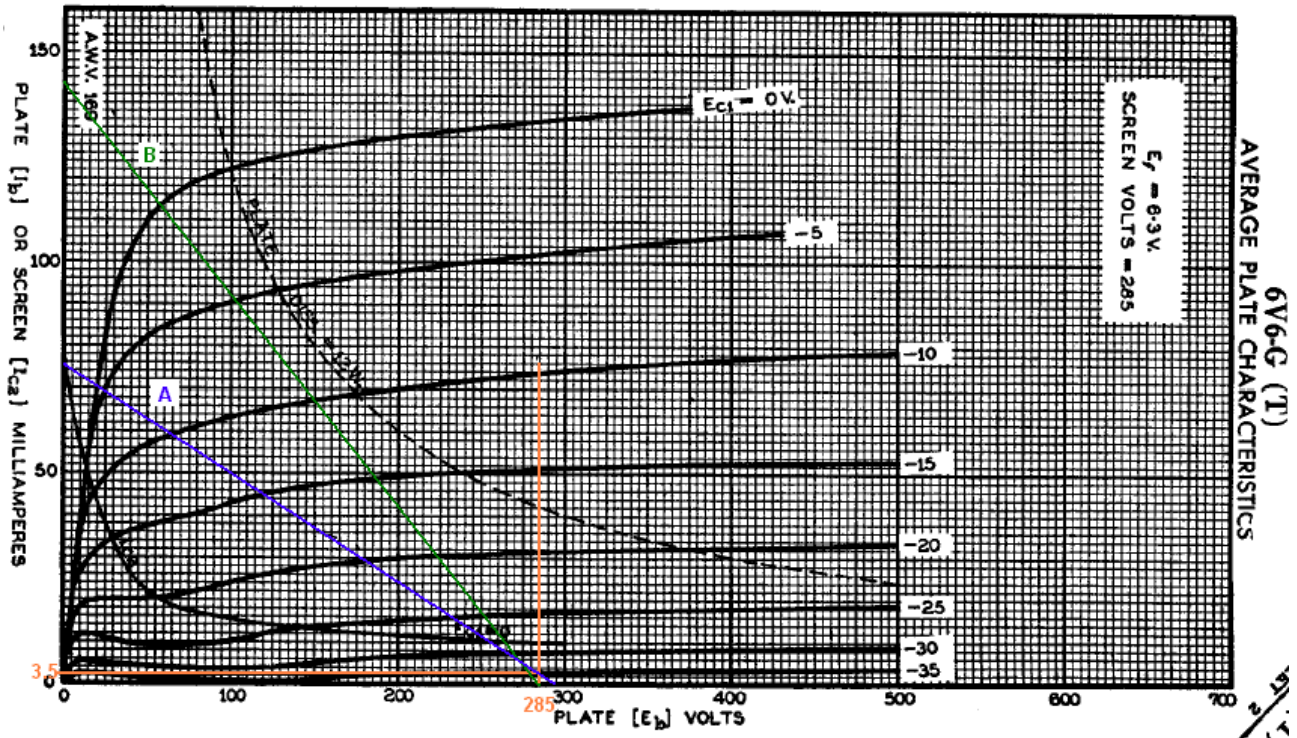
On augmente la puissance et on diminue le taux de distortions ! C'est pas fabuleux ?

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.

La classe AB c'est peut-être mieux mais...

Reprenons la feuille RADIOTRON et traçons la droite de charge à $Z_a - a = 8k$ au maximum de la classe B qu'on peut avoir sur cette feuille de caractéristiques, à savoir une polarisation à $U_{g1} = -35V$.

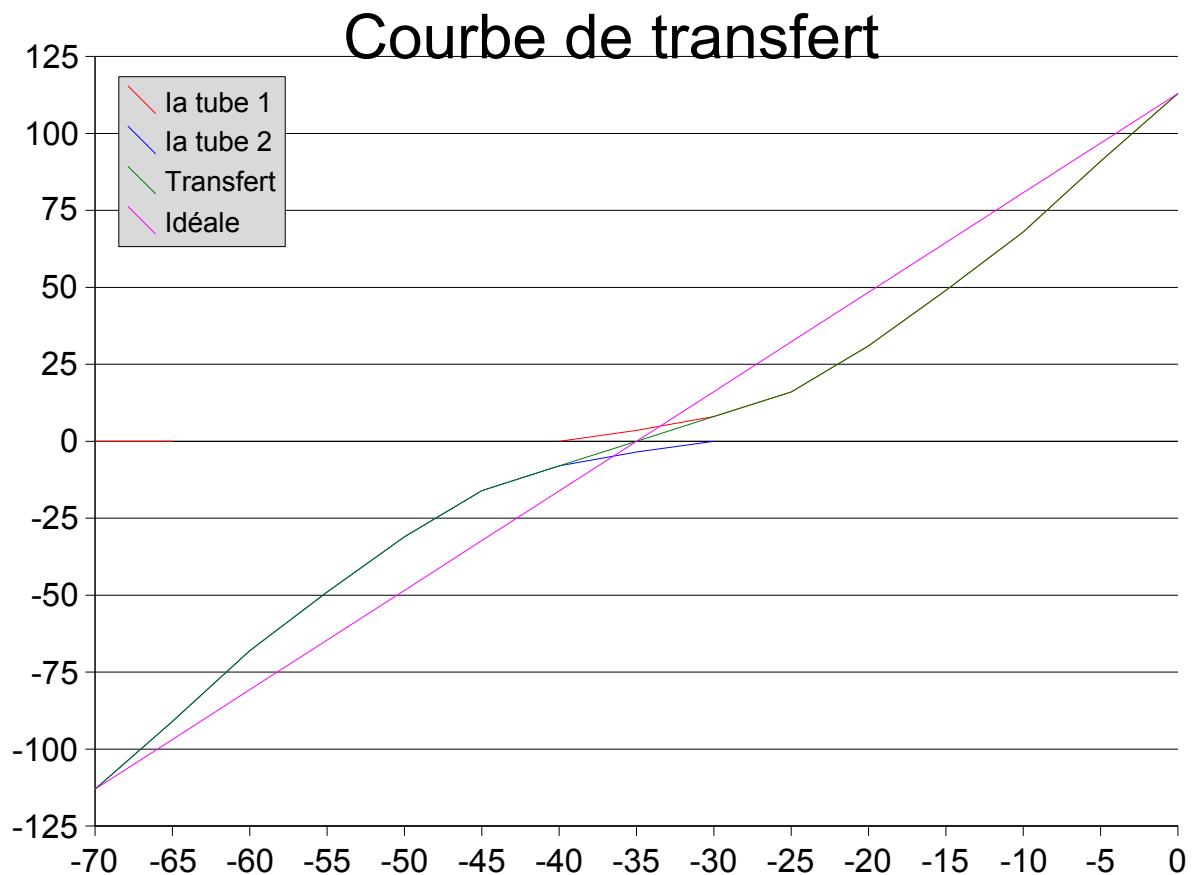


On remarque que l'on fonctionne presque exclusivement sur la classe B en vert. On peut même aller jusqu'à dire qu'on vient de polariser en classe B notre PP.

Remplissons le tableau de valeurs :

	-70	-65	-60	-55	-50	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0
la tube 1								3,5	8	16	31	49	68	91	113
la tube 2	-113	-91	-68	-49	-31	-16	-8	-3,5							
Transfert	-113	-91	-68	-49	-31	-16	-8	0	8	16	31	49	68	91	113
Idéale	-113	-96,86	-80,71	-64,57	-48,43	-32,29	-16,14	0	16,14	32,29	48,43	64,57	80,71	96,86	113

Et la voici la caractéristique de transfert :



Cette fois, on voit très nettement la non linéarité et la distortion de raccordement. La caractéristique de transfert suit au plus près les caractéristiques de chaque tube sauf dans la partie centrale où il se fait encore au niveau du transformateur de sortie la somme des courants.

Qui dit non linéarité dit distortion harmonique (ici impaire toujours car en théorie, la topologie du PP élimine les harmoniques paires).

Constatations

Mon constat est simple, pour un taux de classe A :

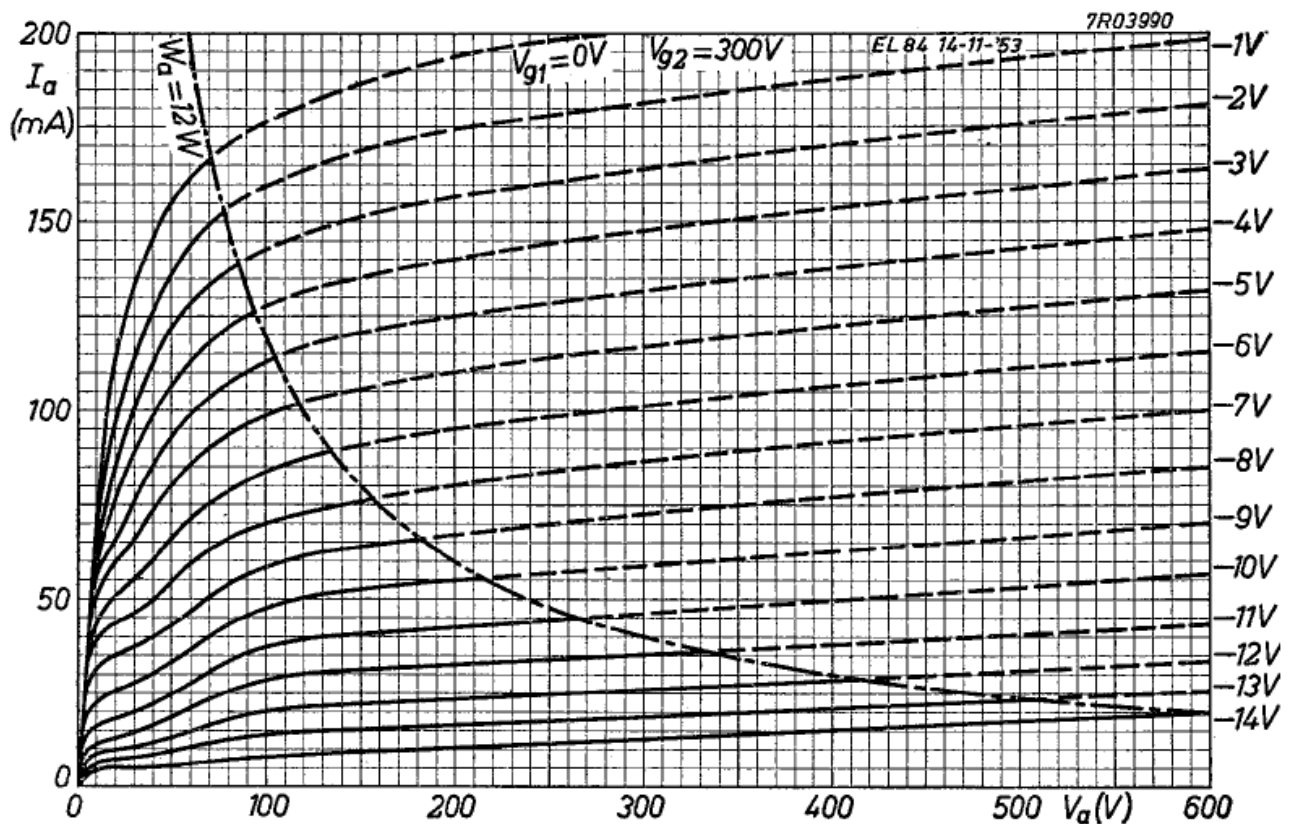
- **trop élevé**, on obtient une forme de S
- **trop faible**, on obtient une forme de S inversé
- **entre les deux** on passe par une phase où la linéarité est quasi parfaite

Il vaut certainement mieux polariser trop que pas assez. En effet on a bien vu que pour une polarisation un peu forte, la forme de S laissait une bonne partie de zone assez linéaire alors que quand elle est trop faible, la zone non linéaire est très rapidement atteinte et cause en plus une sorte d'effet expendeur (pas terrible sur un ampli guitare où on recherche plutôt de la compression).

Ce constat n'est pas forcément valable pour tous les tubes mais en utilisant les bonnes tensions U_a , U_{g2} , U_{g1} et la bonne charge Z_{a-a} , il semble possible d'obtenir de bons résultats avec les tubes courants comme l'EL84, EL34, KT88, 6550, 6L6...

Etude d'un push-pull d'EL84

Je continue mes investigations. Cette fois je vais changer de lampe et utiliser une EL84 à $U_{g2}=300V$.
Pour tous les graphiques qui suivent, je vais prendre une documentation PHILLIPS



On aurait apprécié d'avoir pour U_{g1} -15V, -16V et -17V pour la précision mais on va faire avec... ou plutôt sans.

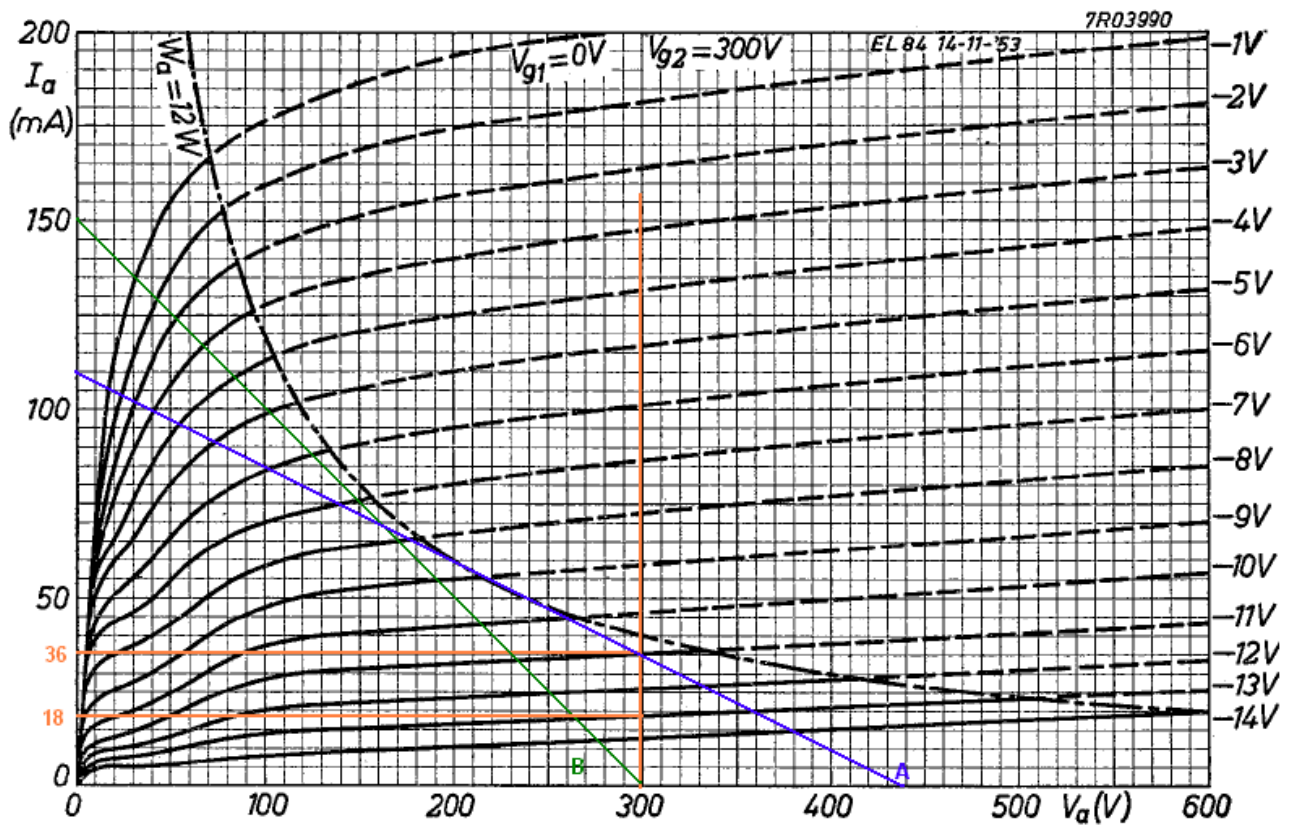
D'après la doc...

Les spécifications d'utilisations en classe AB sont :

- $U_a = 300V$
- $U_{g2} = 300V$
- $I_a = 36mA$
- $Z_{a-a} = 8k\Omega$

Traçons donc notre droite de charge. Pour une polarisation à 36mA on obtient $U_{g1} = -11V$.

On peut voir que la droite de charge en classe A passe juste sur la courbe de dissipation max de notre anode.



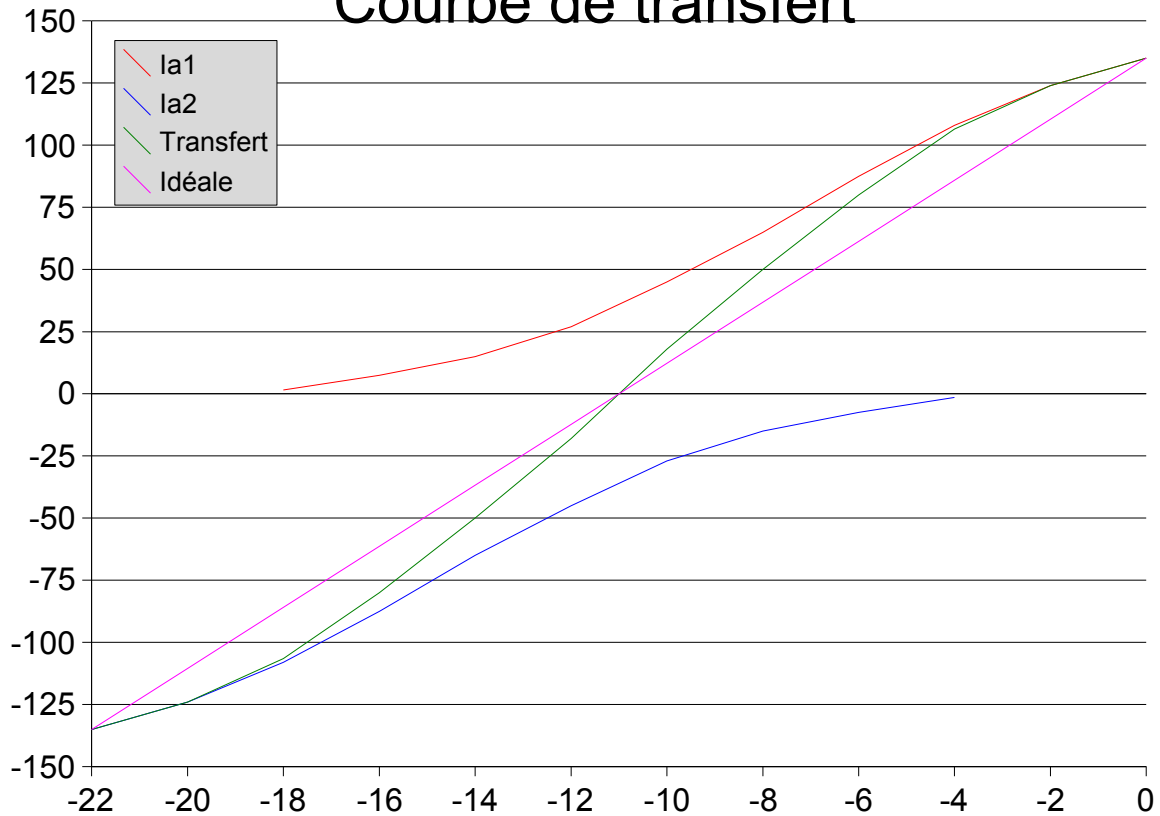
On va donc prendre nos points et remplir le tableau pour ne pas changer.

	-22	-20	-18	-16	-14	-12	-10	-8	-6	-4	-2	0
Ia1			1,5	7,5	15	27	45	65	87,5	108	124	135
Ia2	-135	-124	-108	-87,5	-65	-45	-27	-15	-7,5	-1,5		
Transfert	-135	-124	-106,5	-80	-50	-18	18	50	80	106,5	124	135
Idéale	-135	-110,45	-85,91	-61,36	-36,82	-12,27	12,27	36,82	61,36	85,91	110,45	135

Pas de case -11V ? Et non, j'ai volontairement pris les points de deux en deux pour ne pas se retrouver avec un tableau de taille trop importante. Peu-importe, on a pu voir que de toute façon à la tension de polarisation (ici -11V) les courants s'annulent pour donner 0A dans le transformateur de sortie. Cela n'a donc pas d'incidence sur la caractéristique de transfert qui suit.

J'ai en revanche complété les cases -16V et -18V pour finir la courbe (en respectant la forme caractéristique d'un courbe Ia en fonction de Ug1) qui s'arrêterait un peu trop tôt pour avoir quelque chose de correcte. C'est la qu'on voit l'importance d'avoir des documentations avec le maximum de courbes pour Ug1.

Courbe de transfert



Quelle beau S ! On peut le considérer relativement linéaire entre -100 et 100mA mais après ça flanche.

La puissance que je considère comme en son non distordu vaut :

$$P = \frac{8000 \times 0,1^2}{8} = 10W$$

Et la puissance max vaut :

$$P = \frac{8000 \times 0,135^2}{8} = 18,2 W$$

La doc annonce 17W pour un THD de 4%. Il se peut donc qu'on dépasse ces 4% mais sachant qu'on est à un peu plus de 18W, ça semble normal.

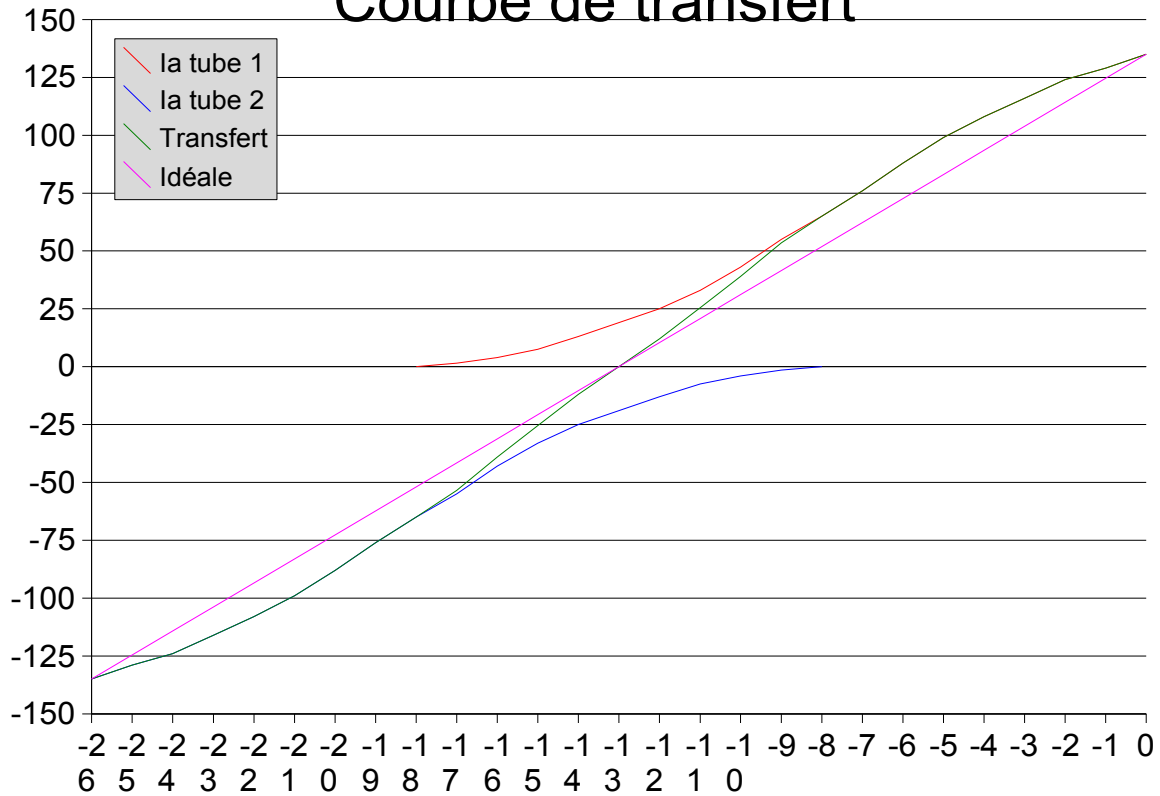
Nous avons constaté pour le PP de 6V6GT qu'en diminuant la polarisation, nous réduisons la forme en S. On va faire ça et descendre à 18mA.

Je ne remet pas de tableau, vous avez compris comment je fait.

Pour 18mA, je trouve graphiquement $U_{g1} = -13V$.

La nouvelle caractéristique de transfert devient alors celle-ci

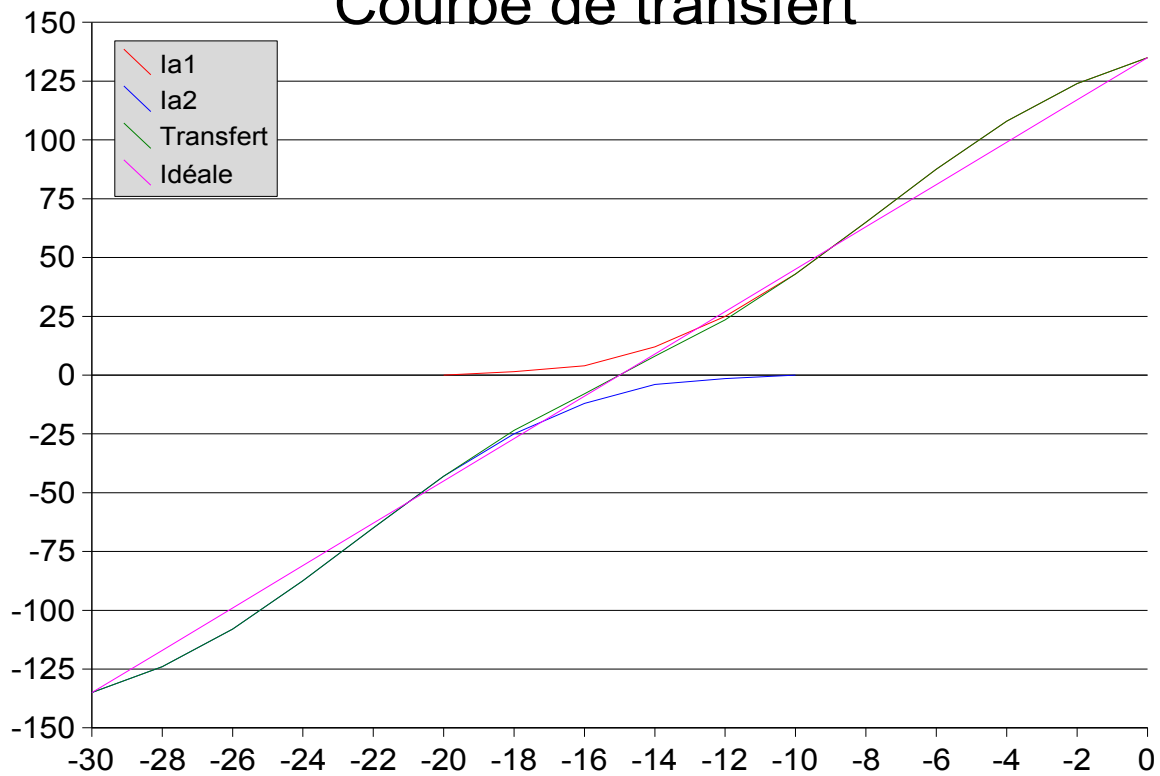
Courbe de transfert



Le S est un peu moins prononcé. Et si je poussais jusqu'à 9mA ?

Je trouve graphiquement $U_{g1} = -14V$ et cette caractéristique :

Courbe de transfert



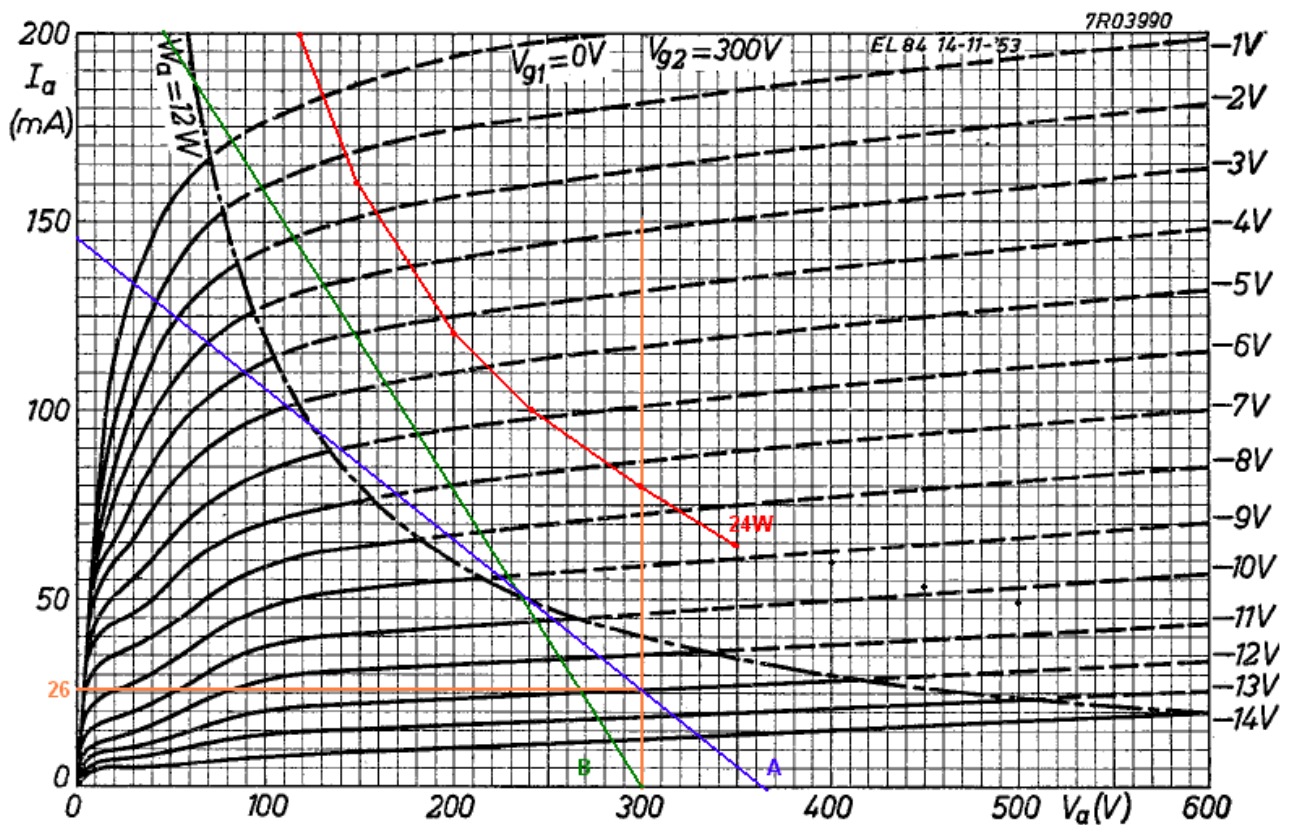
Cette fois, la caractéristique est plus proche de la droite idéale ce qui signifie moins de distortions.

La puissance reste de 18,2W max, car comme je l'ai expliqué plus tôt, la taux de classe A n'influe pas sur la puissance tant que l'on reste en classe AB.

Mon souci c'est que je vois une sorte de "vague" qui passe de part et d'autre de la droite idéale, Je ne suis pas fan. Alors quelle solution trouver pour linéariser tout ça ? Il y a bien la contre-réaction mais bon j'ai bien réussi à faire une droite avec mes 6V6, il doit bien y avoir moins de faire mieu.

Charge la mule !

Et si on changeait la charge ? prenons $Z_{a-a}=5k\Omega$ et retraçons une nouvelle droite de charge.



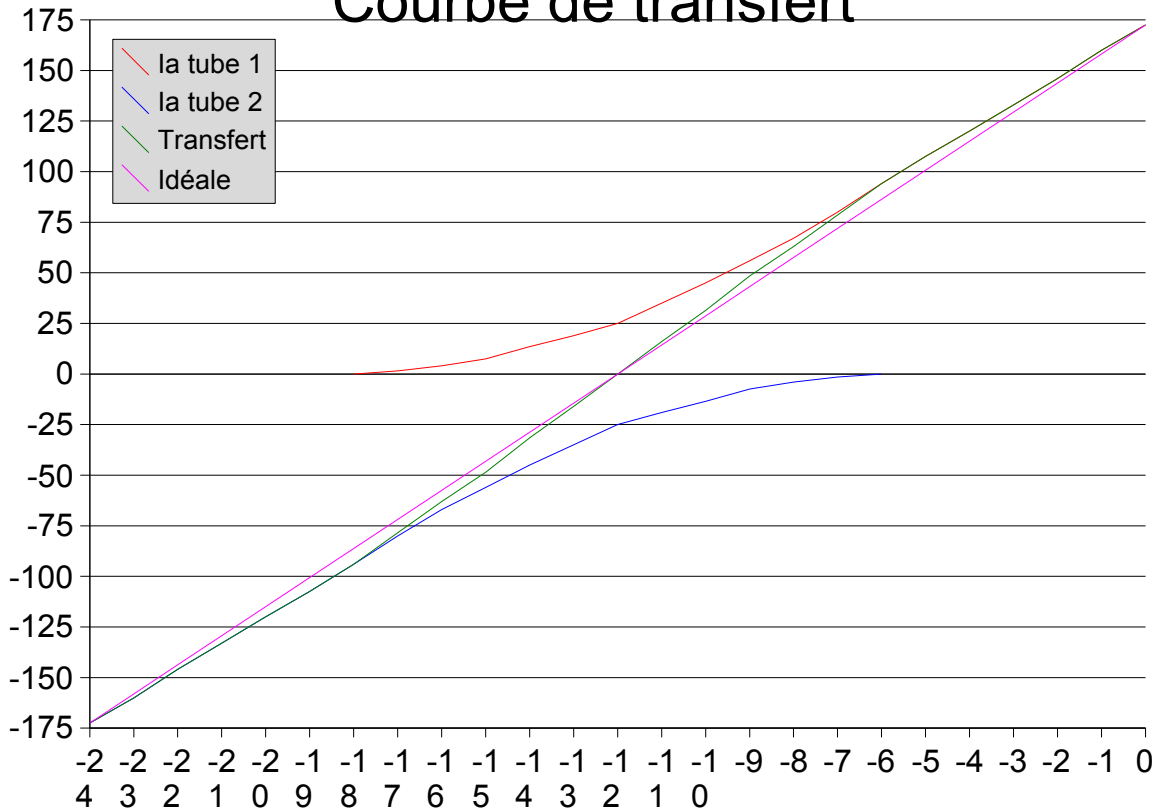
Aye !!! la droite bleu (classe A) traverse la zone interdite de dissipation max d'anode. Pas grave car comme l'a démontré l'excellent article "La droite de charge en classe AB" de Mikka Grytviken, si la droite de classe B prend le relais on peut se permettre d'approcher cette zone mais sans la franchir.

Ici on dépasse un peu mais c'est une construction graphique alors on peut se le permettre (mais juste un peu), dans la réalité on polarisera un peu moins chaud pour ne pas prendre de risques. En revanche, la droite verte traverse très franchement la zone de dissipation max c'est pour cette raison que j'ai tracé en rouge la courbe 2 x P_{a-max} soit 24W pour vérifier qu'elle ne dépassait pas.

La tension de grille de commande vaut -12V pour un courant d'anode de 26mA qui est le maximum admissible (bias à 65% c'est très proche des classiques 70%).

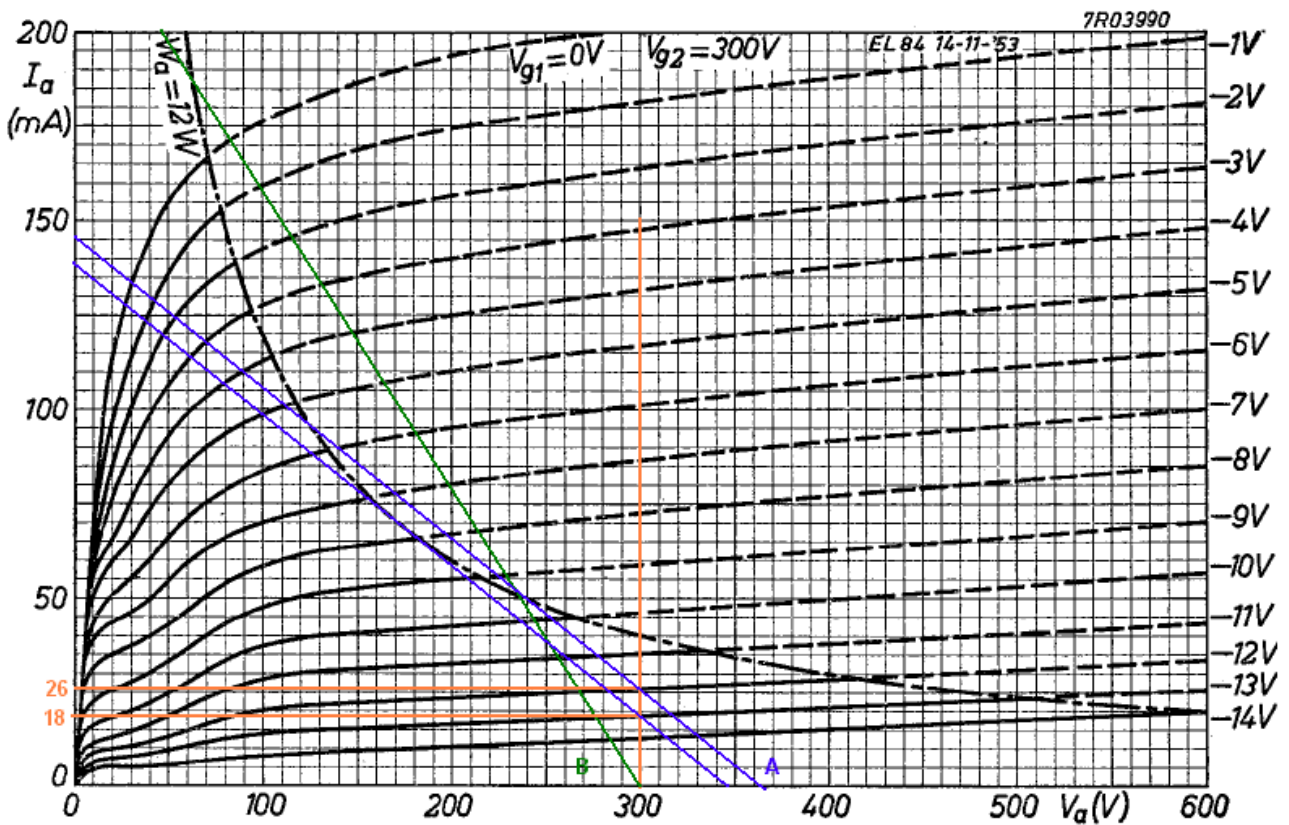
La caractéristique de transfert ressemble alors à ceci :

Courbe de transfert

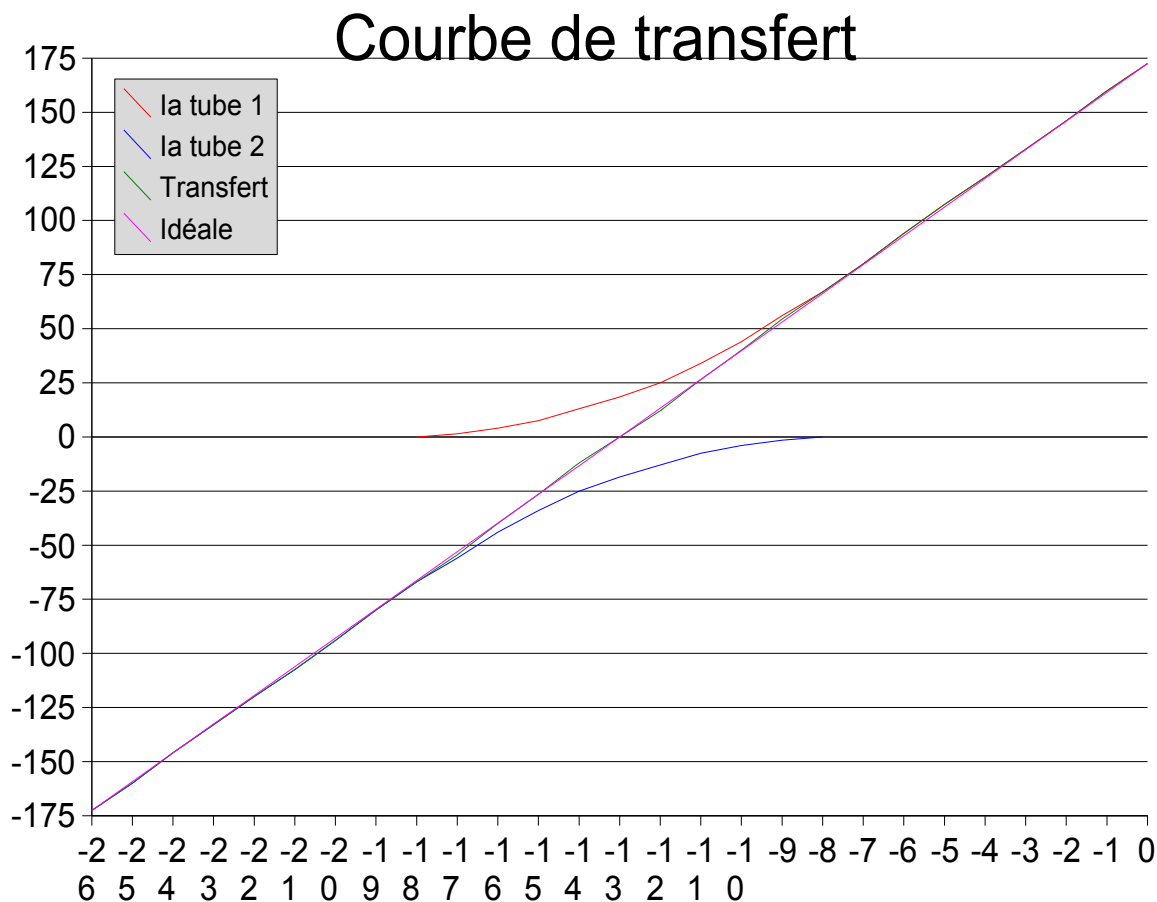


Mais quelle surprise !!! Elle ressemble à la caractéristique que nous avons tracé avec notre PP de 6V6 pour $I_a=32\text{mA}$. Ca devient vraiment intéressant.

Pour diminuer la forme de S, j'avais diminué la polarisation. Je vais donc descendre à $U_{g1}=-13\text{V}$ pour voir si le comportement est le même. Je trace une nouvelle droite bleu qui coupe $U_{g1}=-13\text{V}$ à $I_a=18\text{mA}$.



Et c'est ainsi que j'obtiens cette caractéristique de transfert



Elle est proche de la droite idéale avec laquelle elle est presque confondue.

Enfin la puissance sur une charge de $5k\Omega$ d'anode à anode vaut :

$$P = \frac{5000 \times 0,172^2}{8} = 18,5 W$$

Ce qui est très bon et tout ça avec un THD très faible.

Conclusion

Cette méthode peut sembler longue mais est révélatrice du comportement dynamique d'un PP. Il faut également être conscient que pour des fréquences basses, la caractéristique prend une forme elliptique ce qui engendre des distortions également.

Pour un ampli guitare, on comprend aisément que la recherche d'harmonique pour colorer le son est intéressant. Malgré tout on peut modifier la polarisation de manière à modeler le son et changer le caractère de l'ampli. Il va sans dire que les qualités tonales de chaque lampe sont particulières et qu'elles sont au moins aussi importantes que la classe dans laquelle va fonctionner l'étage finale. En ce qui concerne la hifi, il semble normal de limiter au maximum les distortions et que l'inverseur de phase en amont soit très soigné car une simple différence de niveau entre les deux grilles de commande engendrera des distortions.