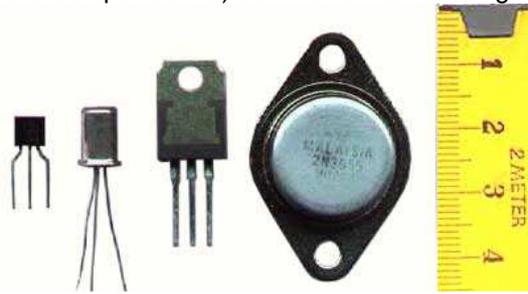


TRANSISTORS bipolaires, MOS et à effet de champ

Deux transistors sont principalement utilisés en électronique : le transistor bipolaire et le transistor MOS. Dans une proportion moindre, on trouvera également des transistors à effet de champ. On rencontrera ces composants dans les circuits intégrés, dont ils sont souvent l'unique constituant (291 millions de transistors MOS de 65 nm dans le processeur « Core 2 duo »), mais également sous forme dite « discrètes » (un transistor par boîtier) comme le montre la figure suivante :



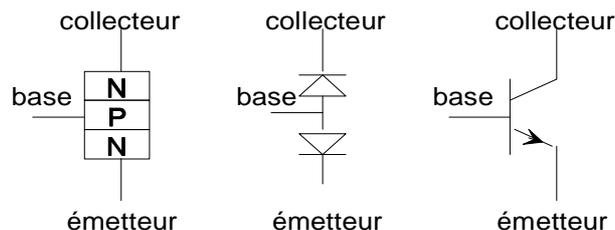
La taille dépend de la puissance que peut dissiper le composant, avec de gauche à droite un boîtier TO92, TO3, TO220 (MOS et bipolaire uniquement) et TO3 (bipolaire uniquement)

1. Transistor bipolaire

C'est le premier apparu. Il existe deux types de transistors bipolaires : type NPN et type PNP. Nous ne nous intéresserons dans un premier temps qu'au transistor NPN.

1.1 Structure

Un transistor bipolaire est un composant fabriqué à partir d'un monocristal de semi-conducteur composé de deux régions dopées N séparées par une région dopée P. Dans une première approche on peut donc voir ce composant comme deux diodes montées en opposition (attention deux diodes ne pourront jamais faire un transistor, les jonctions PN devant se trouver dans le même cristal) Le transistor se symbolise comme l'indique la figure ci-dessous.



Le terme bipolaire est dû au fait que le passage du courant électrique dans le transistor vient de la circulation de charges positives et de charges négatives (contrairement à un matériau conducteur électrique, comme le cuivre, où seuls le déplacement des électrons crée le courant).

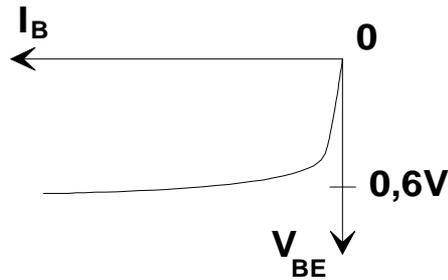
1.2 Premières caractéristiques

Les trois pattes du transistor peuvent être vues comme deux circuits :

un circuit d'entrée base émetteur

un circuit de sortie collecteur émetteur

Si on regarde la structure du transistor, on s'aperçoit que le circuit base émetteur est en fait une diode, qui présente donc la même caractéristique que n'importe quelle diode :

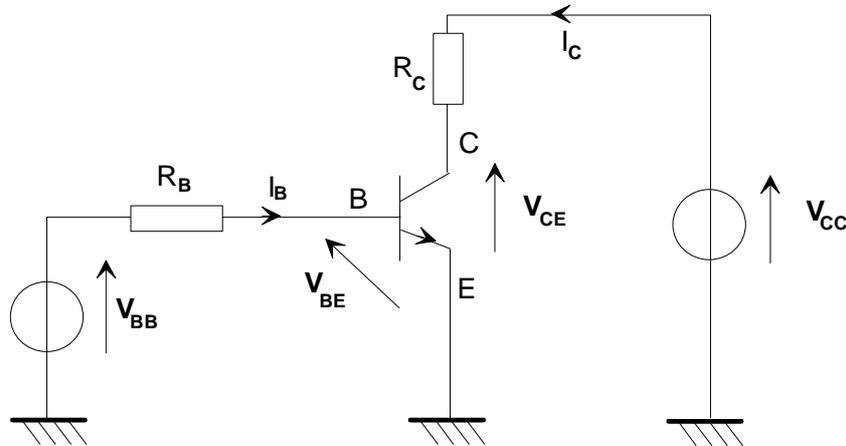


Cette courbe est habituellement entourée des autres caractéristiques du transistor, ce qui explique l'orientation choisie pour les axes.

A première vue, aucun courant ne peut circuler dans le circuit collecteur-émetteur (deux diodes en opposition).

1.3 Effet transistor

Considérons le schéma ci-dessous



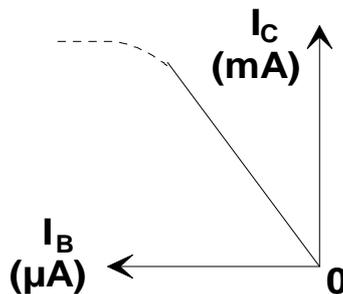
Si on ouvre le circuit de base, le courant I_B est nul, il n'y a pas de courant collecteur I_C .

Si on ferme ce circuit et on augmente I_B (en augmentant V_{BB} ou en diminuant R_B) on s'aperçoit qu'il circule un courant I_C fonction de I_B dans un rapport constant (environ 100 à 300 suivant les types de transistors) :

$$I_C = \beta I_B$$

β étant le gain du transistor

C'est ce qu'on appelle l'effet transistor dont l'explication relève de la physique du semi-conducteur, ce qui n'est pas notre propos ici.



Si l'alimentation V_{CC} est constante, la tension V_{CE} décroît lorsque I_C augmente, car la loi des mailles nous donne :

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$

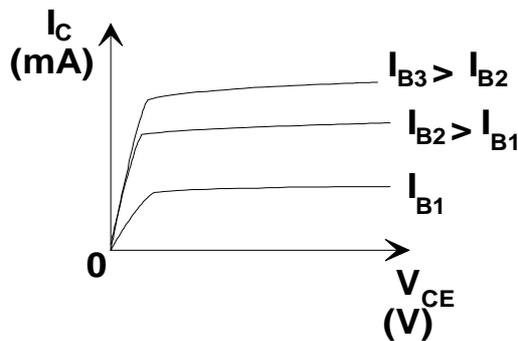
Le transistor se comporte en quelque sorte entre les points C et E comme une résistance qui s'ajusterait automatiquement pour faire passer un courant I_C vérifiant toujours la relation $I_C = \beta I_B$, jusqu'à ce que cela ne soit plus possible.

En effet, lorsqu'un courant I_C circule dans le transistor, la tension V_{CE} ne peut descendre en dessous d'une certaine valeur V_{CEsat} , environ 0,2 V pour un transistor de faible puissance. Aussi, si on continue à augmenter I_B , on atteint une valeur maximale de I_C :

$$I_{Cmax} = \frac{V_{CC} - 0,2}{R_C}$$

On dit alors que le transistor est saturé. Cette saturation que l'on peut voir en pointillé sur la courbe est due aux limitations du circuit extérieur, ce qui explique que sur les caractéristiques données par le constructeur cette partie de la courbe n'existe pas.

On a l'habitude de représenter l'invariance du courant de collecteur (pour un courant de base fixé) en fonction de la tension collecteur émetteur par la caractéristique ci-après.



On peut noter sur cette caractéristique :

- une zone où les courbes sont (presque) horizontale (on note tout de même une légère dépendance côté collecteur entre courant et tension), le transistor fonctionnant alors en régime linéaire ($I_C = \beta I_B$) ;
- une zone où les courbes sont pentues, la tension V_{CE} ayant atteint sa limite minimale, notée V_{CESAT} , Pour assurer encore la relation précédente, il faudrait augmenter V_{CC} pour augmenter V_{CE} . Le transistor est alors saturé et on a $I_C \leq \beta I_B$

Les trois caractéristiques que nous venons de voir sont habituellement représentées ensemble sur la même figure.

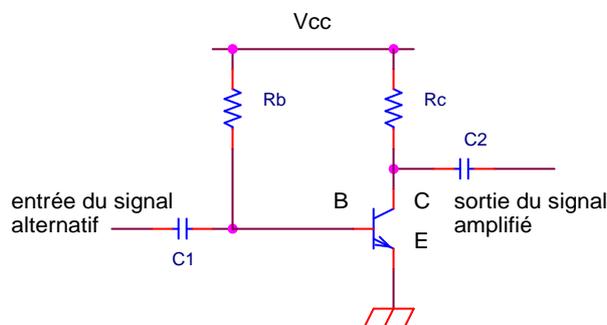
1.4 Applications

On utilise le transistor dans deux régimes de fonctionnement :

1.4.1 Régime linéaire

On se sert de la propriété $I_C = \beta I_B$ pour amplifier des signaux.

Un exemple théorique de schéma est donné par la figure ci-dessous, pour un amplificateur pour petits signaux alternatifs :

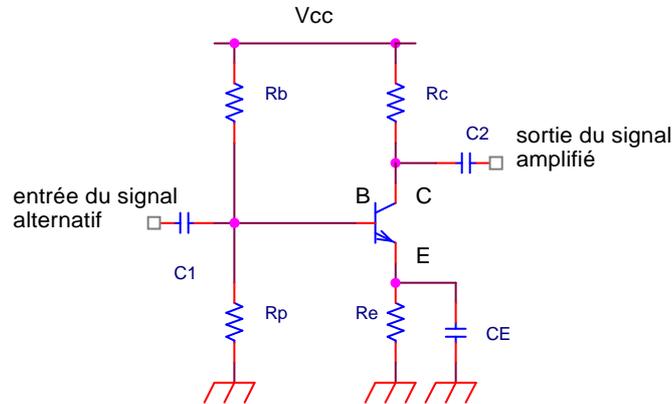


Le transistor étant un élément non linéaire (voir les caractéristiques), il est nécessaire de le polariser dans un point de fonctionnement autour duquel les caractéristiques seront des droites. C'est le rôle de R_b et R_c .

Le signal à amplifier est ensuite appliqué par l'intermédiaire d'un condensateur C_1 qui évite que la polarisation ne perturbe le générateur d'attaque (l'impédance du condensateur est nulle en HF et infinie en BF). Le condensateur C_2 joue le même rôle en sortie.

Le schéma précédent ne permet pas une stabilisation thermique du montage : les variations de température et les dispersions de caractéristique entre les différents échantillons d'une même référence de transistor, conduiraient à un emballement thermique et à la destruction du transistor (la démonstration de cette caractéristique sort du propos de cet exposé).

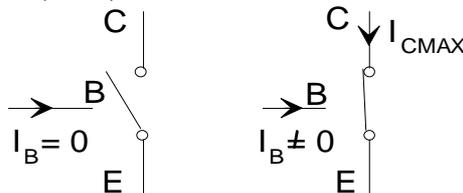
Aussi utilise-t-on généralement le montage suivant pour réaliser un amplificateur petits signaux à transistor bipolaire :



1.4.2 Régime de commutation

Le transistor est alors considéré comme un interrupteur entre les bornes C et E, commandé par le courant de base.

Lorsque le courant de base est nul, l'interrupteur est ouvert, lorsque I_B a une valeur suffisante pour saturer le transistor, celui-ci peut être vu côté collecteur-émetteur comme un interrupteur fermé avec une tension V_{CESAT} presque nulle (0,2 V) à ces bornes.



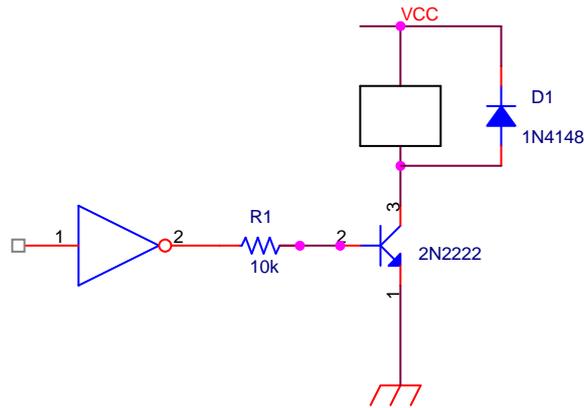
Ce mode de fonctionnement permet de commander côté collecteur une puissance plus importante que celle qui est envoyée côté base.

Le courant de collecteur est fixé par la charge que l'on souhaite alimenter et on détermine le courant de base pour vérifier la relation : $I_C \leq \beta I_B$.

Un courant de base grand conduira à une bonne saturation et une tension V_{CE} faible (le transistor ressemblera alors à un interrupteur fermé parfait). Cependant l'ouverture de cet interrupteur (le blocage du transistor) sera lente.

Un compromis est donc à trouver entre vitesse et saturation.

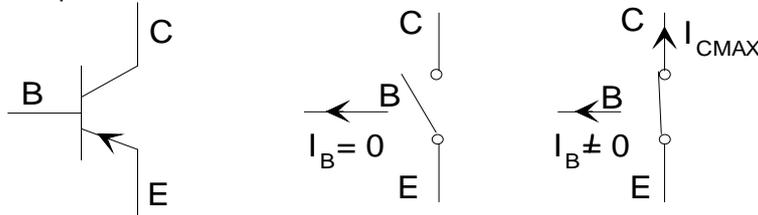
Le schéma ci-après propose un exemple d'alimentation d'un relais par une porte logique : celle-ci est incapable de fournir le courant nécessaire à la bobine du relais, le courant de sortie de la porte va donc, à travers la résistance R1, attaquer la base du transistor, provoquant la saturation de ce dernier (si R1 est suffisamment faible) et l'alimentation du relais.



La diode D1, dite diode de roue libre, permet l'évacuation de l'énergie stockée dans la bobine du relais, lors du blocage du transistor, en assurant la continuité du courant lors de cette phase.

1.5 Transistor PNP

Il s'agit d'un transistor ayant le même fonctionnement que le NPN, mais avec des courants et tensions de sens opposé au NPN. La figure ci-après donne le symbole et le mode de fonctionnement en commutation de ce composant.



2 Transistor MOS (Métal Oxyde Semiconductor)

Mis au point beaucoup plus tard le transistor MOS est fabriqué également à partir d'un monocristal de semi-conducteur, mais avec des dopages de densité et de répartitions différentes. Il existe deux types de transistor MOS : canal N et canal P.

2.1 Symboles

De nombreux symboles ont été utilisés pour représenter le transistor. Pour une meilleure communication il est conseillé de n'utiliser que ceux présentés ici.



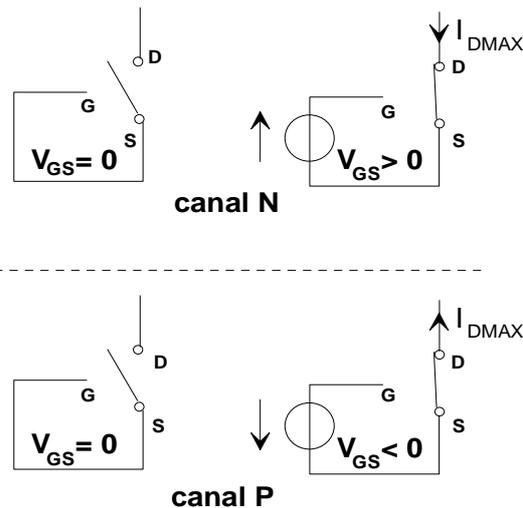
2.2 Fonctionnement

La principale différence avec le transistor bipolaire se situe au niveau du circuit de commande (grille source) : celui-ci présente une impédance d'entrée quasiment infinie. Ce transistor est donc commandé en tension par V_{GS} contrairement au bipolaire qui l'était en courant par le courant de base. Le principal avantage du transistor MOS est donc de pouvoir maintenir un état donné sans avoir à fournir de puissance (courant d'entrée nul).

Ce composant est surtout utilisé en commutation que ce soit pour l'électronique de puissance ou pour la réalisation de circuit numérique.

Le transistor MOS à canal N se commande avec une tension grille source positive ($V_{GS} > 0$) qui provoque la circulation d'un courant dans le sens drain source. ($I_D > 0$) Le transistor MOS à canal P se commande avec une tension V_{GS} négative et le courant circule de la source vers le drain : I_D négatif. Lorsque la tension V_{GS} est nulle le courant de drain l'est aussi.

En commutation, on peut donc voir ces transistors de la manière suivante :



On notera que la flèche sur le symbole de chaque transistor est de sens opposée à la circulation du courant (celle-ci représente en fait une diode interne inhérente à la structure du transistor).

Remarque : le transistor MOS que nous venons de voir est un transistor dit à enrichissement. Il existe un transistor MOS dit à appauvrissement. Il est beaucoup moins utilisé. Basé sur le même principe de fonctionnement, il existe également un transistor dit "Transistor à Effet de Champ à jonction" ou T.E.C. soit J.F.E.T. en anglais (Jonction Field Effect Transistor). Ce composant est essentiellement utilisé en analogique comme porte commandée (transmission ou non de l'information suivant la commande) ou dans les premiers étages des amplificateurs où son faible niveau de bruit est très apprécié.

3 Transistor à effet de champ (TEC ou FET)

On trouvera aussi la dénomination anglo-saxonne FET (Field Effect Transistor) ou encore J FET (Jonction FET).

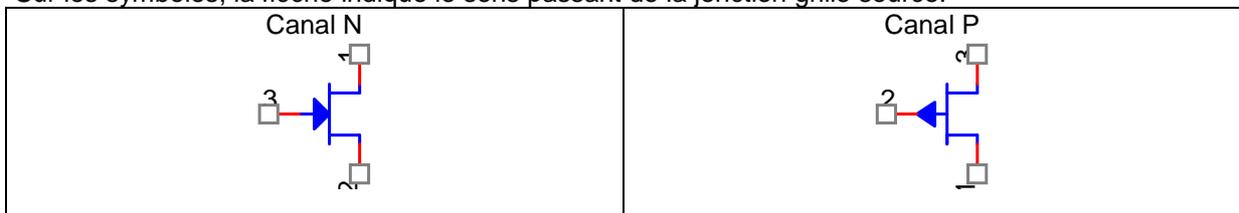
A l'instar du transistor MOS, ce transistor est composé de trois électrodes :

- - une grille G de commande (l'équivalent de la base d'un transistor bipolaire) ;
- - deux électrodes de « puissance » dites drain D et source S (respectivement l'équivalent sur le transistor bipolaire du collecteur et de l'émetteur).

Comme pour le transistor bipolaire, le circuit de commande grille source est composé d'une diode, mais celle-ci sera polarisée à l'état bloqué. Ce transistor n'absorbe donc pas (ou peu) de courant du côté de la commande.

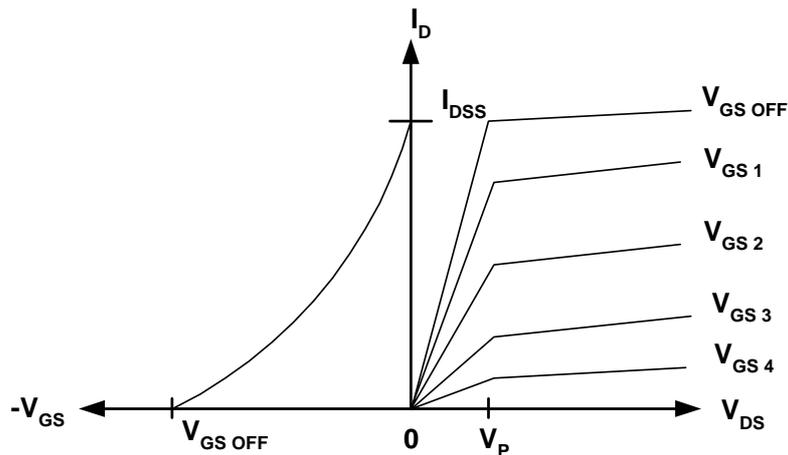
Deux types de transistors existent, le canal N et le canal P, sachant que comme pour les transistors bipolaires et MOS, on passe de l'un à l'autre en inversant le signe des grandeurs.

Sur les symboles, la flèche indique le sens passant de la jonction grille source.



L'étude se limitera au canal N, c'est le plus utilisé.

3.1 Caractéristique d'un TEC canal N



La tension V_{GS} est négative, et pour une valeur inférieure à $V_{GS OFF}$ (environ -3 V) le courant de drain est nul.

Pour une tension V_{GS} nulle le courant de drain est maximal et vaut I_{DSS} (classiquement 20 mA).

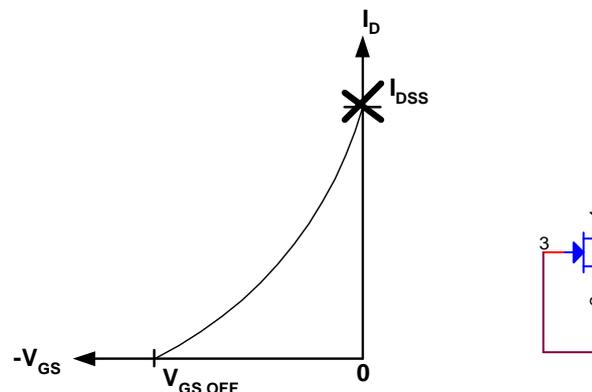
La caractéristique I_D en fonction de V_{DS} dépend de V_{GS} . Pour une faible valeur de V_{DS} , le comportement est résistif (avec possibilité de fonctionner avec des valeurs négatives –non représentées sur la courbe). Passée la valeur $V_{DS}=V_P$ dite de pincement (classiquement 3 V), le courant reste pratiquement constant (zone d'utilisation en amplification).

3.2 Applications

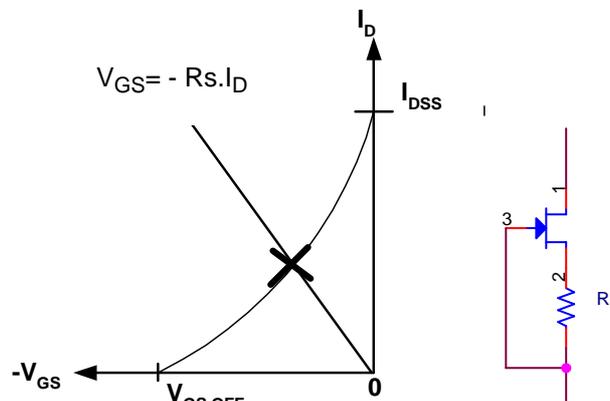
On trouvera classiquement 4 utilisations.

3.2.1 Générateur de courant

Si la tension V_{GS} est nulle, le courant I_{DSS} circule dans le drain.



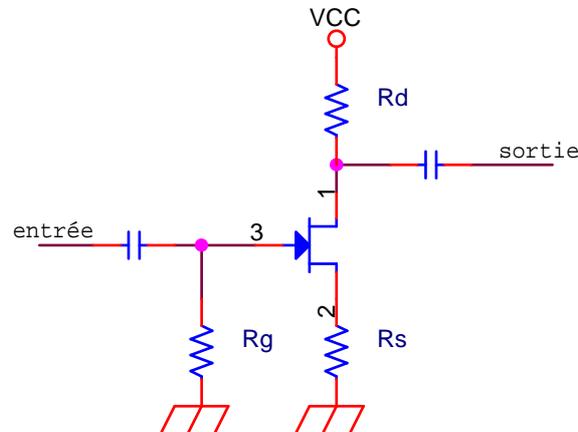
Une résistance en série avec la source diminue le courant de drain en augmentant la valeur absolue de la tension grille source. Le point de fonctionnement se situe alors sur l'intersection de la caractéristique de la résistance et du transistor.



3.2.2 Amplificateur

Pour polariser la grille négativement on utilise une résistance de source (voir le montage en générateur de courant) ; la résistance R_g de grille évite de court-circuiter le signal d'entrée.

Le montage peut être utilisé en source commune (figure suivante), grille commune ou drain commun.



Par rapport à un transistor bipolaire monté en amplificateur, on obtient les caractéristiques suivantes :
forte impédance d'entrée (jonction GS en inverse) ;
faible bruit (utilisation pour les premiers étages d'une chaîne d'amplification) ;
mauvaise linéarité (à éviter dans les derniers étages d'une chaîne d'amplification).

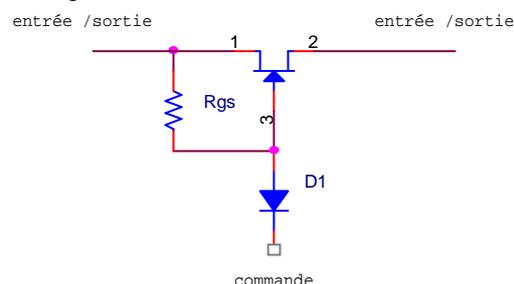
3.2.3 Résistance commandée

Contrairement au transistor bipolaire dont la tension V_{CE} se présente, lorsqu'elle est faible, comme une force contre-électromotrice (pratiquement indépendante du courant), à faible niveau, lorsque V_{DS} est inférieure à la valeur de pincement, le circuit drain source a un comportement résistif, dont la valeur peut être commandée par V_{GS} .

On trouvera donc quelques applications comme résistance commandée, par exemple pour contrôler la fréquence de coupure d'un filtre (méthode aujourd'hui obsolète) ou contrôler l'amplitude de la tension de sortie d'un oscillateur (qui dépend du gain d'un amplificateur donc généralement d'une résistance).

3.2.4 Commutateur analogique

Lorsque la tension V_{GS} est nulle, la résistance du circuit drain source est minimale et notée $R_{DS\ ON}$. Cette valeur étant faible (ordre de grandeur $80\ \Omega$), le transistor est parfois utilisé comme commutateur analogique, comme dans le montage suivant.



Lorsque la tension de commande est positive (supérieure au maximum de l'entrée), la diode est bloquée, la tension V_{GS} est nulle, la porte est passante.

Lorsque la tension de commande est suffisamment négative pour rendre la diode passante et imposer une tension V_{GS} inférieure à $V_{GS\ OFF}$, la porte est bloquée, le signal ne passe pas.