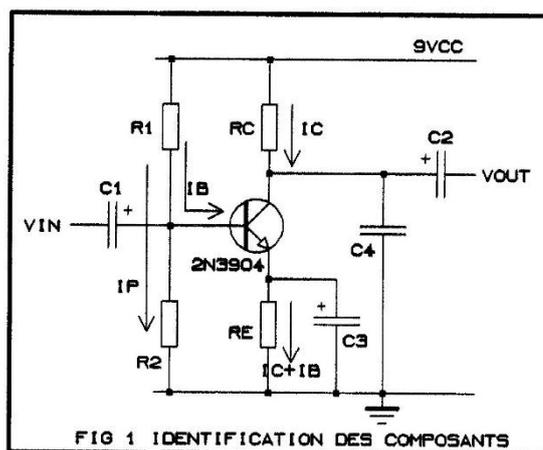


## Partie 1 : Conception d'un petit amplificateur BF

Ce petit module sans ambition s'adresse aux débutants en électronique qui se demandent comment concevoir un petit amplificateur BF avec un seul transistor? Ce module va essayer de répondre à cette question. Ce module ne fait pas appel à des notions avancées en électronique ni en mathématique, et c'est une bonne chose pour l'auteur qui, sinon, aurait été bien embarrassé!

En fait, il n'est pas rare que l'on se retrouve confronté avec un signal un peu faiblard en tension, et que l'on voudrait amplifier, disons d'un facteur 10, pour entrer sur l'étage d'amplification suivant. Donner un petit coup de booster en quelque sorte, tout en maintenant une bonne qualité du signal. On trouve dans la littérature et sur internet en particulier, un grand nombre de petits schémas qui répondent à ce besoin et qui font appel à un seul transistor. Ces schémas présentent souvent beaucoup de similitudes entre eux. Parfois ils se ressemblent très fort et font appels à des composants de valeurs très semblables d'un schéma à l'autre. Nous allons voir comment on peut définir les valeurs des composants avec un exemple particulier.

Comme souvent lorsqu'on démarre un projet, il faut se fixer des points de départ et faire quelques hypothèses de travail. On va utiliser le schéma de réalisation donné dans la Fig. 1, que l'on désigne souvent par « polarisation par pont de base, résistance d'émetteur et condensateur de découplage ». Cette configuration a la réputation d'être très stable, mais elle est un peu plus compliquée que d'autres puisqu'elle fait appel à 4 résistances et à 4 condensateurs. On reconnaîtra facilement que cette configuration est « en émetteur commun », avec entrée sur la base et sortie sur le collecteur.



Sur la Fig. 1 ci-dessus, on a identifié les composants comme suit :

- RC pour la résistance de charge,
- RE pour la résistance de l'émetteur,
- R1 et R2 pour les résistances du pont de base,
- C1 et C2 pour les condensateurs de liaison ou de couplage,
- C3 pour le condensateur de découplage de l'émetteur,
- C4 pour le condensateur de filtrage des hautes fréquences en sortie.

Sur la Fig. 1, on a également indiqué les courants qui circulent autour du transistor, ainsi que le sens de ces courants. Par convention le courant va « du plus au moins », soit de la borne la plus positive à la borne la moins positive, et bien sûr les électrons qui alimentent ces courants circulent dans le sens inverse, soit « du moins au plus ». On n'oubliera pas que dans le montage en émetteur commun, les courants du collecteur ( $I_c$ ) et de base ( $I_b$ ) se rejoignent dans le courant d'émetteur ( $I_e$ ) et que le courant de base est négligeable par rapport au courant de collecteur (disons 1 %).

**1- Choix de la tension d'alimentation Vcc.** La plupart des petits montages électroniques pour amateurs font appel à une tension d'alimentation de 6 Vcc, 9 Vcc ou 12 Vcc, mais certains montages utilisent des tensions plus basses ou plus élevées. On a choisi une tension de 9 Vcc parce qu'on peut aussi utiliser une simple pile de 9 Vcc. En fait, il s'avère que la valeur nominale de la tension d'alimentation n'est pas souvent critique. De nombreux montages prévus pour une alimentation de 9 Vcc fonctionnent tout aussi bien avec une tension comprise entre 6 Vcc et 12 Vcc, et ils ne commencent à perdre de la puissance qu'en dessous de 6 Vcc. En revanche, la tension d'alimentation doit être filtrée et régulée, avec un minimum de taux d'ondulation résiduel, sinon on s'expose à de fameux coups de ronflette désagréable. On entend souvent dire que la qualité d'une réalisation électronique dépend de la qualité de son alimentation.

**2- Choix du transistor :** Nous prendrons un brave 2N3904 qui a fait ses preuves depuis tant d'années, que l'on peut se procurer très facilement, et qui est robuste et sans risques. Ce transistor fonctionne très bien sous 9 Vcc. Sa datasheet est disponible un peu partout...

**3- Choix du courant de repos du transistor (quiescent current) IC.** Le courant de repos du transistor, c'est le courant qui traverse le transistor en absence de signal d'entrées. On dit généralement que ce courant de repos ne doit pas excéder 20% de la valeur maximale du courant de collecteur admise par la datasheet. Mais le plus souvent, pour les petits transistors de type NPN, on prend la valeur communément admise de 1 mA, sans se poser d'autres questions.  $I_c = 1 \text{ mA}$ .

**4- Choix de la tension de repos du transistor (quiescent voltage) VC.** On va travailler en classe A pour préserver au maximum la qualité du signal d'entrée à travers l'étage d'amplification. Pour cela, on va choisir une tension de repos du collecteur  $V_c$ , égale à la moitié de la valeur de la tension d'alimentation Vcc, soit  $9/2 = 4.5 \text{ Vcc}$ . Ou ce qui revient à peu près au même, on va s'arranger pour que  $V_c$  ait une valeur proche de  $V_{ce}$  qui est la différence de tension entre le collecteur et l'émetteur du transistor. En procédant de la sorte, on assure une dynamique maximum pour les signaux de sortie, et on évite au mieux de conduire le transistor en saturation ou en cut-off, ce qui cause toujours de la distorsion.

**5- Calcul de la résistance de charge RC.** La résistance de charge  $R_c$  est importante parce que c'est elle qui va transformer le courant qui traverse le transistor en tension, et c'est précisément ce que l'on cherche à faire avec ce petit amplificateur de tension. Connaissant la chute de tension aux bornes de la résistance de charge (4,5 Volts) et l'intensité du courant qui la traverse (1 mA), on calculera la valeur de la résistance avec la loi d'Ohm :  $R_c = V_c/I_c = 4.5/0.001 = 4500 \text{ Ohms}$ , arrondis à 4,7 KOhms. Ici il faut faire une petite vérification. La résistance de charge est aussi importante pour une autre raison. Elle représente « en gros » la valeur de l'impédance de sortie du module,  $Z_{out}$ , que l'on construit. En général, pour garder la qualité sonore et éviter des pertes de signal, on a tout intérêt à garder la valeur de l'impédance de sortie d'un étage d'amplification faible par rapport à l'impédance d'entrée de l'étage d'amplification qui suit. Supposons que l'étage d'amplification qui suit notre petit module soit un amplificateur de puissance avec une entrée de 47 kOhms. Alors on limitera la valeur de  $R_c$  à seulement 10% de 47 kOhms, soit 4,7 KOhms. On est dans le bon. Et

effectivement, dans les schémas que l'on trouve un peu partout sur le web, on voit le plus souvent des valeurs de  $R_c$  comprises entre 2,2 et 5,6 kOhms.

**6- Calcul de la résistance d'émetteur  $R_E$ .** La résistance d'émetteur  $R_e$  génère une sorte de contre réaction appelée dégénération de l'émetteur, qui assure la stabilité du circuit en particulier contre les variations de température. On ne la retrouve pas sur tous les montages, car bien souvent l'émetteur est mis directement à la masse, mais nous allons la calculer quand même pour être complet. Une règle empirique dit que  $R_e$  doit amener la tension d'émetteur entre 10 et 15% de  $V_{cc}$ , mais ne pas dépasser 1000 Ohms. En fait, on peut calculer facilement  $R_e$  à partir du gain en tension  $A_v$  que l'on attend. Le gain en tension  $A_v$  est approximativement donné par le rapport  $R_c/R_e$  (quand il n'y a pas de condensateur de découplage). Dès lors,  $R_e = R_c/A_v = 4700/10 = 470$  Ohms. Ce qui est bien dans la fourchette de valeurs communément admises.

**7- Calcul du courant de Base (IB) et du courant d'Emetteur (IE).** Le courant de base se calcule par la formule  $I_b = I_c/hFE$ . On prendra  $hFE = 200$ , ce qui est la valeur moyenne que l'on trouve dans la datasheet du 2N3904. Donc le courant de base  $I_b = 1/200 = 0.005$  mA est effectivement bien négligeable par rapport au courant de collecteur 1 mA. Le courant d'émetteur est la somme des deux, soit  $1 + 0.005 = 1,005$  mA, que l'on arrondit à 1 mA.

**8- Calcul de la tension d'émetteur  $V_e$  et choix de la tension de base  $V_b$ .** La chute de tension aux bornes de la résistance d'émetteur est égale à  $I_e \times R_e = 1 \times 470 = 470$  mV. Pour que le système fonctionne, il faut que la base soit portée à un potentiel au moins 700 mV au-dessus du potentiel de l'émetteur. Ceci nous amène à fixer la tension de base à  $0,5 + 0,7 = 1,2$  V.

**9- Calcul du pont de base, c'est-à-dire des résistances  $R_1$  et  $R_2$ .** Le pont de base sert à amener la tension de la base à 1,2 V. La chute de tension aux bornes de la résistance  $R_1$  doit donc être de  $9 - 1,2 = 7,8$  V. On pourrait penser que n'importe quelles résistances peuvent convenir à condition de respecter le rapport  $R_1 / R_2 = 7,8 / 1,2$ . Ceci n'est pas correct pour au moins 2 raisons.

Premièrement, la résistance  $R_2$  représente aussi « en gros » la valeur de l'impédance d'entrée du montage et, dans certains cas, on a intérêt à maintenir cette impédance assez élevée, disons au moins 20 kOhms. Si nous fixons  $R_2 = 22$  kOhms (valeur de la série E24 à 5%), alors le courant qui traverse la résistance est  $V_b / R_2 = 1,2 / 22000 = 0.055$  mA. C'est le courant du pont diviseur. On estime souvent que ce courant de pont doit être 10 fois plus élevé que le courant de base et c'est le cas ici.

Deuxièmement, le courant qui traverse la résistance  $R_1$  est un peu plus élevé parce que c'est la somme du courant de pont et du courant de base. Dans ce cas il vaut  $0,055 + 0,005 = 0,060$  mA. Si l'on veut une chute de tension de 7,8 V aux bornes de  $R_1$ , il faut fixer  $R_1 = 7,8 / 0.060 = 130$  kOhms (également valeur de la série E24 à 5%).

**Note :** certains articles donnent une formule plus précise pour calculer l'impédance d'entrée  $Z_{in}$  en tenant compte cette fois, de la résistance d'émetteur  $R_e$  qui est en parallèle avec  $R_2$  et du gain  $hFE$  du transistor. La formule est la suivante :

$$1 / Z_{in} = 1 / R_2 + 1 / (hFE \times R_e), \text{ que l'on peut ré-écrire}$$

$$R_2 = (Z_{in} \times hFE \times R_e) / (hFE \times R_e - Z_{in}), \text{ ou bien encore}$$

$$Z_{in} = (hFE \times R_e \times R_2) / (hFE \times R_e + R_2) .$$

Cette formule montre que si l'on veut garantir une impédance d'entrée de 22 kOhms, avec  $R_e = 470 \text{ Ohms}$  et  $hFE = 200$ , il faut ajuster  $R_2$  à 28,7 kOhms. Ou bien encore, que lorsqu'on fixe  $R_2$  à 22 kOhms, on accepte une impédance d'entrée plus petite de 17,8 kOhms.

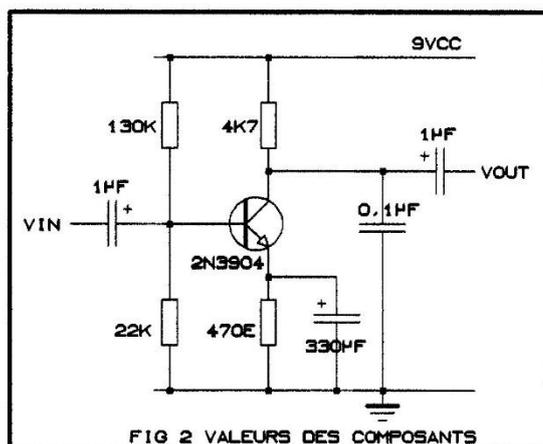
**10- Calcul de C1 et de C2.** Les condensateurs C1 et C2 sont des condensateurs de liaison qui ont pour fonction de bloquer la composante en courant continu entre les étages d'amplification et de ne laisser passer que la composante alternative. Comme ils sont placés en série avec l'entrée et la sortie, ils jouent aussi un rôle de filtre passe haut. Il faut alors veiller à adapter leurs valeurs pour éviter de raboter le spectre de fréquences dans les basses fréquences. Si l'on accepte une réduction de 1 dB à la fréquence de 20 Hz (ce qui relève plutôt de la Hi-Fi et n'est probablement pas perceptible même par les oreilles les plus fines!), on peut estimer les condensateurs par la formule suivante :  $C_1 = 1 / (\pi \times f \times Z_{in})$  et  $C_2 = 1 / (\pi \times f \times Z_{out})$ . On aura  $C_1 = 1 / (3.14 \times 20 \times 17800) = 0,89 \mu\text{F}$  et  $C_2 = 1 / (3.14 \times 20 \times 47000) = 0.34 \mu\text{F}$ . En règle générale, on fixe les valeurs des condensateurs de liaison à  $1\mu$  en électrolytique, mais on trouve des montages avec des condensateurs de  $0.47 \mu\text{F}$  non polarisés qui fonctionnent très bien.

**11- Calcul du condensateur de découplage C3.** Le condensateur C3 est chargé de drainer un maximum de courant alternatif vers la masse en court-circuitant la résistance  $R_e$  et ainsi stabiliser le gain du module d'amplification. On peut également estimer la valeur de C3 avec la formule suivante :  $C = 1 / (2 \times \pi \times f \times R_{dyn})$ . Dans cette formule,  $f$  est la fréquence minimum du spectre audible,  $R_{dyn}$  est la résistance dynamique de l'émetteur, soit  $V_t / I_c$ , avec  $V_t$  la tension thermique du transistor et  $I_c$  le courant du collecteur. La tension thermique ne dépend que de la température et elle vaut 25 mV à 25 degrés. En prenant  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $I_c = 1 \text{ mA}$  et  $V = 25 \text{ mV}$ , on a donc

$C_3 = 1 / (2 \times \pi \times 20 \times (0.025 / 0.001)) = 0.001 / (2 \times \pi \times 20 \times 0.025) = 320 \mu\text{F}$  en électrolytique et on arrondira à la valeur 330  $\mu\text{F}$  qui est disponible dans la série E24.

**12- Calcul du condensateur C4.** Ce condensateur fonctionne en filtre passe bas avec la résistance de charge  $R_c$  et réduit le bruit et l'instabilité aux hautes fréquences. En fait il n'est pas indispensable et on ne le retrouve pas sur tous les montages. Parfois on le retrouve en série avec une résistance de 1 à 10 Ohms sous la désignation de réseau de Boucherot ou réseau de Zobel. On peut essayer une valeur de 0,1  $\mu\text{F}$  qui est la valeur de référence communément admise et la corriger si nécessaire.

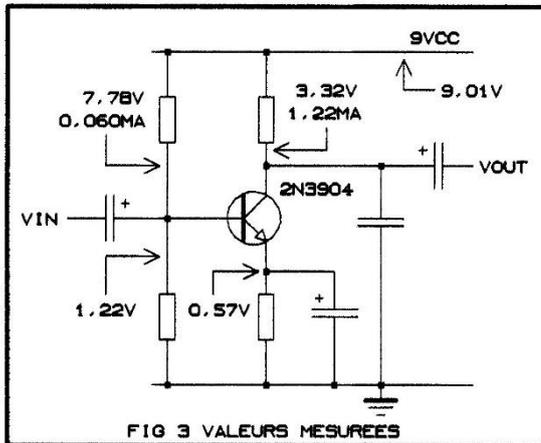
Sur la fig. 2 ci-dessous, on a indiqué les valeurs des composants que l'on vient de choisir ou de calculer.



## Partie 2 : réalisation du montage, mesure des valeurs et vérification du fonctionnement.

On va maintenant construire le module d'amplification sur une plaque de montage rapide en utilisant les valeurs des composants qui se trouvent dans le tableau de synthèse ci-dessous. Une photo hors texte montre la réalisation ainsi que le petit générateur de signaux élémentaires et l'oscilloscope tout aussi élémentaire qui ont été utilisés pour les mesures. Les résultats des mesures sont repris dans le tableau de synthèse et visualisés sur la Fig. 3.

Composants	Formule	Valeur choisie ou calculée	Valeur mesurée
Tension alimentation	Choisie	9 Vcc	9,01 Vcc
Transistor	Choisi	2N3904	
Gain hFE	Datasheet 2N3904	200 (moyenne)	426 !!!!!
Courant de repos Ic	Choisi	1 mA	1,22 mA → <b>1,24</b>
Tension de repos Vc	Vcc / 2	4,5 V	3,32 V → <b>4,27 V</b>
Résistance de charge Rc	Vc / Ic	4700 Ohms → <b>3900 Ohms</b>	
Résistance d'émetteur Re	Rc / Av	470 Ohms	
Courant de base Ib	Ic / hFE	0,005 mA	
Tension d'émetteur Ve	Ie x Re	470 mV	570 mV
Tension de base Vb	Ve + 700 mV	1,2 V	1,22 V
Résistance de pont R2	Choisie	22 KOhms	
Courant de pont Ip	Vb / R2 = Ip	0,055 mA	
Tension aux bornes de R1	Vcc - Vb	7,8 V	7,78 V
Courant de pont sous R1	Ip + Ib	0,060 mA	0.060 mA
Condensateur de couplage C1	$1 / (\pi \times f \times Z_{in})$	0,34 $\mu$ F -> 1 $\mu$ F	
Condensateur de couplage C2	$1 / (\pi \times f \times Z_{out})$	0,89 $\mu$ F -> 1 $\mu$ F	
Condensateur de découplage C3	$1 / (2 \times \pi \times 20 \times R_{dyn})$	330 $\mu$ F	
Condensateur filtre passe bas C4	Choisi	0,1 $\mu$ F	
Résistance dynamique de l'émetteur Rdyn	Vt / Ic avec Vt = 0.025 V	25	



Sans surprise, le pont diviseur fonctionne comme prévu. La tension de la base est bien 1,2 V et le courant de pont est bien 0.060 mA. Par contre le courant de repos du transistor est 20 % trop élevé et la tension de repos est 20 % trop basse par rapport aux attentes. En réduisant la résistance de charge à 3900 Ohms on obtient une tension au repos de 4,27 V avec un courant de repos qui reste inchangé à 1,24 mA, ce qui est plus proche des attentes initiales. Cette adaptation est notée en gras dans le tableau.

Le module fonctionne bien sous 9 VCC. En utilisant un signal d'entrée de 0.60 V RMS on mesure un gain en tension de 5,9 à 1,2 kHz et à 5,4 kHz, ce qui est plus petit que la valeur 10 sur laquelle on avait tablé. Le signal de sortie ne paraît pas déformé (dans la mesure où le modeste appareillage de mesure permet de juger!), ce qui semble indiquer que les conditions au repos sont correctes. Enfin ce petit module amplifie bien un signal audio sans distorsion apparente et joue donc bien son rôle de booster prévu au début de ce texte.

Il ne reste plus qu'à souhaiter bonne lecture et bon travail à tous les débutants en électronique qui souhaiteront reproduire ou améliorer ce petit montage. Pour beaucoup, l'apprentissage passe avant tout par les réalisations pratiques.

## Références.

En fait, il existe de nombreux ouvrages et articles de toutes sortes qui décrivent la conception d'un étage d'amplification à un transistor. Le texte ci-dessus s'inspire plus particulièrement des trois références suivantes :

- 1- Transistors Tutorial Part 8 de Tony van Roon VA3AVR , December 18, 2009.
- 2- Class A Amplifier Design Module 2 sous [www.learnabout-electronics.org](http://www.learnabout-electronics.org)
- 3- Common Emitter de Wikipedia.

LLC73s. 18-05-2022.