TP 3: Transistors

Sergio Gonzalez Sevilla*, Antonio Miucci

Département de Physique Nucléaire et Corpusculaire (DPNC)
Université de Genève (Faculté des Sciences, Section de Physique)

*Sergio.Gonzalez@unige.ch

1. Transistor à jonction bipolaire

1.1 Transistor 2N3904

Testez d'abord le bon fonctionnement d'un transistor 2N3904 à l'aide du multimètre. Mesurez la résistance de chacune des 3 connexions possibles dans les deux directions.

1. la jonction base-émetteur devrait se comporter comme une diode ;
2. la jonction base-collecteur devrait se comporter comme une diode ;
3. la jonction collecteur-émetteur ne devrait pas être conductrice dans aucune direction.

Vérifiez l'analogie avec deux jonctions PN de la figure 1a. Si ce n'est pas le cas, votre BJT est probablement endommagé, refilez-le à Christian !



(a) **(b)**

FIGURE 1. (a) Analogie des bornes base (B), collecteur (C) et émetteur (E) d'un transistor à jonction bipolaire (BJT pour *"Bipolar Junction Transistor"*) dopé NPN avec deux diodes "dos à dos". (b) Symbole graphique d'un transistor NPN. La flèche pointe vers l'émetteur (sens conventionnel du courant, opposé au courant électronique).

On souligne que la figure 1a représente simplement une analogie avec un transistor bipolaire, convéniente d'un point de vue pratique pour le labo. No croyez pas que le montage dos à dos de deux diodes discrètes forme un transistor. Dans un vrai transistor, la base (faiblement dopée) est située entre l'emetteur (fortement dopé) et le collecteur. Une diode ayant deux régions dopées, un montage dos à dos de deux diodes discrètes donne quatre régions dopées au lieu de trois, et ne correspond donc pas à une base étroite entre un émetteur et un collecteur.

1.2 Circuit interrupteur simple

1. Montez le circuit de la figure 2 avec une LED en série au collecteur. Remplacez l'interrupteur par un bout de fil que vous brancherez et débrancherez.
2. Avec $V_{cc} = 9\,\text{V}$, mesurez les tensions aux bornes des résistances lorsque l'interrupteur est fermé et ouvert, et calculez les courants I_B et I_C correspondants.

3. Le facteur de transport α d'un BJT ("effet transistor") et le gain en courant β sont donnés par :

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \quad , \quad \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

En utilisant la loi des noeuds, montrez que :

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

Calculez le gain (β) de votre circuit.

4. En augmentant V_{cc} depuis 0 V, mesurez à quelle valeur la diode s'allume. Mesurez les tensions aux bornes des résistances et déduisez-en V_{BE}. Vérifiez votre calcul en mesurant directement aux bornes du transistor.
5. Mesurez V_{CE} lorsque le transistor est sous tension, et expliquez votre résultat.
6. Sur le même montage, mettez la LED en série à l'émetteur (fig. 3a), puis en parallèle avec CE (fig. 3b), et expliquez ce que vous observez.

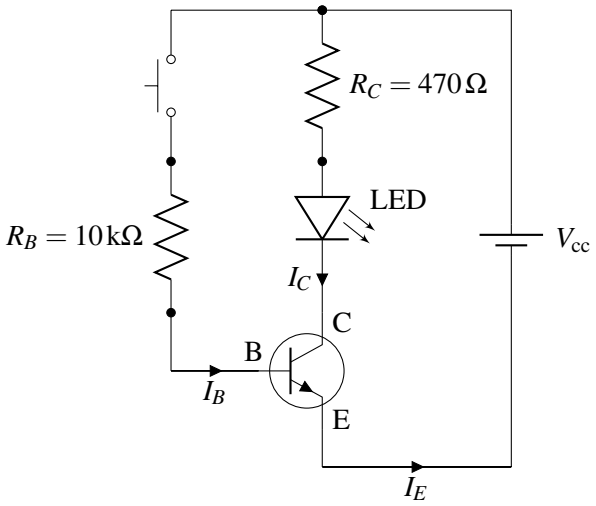
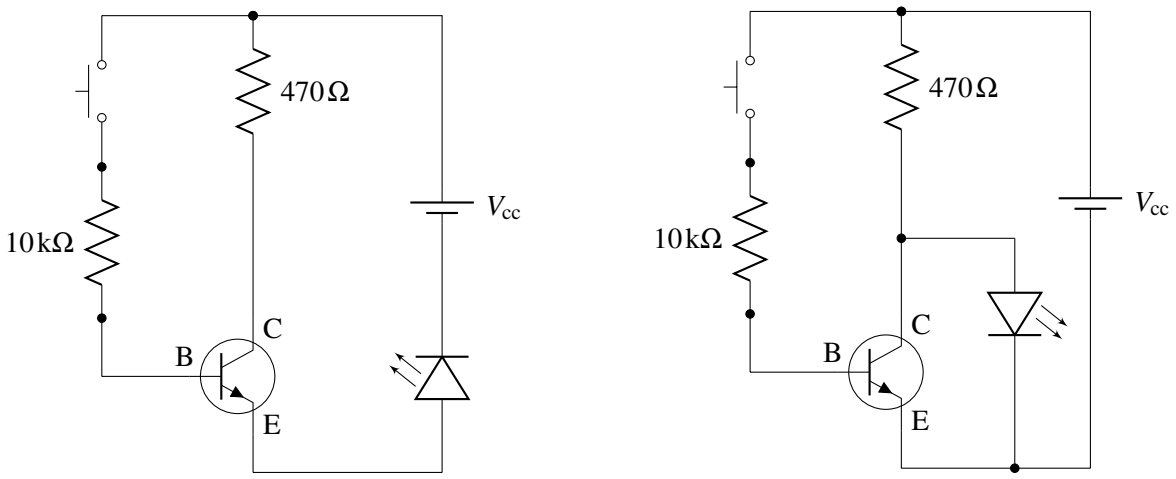


FIGURE 2. Circuit interrupteur simple.



(a) LED en série avec l'émetteur.

(b) LED en parallèle avec avec collecteur-emétteur.

FIGURE 3. Circuit interrupteur simple : variations.

1.3 Caractéristiques

Les courbes (V, I) et les droites de charge des transistors sont obtenues en appliquant du courant continu, mais en pratique, les transistors sont habituellement utilisés en courant alternatif. Le montage de la figure 4 permet de mesurer les caractéristiques du BJT (courbe (V, I) et V_{BE}) et du circuit lui-même (droite de charge). En l'absence de AC et alimenté par un courant continu V_{CC}, un circuit BJT aura une valeur spécifique de I_C, V_{CE} pour un V_{BB} (ou I_B) donné ; il s'agit du point de fonctionnement (ou Q-point), qui se trouve à l'intersection de la droite de charge du circuit avec la courbe (V, I) du transistor.

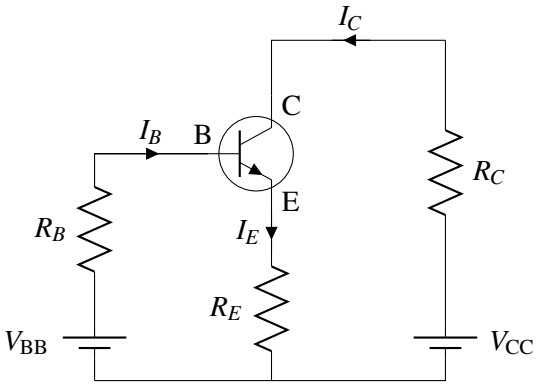


FIGURE 4. Circuit BJT en configuration émetteur-commun. $R_B = 1\,\mathrm{M\Omega}$, $R_C = 1\,\mathrm{k\Omega}$ et $R_E = 330\,\Omega$.

1. Puissance maximale

   Prenez note des valeurs maximales $V_{CE}^{\max}$, $I_C^{\max}$ et $P_D^{\max}$ spécifiés par le fabriquant. Sur un graphique du courant I_C en fonction de la différence de potentiel V_{CE}, montrez $I_C^{\max}$ et $V_{CE}^{\max}$, et tracez la puissance maximale $P_D^{\max}$ qui apparaitra comme une hyperbole sur votre graphique. Celle-ci vous indique la dissipation maximale que le transistor peut soutenir, **veillez à ne pas dépasser ces limites** (le transistor doit fonctionner en dessous de la courbe).

2. Polarisation base-émetteur

   (a) Mettez les tensions V_{BB} et V_{CC} à 0 V. Augmentez doucement V_{BB} de 0 à 1 V et mesurez la courbe caractéristique (V_{BE}, I_B) de la région base-émetteur (BE). Identifiez les zones de blocage et passante. Déterminez à partir de quelle tension le transistor devient passant, et expliquez votre résultat.

   (b) Ecrivez la loi de la maille V_{BB} et ajoutez à la courbe (V_{BE}, I_B) les droites d'attaque pour V_{BB} = 0.6, 1 et 5 V. La droite d'attaque consiste à tracer une droite de I_B^{max} à $V_{BE}^{\max}$ pour un V_{BB} donné.

   (c) Déterminez le point de fonctionnement V_{BEP} correspondant au croisement entre la droite d'attaque et la courbe (V_{BE}, I_B). Quelles valeurs de V_{BB} vous semble appropriées pour ce transistor ?

3. Droite de charge

   (a) Appliquez $V_{\mathrm{BB}} = 6$ V et mesurez I_C en fonction de V_{CE}. Prenez plusieurs points entre 0 et 1 V. Faites deux graphiques montrant votre courbe (V, I), un pour les zones de blocage et de saturation, l'autre comprenant aussi la zone linéaire.

   (b) Répéter ces mesures avec $V_{\mathrm{BB}} = 2$ V et 10 V. Ajoutez les courbes (V, I) aux graphiques précédents.

   (c) Ecrivez la loi de la maille V_{CC}, et ajoutez au graphique des courbes (V, I) les droites de charge pour V_{CC} = 1, 2 et 6 V. Déterminez le point de fonctionnement de votre BJT pour ces 3 circuits, en spécifiant quel V_{BB} est le plus approprié.

4. Gain en courant

   (a) Mesurez le gain en courant β pour les trois valeurs de V_{BB} trouvées précédemment pour des valeurs adéquates de V_{CC}.

   (b) Refaites cette mesure avec $R_E = 0\,\Omega$ et 10 kΩ. Quel est l'effet d'ajouter la charge R_E à l'émetteur ?

2. Transistor à effet de champ

Le transistor à effet de champ à jonction est un exemple de transistor unipolaire (*i.e.*, qui ne dépend que d'un seul type de porteur de charge, trous ou électrons).

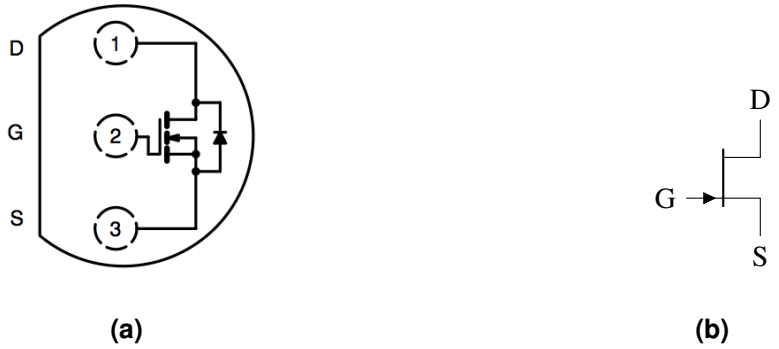


FIGURE 5. (a) Transistor à effet de champ MOSFET BS170KL et ses 3 électrodes **vues du dessus** : *Grille* (G), *Drain* (D) et *Source* (S). (b) Symbole du composant.

> Note : *les MOSFETS ne sont pas conçus pour être opérés en courant continu pendant de longues périodes ; veuillez éteindre les alimentations entre les mesures ou en cas d'hésitation.*

1. Branchez l'alimentation qui servira à fournir un potentiel au MOSFET BS170KL en court-circuit et ajustez la limite de courant à 300 mA.
2. Sur un graphique (V_{DS}, I_D), tracez $V_{DS}^{\max}$, $I_D^{\max}$, ainsi que l'hyperbole $P_D^{\max}$. Veillez à ne pas dépasser ces limites.
3. Montez le circuit de la figure 6 avec un MOSFET BS170KL. Assurez-vous que l'alimentation soit éteinte lorsque vous le branchez, et que les électrodes soient bien celles que vous croyez.
4. Sans alimenter la *Grille* ($V_{GS} = 0$), augmentez V_{DD} de 0 à quelques volts, et mesurez V_{DS}. Expliquez vos observations.
5. Alimentez le circuit avec $V_{\mathrm{DD}} = 5$ V, et augmentez doucement V_{GS} jusqu'à ce que $V_D > 0$. Notez la tension de seuil du transistor V_{GS}^T.
6. Pour 3 valeurs de V_{GS} entre V_{GS}^T et 3V, produisez les courbes (V_{DS}, I_D) en augmentant V_{DD} doucement. Prenez note de V_{GS}, V_{DD}, V_{DS} et V_D que vous convertirez en I_D. Identifiez les zones dites ohmique (*"triodic"* en anglais) et de pincement (*"saturation"* en anglais, à ne pas confondre avec la zone de saturation du BJT).

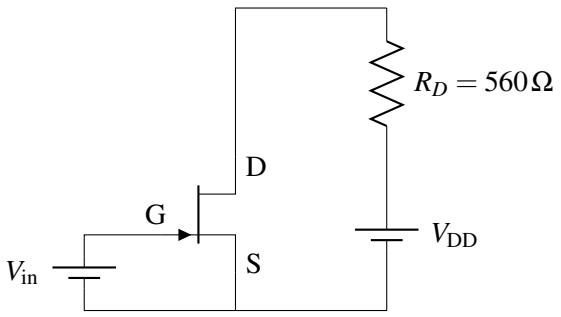


FIGURE 6. MOSFET BS170KL en configuration d'amplificateur. $V_{\mathrm{in}} = V_{GS}$.

3. Paire de Darlington

1. Montez le circuit de la figure 7 avec deux transistors BJT et $V_{CC} = 9$ V. Observez le comportement du circuit lorsque vous touchez les deux fils avec vos doigts et expliquez ce qui se passe.
2. Avec l'interrupteur fermé (*i.e.* remplacez vos doigts par un fil), en variant V_{CC} déterminez la tension de seuil à laquelle la diode s'allume et expliquez ce que vous trouvez.
3. Mettez les collecteurs au même potentiel (9 V) (*i.e.* enlevez R_C et la LED), et mettez une charge $R_E = 470\,\Omega$ entre le 2e émetteur et la masse. Déterminez V_{E2} par rapport à V_{B1}, et montrez que :

$$Z_{\text{out}} \ll Z_{\text{in}} \qquad \text{et} \qquad \beta_{\text{darlington}} = \beta_1 \cdot \beta_2$$

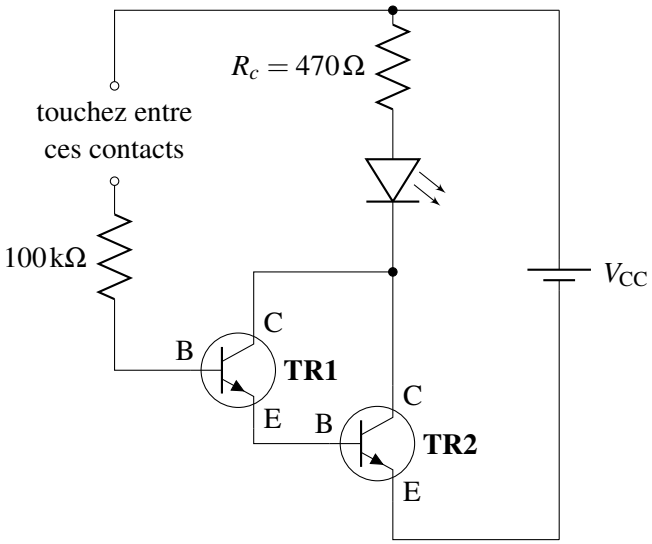


FIGURE 7. Paire de Darlington avec deux transistors BJT.

4. BJT en courant alternatif

Les transistors sont des composants fonctionnant en courant continu, et ne peuvent tolérer des courants et des tensions qui s'inversent. Afin de les utiliser avec des sources de courant alternatif, le signal d'entrée doit être décalé (*"offset"*) pour garder le transistor en mode actif pendant toute la durée du cycle du signal.

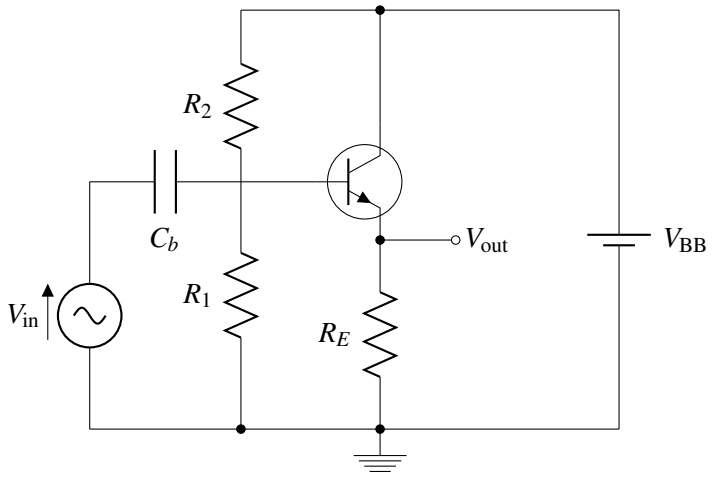


FIGURE 8. Circuit BJT à collecteur commun (émetteur-suiveur). V_{out} est mesuré aux bornes de la résistance R_E.

4.1 Amplificateur à collecteur commun

Ce montage est aussi appelé émetteur-suiveur, car la tension à l'émetteur correspond à $V_E = V_B + V_{BE}$, et donc "suit" la tension de la base. Il permet d'obtenir un gain en courant, et d'ajuster les impédances entre deux stages d'un circuit : un signal d'entrée de haute impédance sort avec une impédance beaucoup plus faible. Le gain en tension est inférieur à 1, et le signal de sortie reste en phase avec le signal d'entrée.

1. Faites le montage de la figure 8 avec $C_b = 1\,\text{nF}$, $R_1 = 22\,\text{k}\Omega$, $R_2 = 22\,\text{k}\Omega$ et $R_E = 2\,\text{k}\Omega$. Quelle est l'utilité du condensateur C_1 ?
2. Ajustez les tensions $V_{\text{BB}} = 10$ V et $V_{\text{in}} = 0$. Calculez le gain en courant en utilisant la loi de la maille base-émetteur-masse pour calculer I_B (Rappel : utilisez l'équivalent de Thévenin).
3. Toujours avec $V_{\text{BB}} = 10$ V et $V_{\text{in}} = 0$, comparez les impédances d'entrée et de sortie, sachant que :

$$Z_{in} = \frac{V_B}{I_B} \quad , \quad Z_{out} = \frac{V_E}{I_E}$$

4. Appliquez un signal sinusoïdal de 400 kHz et $V_{\text{in}} = 3$ V ; mesurez le déphasage entre V_{in} et V_{out} et calculez le gain en tension $V_{\text{out}}/V_{\text{in}}$. Montrez que ce montage permet un gain important en puissance $P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$.
5. Variez V_{in} et déterminez à quelle tension le signal de sortie est écrêté. Répétez cette mesure pour quelques valeurs de V_{in} et V_{BB}, et expliquez. Variez la fréquence et expliquez ce que vous observez. Quels sont les deux rôles de V_{BB} ?

5. Fonction logique *"not"*

1. Faites le montage de la figure 9 avec $V_{\text{bb}} = 10$ V et $V_{\text{in}} = 0$ (*"off"*) ou 10 V (*"on"*).
2. Avec quelle condition logique d'entrée la LED rouge s'allume-t-elle ?
3. Expliquez comment le circuit fonctionne, sachant qu'il est supposé représenter un feu de circulation.

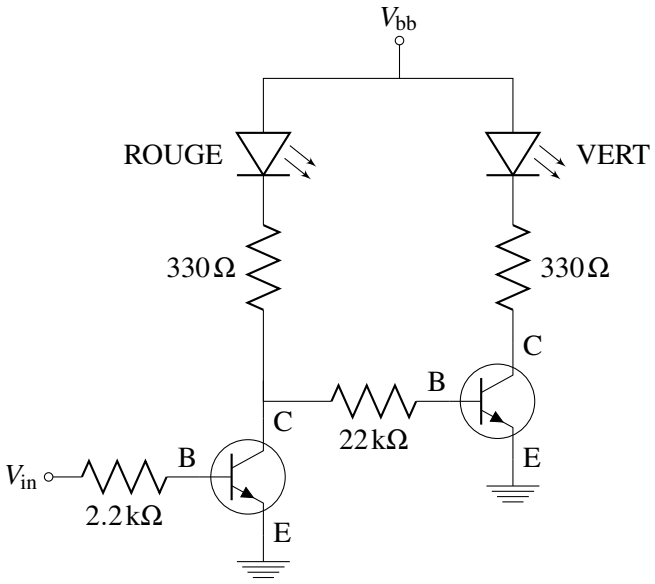


FIGURE 9. Porte logique *"not"*.