



2023

17. Transistors

R2 : Guide SCRAPY

Numéro de projet: **2021-1-FR01-KA220-SCH-000031617**



Le soutien de la Commission européenne à la production de cette publication ne constitue pas une approbation du contenu, qui reflète uniquement les points de vue des auteurs, et la Commission ne peut être tenue responsable de toute utilisation qui pourrait être faite des informations contenues dans ce document.



**Co-funded by
the European Union**

ECAM EPMI

30/04/2023

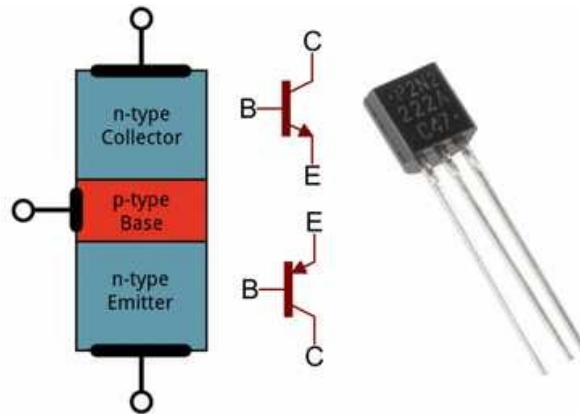
Table des matières

1. Introduction	2
2 Symboles, épingles et construction	3
2.1 Construction des transistors.....	4
2.2 Un transistor sous forme de deux diodes	4
2.3 Structure et fonctionnement du transistor.....	5
2.4 Étendre l'analogie avec l'eau	6
2.5 Puissance d'amplification.....	8
3 modes de fonctionnement	8
3.1 Mode saturation	9
3.2 Mode coupure.....	10
3.3 Mode actif.....	11
3.4 Amplificateur en mode actif.....	11
3.5 Inversion active.....	12
4 Relatif au PNP.....	13
5 Applications I : Commutateurs.....	13
5.1 Commutateur à transistors.....	14
6 résistances de base !	15
7 Logique numérique.....	16
8 oscillateurs	19
9 Applications II : Amplificateurs.....	21
10 configurations courantes	21
10.1 Émetteur commun	21
10.2 Collecteur commun (émetteur suiveur)	22
10.3 Base commune.....	23
10.4 En résumé	23
11 amplificateurs multi-étages.....	24
11.1 Amplificateur différentiel.....	24
11.2 Amplificateur push-pull.....	25
11.3 Les assembler (un amplificateur opérationnel).....	26

1. Introduction

Les transistors font tourner notre monde électronique. Ils sont essentiels en tant que source de contrôle dans presque tous les circuits modernes. Parfois, vous les voyez, mais le plus souvent, ils sont cachés au plus profond de la puce d'un circuit intégré. Dans cette leçon, nous vous présenterons les bases du transistor le plus courant autour de la jonction avec le transistor du trouble bipolaire (BJT).

En petites quantités discrètes, les transistors peuvent être utilisés pour créer de simples commutateurs électroniques, une logique numérique et des circuits amplificateurs de signal. En quantités de milliers, de millions, voire de milliards, les transistors sont interconnectés et intégrés dans de minuscules puces pour créer des mémoires informatiques, des microprocesseurs et d'autres circuits intégrés complexes.



Transistors

couvert dans cette leçon:

Après avoir lu cette leçon, nous souhaitons que vous compreniez largement le fonctionnement des transistors. Nous n'approfondirons pas trop la physique des semi-conducteurs ou les modèles équivalents, mais nous approfondirons suffisamment le sujet pour que vous compreniez comment un transistor peut être utilisé comme commutateur ou comme amplificateur.

Cette leçon est divisée en une série de sections couvrant :

- **Symboles, épingles et construction**-- Expliquer les différences entre les trois broches du transistor.
- **Étendre l'analogie avec l'eau**-- Revenons à l'analogie avec l'eau pour expliquer comment un transistor agit comme une valve.
- **Modes de fonctionnement** -- Un aperçu des quatre modes de fonctionnement possibles d'un transistor.
- **Applications I : commutateurs**-- Circuits d'application montrant comment les transistors sont utilisés comme commutateurs à commande électronique.

- **Applications II : Amplificateurs**-- Plus de circuits d'application, montrant cette fois comment les transistors sont utilisés pour amplifier la tension ou le courant.

Il existe deux types de transistors de base : à jonction bipolaire (BJT) et à effet de champ à oxyde métallique (MOSFET). Dans cette leçon, nous nous concentrerons sur le BJT, car il est légèrement plus facile à comprendre. En creusant encore plus profondément dans les types de transistors, il existe deux versions du BJT : NPN et PNP. Nous concentrerons encore plus notre attention en limitant notre première discussion au NPN. En limitant notre attention – en obtenant une solide compréhension du NPN – il sera plus facile de comprendre le PNP (ou même les MOSFETS) en comparant en quoi il diffère du NPN.

Avant d'approfondir cette leçon, nous vous recommandons fortement de jeter un coup d'œil :

- **Tension, courant, résistance et loi d'Ohm**-- Une introduction aux fondamentaux de l'électronique.
- **Bases de l'électricité** --Nous parlerons un peu de l'électricité en tant que flux d'électrons. Découvrez comment ces électrons circulent dans ce tutoriel.
- **Pouvoir électrique** --L'une des principales applications du transistor est l'amplification, c'est-à-dire l'augmentation de la puissance d'un signal. Augmenter la puissance signifie que nous pouvons augmenter le courant ou la tension, découvrez pourquoi dans ce tutoriel.
- **Diodes**--Un transistor est un dispositif semi-conducteur, tout comme une diode. D'une certaine manière, c'est ce que vous obtiendriez si vous empiliez deux diodes ensemble et attachiez leurs anodes ensemble. Comprendre le fonctionnement d'une diode contribuera grandement à découvrir le fonctionnement d'un transistor.

2 Symboles, épingles et construction

Les transistors sont fondamentalement des dispositifs à trois bornes. Sur une jonction avec un transistor à jonction bipolaire (BJT), ces broches sont étiquetées collecteur (C), base (B) et émetteur (E). Les symboles de circuit pour le NPN et le PNP BJT sont ci-dessous :



Les symboles de circuit pour les transistors NPN et PNP

La seule différence entre un NPN et un PNP est la direction de la flèche sur l'émetteur. La flèche sur un NPN indique, et sur le PNP, elle pointe vers l'intérieur. Un mnémonique utile pour se souvenir est :

NPN : ne pointe pas vers iN

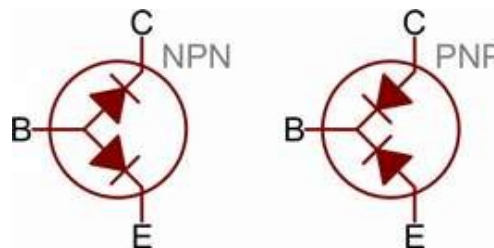
Logique à rebours, mais ça marche !

2.1 Construction des transistors

Les transistors s'appuient sur les semi-conducteurs pour opérer leur magie. Un semi-conducteur est un matériau qui n'est pas un conducteur pur (comme le fil de cuivre) mais pas non plus un isolant (comme l'air). La conductivité d'un semi-conducteur – la facilité avec laquelle il permet aux électrons de circuler – dépend de variables telles que la température ou la présence de plus ou moins d'électrons. Regardons brièvement sous le capot d'un transistor. Ne vous inquiétez pas, nous n'approfondirons pas la physique quantique.

2.2 Un transistor sous forme de deux diodes

Les transistors sont comme une extension d'un autre composant semi-conducteur : les diodes. D'une certaine manière, les transistors ne sont que deux diodes avec leurs cathodes (ou anodes) liées ensemble :



Un transistor comme deux diodes

La diode reliant la base de l'émetteur est ici la plus importante ; il correspond au sens de la flèche sur le symbole schématique et vous montre dans quel sens le courant est destiné à circuler à travers le transistor.

La représentation des diodes est un bon point de départ, mais elle est loin d'être précise. Ne basez pas votre compréhension du fonctionnement d'un transistor sur ce modèle (et n'essayez pas de le reproduire sur une maquette, cela ne fonctionnera pas). Il y a beaucoup de choses étranges au niveau de la physique quantique qui contrôlent les interactions entre les trois terminaux.

(Ce modèle est utile si vous devez tester un transistor. En utilisant la fonction de test de diode (ou de résistance) sur un multimètre, vous pouvez mesurer entre les bornes BE et BC pour vérifier la présence de ces « diodes ».)

2.3 Structure et fonctionnement du transistor

Les transistors sont construits en empilant trois couches différentes de matériaux semi-conducteurs. Certaines de ces couches contiennent des électrons supplémentaires (un processus appelé "dopage"), et d'autres ont des électrons supprimés (dopés avec des "trous" - l'absence d'électrons). Un matériau semi-conducteur avec des électrons supplémentaires est appelé type n (n pour négatif car les électrons ont une charge négative) et un matériau sans électrons est appelé type p (pour positif). Les transistors sont créés en empilant soit un n au-dessus d'un p au-dessus d'un n, soit un p sur n sur p.

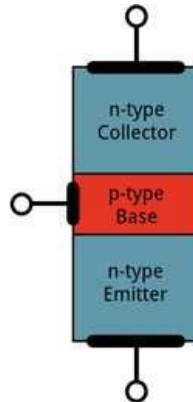


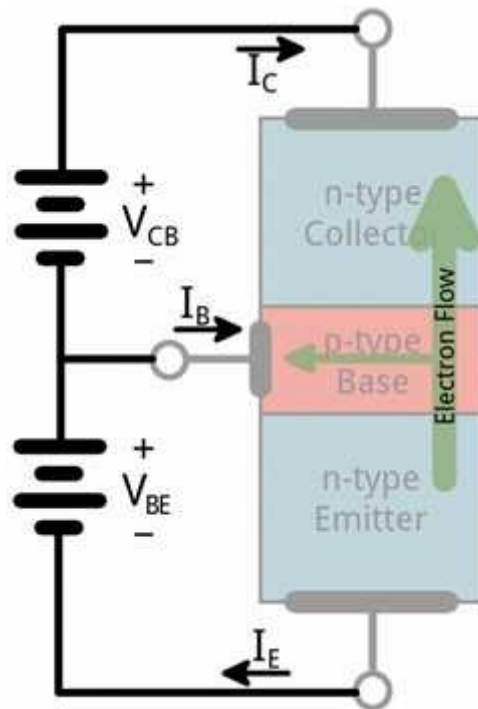
Schéma simplifié de la structure d'un NPN.

En agitant la main, nous pouvons dire que les électrons peuvent facilement circuler depuis n régions supérieures, à condition qu'ils aient un peu de force (tension) pour les pousser. Mais passer d'une région p à une région n est difficile (nécessite beaucoup de tension). Mais la particularité d'un transistor -- la partie qui rend notre modèle à deux diodes obsolète -- est le fait que les électrons peuvent facilement circuler de la base de type p vers le collecteur de type n tant que la jonction base-émetteur est polarisée en direct (ce qui signifie que la base est à une tension plus élevée que l'émetteur).

Le transistor NPN est conçu pour faire passer les électrons de l'émetteur au collecteur (le courant conventionnel circule donc du collecteur à l'émetteur). L'émetteur « émet » des électrons dans la base, qui contrôle le nombre d'électrons émis par l'émetteur. La plupart des électrons émis sont « collectés » par le collecteur, qui les envoie vers la partie suivante du circuit.

Un PNP fonctionne de la même manière mais de manière opposée. La base contrôle toujours le flux de courant, mais ce courant circule dans la direction opposée : de l'émetteur au collecteur. Au lieu d'électrons, l'émetteur émet des « trous » (une absence conceptuelle d'électrons) qui sont collectés par le collecteur.

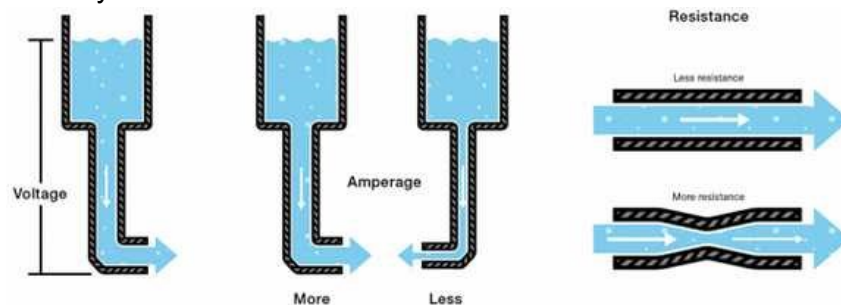
Le transistor est comme une valve électronique. La broche de base est comme une poignée que vous pouvez ajuster pour permettre à plus ou moins d'électrons de circuler de l'émetteur vers le collecteur. Examinons cette analogie plus en détail...



La structure d'un NPN

2.4 Étendre l'analogie avec l'eau

Si vous avez lu beaucoup de tutoriels sur les concepts d'électricité ces derniers temps, vous êtes habitué aux analogies avec l'eau. Nous disons que le courant est analogue au débit de l'eau, la tension est la pression qui pousse l'eau à travers un tuyau et la résistance est la largeur du tuyau.



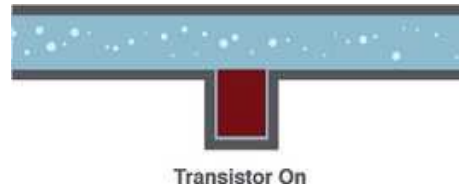
Étendre l'analogie avec l'eau

Sans surprise, l'analogie avec l'eau peut également être étendue aux transistors : un transistor est comme une vanne d'eau – un mécanisme que nous pouvons utiliser pour contrôler le débit.

Il existe trois états dans lesquels nous pouvons utiliser une vanne, chacun ayant un effet différent sur le débit d'un système.

1) Allumé -- Court-circuit

Une vanne peut être complètement ouverte, permettant à l'eau de s'écouler librement - en passant comme si la vanne n'était même pas présente.

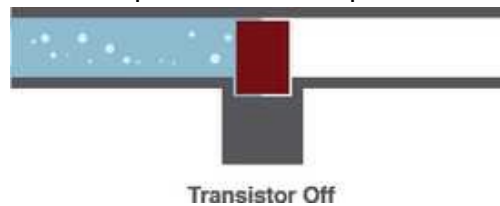


Transistor activé - Court-circuit

De même, dans de bonnes circonstances, un transistor peut ressembler à un court-circuit entre les broches du collecteur et de l'émetteur. Le courant peut circuler librement à travers le collecteur et sortir par l'émetteur.

2) Éteint - Circuit ouvert

Lorsqu'elle est fermée, une vanne peut arrêter complètement l'écoulement de l'eau.

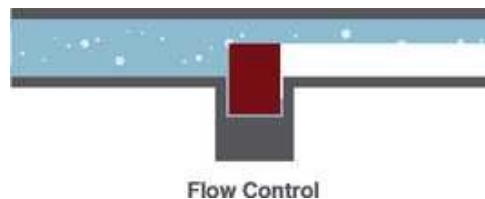


Transistor désactivé - Circuit ouvert

De la même manière, un transistor peut être utilisé pour créer un circuit ouvert entre les broches du collecteur et de l'émetteur.

3) Contrôle de débit linéaire

Avec un réglage précis, une vanne peut être ajustée pour contrôler finement le débit jusqu'à un certain point entre complètement ouverte et fermée.



Contrôle de flux linéaire de transistor

Un transistor peut faire la même chose : contrôler linéairement le courant dans un circuit à un moment donné entre complètement désactivé (un circuit ouvert) et complètement activé (un court-circuit).

D'après notre analogie avec l'eau, la largeur d'un tuyau est similaire à la résistance d'un circuit. Si une vanne peut ajuster finement la largeur d'un tuyau, alors un transistor peut ajuster finement la résistance entre le collecteur et l'émetteur. Ainsi, d'une certaine manière, un transistor est comme une résistance variable et réglable.

2.5 Puissance d'amplification

Il y a une autre analogie que nous pouvons utiliser. Imaginez si, en tournant légèrement une vanne, vous pouviez contrôler le débit des vannes d'écoulement du barrage Hoover. La faible quantité de force que vous pourriez mettre en tournant ce bouton a le potentiel de créer une force des milliers de fois plus forte. Nous poussons l'analogie jusqu'à ses limites, mais cette idée s'applique également aux transistors. Les transistors sont spéciaux car ils peuvent amplifier les signaux électriques, transformant un signal de faible puissance en un signal similaire de puissance beaucoup plus élevée.

Type de. Il y a bien plus à faire, mais c'est un bon point de départ ! Consultez la section suivante pour une explication plus détaillée du fonctionnement d'un transistor.

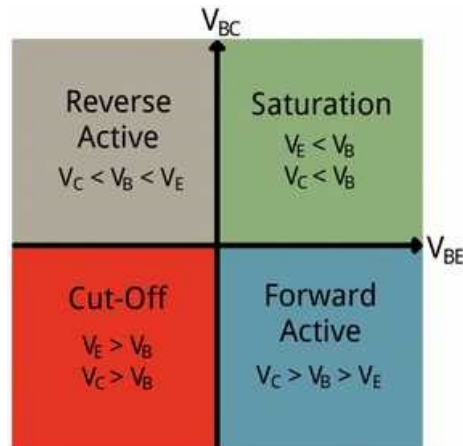
3 modes de fonctionnement

Contrairement aux résistances, qui imposent une relation linéaire entre la tension et le courant, les transistors sont des dispositifs non linéaires. Ils ont quatre modes de fonctionnement distincts, qui décrivent le courant qui les traverse. (Lorsque nous parlons de flux de courant à travers un transistor, nous entendons généralement le courant circulant du collecteur à l'émetteur d'un NPN.)

Les quatre modes de fonctionnement des transistors sont :

- **Saturation**-- Le transistor agit comme un court-circuit. Le courant circule librement du collecteur à l'émetteur.
- **Couper**-- Le transistor agit comme un circuit ouvert. Aucun courant ne circule du collecteur vers l'émetteur.
- **Actif**-- Le courant du collecteur à l'émetteur est proportionnel au courant circulant dans la base.
- **Inverse-Active**-- Comme le mode actif, le courant est proportionnel au courant de base, mais il circule en sens inverse. Le courant circule de l'émetteur au collecteur (ce n'est pas exactement le but pour lequel les transistors ont été conçus).

Pour déterminer dans quel mode se trouve un transistor, nous devons examiner les tensions sur chacune des trois broches et leurs relations les unes avec les autres. Les tensions de la base à l'émetteur (VBE), puis de la base au collecteur (VBC) définissent le mode du transistor :



Le mode du transistor

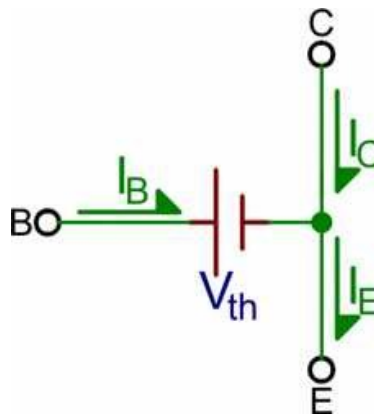
Le graphique en quadrant simplifié ci-dessus montre comment les tensions positives et négatives à ces bornes affectent le mode. En réalité, c'est un peu plus compliqué que ça.

Examinons les quatre modes de transistor individuellement ; nous étudierons comment mettre l'appareil dans ce mode et quel effet cela a sur le flux de courant.

Note: La majorité de cette page se concentre sur les transistors NPN. Pour comprendre le fonctionnement d'un transistor PNP, inversez simplement la polarité ou les signes > et <.

3.1 Mode saturation

La saturation est le seul mode d'un transistor. Un transistor en mode saturation agit comme un court-circuit entre le collecteur et l'émetteur.



Mode saturation

En mode saturation, les deux « diodes » du transistor sont polarisées en direct. Cela veut dire V_{BE} doit être supérieur à 0, tout comme V_{BC} . En d'autres termes, V_B doit être supérieur aux deux V_E et V_C .

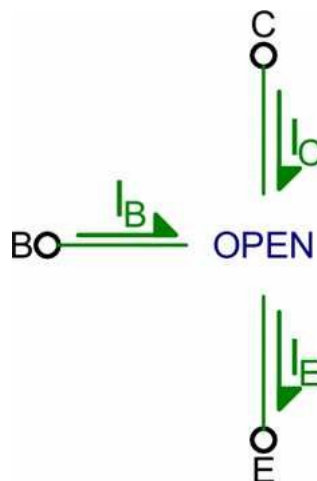
$$\begin{aligned} V_B &> V_C \\ V_B &> V_E \end{aligned}$$

Étant donné que la jonction de la base à l'émetteur ressemble à une diode, en réalité, V_{BE} doit être supérieure à une tension de seuil pour entrer en saturation. Il existe de nombreuses abréviations pour cette chute de tension – V_{th} , V_{γ} et V_d en sont quelques-unes – et la valeur réelle varie entre les transistors (et encore plus en fonction de la température). Pour beaucoup de transistors (à température ambiante) on peut estimer cette chute à environ 0,6V.

Autre réalité décevante : il n'y aura pas de conduction parfaite entre l'émetteur et le collecteur. Une petite chute de tension se formera entre ces nœuds. Les fiches techniques des transistors définiront cette tension comme tension de saturation CE $V_{CE(sat)}$ - une tension du collecteur à l'émetteur requise pour la saturation. Cette valeur est généralement d'environ 0,05 à 0,2 V. Cette valeur signifie que V_C doit être légèrement supérieur à V_E (mais tous deux toujours inférieurs à V_B) pour mettre le transistor en mode saturation.

3.2 Mode coupure

Le mode Cutoff est l'opposé de la saturation. Un transistor en mode coupure est bloqué : il n'y a pas de courant de collecteur, et donc pas de courant d'émetteur. Cela ressemble presque à un circuit ouvert.



Mode de coupure

Pour mettre un transistor en mode de coupure, la tension de base doit être inférieure aux tensions de l'émetteur et du collecteur. V_{BE} et V_{BC} doivent tous deux être négatifs.

$$\begin{aligned}V_C &> V_B \\V_E &> V_B\end{aligned}$$

En réalité, V_E peut être n'importe où entre 0V et $V_{\text{ème}}(\sim 0,6 \text{ V})$ pour obtenir le mode de coupure.

3.3 Mode actif

Pour fonctionner en mode actif, le V_{BE} d'un transistor doit être supérieur à zéro et son V_{BC} doit être négatif. Ainsi, la tension de base doit être inférieure à celle du collecteur, mais supérieure à celle de l'émetteur. Cela signifie également que le collecteur doit être plus grand que l'émetteur.

$$V_C > V_B > V_E$$

En réalité, nous avons besoin d'une chute de tension directe non nulle (en abrégé V_{th} , V_{γ} ou V_d) de la base à l'émetteur (V_{BE}) pour « allumer » le transistor. Habituellement, cette tension est d'environ 0,6 V.

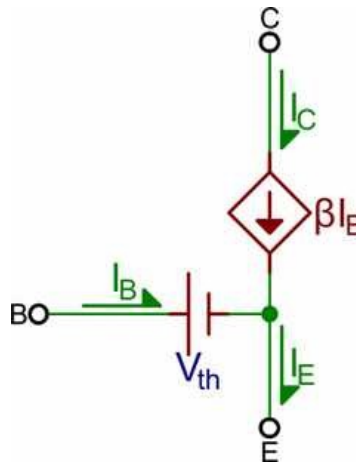
3.4 Amplificateur en mode actif

Le mode actif est le mode le plus puissant du transistor car il transforme l'appareil en amplificateur. Le courant entrant dans la broche de base amplifie le courant entrant dans le collecteur et sortant de l'émetteur.

Notre notation abrégée pour le gain (facteur d'amplification) d'un transistor est β (vous pouvez également le voir comme β_F , ou h_{FE}). β relie linéairement le courant du collecteur (I_C) au courant de base (I_B) :

$$I_C = \beta I_B$$

La valeur réelle de β varie selon le transistor. C'est généralement autour de 100 mais peut aller de 50 à 200... voire 2000, selon le transistor que vous utilisez et la quantité de courant qui le traverse. Si votre transistor avait un β de 100, par exemple, cela signifierait qu'un courant d'entrée de 1 mA dans la base pourrait produire un courant de 100 mA à travers le collecteur.



Modèle en mode actif. $V_{BE} = V_{th}$ et $I_C = \beta I_B$.

Qu'en est-il du courant de l'émetteur, I_E ? En mode actif, les courants de collecteur et de base entrent dans l'appareil et l' I_E en sort. Pour relier le courant émetteur au courant collecteur, nous avons une autre valeur constante : α . α est le gain de courant de base commune, il relie ces courants comme tels :

$$I_C = \alpha I_E$$

α est généralement très proche de 1, mais inférieur à 1. Cela signifie que I_C est très proche, mais inférieur à I_E en mode actif.

Vous pouvez utiliser β pour calculer α , ou vice versa :

$$\beta = \frac{\alpha}{(1-\alpha)}$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta+1}$$

Si β vaut 100, par exemple, cela signifie que α vaut 0,99. Ainsi, si I_C est de 100 mA, par exemple, alors I_E est de 101 mA.

3.5 Inversion active

Tout comme la saturation est l'opposé de la coupure, le mode actif inversé est l'opposé du mode actif. Un transistor en mode actif inverse conduit, voire amplifie, mais le courant circule dans le sens opposé, de l'émetteur au collecteur. L'inconvénient du mode actif inversé est que le β (β_R dans ce cas) est beaucoup plus petit.

Pour mettre un transistor en mode actif inverse, la tension de l'émetteur doit être supérieure à la base, qui doit être supérieure au collecteur ($V_{BE} < 0$ et $V_{BC} > 0$).

$$V_C < V_B < V_E$$

Le mode actif inverse n'est généralement pas un état dans lequel vous souhaitez piloter un transistor. C'est bien de savoir qu'il existe, mais il est rarement conçu dans une application.

4 Relatif au PNP

Après tout ce dont nous avons parlé sur cette page, nous n'avons encore couvert que la moitié du spectre BJT. Qu'en est-il des transistors PNP ? Les PNP fonctionnent un peu comme les NPN – ils ont les quatre mêmes modes – mais tout est inversé. Pour savoir dans quel mode se trouve un transistor PNP, inversez tous les signes $<$ et $>$.

Par exemple, pour mettre un PNP en saturation, V_C et V_E doivent être supérieurs à V_B . Vous tirez la base vers le bas pour allumer le PNP et la placez plus haut que le collecteur et l'émetteur pour l'éteindre. Et, pour mettre un PNP en mode actif, V_E doit être à une tension supérieure à V_B , qui doit être supérieure à V_C .

En résumé:

Relations de tension	Mode NPN	Mode PNP
$V_E < V_B < V_C$	Actif	Inverse
$V_E < V_B > V_C$	Saturation	Couper
$V_E > V_B < V_C$	Couper	Saturation
$V_E > V_B > V_C$	Inverse	Actif

Une autre caractéristique opposée des NPN et des PNP est la direction du flux de courant. En modes actif et saturation, le courant dans un PNP circule de l'émetteur au collecteur. Cela signifie que l'émetteur doit être à une tension plus élevée que le collecteur.

Si vous êtes épuisé par les trucs conceptuels, passez à la section suivante. La meilleure façon d'apprendre comment fonctionne un transistor est de l'examiner dans des circuits réels. Regardons quelques applications !

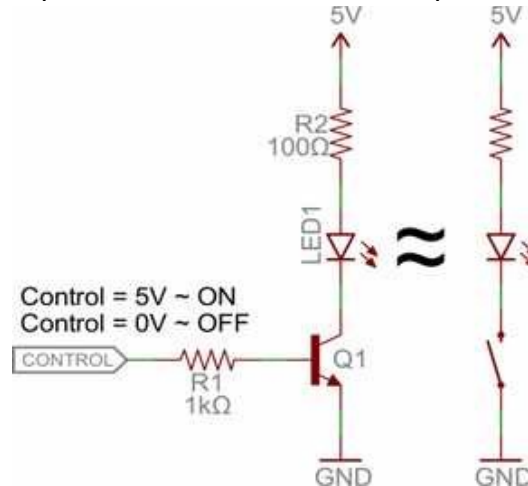
5 Applications I : Commutateurs

L'une des applications les plus fondamentales d'un transistor consiste à l'utiliser pour contrôler le flux d'énergie vers une autre partie du circuit, en l'utilisant comme interrupteur électrique. En le pilotant en mode coupure ou saturation, le transistor peut créer l'effet binaire marche/arrêt d'un interrupteur.

Les commutateurs à transistor sont des éléments essentiels de la construction de circuits ; ils sont utilisés pour fabriquer des portes logiques, qui servent ensuite à créer des microcontrôleurs, des microprocesseurs et d'autres circuits intégrés. Vous trouverez ci-dessous quelques exemples de circuits.

5.1 Commutateur à transistors

Examinons le circuit transistor-commutateur le plus fondamental : un commutateur NPN. Ici, nous utilisons un NPN pour contrôler une LED haute puissance :



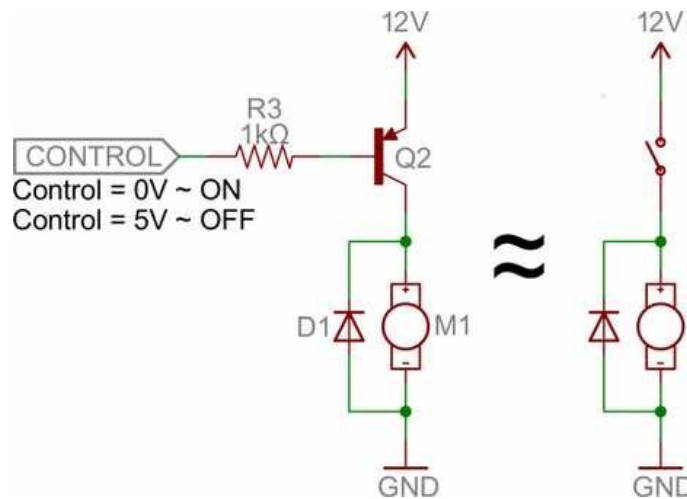
Un commutateur NPN

Notre entrée de contrôle circule dans la base, la sortie est liée au collecteur et l'émetteur est maintenu à une tension fixe.

Alors qu'un interrupteur normal nécessiterait qu'un actionneur soit physiquement basculé, cet interrupteur est contrôlé par la tension au niveau de la broche de base.

Une broche d'E/S d'un microcontrôleur, comme celles d'un Arduino, peut être programmée pour monter ou descendre pour allumer ou éteindre la LED.

Lorsque la tension à la base est supérieure à 0,6 V (ou quel que soit le V_{th} de votre transistor), le transistor commence à saturer et ressemble à un court-circuit entre le collecteur et l'émetteur. Lorsque la tension à la base est inférieure à 0,6 V, le transistor est en mode coupure : aucun courant ne circule car cela ressemble à un circuit ouvert entre C et E.



Un interrupteur côté bas

Le circuit ci-dessus est appelé interrupteur côté bas car l'interrupteur - notre transistor - se trouve du côté bas (terre) du circuit. Alternativement, nous pouvons utiliser un transistor PNP pour créer un commutateur côté haut

Semblable au circuit NPN, la base est notre entrée et l'émetteur est lié à une tension constante. Cette fois, cependant, l'émetteur est attaché au niveau haut et la charge est connectée au transistor côté masse.

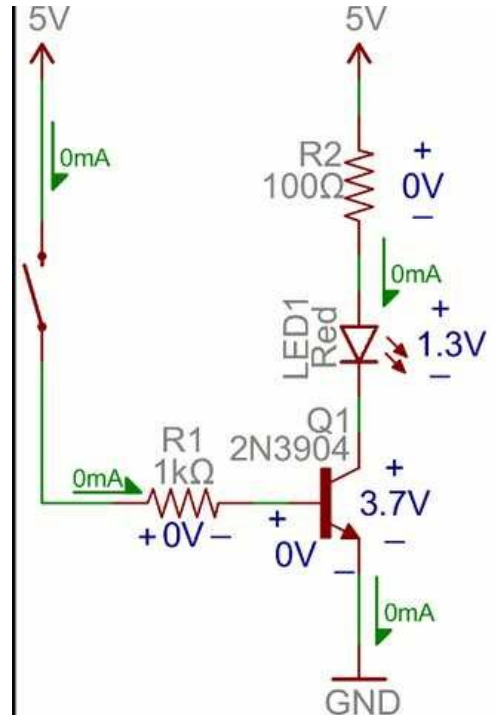
Ce circuit fonctionne aussi bien que le commutateur basé sur NPN, mais il y a une énorme différence : pour allumer la charge, la base doit être basse. Cela peut entraîner des complications, surtout si la haute tension de la charge (VCC étant 12 V connecté à l'émetteur VE sur cette image) est supérieure à la haute tension de notre entrée de commande. Par exemple, ce circuit ne fonctionnerait pas si vous essayiez d'utiliser un Arduino fonctionnant en 5 V pour éteindre un moteur 12 V. Dans ce cas, il serait impossible d'éteindre l'interrupteur car VB (connexion à la broche de commande) serait toujours inférieur à VE.

6 résistances de base !

Vous remarquerez que chacun de ces circuits utilise une résistance série entre l'entrée de commande et la base du transistor. N'oubliez pas d'ajouter cette résistance ! Un transistor sans résistance sur la base est comme une LED sans résistance de limitation de courant.

Rappelons que, d'une certaine manière, un transistor n'est qu'une paire de diodes interconnectées. Nous polarisons la diode base-émetteur pour allumer la charge. La diode n'a besoin que de 0,6 V pour s'allumer, plus de tension signifie plus de courant. Certains transistors ne peuvent être conçus que pour un courant maximum de 10 à 100 mA qui les traverse. Si vous fournissez un courant supérieur à la valeur nominale maximale, le transistor peut exploser.

La résistance série entre notre source de contrôle et la base limite le courant entrant dans la base. Le nœud base-émetteur peut obtenir sa chute de tension heureuse de 0,6 V, et la résistance peut chuter la tension restante. La valeur de la résistance et la tension à ses bornes détermineront le courant.



Une résistance de base

La résistance doit être suffisamment grande pour limiter efficacement le courant, mais suffisamment petite pour alimenter suffisamment de courant la base. 1 mA à 10 mA suffiront généralement, mais vérifiez la fiche technique de votre transistor pour vous en assurer.

7 Logique numérique

Les transistors peuvent être combinés pour créer toutes nos portes logiques fondamentales : ET, OU et NON.

(Remarque : de nos jours, les MOSFET sont plus susceptibles d'être utilisés pour créer des portes logiques que les BJT. Les MOSFET sont plus économes en énergie, ce qui en fait le meilleur choix.)

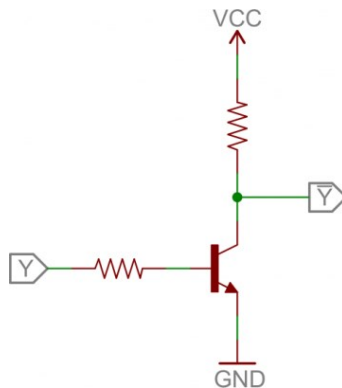
Onduleur

Voici un circuit à transistor qui implémente un inverseur, ou porte NON :

Ici, une haute tension dans la base activera le transistor, ce qui connectera efficacement le collecteur à l'émetteur. Puisque l'émetteur est connecté directement à la terre, le

collecteur le sera également (bien qu'il soit légèrement plus élevé, quelque part autour de $V_{CE(sat)} \sim 0,05-0,2 \text{ V}$). En revanche, si l'entrée est faible, le transistor ressemble à un circuit ouvert et la sortie est tirée vers VCC.

(Il s'agit d'une configuration fondamentale de transistor appelée émetteur commun. Nous y reviendrons plus tard.)



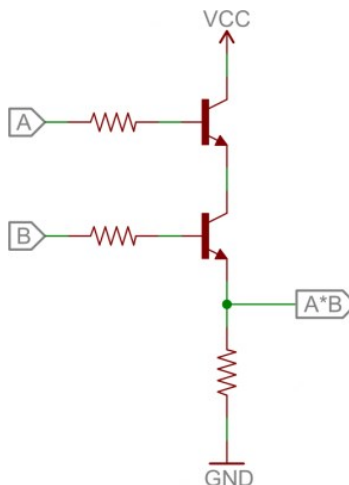
Un onduleur construit à partir de transistors.

ET Porte

Voici une paire de transistors utilisés pour créer une porte ET à 2 entrées :

Si l'un des transistors est désactivé, la sortie du collecteur du deuxième transistor sera abaissée.

Si les deux transistors sont « allumés » (bases toutes deux élevées), alors la sortie du circuit est également élevée.

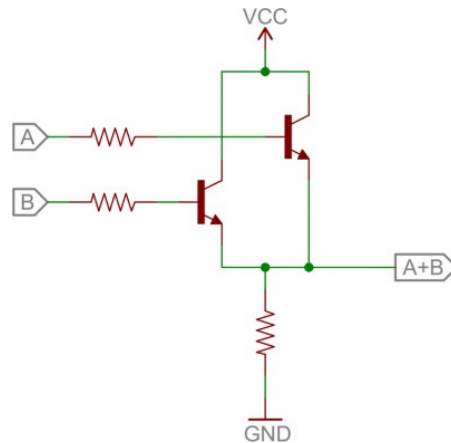


Porte ET à 2 entrées construite à partir de transistors.

OU Porte

Et enfin, voici une porte OU à 2 entrées :

Dans ce circuit, si l'un (ou les deux) A et B sont à l'état haut, ce transistor respectif s'allumera et élèvera la sortie à l'état haut. Si les deux transistors sont bloqués, la sortie est tirée au niveau bas via la résistance.

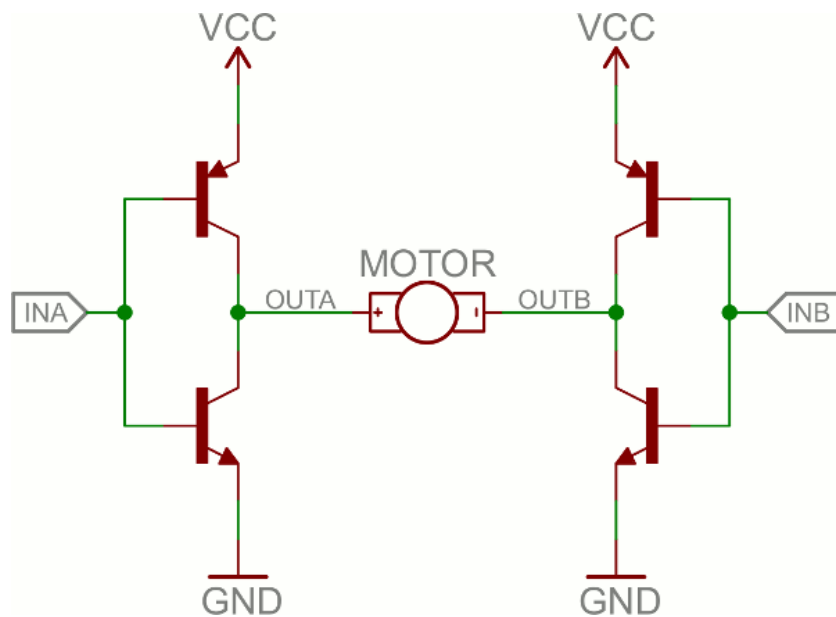


Porte OU à 2 entrées construite à partir de transistors.

Pont en H

Un pont en H est un circuit à transistors capable de piloter des moteurs dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens inverse. Il s'agit d'un circuit incroyablement populaire, la force motrice derrière d'innombrables robots qui doivent être capables d'avancer et de reculer.

Fondamentalement, un pont en H est une combinaison de quatre transistors avec deux lignes d'entrée et deux sorties :



Pouvez-vous deviner pourquoi on l'appelle un pont en H ?

(Remarque : un pont en H bien conçu comporte généralement bien plus, notamment des diodes flyback, des résistances de base et des déclencheurs Schmidt.)

Si les deux entrées ont la même tension, les sorties du moteur auront la même tension et le moteur ne pourra pas tourner. Mais si les deux entrées sont opposées, le moteur tournera dans un sens ou dans l'autre.

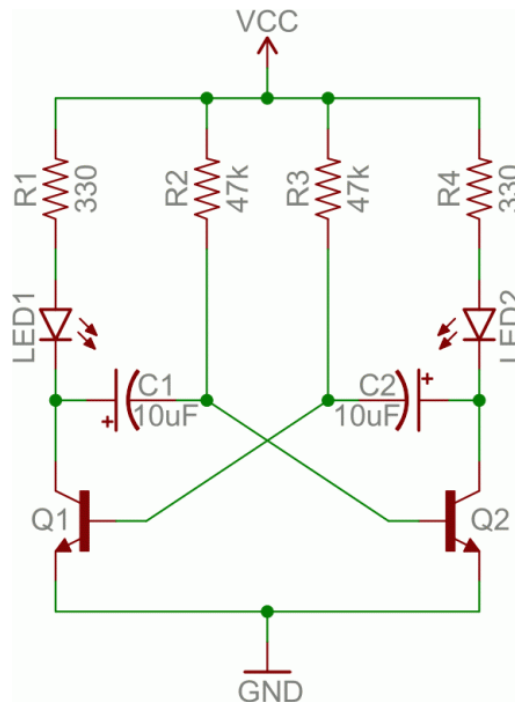
Le pont en H possède une table de vérité qui ressemble un peu à ceci :

Entrée A	Entrée B	Sortie A	Sortie B	Direction du moteur
0	0	1	1	Arrêté (freinage)
0	1	1	0	Dans le sens des aiguilles d'une montre
1	0	0	1	Dans le sens inverse des aiguilles d'une montre
1	1	0	0	Arrêté (freinage)

8 oscillateurs

Un oscillateur est un circuit qui produit un signal périodique oscillant entre une tension haute et basse. Les oscillateurs sont utilisés dans toutes sortes de circuits : du simple clignotement d'une LED à la production d'un signal d'horloge pour piloter un microcontrôleur. Il existe de nombreuses façons de créer un circuit oscillateur, notamment des cristaux de quartz, des amplificateurs opérationnels et, bien sûr, des transistors.

Voici un exemple de circuit oscillant, que nous appelons multivibrateur astable. En utilisant la rétroaction, nous pouvons utiliser une paire de transistors pour créer deux signaux oscillants complémentaires.



Circuit oscillant

Outre les deux transistors, les condensateurs sont la véritable clé de ce circuit. Les capuchons se chargent et se déchargent alternativement, ce qui provoque l'activation et la désactivation alternative des deux transistors.

L'analyse du fonctionnement de ce circuit constitue une excellente étude du fonctionnement des condensateurs et des transistors. Pour commencer, supposons que C1 est complètement chargé (stockant une tension d'environ VCC), C2 est déchargé, Q1 est allumé et Q2 est éteint. Voici ce qui se passe après cela :

- Si Q1 est allumé, alors la plaque gauche de C1 (sur le schéma) est connectée à environ 0 V. Cela permettra à C1 de se décharger via le collecteur de Q1.
- Pendant que C1 se décharge, C2 se charge rapidement via la résistance de valeur inférieure – R4.
- Une fois que C1 se déchargera complètement, sa plaque droite sera tirée jusqu'à environ 0,6 V, ce qui activera Q2.
- À ce stade, nous avons inversé les états : C1 est déchargé, C2 est chargé, Q1 est éteint et Q2 est activé. Maintenant, nous faisons la même danse dans l'autre sens.
- Q2 étant allumé, C2 peut se décharger via le collecteur de Q2.
- Pendant que Q1 est éteint, C1 peut charger rapidement via R1.
- Une fois que C2 sera complètement déchargé, Q1 sera réactivé et nous reviendrons à l'état dans lequel nous avons commencé.

Il peut être difficile de comprendre. Vous pouvez trouver une autre excellente démo de ce circuit [ici](#).

En choisissant des valeurs spécifiques pour C1, C2, R2 et R3 (et en gardant R1 et R4 faibles), nous pouvons définir la vitesse de notre circuit multivibrateur :

$$f = \frac{1}{\ln(2) \cdot (R_2 C_1 + R_3 C_2)}$$

Ainsi, avec les valeurs des capuchons et des résistances définies respectivement sur 10 µF et 47 kΩ, la fréquence de notre oscillateur est d'environ 1,5 Hz. Cela signifie que chaque LED clignotera environ 1,5 fois par seconde.

Comme vous pouvez déjà le constater, il existe des tonnes de circuits utilisant des transistors. Mais nous avons à peine effleuré la surface. Ces exemples montrent principalement comment le transistor peut être utilisé en mode saturation et coupure comme interrupteur, mais qu'en est-il de l'amplification ? Il est temps de donner plus d'exemples !

9 Applications II : Amplificateurs

Certaines des applications de transistors les plus puissantes impliquent l'amplification : transformer un signal de faible puissance en un signal de puissance plus élevée. Les amplificateurs peuvent augmenter la tension d'un signal, en prenant quelque chose de la plage µV et en le convertissant en un niveau mV ou V plus utile. Ou encore, ils peuvent amplifier le courant, ce qui est utile pour transformer le µA de courant produit par une photodiode en un courant d'amplitude beaucoup plus élevée. Il existe même des amplificateurs qui absorbent un courant et produisent une tension plus élevée, ou vice versa (appelés respectivement trans résistance et transconductance).

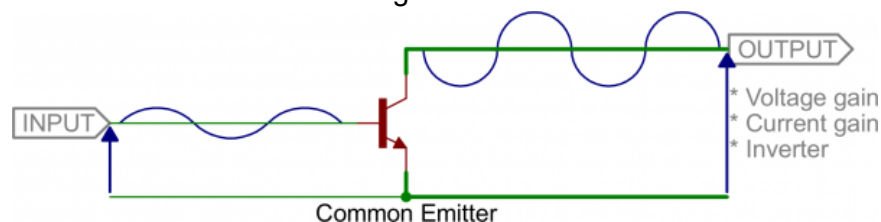
Les transistors sont un élément clé de nombreux circuits amplificateurs. Il existe une variété infinie d'amplificateurs à transistors, mais heureusement, beaucoup d'entre eux sont basés sur certains de ces circuits les plus primitifs. N'oubliez pas ces circuits et, espérons-le, avec un peu de correspondance de modèles, vous pourrez donner un sens à des amplificateurs plus complexes.

10 configurations courantes

Trois des amplificateurs à transistors les plus fondamentaux sont l'émetteur commun, le collecteur commun et la base commune. Dans chacune des trois configurations, l'un des trois nœuds est lié en permanence à une tension commune (généralement la masse) et les deux autres nœuds sont soit une entrée, soit une sortie de l'amplificateur.

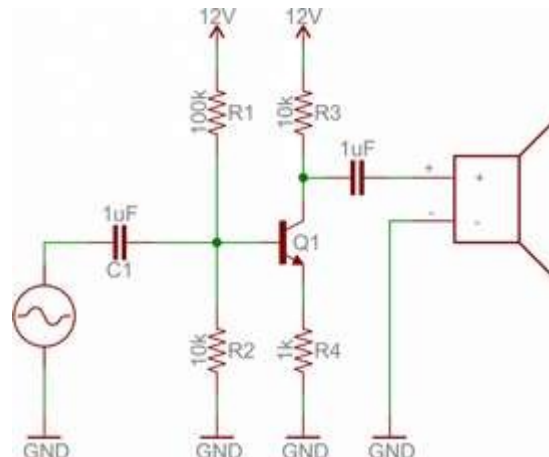
10.1 Émetteur commun

L'émetteur commun est l'un des agencements de transistors les plus populaires. Dans ce circuit, l'émetteur est lié à une tension commune à la base et au collecteur (généralement la masse). La base devient l'entrée du signal et le collecteur devient la sortie.



Émetteur commun

Le circuit émetteur commun est populaire car il est bien adapté à l'amplification de tension, en particulier aux basses fréquences. Ils sont parfaits pour amplifier les signaux audio, par exemple. Si vous disposez d'un petit signal d'entrée crête à crête de 1,5 V, vous pouvez l'amplifier à une tension beaucoup plus élevée en utilisant un circuit légèrement plus compliqué, comme :

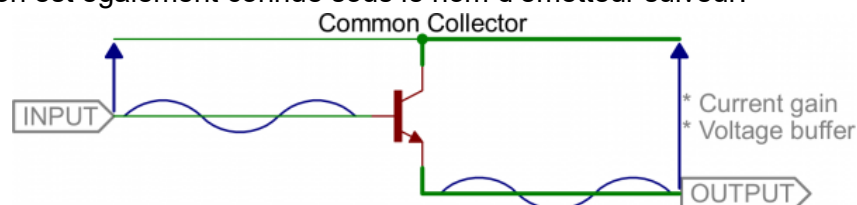


Circuit émetteur commun

Une particularité de l'émetteur commun, cependant, est qu'il inverse le signal d'entrée (comparez-le à l'inverseur de la dernière page !).

10.2 Collecteur commun (émetteur suiveur)

Si nous attachons la broche du collecteur à une tension commune, utilisons la base comme entrée et l'émetteur comme sortie, nous avons un collecteur commun. Cette configuration est également connue sous le nom d'émetteur suiveur.

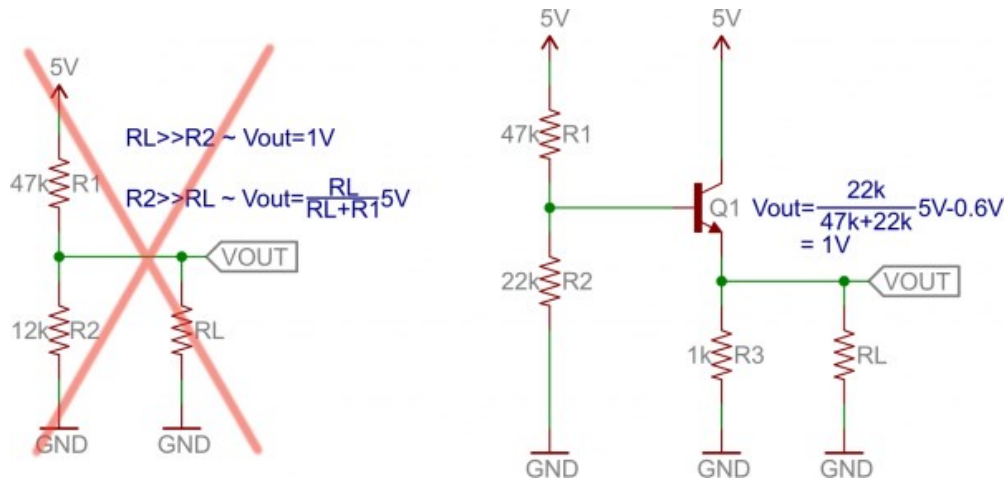


Collecteur commun

Le collecteur commun n'amplifie pas la tension (en fait, la tension de sortie sera inférieure de 0,6 V à la tension d'entrée). Pour cette raison, ce circuit est parfois appelé suiveur de tension.

Ce circuit a un grand potentiel en tant qu'amplificateur de courant. En plus de cela, le gain de courant élevé combiné à un gain de tension proche de l'unité fait de ce circuit un excellent tampon de tension. Un tampon de tension empêche un circuit de charge d'interférer de manière indésirable avec le circuit qui le pilote.

Par exemple, si vous souhaitez fournir 1 V à une charge, vous pouvez opter pour la solution de facilité et utiliser un diviseur de tension, ou vous pouvez utiliser un émetteur suiveur.

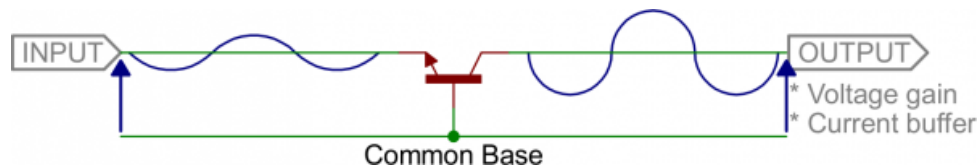


Circuit collecteur commun

À mesure que la charge augmente (ce qui, à l'inverse, signifie que la résistance est plus faible), la sortie du circuit diviseur de tension chute. Mais la tension de sortie de l'émetteur suiveur reste stable, quelle que soit la charge. Des charges plus importantes ne peuvent pas « charger » un émetteur-suiveur, car elles peuvent fonctionner avec des impédances de sortie plus grandes.

10.3 Base commune

Nous parlerons de la base commune pour clôturer cette section, mais il s'agit de la moins populaire des trois configurations fondamentales. Dans un amplificateur à base commune, l'émetteur est l'entrée et la sortie du collecteur. La base est commune aux deux.



Base commune

La base commune est comme l'anti-émetteur-suiveur. C'est un amplificateur de tension décent, et le courant entrant est à peu près égal au courant sortant (en fait, le courant entrant est légèrement supérieur au courant sortant).

Le circuit de base commune fonctionne mieux comme tampon de courant. Il peut prendre un courant d'entrée à faible impédance d'entrée et délivrer ce même courant à une sortie à impédance plus élevée.

10.4 En résumé

Ces trois configurations d'amplificateurs sont au cœur de nombreux amplificateurs à transistors plus complexes. Ils ont chacun des applications où ils brillent, qu'il s'agisse d'amplifier le courant, la tension ou la mise en mémoire tampon.

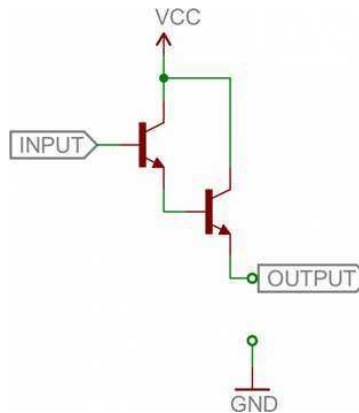
	Émetteur commun	Collecteur commun	Base commune
Gain de tension	Moyen	Faible	Haut
Gain actuel	Moyen	Haut	Faible
Impédance d'entrée	Moyen	Haut	Faible
Impédance de sortie	Moyen	Faible	Haut

11 amplificateurs multi-étages

Nous pourrions parler encore et encore de la grande variété d'amplificateurs à transistors disponibles. Voici quelques exemples rapides pour montrer ce qui se passe lorsque vous combinez les amplificateurs à un étage ci-dessus :

Darlington

L'amplificateur Darlington fait passer un collecteur commun dans un autre pour créer un amplificateur à gain de courant élevé.



Amplificateurs multi-étages

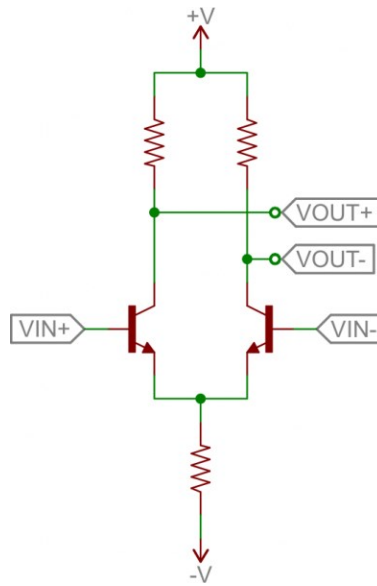
La tension de sortie est à peu près la même que la tension d'entrée (moins environ 1,2 V-1,4 V), mais le gain de courant est le produit des gains de deux transistors. C'est β^2 – plus de 10 000 !

La paire Darlington est un excellent outil si vous devez piloter une charge importante avec un très faible courant d'entrée.

11.1 Amplificateur différentiel

Un amplificateur différentiel soustrait deux signaux d'entrée et amplifie cette différence. Il s'agit d'un élément essentiel des circuits de rétroaction, dans lequel l'entrée est comparée à la sortie, pour produire une sortie future.

Voici les bases de l'ampli différentiel :



Amplificateur différentiel

Ce circuit est également appelé paire à longue queue. Il s'agit d'une paire de circuits à émetteur commun qui sont comparés les uns aux autres pour produire une sortie différentielle. Deux entrées sont appliquées aux bases des transistors ; la sortie est une tension différentielle aux bornes des deux collecteurs.

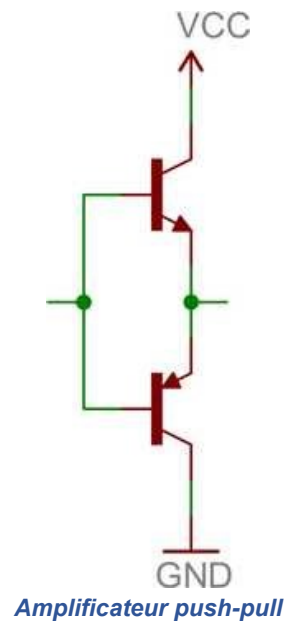
11.2 Amplificateur push-pull

Un amplificateur push-pull est un « étage final » utile dans de nombreux amplificateurs multi-étages. Il s'agit d'un amplificateur de puissance économe en énergie, souvent utilisé pour alimenter des haut-parleurs.

L'ampli push-pull fondamental utilise un transistor NPN et PNP, tous deux configurés comme collecteurs communs :

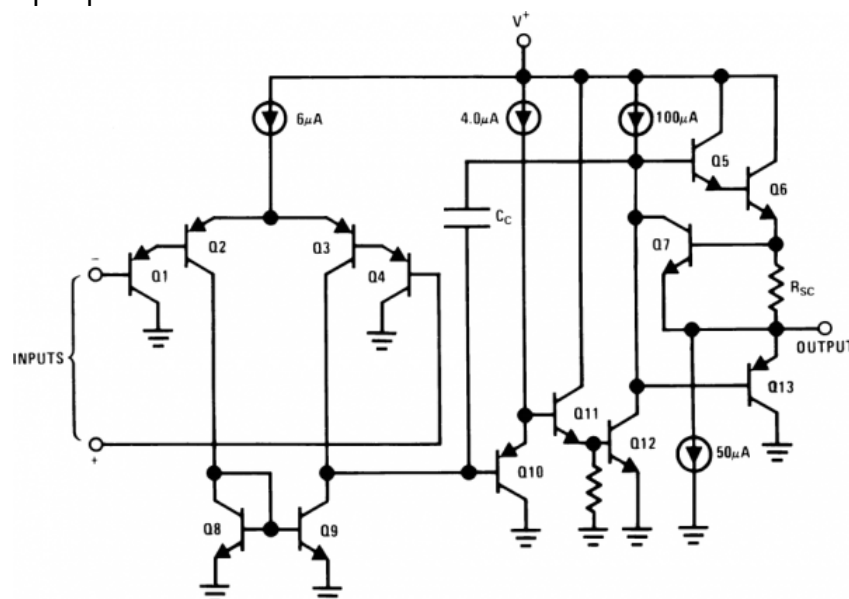
L'ampli push-pull n'amplifie pas la tension (la tension de sortie sera légèrement inférieure à celle d'entrée), mais il amplifie le courant. Il est particulièrement utile dans les circuits bipolaires (ceux avec des alimentations positives et négatives) car il peut à la fois « pousser » le courant dans la charge à partir de l'alimentation positive, et « extraire » le courant et le faire couler dans l'alimentation négative.

Si vous disposez d'une alimentation bipolaire (ou même si vous n'en avez pas), le push-pull est un excellent étage final pour un amplificateur, agissant comme un tampon pour la charge.



11.3 Les assembler (un amplificateur opérationnel)

Regardons un exemple classique de circuit à transistors à plusieurs étages : un ampli opérationnel. Être capable de reconnaître les circuits à transistors courants et de comprendre leur fonction peut vous mener loin ! Voici le circuit à l'intérieur d'un LM3558, un simple ampli opérationnel :



Les composants internes d'un amplificateur opérationnel LM3558. Vous reconnaissez certains amplificateurs ?

Il y a certainement plus de complexité ici que ce que vous pourriez être prêt à digérer ; cependant, vous verrez peut-être des topologies familières :

- Q1, Q2, Q3 et Q4 forment l'étage d'entrée. Cela ressemble beaucoup à un collecteur commun (Q1 et Q4) dans un amplificateur différentiel, non ? Il a l'air à l'envers parce qu'il utilise des PNP. Ces transistors contribuent à former l'étage différentiel d'entrée de l'amplificateur.
- Q11 et Q12 font partie de la deuxième étape. Q11 est un collecteur commun et Q12 est un émetteur commun. Cette paire de transistors tamponnera le signal du collecteur du Q3 et fournira un gain élevé lorsque le signal atteindra l'étage final.
- Q6 et Q13 font partie de l'étape finale, et ils devraient également vous sembler familiers (surtout si vous ignorez RSC) – c'est un push-pull ! Cette étape met en mémoire tampon la sortie, lui permettant de piloter des charges plus importantes.
- Il existe une variété d'autres configurations courantes dont nous n'avons pas parlé. Q8 et Q9 sont configurés comme un miroir de courant, qui copie simplement la quantité de courant traversant un transistor vers l'autre.

Après ce cours intensif sur les transistors, nous ne nous attendons pas à ce que vous compreniez ce qui se passe dans ce circuit, mais si vous pouvez commencer à identifier les circuits à transistors courants, vous êtes sur la bonne voie !