

## Chapitre 5 - Les transistors

Les transistors sont des composants qui utilisent les semi-conducteurs ; leur invention est sans doute l'invention majeure du 20<sup>ème</sup> siècle, une invention qui a révolutionné le monde de l'électronique. Rappelez-vous l'invasion des postes de radio à transistors sur les plages et de la liberté que cela représentait pour les jeunes de l'époque. Sans les transistors, point de salut (ni de « Salut les copains » entre potes !). Toute une époque ! Aujourd'hui, on sait graver plusieurs centaines de millions de transistors sur une puce de 1 cm<sup>2</sup>.

### Semi-conducteurs

On appelle semi-conducteur **un corps qui se comporte tantôt comme un isolant, tantôt comme un conducteur (sous certaines conditions)**. Le silicium ou le germanium sont des semi-conducteurs. Je ne vais pas détailler la physique atomique des semi-conducteurs ; j'irai à l'essentiel mais tout cela est développé dans les ouvrages que j'ai déjà cités.

Pour rendre conducteur un semi-conducteur, on le dope avec des impuretés (Arsenic ou Bore par exemple) en petites quantités. Deux technologies s'affrontent et en fonction de l'élément de dopage, on obtient un semi-conducteur de type N (cas de l'Arsenic) ou de type P (cas du Bore).

### Les transistors bipolaires à jonction

Pour fabriquer un transistor bipolaire à jonction, on utilise une fine section de semi-conducteur d'un type (N ou P) prise en sandwich entre deux sections plus épaisses du type opposé. On obtient ainsi des transistors NPN ou des transistors PNP selon l'empilement des couches comme le montre la figure 5.1.

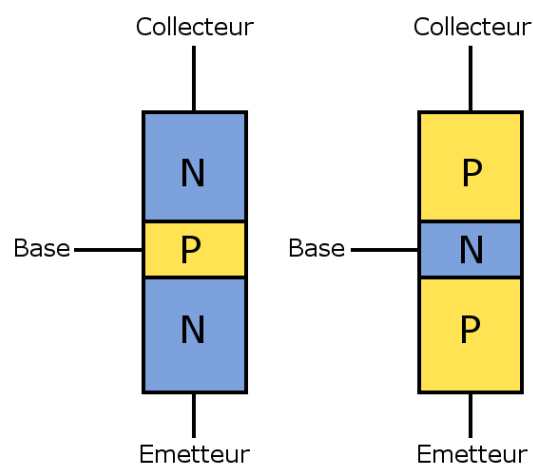


Figure 5. 1

Un transistor a trois électrodes : la couche fine du milieu est reliée à l'électrode appelée « **Base** », les couches épaisses sont reliées respectivement à « l'**Emetteur** » et au « **Collecteur** ». Transistor NPN et transistor PNP ne sont pas interchangeables dans un circuit électronique car ses électrodes ne se branchent pas de la même manière comme nous le verrons.

Un transistor comporte donc deux jonctions entre semi-conducteur de type P et de type N. Le type NPN est parfois désigné « type N » et le type PNP « type P ».

A quoi sert un transistor ? Ce composant a été inventé pour **amplifier des signaux** (transistor en amplification), mais le plus souvent nous l'utiliserons **comme un interrupteur qu'on peut commander à distance** (transistor en commutation).

La figure 5.2 montre le symbole du transistor sur un schéma électronique.

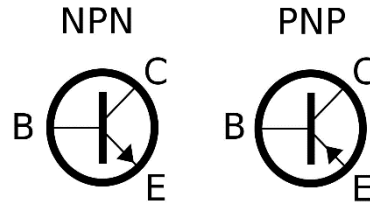


Figure 5. 2

La flèche indique le sens du courant circulant entre émetteur et collecteur ; comme le courant circule du plus vers le moins, on comprend que les transistors NPN et PNP ne sont pas interchangeables (la polarité est inversée). L'émetteur d'un transistor NPN est relié à la masse (ou – de l'alimentation), l'émetteur d'un transistor PNP est relié au + de l'alimentation.

Comment repérer les électrodes sur le composant ? Cela dépend du type de boîtier (dont les appellations sont standardisées) comme le montre la figure 5.3. Parfois le collecteur est le boîtier lui-même. On peut toujours se référer à la datasheet du composant.

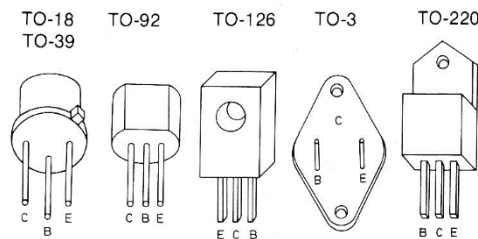


Figure 5. 3

### Principe de fonctionnement

Considérons un transistor NPN ; si on fait circuler un courant très faible (quelques mA au maximum) entre la base et l'émetteur, on constate qu'un courant beaucoup plus fort circule entre le collecteur et l'émetteur, **égal au courant de base multiplié par le gain** (une des caractéristiques du transistor). La figure 5.4 montre l'effet d'amplification.

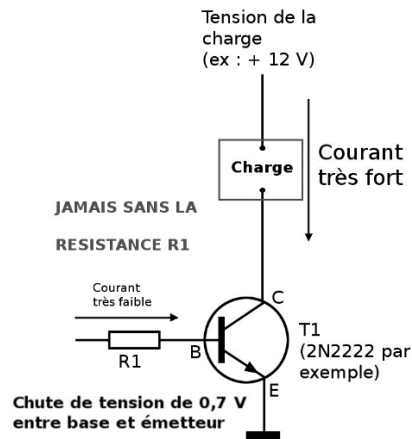


Figure 5. 4

La présence de la résistance R1 limitant le courant de base est **obligatoire** !

Pour un transistor PNP, c'est l'inverse : il faut absorber un courant très faible passant entre émetteur et base pour observer un courant fort s'établissant entre émetteur et collecteur (les sens des courants sont donc inversés).

Si on augmente l'intensité du courant de base (entre base et émetteur), le courant de collecteur augmente d'autant. Ce phénomène a pourtant une limite ; si on continue à augmenter le courant de base, le courant de collecteur atteint une valeur maximale ; **le transistor est saturé**.

#### Le transistor en commutation

Dans nos montages, le transistor est toujours utilisé en commutation (et non en amplification), ce qui signifie qu'on s'arrange pour que le courant collecteur-émetteur soit le plus fort possible (le transistor est saturé, en respectant ses possibilités) ; le transistor est passant, alors qu'il est bloqué si le courant de base est nul. **Le transistor est dans ce cas équivalent à un interrupteur que l'on commande avec le courant de base.**

La figure 5.5 montre un tel montage. La valeur de la résistance R1 doit permettre au transistor d'être saturé lorsqu'on le veut passant, mais pas trop pour qu'il n'y ait pas un courant de collecteur résiduel lorsqu'on veut que le transistor soit bloqué.

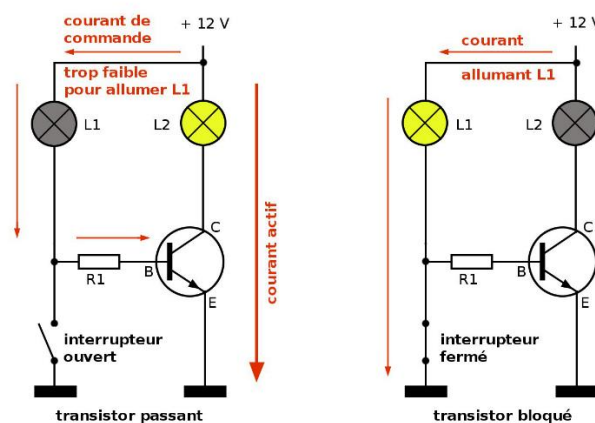


Figure 5. 5

On remarque que, dans le cas du transistor bloqué, le potentiel de la base est le même que celui de l'émetteur (0 V car les deux sont reliés à la masse GND). Pour qu'un courant circule entre base et émetteur, il faut que le potentiel de la base soit supérieur de 0,7 V à celui de l'émetteur car entre base et émetteur, il y a une jonction PN. Si cela vous rappelle les diodes, alors bravo ! Effectivement, les diodes sont construites à partir d'une jonction PN de semi-conducteurs.

Seriez-vous capable de transposer le schéma de la figure 5.5 à un transistor PNP ? Je pense que vous pouvez le faire...

#### Choix d'un transistor

Pour choisir un transistor, il faut vérifier :

- Son type (NPN ou PNP)
- Le courant collecteur  $I_{CE}$  maximal qu'il supporte (il doit être supérieur au courant maximal consommé par la charge)
- La tension collecteur-émetteur  $U_{CE}$  maximale (elle doit être supérieure à la tension d'alimentation utilisée)
- La puissance dissipée maximale (elle doit être supérieure à  $P_{max} = V_{ce(sat)} \times I_{charge}$  où  $V_{ce(sat)}$  est la tension aux bornes du transistor **lorsqu'il est saturé**).  $V_{ce(sat)}$  étant très faible, **un transistor ne dissipe quasiment pas de puissance lorsqu'il est utilisé en commutation**.

Notons que le gain (taux d'amplification) du transistor n'est pas une donnée critique car le transistor est utilisé en commutation.

Le tableau suivant donne les caractéristiques de quelques modèles courants.

Nom	Type	Tension $U_{CE}$ (V)	Courant $I_{CE}$ (A)
2N2222	NPN	40	0,6
BC107	NPN	45	0,1
BC177	PNP	-45	-0,1
TIP120	NPN	60	5
TIP125	PNP	-60	-5
2N3055	NPN	60	15

#### Transistor de puissance

Les trois derniers transistors du tableau sont des **transistors de puissance** ; comme vous le voyez, ils peuvent faire circuler des courants de 5 ou 15 A. Ils sont souvent construits autour du montage Darlington où on trouve deux transistors en cascade, un premier pour amplifier le signal et un deuxième pour lui donner de la puissance. Ce montage est transparent pour nous puisqu'il est encapsulé dans un seul boîtier à trois électrodes qui s'utilisent comme les transistors plus petits. Néanmoins, même si  $V_{ce}$  est faible (tension collecteur-émetteur **en mode passant**), il convient de calculer la puissance dissipée en fonction du courant (qui lui peut être fort) et d'équiper ces transistors de puissance d'un radiateur de refroidissement.

#### Utilisation en modélisme ferroviaire

Sur un réseau miniature, les transistors ont de nombreuses applications. On peut les utiliser pour fabriquer des fonctions logiques (ET, OU, NON, nous en reparlerons plus tard) et les combiner entre elles, pour faire clignoter des LED, pour réaliser des bascules bistables permettant de commander un

signal à l'entrée d'un canton, ou bien encore pour amplifier les signaux trop faibles qu'on récupère sur les sorties d'un microcontrôleur programmable.

Et comme on l'a expliqué, leur principale fonction est de réaliser un interrupteur commandé électriquement (figure 5.4 ou 5.5 qui peuvent servir de schémathèque).

Cela me rappelle un excellent article publié dans la revue « Electronique pratique » sur l'interchangeabilité des composants. Pour l'auteur (M Rateau), il n'y avait que trois catégories de transistors, les petits NPN, les petits PNP et les transistors de puissance, ce que possédait M. Débrouillard alors que M. Vantard essayait d'accumuler toutes les références possibles ! Croyez-moi, j'ai bien souvent vérifié les dires de mon mentor, Monsieur Rateau... Avec un peu d'astuce, on peut remplacer un transistor par un autre qu'on a en stock, dans un montage électronique.

#### À retenir sur les transistors bipolaires à jonction :

- Les semi-conducteurs se comportent tantôt comme des isolants, tantôt comme des conducteurs.
- Il existe deux types de semi-conducteurs selon l'élément de dopage : le type N et le type P.
- Un transistor est constitué d'un empilement de trois couches de semi-conducteurs de types alternés ; on a donc des transistors NPN et des transistors PNP.
- L'émetteur d'un transistor NPN est relié à la masse (ou – de l'alimentation), l'émetteur d'un transistor PNP est relié au + de l'alimentation.
- La disposition des électrodes d'un transistor dépend du type de boîtier ; la datasheet du composant montre comment repérer les électrodes.
- Les transistors peuvent amplifier des courants, mais le plus souvent (surtout en modélisme ferroviaire) on les utilise en commutation comme des interrupteurs que l'on peut commander à distance.
- Un transistor bipolaire se commande par un courant sur sa base.
- Il faut toujours une résistance pour limiter le courant de base d'un transistor.
- Pour choisir un transistor, il faut considérer son type, le courant maximal qu'il peut supporter et la tension maximale utilisable (entre collecteur et émetteur). Le gain n'est intéressant que dans une moindre mesure.
- En régime de commutation, un transistor ne dissipe quasiment pas de puissance.

#### Les transistors à effet de champ

On vient de décrire le fonctionnement du transistor bipolaire ; on l'appelle ainsi car il est constitué de trois couches alternées de semi-conducteurs de type N ou P (d'où les différences NPN et PNP), constituant ainsi deux jonctions P-N. Un courant très faible circulant entre base et émetteur a pour conséquence un courant plus fort circulant entre émetteur et collecteur. Le transistor bipolaire est donc **contrôlé par un courant**.

Le **transistor à effet de champ** (FET pour Field Effect Transistor) est un transistor **commandé par une tension**.

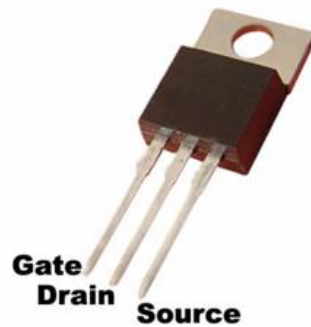


Figure 5. 6

À quoi sert un transistor à effet de champ ? Son utilisation principale en modélisme ferroviaire est de constituer **un interrupteur quasiment parfait contrôlable par une tension**. En effet, par rapport au transistor bipolaire, le FET a une résistance d'entrée très élevée (plusieurs M $\Omega$ ) **donc il ne consomme rien** et sa résistance interne ( $R_{on}$ ) **quand il conduit**, est inférieure à 1  $\Omega$ , **donc il ne dissipe rien**.

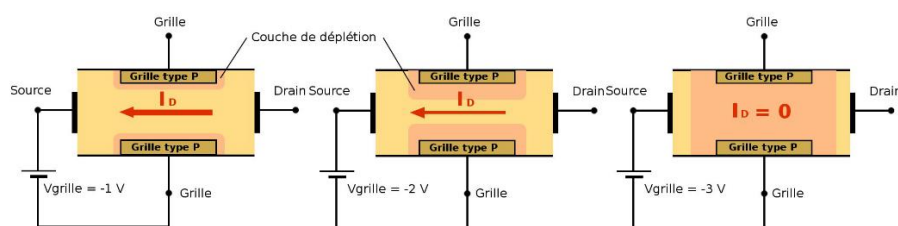
Comme le transistor bipolaire, le FET a trois broches : la **source**, la **grille** (gate en anglais), et le **drain** comme le résume le tableau (voir aussi figure 5.6).

Transistor bipolaire	Transistor à effet de champ
Émetteur (E)	Source (S)
Base (B)	Grille (Gate) (G)
Collecteur (C)	Drain (D)

L'inconvénient majeur des FET est qu'ils sont **extrêmement sensibles aux décharges électrostatiques** et il faut prendre quelques précautions pour les stocker et les manipuler (bracelet antistatique, panne du fer à souder reliée à la terre).

Pourquoi « à effet de champ » ?

Un FET est principalement constitué d'un canal, matériau semi-conducteur de type N ou P, permettant au courant de circuler entre la source et le drain. Une troisième broche, la grille, matériau de type opposé au canal, va créer un champ électrostatique si elle est soumise à une tension, réduisant ainsi l'espace par où le courant peut circuler ; exactement comme si vous écrasiez progressivement (voire complètement) votre tuyau d'arrosage en caoutchouc pour empêcher l'eau de circuler. C'est ce que montre la figure 5.7, la tension sur la grille augmente la zone de déplétion (là où le courant ne peut circuler), rétrécissant la largeur du canal (là où le courant peut circuler). À l'extrême, le canal peut être réduit à zéro et le courant ne circule plus.



Rétrécissement du canal en fonction de la tension grille appliquée

Figure 5. 7

### Plusieurs types de technologie

Il y a deux types de FET : le JFET (Junction Field Effect Transistor) et le IGFET (Insulated Gate Field Effect Transistor) dont le MOSFET fait partie (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). En fonction du type de semi-conducteur formant le canal, on peut avoir des FET canal N ou canal P. Les MOSFET sont encore divisés en deux catégories : à appauvrissement et à enrichissement.

- À appauvrissement (ou déplétion) : une tension grille est nécessaire pour bloquer le transistor qui est **équivalent à un interrupteur normalement fermé**.
- À enrichissement : une tension grille est nécessaire pour enclencher le transistor qui est **équivalent à un interrupteur normalement ouvert**.

En modélisme ferroviaire, c'est le MOSFET à enrichissement (canal N ou P) qui est le plus utilisé puisqu'il est équivalent à un interrupteur ouvert qu'on peut électriquement fermer.

La figure 5.8 montre les symboles des transistors à effet de champ.

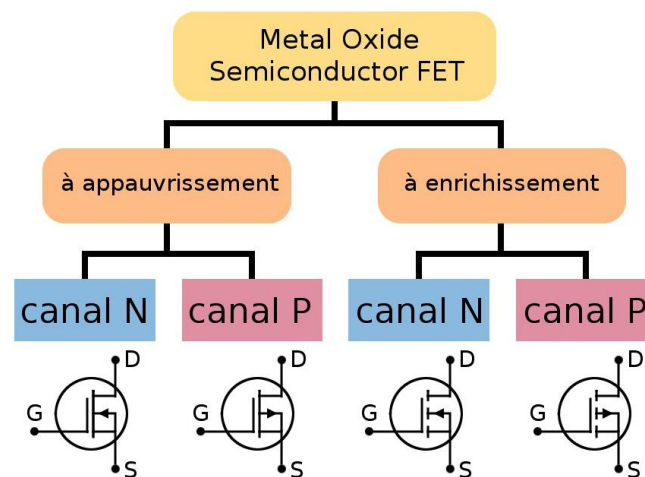


Figure 5. 8

Pour reconnaître les différents types possibles, il faut examiner la barre verticale du symbole. S'il y a 3 électrodes qui s'appuient dessus, c'est un MOS (3 lettres). Si elle est continue, le courant passe (interrupteur normalement fermé : MOS à appauvrissement). Si elle est discontinue, le courant ne passe pas (interrupteur normalement ouvert : MOS à enrichissement). Enfin, si la pointe de la flèche appuie sur la barre verticale, c'est du canal N.

### Utilisation d'un transistor MOSFET comme interrupteur

La figure 5.9 montre un schéma où un **MOSFET canal N** est utilisé pour commander une charge (ampoule électrique, relais, moteur) alimentée en 12 V. Il s'agit d'un MOSFET à enrichissement, équivalent à un interrupteur normalement ouvert. Pour le fermer, il faut une tension sur la grille. Si la tension sur la grille est de 0 V, le transistor est bloqué, l'ampoule éteinte. Si la tension sur la grille est de 5 V, le transistor est déclenché, l'ampoule est allumée. La tension sur la grille doit être inférieure à 15 V pour ne pas détruire le transistor. La tension d'alimentation du montage doit être inférieure à ce que peut supporter le transistor (par exemple 60 V pour un IRFZ44).

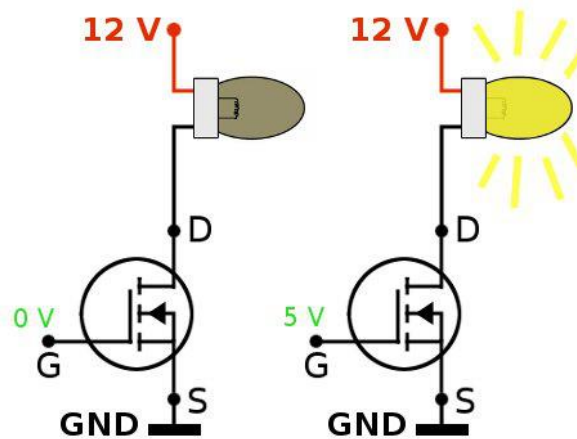


Figure 5. 9

La figure 5.10 montre un interrupteur **MOSFET à canal P** à enrichissement (**attention, la source S est en haut**). Le transistor est passant pour la tension grille à 0 V.

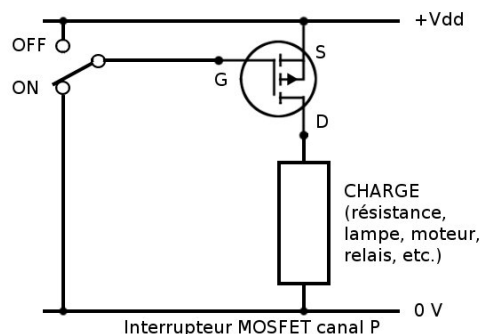


Figure 5. 10

Si le MOSFET a une résistance interne  $R_{on}$  de  $0,1 \Omega$ , et qu'il est traversé par un courant de 1 A, la puissance qu'il dissipe est de  $0,1 \text{ W}$  ( $R \times I \times I$ ). C'est très peu mais pour des courants très forts, on a intérêt à choisir des transistors dont la résistance interne est la plus faible possible (les MOSFET de puissance ont des  $R_{on} < 0,01 \Omega$ ).

À retenir sur les transistors à effet de champ :

- Les transistors à effet de champ constituent des interrupteurs quasiment parfaits.
- Les transistors à effet de champ sont commandés par une tension (sur la grille).
- Les transistors à effet de champ ne consomment rien et ne dissipent rien.
- Les transistors à effet de champ sont sensibles aux décharges électrostatiques.
- Il existe plusieurs types de technologies pour les transistors à effet de champ : en modélisme ferroviaire, on utilise surtout les MOSFET à enrichissement équivalents à un interrupteur ouvert qu'on peut fermer électriquement.
- Comment brancher un MOSFET comme interrupteur.



## Travaux pratiques sur le transistor bipolaire

### Matériel :

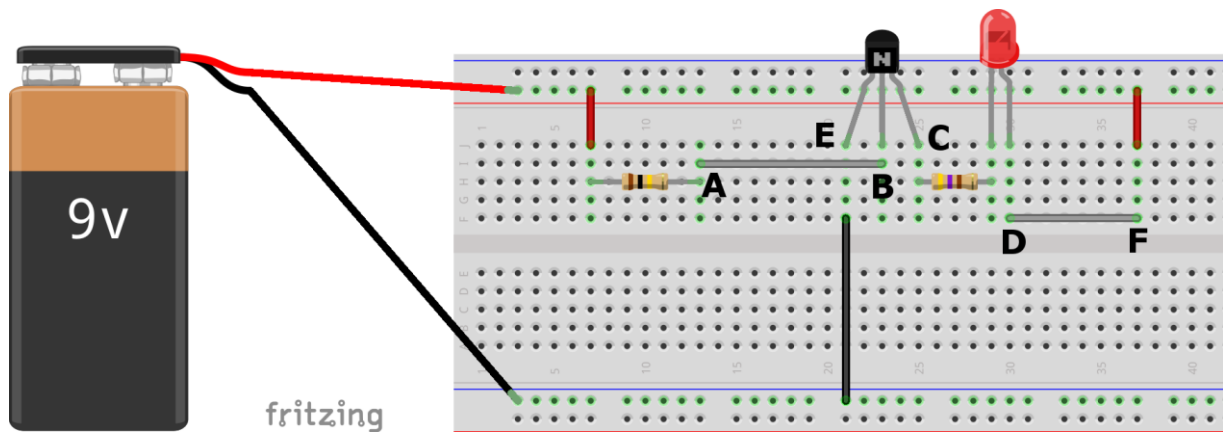
Un transistor NPN (exemple 2N2222, BC107)

Une résistance de  $470\ \Omega$  et une de  $100\ k\Omega$

Une DEL

### Montage :

Réalisez le montage suivant :



Mesurez la tension entre émetteur et base, entre E et B.

Mesurez la tension entre émetteur et collecteur, entre E et C.

Enlevez le fil A-B et mettez le pouce sur A et l'index sur B. La LED s'allume-t-elle encore ?

Enlevez le fil A-B et remplacez le par votre multimètre (en position ampèremètre) : que vaut le courant qui circule dans la base ?

Remettez le fil A-B. Enlevez le fil D-F et remplacez le par votre multimètre (en position ampèremètre) : que vaut le courant qui circule dans la LED ?

Calculez le gain du transistor.

Le transistor est-il en saturation ?