

# LE TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP

## 8.1 PRÉSENTATION

Les transistors à effet de champ (FET pour Field Effect Transistor) ont un fonctionnement totalement différent des transistors bipolaires.

Néanmoins, ils possèdent eux aussi trois régimes de fonctionnement : bloqué, saturé ou passant.

Ils font partie d'une famille plus grande que les transistors bipolaires (voir classification).

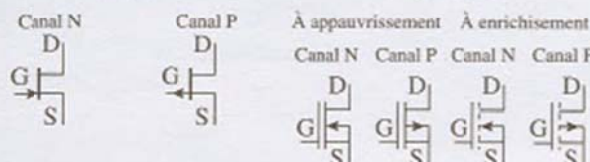
Ils possèdent tous 3 électrodes : source ; drain ; grille.

## 8.2 CLASSIFICATION

Transistor à effet de champ

J-FET

MOS-FET



## 8.3 PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

La commande de ces transistors (côté grille) se fait par la tension appliquée sur la grille. L'avantage est que cette entrée ne consomme pas de courant (résistance d'entrée importante).

Le circuit commandé (circuit comprenant la jonction drain-source), présente deux zones de fonctionnement : une où la jonction DS se comporte comme une résistance variable dépendant de la valeur de la tension  $V_{GS}$ , et une zone où la valeur du courant traversant la jonction DS ( $I_D$ ) ne dépend que de la tension  $V_{GS}$ .

$V_{DS}$  et  $I_D$  sont positifs pour tous les transistors FET type canal N.

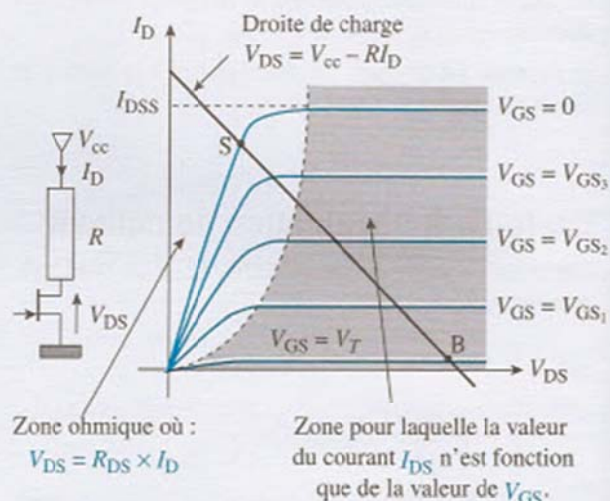
$V_{DS}$  et  $I_D$  sont négatifs pour tous les transistors FET type canal P.

### ■ Circuit commandé : caractéristique $I_D = f(V_{DS})$

Nous allons d'abord nous intéresser au circuit commandé (côté jonction DS), dont le réseau de caractéristique  $I_D = f(V_{DS})$  est commun à tous les transistors FET (au signe près selon canal N ou P).

Raisonnons sur la caractéristique d'un transistor J-FET canal N, tracée avec un montage classique.

Cette caractéristique présente deux zones distinctes :



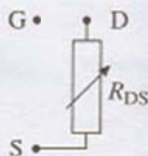
Tous les transistors FET type canal N présentent cette même forme de réseau de caractéristiques  $I_D = f(V_{DS})$ . Chaque caractéristique de ce réseau correspond à une valeur de la tension de commande  $V_{GS}$ .

### Droite de charge

L'équation de cette droite est trouvée par la loi de la maille du circuit commandé. Elle permet de connaître tous les points  $[V_{DS}; I_D]$  possibles de fonctionnement. Le point de fonctionnement du circuit est l'intersection de la droite de charge et de la caractéristique  $I_D = f(V_{DS})$  correspondant à la valeur de  $V_{GS}$  appliquée à la commande.

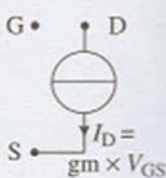
### Zone ohmique

La jonction DS dans cette zone est une résistance ( $R_{DS}$ ), dont la valeur est fonction de la tension de commande  $V_{GS}$ . Ce schéma est valable pour  $V_{DS}$  faible.



### Zone $I_D = g_m \times V_{GS}$

La caractéristique  $I_D = f(V_{DS})$  est horizontale. La jonction DS se comporte comme une source de courant ( $I_D$ ) commandée par une tension ( $V_{GS}$ ) :  $I_D = g_m \times V_{GS}$ .  $g_m$  est la transconductance du transistor en Siemens ( $\Omega^{-1}$ ).



### Transistor bloqué

Un transistor FET est dit bloqué quand son circuit commandé ne laisse pas passer le courant  $I_D$  (point B).

$V_{GS} = V_T$  est la valeur caractéristique de  $V_{GS}$  (appelée tension de pincement) qui permet de bloquer le transistor.

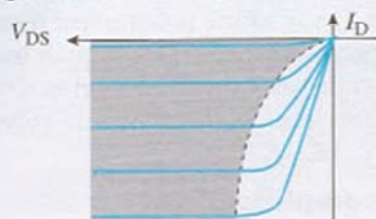
### Transistor saturé

Au point S : le courant  $I_D$  ne peut plus augmenter, même si la tension  $V_{DS}$  l'y incite.

→ Pour les transistors FET canal P dont la polarisation



est négative, la caractéristique  $I_D = f(V_{DS})$  change de signe :

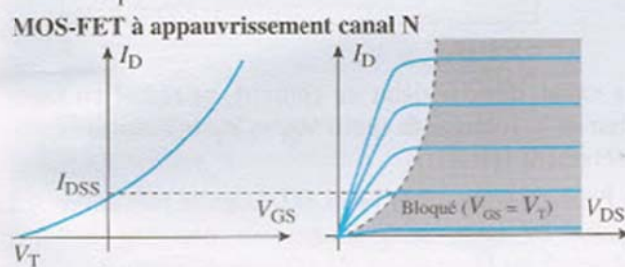
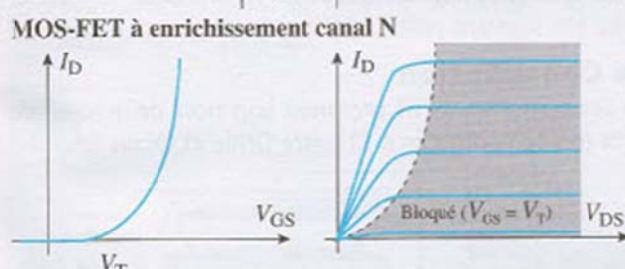
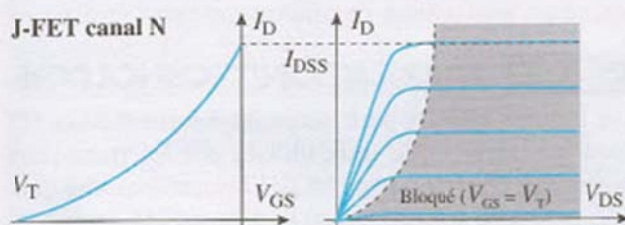


## ■ Côté commande : caractéristique $I_D = f(V_{GS})$

Cette caractéristique présente une forme différente selon qu'il s'agit d'un transistor J-FET, d'un MOS-FET à enrichissement ou d'un MOS-FET à appauvrissement.

Afin de comprendre la commande de tous les transistors FET, il nous faut présenter 3 caractéristiques  $I_D = f(V_{GS})$  :

- celle des transistors J-FET ;
- celle des transistors MOS-FET à enrichissement ;
- celle des transistors MOS-FET à appauvrissement.



### Commande de blocage des transistors FET

Le point commun de tous les transistors FET est la tension dite de pincement, notée  $V_T$ . Si  $V_{GS} < V_T$ , alors le transistor est bloqué ( $I_D = 0$ ).  $V_T$  est une donnée constructeur.

### Commande du transistor en linéaire

Dans ce régime de fonctionnement, le courant  $I_D$  est fonction de la tension de la commande  $V_{GS}$ . Selon la valeur de  $V_{DS}$  (dépendant de la droite de charge), le transistor se trouve soit en zone ohmique, soit en zone de pincement.

### Commande de saturation

- Pour un transistor J-FET canal N, le régime de saturation est valable pour  $V_{GS} = 0$ . Le courant  $I_D$  ne peut alors pas dépasser la valeur  $I_{DSS}$ .

• Pour les transistors MOS-FET, le régime de saturation est atteint quand la tension de commande  $V_{GS}$  devient supérieure à  $V_T + g_m \times I_D$ .

→ Afin de raisonner sur des transistors FET types canal P, il suffit de raisonner avec des grandeurs négatives.

→  $I_{DSS}$  n'a pas la même signification pour un transistor J-FET ou un transistor MOS-FET.

## 8.4 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

### ■ Paramètres indispensables en régime de commutation

$V_T$  : c'est la valeur particulière de la tension  $V_{GS}$  qui rend le transistor bloqué. Ce paramètre peut être noté  $V_{GS_{off}}$  ou encore  $V_{GS_{th}}$ . Les constructeurs donnent une plage de valeurs. Pour le transistor J-FET MPF4391 :  $4 < V_T < 10$  V.

$I_{GSS}$  : c'est le courant d'entrée sur la grille des transistors FET dans le cas où  $V_{GS} = 0$ . Ce courant est extrêmement faible (nA ou pA), expliquant la faible puissance consommée.

$R_{DS_{ON}}$  : c'est la valeur minimale pouvant être prise par la résistance équivalente entre drain et source. Quand le transistor est saturé, la jonction DS est équivalente à une résistance de valeur  $R_{DS_{ON}}$ . Si on veut que le transistor se comporte comme un interrupteur parfait, il faut que la valeur de  $R_{DS_{ON}}$  soit la plus faible possible. Elle fixera aussi la perte de puissance ( $P = V_{DS} \times I_{DS} = R_{DS_{ON}} \times I_{DS}^2$ ). Pour le J-FET canal N de référence PMBF4393,  $R_{DS_{ON}} = 100 \Omega$ , et  $30 \Omega$  pour la référence MPF4391. Pour un transistor MOS de puissance,  $R_{DS_{ON}}$  est plus faible ( $0,006 \Omega$  à  $I_D = 200$  A, pour un type TSD 200 N05) afin d'éviter une température trop importante. Pour connaître la valeur de  $R_{DS}$  dans les autres conditions, on utilise des formules approchées donnant  $R_{DS}$  en fonction de  $V_{GS}$ .

$I_{DSS}$  : comme nous l'avons vu sur les différentes caractéristiques,  $I_{DSS}$  est la valeur prise par  $I_D$  lorsque  $V_{GS} = 0$ .

Le paramètre  $I_{DSS}$  n'aura donc pas la même définition selon le type de transistor :  $I_{DSS}$  sera la valeur maximale de  $I_D$  pour un transistor J-FET ou la valeur minimale pour un MOS-FET à enrichissement. Pour le J-FET de type MPF4391,  $I_{DSS} = 60$  mA minimum.

$V_{DS_{ON}}$  : les constructeurs précisent parfois cette valeur. C'est la valeur de la tension entre drain et source lorsque le transistor est saturé. Il faut tenir compte des conditions particulières de mesure.

### ■ Les autres paramètres utiles

$g_m$  : paramètre noté souvent  $Y_{21}$  ou  $Y_{fs}$  dans les documentations. C'est la transconductance du transistor en régime linéaire :  $I_D = g_m \times V_{GS}$ .  $g_m$  s'exprime en Siemens : S ( $\Omega^{-1}$ ). C'est l'équivalent du  $\beta$  du transistor bipolaire, car c'est le paramètre qui fait la liaison entre le circuit de commande et le circuit commandé en régime linéaire. Pour un J-FET canal N de référence BFW11,  $Y_{fs} = 3$  mS.



## Les maximums à ne pas dépasser

Les autres caractéristiques sont les valeurs maximales des paramètres pouvant détruire le transistor en cas de dépassement ( $V_{DS_{max}}$ ,  $V_{GS_{max}}$  et  $I_{D_{max}}$ ). La valeur de  $V_{GS}$  à ne pas dépasser, notée  $V_{GSBR}$  (pour breakdown) vaut 30 V pour le FET MPF4391. On n'oublie pas non plus de vérifier la puissance du circuit commandé :  $P = V_{GS} \cdot I_D$ . Pour les transistors FET de commutation basse puissance, la puissance maximale est de quelques centaines de mW. Pour les transistors FET de puissance, elle peut atteindre plusieurs centaines de watts.

## Les paramètres temporels

Citons simplement les temps de passage de l'état bloqué à l'état saturé et inversement, respectivement  $t_{ON}$  et  $t_{OFF}$ . Ces temps limiteront la fréquence de commutation des transistors. Pour un type J177 (J-FET),  $t_{ON} = t_{OFF} = 45$  ns.

## Caractéristiques du J-FET, canal N, MPF4391

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (TA = 25°C)				
Characteristics	Symbol	Min	Max	Unit
<b>OFF CHARACTERISTICS</b>				
Gate Source Breakdown Voltage ( $I_G = 1 \mu A$ , $V_{DS} = 0$ )	$V_{(BR)}$	30		Vdc
Gate Source Voltage ( $V_{DS} = 15$ Vdc, $I_D = 10$ nAdc)	$V_{GSth}$	4	10	Vdc
Gate reverse current ( $V_{GS} = 0$ Vdc, $V_{DS} = 0$ Vdc)	$I_{GSS}$	—	1	NAdc
Drain cutoff current ( $V_{DS} = 15$ Vdc, $V_{GS} = 12$ Vdc)	$I_{Doff}$	—	1	NAdc
<b>ON CHARACTERISTICS</b>				
Zero-Gate Voltage Drain Current ( $V_{DS} = 15$ Vdc, $V_{GS} = 0$ )	$I_{DSS}$	6	130	MAdc
Drain Source ON voltage ( $I_D = 12$ mAdc, $V_{GS} = 0$ )	$V_{DSon}$	—	0.4	Vdc
Drain Source ON voltage ( $I_D = 1$ mAdc, $V_{GS} = 0$ )	$R_{DSon}$	—	30	Ohms

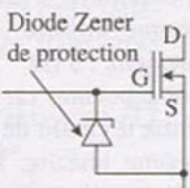
## 8.5 EMPLOI DES TRANSISTORS FET

### ■ Avantages

- Par rapport à leurs cousins bipolaires (NPN ou PNP), ces transistors sont peu gourmands en courant sur le circuit de commande ( $I_{grille}$  de quelques nA seulement). Donc, la puissance consommée est très faible.
- L'intégration des MOS est relativement facile à réaliser.

### ■ Inconvénients

- En commutation, les transistors FET sont lents, ce qui limite les fréquences de commutation.
- Les transistors MOS-FET sont fragiles. Ils sont facilement destructibles par des décharges électrostatiques (DES) ou des tensions inverses entre grille et source. Cette remarque explique la nécessité d'un composant supplémentaire de protection.



## ■ Utilisation en interrupteur

En commutation, le transistor est soit bloqué (interrupteur ouvert entre D et S) soit saturé (interrupteur fermé entre D et S). La commutation est commandée par la tension  $V_{GS}$ . Les propriétés de basse consommation et d'intégration sont appréciées pour la conception de portes logiques (famille type C, HC, HCT...).

## ■ Utilisation en amplification

Nous étudierons, dans le chapitre suivant, les amplificateurs linéaires intégrés. La résistance d'entrée de ces derniers doit être la plus faible possible pour un fonctionnement correct. Certains utilisent donc les transistors FET qui remplissent parfaitement cette condition.

## ■ Utilisation en résistance variable

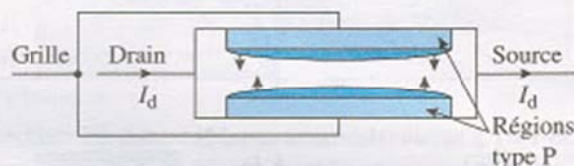
Comme nous l'avons déjà vu, la jonction DS peut se comporter comme une résistance de valeur réglable par la tension de commande  $V_{GS}$ . Cette propriété est fortement intéressante pour la conception d'amplificateur à gain commandé, de filtre à fréquence de coupure variable ou tout autre système nécessitant le réglage d'un paramètre résistif par une tension de commande.

## 8.6 FABRICATION/TECHNOLOGIE

Les boîtiers utilisés pour accueillir les transistors FET sont les mêmes que ceux utilisés par les transistors bipolaires. Les transistors MOSFET possèdent une quatrième broche appelée Substrat. Néanmoins, cette broche est souvent reliée à la source par construction.

### ■ Constitution

- Les transistor J-FET prennent leur nom de la Jonction PN (ou NP pour canal P) entre Grille et Drain Source.



Le canal, donc le débit de courant, se réduit en fonction de la commande (pour  $V_{GS} = V_T$ , le canal est complètement fermé).

- Pour les transistors MOS FET, la grille Métallique est isolée du canal Semi-conducteur non pas par une région P ou N, mais par de l'Oxyde de silicium.

## NOTIONS IMPORTANTES

- Savoir nommer et reconnaître les différents types de transistor FET et les signes des paramètres  $V_{DS}$ ,  $V_{GS}$ ,  $I_D$ .
- La relation  $I_D = g_m \times V_{GS}$  valable uniquement en linéaire.
- Savoir définir et déterminer la saturation et le blocage d'un transistor FET.
- La définition de  $V_T$  et  $R_{DS}$ .
- Côté G-S, la résistance d'entrée est importante (pas de consommation de courant sur la commande).
- La forme du réseau de caractéristique  $I_D = f(V_{GS})$ , et les deux zones de fonctionnement.