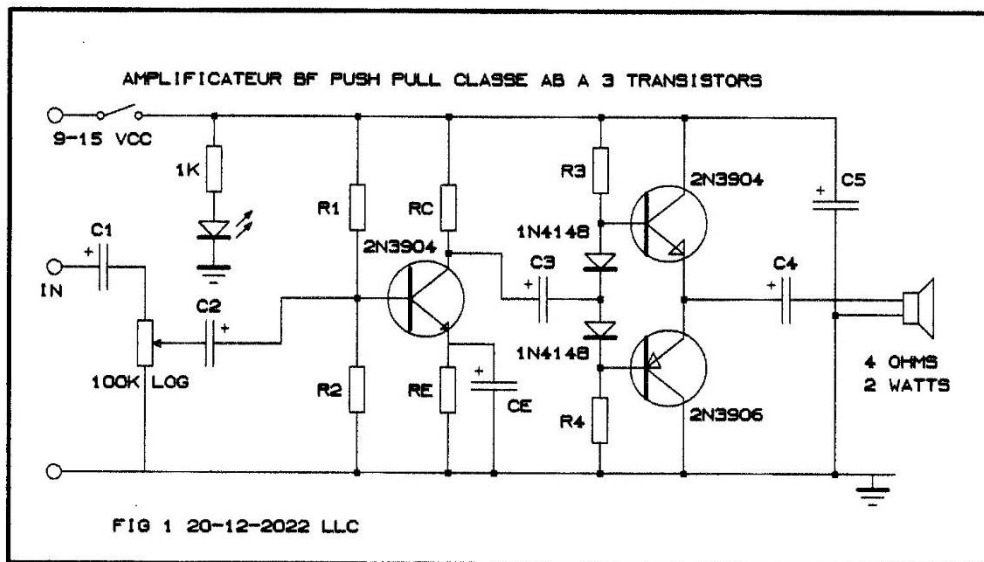


Petit amplificateur audio à 3 transistors et un Push Pull 2N3904/2N3906.

Voici un petit amplificateur audio à 3 transistors, sans grande prétention, dont la puissance n'est pas supérieure à un watt, mais qui offre un petit aspect didactique. Cet amplificateur comprend deux étages. Le premier étage fonctionne en classe A avec un 2N3904. Le deuxième étage est un Push Pull 2N3904/2N3906 qui fonctionne en classe AB. Le schéma se trouve ci-dessous. Il est largement inspiré de nombreux tutoriels que l'on trouve facilement sur le web, et en particulier sur le site www.electronics-tutorials.ws et <https://sonelec-musique.com> de Sonelec-Musique.

Fig. 1 - Schéma théorique.



Comme toujours lorsqu'on veut concevoir un circuit, il faut définir des conditions de départ et faire quelques hypothèses, quitte à les vérifier par la suite. On va alimenter en 9 Vcc, parce que c'est une tension que l'on peut facilement obtenir à partir de piles. La tension d'alimentation est donc $V_{cc} = 9$ Volts. On a aussi choisi les transistors 2N3904 (NPN) et son fidèle et robuste compagnon le 2N3906 (PNP). Le premier étage fonctionne en classe A. Un courant traverse donc le transistor, même au repos, lorsqu'il n'y a pas de signal à l'entrée. On va commencer par définir la tension de repos $V_{ce(q)}$ et le courant au repos $I_{c(q)}$. Quiescent (q) point en Anglais. On portera ces valeurs de $V_{ce(q)}$ et $I_{c(q)}$ sur la droite de charge par après.

1. Choix de la tension de repos du transistor $V_{ce(q)}$. C'est la tension entre le collecteur et l'émetteur au repos. Comme on travaille en classe A, on a tout intérêt à va prendre $V_{ce(q)} = \frac{1}{2} V_{cc}$. En effet, dans ces conditions, on assure un maximum de débattement (swing) au signal en sortie du transistor. On évite ainsi l'écrêtage vers le haut (saturation) ou vers le bas (cut-off), ce qui entraîne de la distorsion qui s'entend le plus souvent ! Et c'est particulièrement dommageable pour un étage en classe A qui est conçu pour amplifier le signal de manière parfaite ! $V_{ce(q)}$ est la tension qui apparait aux entre le collecteur et l'émetteur quand aucun courant ne traverse le transistor.

2. Choix du courant de repos $I_c(q)$. C'est le courant qui va traverser le transistor au repos. Ici on n'a pas trop de contrainte, si ce n'est qu'on recommande souvent de ne pas dépasser 10 % de la valeur maximale de courant de collecteur donnée dans la datasheet du transistor, ce qui n'est pas difficile ! On a aussi intérêt à garder ce courant au repos assez bas, surtout si l'on utilise une alimentation à piles. On va prendre $I_c(max) = 9$ mA, ce qui est le courant maximum qui va traverser le transistor quand $V_{ce} = 0$ (quand le transistor est en court-circuit). On prendra $I_c(q) = \frac{1}{2} I_c(max) = 4,5$ mA. Dans beaucoup de montages semblables à celui que l'on réalise, on trouve des valeurs comprises entre 1 et 10 mA. On est dans le bon.

3. Choix de la tension de l'émetteur. On peut, mais ce n'est pas obligatoire, utiliser une résistance d'émetteur R_e . Cette résistance d'émetteur aide à stabiliser le transistor. Mais cela se fait au détriment du gain. Et oui rien n'est gratuit même dans ces petits montages électroniques. Pour que la résistance d'émetteur soit efficace, il faut que sa valeur soit approximativement 10 % de V_{cc} . Dans ce cas on prendra $V_e = 0,9$ volts.

A ce stade on a défini les conditions de départ :

$V_{ce}(q) = 4.5$ Volts, $I_c(q) = 4.5$ mA et $V_e(q) = 0.9$ Volts.

On va maintenant calculer successivement les valeurs des composants passifs (les résistances). Puis par après, on calculera les valeurs des composants dynamiques ou de courant alternatifs (les condensateurs).

4. Calcul de la résistance de charge R_c .

On a $V_{cc} = (V_{cc} - V_c) + V_{ce} + V_e$, avec $V_{ce} = \frac{1}{2} V_{cc} = 4.5$ Volts et $V_e = 0.9$ Volts. V_c est la tension du collecteur et $V_{cc} - V_c$ est la chute de tension sur la résistance de charge R_c . Ce qui fait :

$$R_c = (V_{cc}/2 - V_e) / I_c \Rightarrow R_c = (4,5 - 0,9) / 4,5 \text{ mA} = 800 \text{ Ohms arrondi à } 820 \text{ Ohms (série E24)}.$$

5. Calcul de la résistance d'émetteur R_e .

On a $V_e = R_e \times I_e$. En fait le courant d'émetteur est la somme du courant de collecteur (I_c) plus le courant de base (I_b). Comme le courant de base est négligeable devant le courant de collecteur (même pas 1 %), on va écrire

$$V_e = R_e \times I_c \Rightarrow R_e = V_e / I_c = 0.9 / 4.5 \text{ mA} = 200 \text{ Ohms (disponible en série E24)}.$$

6. Calcul du pont de base R_1 et R_2 .

Il nous faut maintenant calculer les valeurs des résistances du pont diviseur de tension que l'on appelle aussi pont de base. On doit calculer R_2 et R_1 . On sait que la tension de la base est égale à la tension de l'émetteur V_e plus la différence de tension entre la base et l'émetteur V_{be} . On a donc $V_b = V_e + V_{be}$ avec $V_e = 0.9$ et $V_{be} = 0.7$ Volts pour un transistor npn. La tension de la base, qui est aussi la tension aux bornes de la résistance R_2 est donc

$$V_b = 0.9 + 0.7 = 1.6 \text{ Volts.}$$

Et la tension aux bornes de la résistance R_1 est bien entendu la différence avec V_{cc} ,

$$V_{cc} - V_b = 9 - 1.6 \text{ V} = 7.4 \text{ Volts.}$$

On peut être tenté de croire que n'importe quelle combinaison de résistances R_2 et R_1 qui satisfait à la relation $R_2 / R_1 = 1.6 / 7.4$ peut convenir. En fait, ce n'est pas correct pour plusieurs raisons. Premièrement, pour que le pont diviseur de tension fonctionne correctement, il faut que le

courant qui passe dans le pont diviseur soit nettement supérieur (disons 10x) au courant que l'on va extraire du pont (I_b), sinon le pont diviseur est instable et il varie avec le courant prélevé (I_b). En plus, le courant qui passe dans la branche supérieure du pont est la somme du courant de pont I_p plus le courant de base (I_b).

On va procéder comme suit. Pour estimer le courant de pont, on va commencer par calculer le courant de base I_b à partir du courant de collecteur I_c . Puis on calculera le courant de pont I_p à partir de ce courant de base I_b . Le transistor 2N3904 a un gain h_{FE} mesuré = 210, ce qui est tout à fait attendu.

$$I_b = I_c / h_{FE} \Rightarrow I_b = 4.5 \text{ mA} / 210 = 0.021 \text{ mA.}$$

$$I_p = 10 \times I_b = 0.021 \times 10 = 0.21 \text{ mA (on a pris arbitrairement un facteur 10).}$$

$$R_2 = V_b / I_p = 1,6 / 0.21 = 7600 \text{ Ohms (première estimation).}$$

On peut prendre cette valeur. Mais il faut se souvenir que la résistance R_2 est, en toute grosse approximation, égale à l'impédance d'entrée du premier étage. On a intérêt à maintenir cette résistance à une valeur un peu plus élevée, pour éviter d'interférer avec la source d'entrée. On va prendre 20 kOhms plutôt que 7600 Ohms.

Reste à calculer R_1 . On va commencer par calculer le courant qui traverse R_1 . Puis à partir de cette valeur de courant on va calculer R_1 . On se souviendra que le courant qui traverse R_1 est la somme du courant de pont I_p plus le courant de base I_b .

$$\text{Courant de pont} = I_p = V_b / R_2 = 1,6 / 20000 = 0.08 \text{ mA (ce qui n'est pas beaucoup en fait)}$$

$$\text{Courant qui traverse } R_1 = I_p + I_b = 0.08 + 0.021 \text{ mA} = 0.101 \text{ mA.}$$

D'où $R_1 = (V_{cc} - V_b) / 0.101 \text{ mA} = (9 - 1.6) / 0.101 \text{ mA} = 7.4 / 0.10 \text{ mA} = 74.000 \text{ Ohms}$. On prendra la valeur proche de la série E24, soit 75.000 Ohms.

On a donc en résumé :

$$\mathbf{R_c = 820 \text{ Ohms, } R_e = 200 \text{ Ohms, } R_1 = 75.000 \text{ Ohms et } R_2 = 20.000 \text{ Ohms.}$$

7. Une variante intéressante sans pont de tension.

On peut, si l'on veut, se passer du pont diviseur de tension. On supprime la résistance R_2 et on ne garde que la résistance R_1 , que l'on va appeler la résistance de base R_b . La stabilisation de la base est moindre, mais sur le montage concerné, cela ne devrait pas s'entendre. On calcule la résistance de base R_b comme ceci. On part du I_b que l'on a calculé ci-dessus à partir du courant de collecteur I_c , puis on calcule la valeur de la résistance de base R_b comme suit.

$R_b = (V_{cc} - V_b) / I_b = (V_{cc} - V_{be} - V_e) / I_b = (9.0 - 0.7 - 0.9) / 0.021 \text{ mA} = 352000 \text{ Ohms}$ que l'on va arrondir à la valeur la plus proche de la série E24, soit 350 kOhms.

8. Pont de polarisation du Push Pull 2N3904/2N3906 (diodes et résistances R3 et R4).

Le deuxième étage est un Push Pull 2N3904/2N3906. On va faire fonctionner ce Push Pull en classe AB plutôt que en classe B pour éviter les distorsions de recouvrement entre les demi-alternances positives et négatives (crossover distortion en Anglais), qui sont typiques de la classe B, et qui peuvent être désagréables à l'oreille avertie ! Pour cela, il faut amener la base du transistor 2N3904 (NPN) à + 0.7 Volt par rapport à son émetteur et la base du transistor 2N3906 (PNP) à - 0.7 volt par rapport à son émetteur. On va installer un pont diviseur de tension constitué de 2 diodes 1N4148 en série et de 2 résistances R3 et R4. La chute de tension entre les 2 bases est donc $2 \times 0.7 \text{ Volt} = 1.4 \text{ Volt}$. Bien entendu, pour obtenir cette chute de tension de 1,4 Volt, il faut faire passer un petit courant dans les diodes. C'est le rôle des 2 résistances R3 et R4. Les valeurs de ces résistances ne sont pas critiques. On peut utiliser des valeurs de $R3 = R4$ entre 1 KOhm et 10 KOhms. On a choisi $R3 = R4 = 3,9 \text{ KOhms}$.

On peut aussi, si on le souhaite, remplacer les 2 diodes 1N4148 par de simples résistances « chutrices » et cela fonctionne tout aussi bien. On calculera les valeurs de ces résistances comme suit, pour $V_{cc} = 9.0 \text{ Volts}$:

$$(V_{cc}/2 - 0.7) / 3900 = 0.7 / R_x \Rightarrow R_x = 3900 / 3.8 = 720 \text{ Ohms arrondi à } 750 \text{ Ohms (E24)}.$$

On va maintenant passer au calcul, ou plutôt à l'estimation, des composants dits actifs ou de courant alternatif, c'est-à-dire les condensateurs de C1 à C5 et de Ce.

9. Estimation des condensateurs C1, C2, C3 et C4.

Ces 4 condensateurs sont des condensateurs de couplage ou de liaison. Ils servent à éliminer la composante continue et à ne garder que la composante alternative du signal pour la faire parvenir dans l'étage ou dans le module suivant. Les condensateurs C1 et C2 protègent l'entrée du premier étage d'amplification et en plus ils protègent le potentiomètre de volume contre le vieillissement prématuré (grésillement). Le condensateur C3 protège l'entrée de l'étage Push Pull. Le condensateur C4 protège le petit haut-parleur qui n'apprécierait pas du tout de recevoir un courant continu à ses bornes. Ces condensateurs de couplage forment un filtre passe-haut (ou coupe-bas si l'on préfère) avec l'impédance d'entrée de l'étage ou du module qui le suit. On peut estimer ces condensateurs avec la formule suivante :

$$C = 1 / (2\pi \times f \times Z),$$

où f est la fréquence minimale que l'on veut conserver « sans atténuation ». On peut prendre la fréquence minimale du spectre audible, soit $f = 20 \text{ Hz}$. Et Z est l'impédance d'entrée de l'étage ou du module qui suit le condensateur. Le calcul de Z n'est pas simple du tout, du moins pour les éternels bidouilleurs... tels que l'auteur de ces quelques lignes... On peut essayer de faire une très grossière approximation comme suit :

$$\text{Pour C1 et C2, } C = 1 / (2\pi \times 20 \times 20000) = 0,4 \mu\text{Farad. On prend } Z = R2 = 20000 \text{ Ohms.}$$

$$\text{Pour C3, } C = 1 / (2\pi \times 20 \times 4620) = 1,7 \mu\text{Farad. On prend } Z = 3900 + 720 = 4620 \text{ Ohms.}$$

$$\text{Pour C4, } C = 1 / (2\pi \times 20 \times 8) = 995 \mu\text{Farads. Avec } Z = \text{impédance du haut-parleur} = 8 \text{ Ohms.}$$

Ces valeurs bien en accord avec les valeurs que l'on trouve généralement sur les schémas de montage d'amplificateurs semblables. Pour faire simple, on prendra $C1 = C2 = C3 = 4,7 \mu\text{Farads}$ et on prendra $C4 = 470 \mu\text{Farads}$.

11. Estimation de C5.

C5 est un condensateur de filtrage qui ne semble pas bien nécessaire. On peut si l'on veut, ou pour être complet, mettre $C5 = 220 \mu\text{Farads}$. On peut aussi installer ce condensateur directement sur la borne d'entrée Vcc.

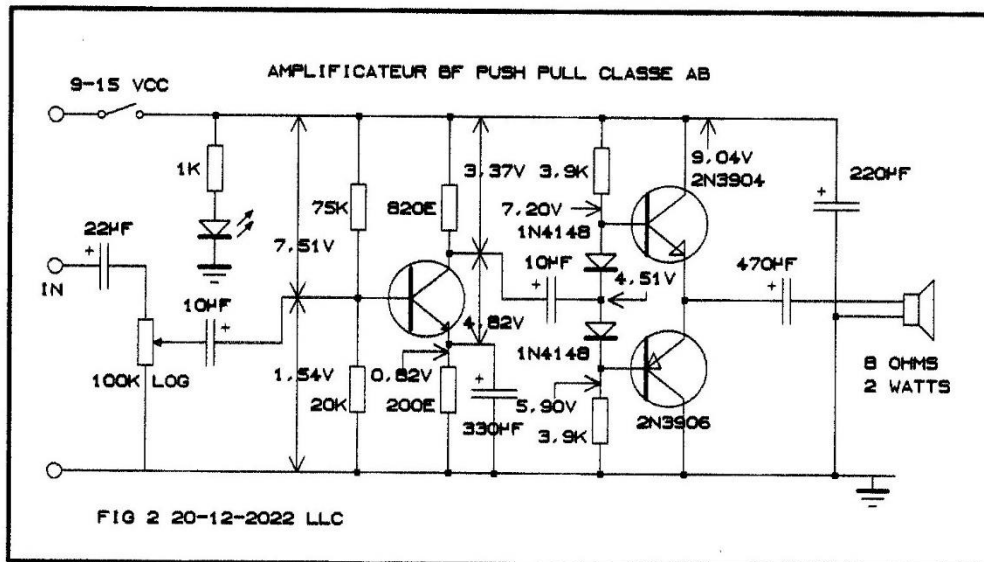
12. Estimation de Ce.

Le condensateur Ce est le condensateur de découplage de la résistance d'émetteur Re. Il sert à drainer la composante alternative qui passe dans l'émetteur vers la masse. Ce condensateur court-circuite en fait la composante alternative. La composante de courant continu continue à passer par la résistance Re. Le condensateur de découplage améliore la stabilité de l'étage d'amplification. En effet, sans ce condensateur de découplage, la tension de l'émetteur (Ve) varie avec la composante alternative, ce qui entraîne une fluctuation de la tension de la base (Vb), qui entraîne à son tour une fluctuation du courant de base (Ib), puis du courant de collecteur (Ic) et finalement une variation de la tension en sortie... Le condensateur de découplage apporte en plus une importante augmentation du gain.

Une règle empirique dit que pour fonctionner correctement, le condensateur de découplage doit avoir une impédance au moins 10 fois plus petite que la résistance d'émetteur Re. Dans notre cas, le condensateur de découplage Ce doit avoir une impédance Z au maximum de $200 / 10 = 20 \text{ Ohms}$. En utilisant la même formule que ci-dessus on arrive à :

$$C_e = 1 / (2\pi \times 20 \times 20) \Rightarrow C_e = 398 \mu\text{Farads}. \text{ On prendra } C_e = 330 \mu\text{Farads}.$$

Figure 2 : schéma de réalisation et mesures.



13. Vérifications par mesures.

A ce stade, on a terminé les calculs de tous les composants du montage. Maintenant, on va réaliser quelques mesures pour vérifier au moins deux choses : que la position du point de repos du

transistor du premier étage (le quiescent point) est bien correcte et que le Push Pull du deuxième étage fonctionne bien en classe AB.

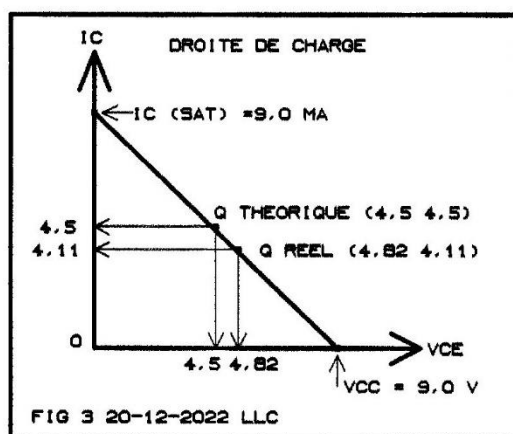
Sur la figure 2, on a porté quelques valeurs de tensions de fonctionnement. On remarquera en particulier, que le point central du pont diviseur de tension du Push Pull est bien $V_{cc}/2 = 4,51$ Volts, que la différence de tension entre les diodes est 1,30 Volts et que la différence de tension aux bornes du condensateur de liaison (C3) en entrée du Push Pull est $4,51 - 3,37 = 1,14$ Volt. Le Push Pull fonctionne bien en classe AB.

Dans le tableau suivant, on a fait varier la résistance de charge (R_c) et la résistance d'émetteur (R_e), tout en gardant les résistances du pont de base (R_1 et R_2) inchangées. Les mesures montrent que le point de repos réel est très proche du point de repos théorique (4.5 Volts, 4,5 mA). Ce qui indique que les calculs développés ci-dessus sont plutôt corrects. Sur la figure 3, on a porté les valeurs réelles et théoriques du point de repos.

Tableau des mesures.

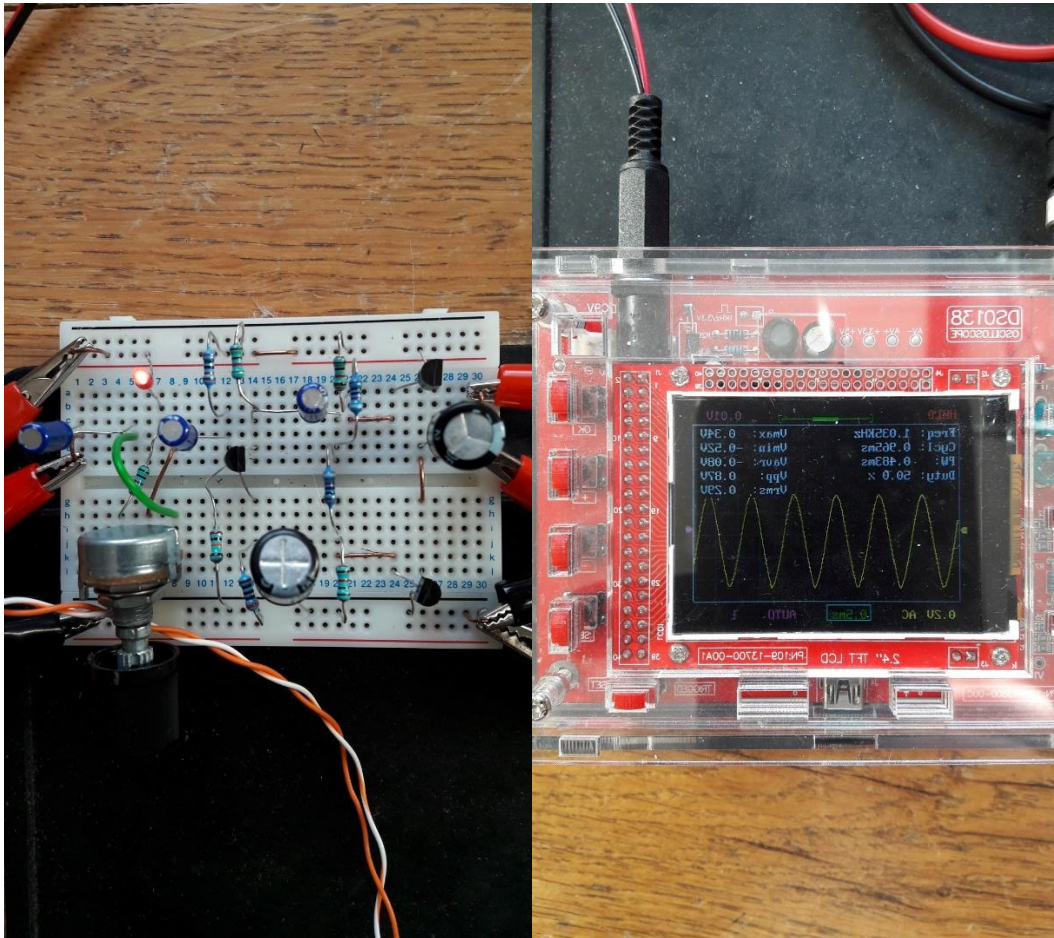
Grandeur	Mesures						Attendu
	---	---	---	20k	20k	20k	
R2	---	---	---	20k	20k	20k	---
R1	360K	360k	360k	75k	75k	75k	---
Rc	820E	1000E	1000E	820E	1000E	1000E	---
Re	200E	200E	100E	200E	200E	100E	---
Vcc - Vc	3,04	3,69	3,18	3,37	4,14	5,11	3,60
Ve	0,74	0,74	0,38	0,82	0,83	0,62	0,90
Vb	1,45	1,45	1,09	1,54	1,55	1,34	1,60
Vbe	0,70	0,70	0,70	0,71	0,71	0,72	0,70
Vce	5,25	4,61	5,45	4,82	4,14	3,26	4,50
Ic	3,70	3,70	3,18	4,11	4,14	5,11	4,50

Illustration du point de repos.



14. Réalisation de l'amplificateur.

On a réalisé le montage sur une plaque d'expérimentation à 456 trous sans soudures. Une photo du montage se trouve ci-dessous à gauche. La photo de droite montre la qualité d'un signal de 10 kHz en sortie, lorsque le potentiomètre de contrôle de volume est pratiquement en fond de course.



15. Le mot de la fin ...

A ce stade il ne me reste plus qu'à encourager tous les bidouilleurs et bidouilleuses de se lancer dans l'aventure et à demander aux experts en électronique d'avoir la gentillesse de signaler les éventuelles erreurs et manquements qui se sont glissés dans ce texte ...

Références.

1. www.electronics-tutorials.ws - Tutoriels sur les transistors et les classe de fonctionnement.
2. <https://sonelec-musique.com> – Théorie, bases et réalisations.

LLC73s. 20-12-2022.