

Chapitre 1

Transistors à effet de champ

1. Introduction

Les transistors unipolaires ou transistors à effet de champ TEC (ou FET en anglais pour Field Effect Transistor) sont basés sur la modulation par un champ électrique transversal du courant qui traverse un semi-conducteur.

Ils existent sous deux formes différentes.

- Le transistor TEC à jonction ou le J-FET pour *Junction –FET*.
- Le transistor TEC à grille isolée ou MOS-FET pour acronyme anglais de *Metal Oxide Semi-conducteur Field Effect Transistor*.

Par comparaison aux transistors bipolaires, les TEC présentent :

Les avantages suivants,

- Leur fabrication est plus simple et ils occupent moins de place sur un circuit intégré.
- Leur résistance d'entrée est très grande (plusieurs dizaine de M ohms).
- Leur bruit est plus faible.

Les inconvénients suivants,

- Performances moins bonnes aux fréquences élevées c'est-à-dire Gain x bande passante moins bon.

Les inconvénients suivants,

- Performances moins bonnes aux fréquences élevées c'est-à-dire Gain x bande passante moins bon.

1.2 Le TEC à Jonction ou JFET

Pour fabriquer un transistor J-FET on utilise un semi-conducteur, ce dernier peut être de type N ou P *figure 1.1*.

Dans la *figure 1.1a* le semi-conducteur est de type N, il réunit deux contacts métalliques appelés Drain et Source, il est appelé dans ce cas Canal.

Si le canal est alimenté par une tension V_{DD} entre le Drain et la Source, cette tension produit un courant I_D qui dépend de la résistance du canal *figure 1.1b*.

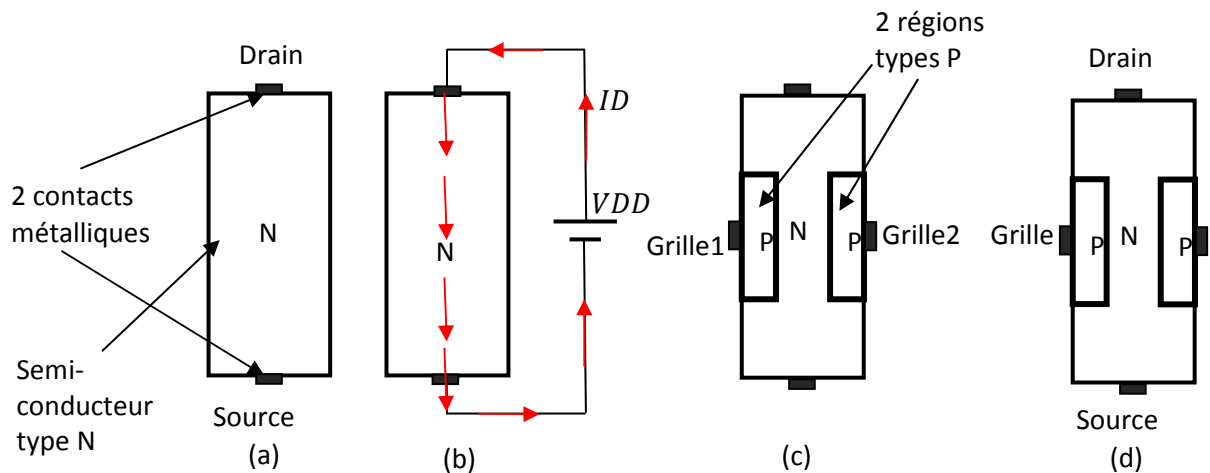


Figure 1.1

En insérant dans le semi-conducteur N deux régions de types P de chaque côté du canal, on obtient le TEC à jonction à canal N *figure 1.1c*.

Chacune des régions P est une électrode de commande appelée Grille.

Dans la plus part du temps les 2 grilles sont raccordées de l'intérieur, donc on aura une seule Grille *figure 1.1d*.

Pour fabriquer un J FET à canal P, on procède de la même manière, on remplace simplement le semi-conducteur de type N par un semi-conducteur de type P et on remplace les régions P par des régions N et on inverse V_{DD} .

1.2.1 L'effet de champ

En partant de la *figure 1.1d* avec les 2 grilles raccordées et en les polarisant par une tension V_{GG} négative *figure 1.2a* on aura l'apparition de 2 couches appelées couches de déplétions *figure 1.2b*.

Donc le nom d'effet de champ vient de l'apparition de ces 2 couches de déplétions qui entourent chaque jonction PN.

Le courant qui circule de du Drain vers la Source doit passer par le canal resserré entre les 2 couches de déplétions.

Les dimensions de ces 2 couches déterminent la largeur du canal de conduction, plus la tension V_{GG} est négative et plus le canal de conduction devient étroit car les 2 couches de déplétions se rapprochent l'une de l'autre sous l'effet du courant I_G sortant de V_{GG} qui vient **se retrancher** au courant I_D sortant de V_{DD} .

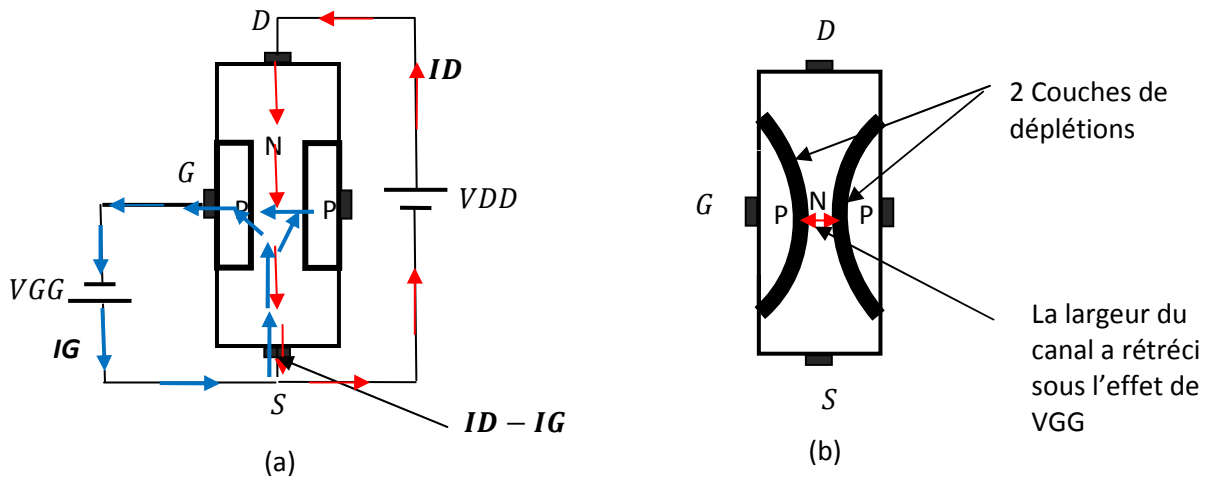


Figure 1.2

Autrement dit la tension grille V_{GG} commande le courant entre la Source et le Drain, plus la tension grille est négative et plus ce courant est faible.

1.2.2 Polarisation d'un J-FET

La *figure 1.2a* représente la polarisation normale d'un TEC à jonction à canal N ou J-FET à canal N. Une tension négative par rapport à la source est appliquée à la grille.

Comme la Grille est polarisée en inverse, il n'y a dans la connexion grille qu'un courant très faible qu'on négligera en première approximation.

1.2.3 Symboles schématique

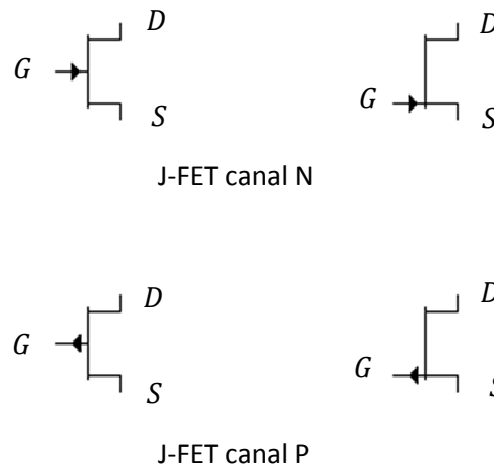


Figure 1.3

La figure 1.3 représente les symboles les plus utilisés pour les J-FET à canal N et P.

1.3 Régime de fonctionnement du JFET et réseaux de caractéristiques

Pour bien comprendre le fonctionnement du J-FET, on va considérer la figure 1.4.

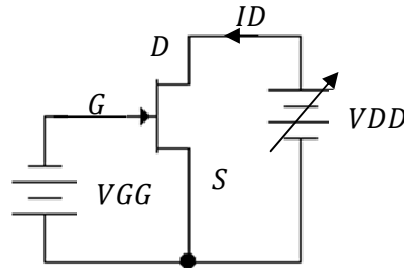


Figure 1.4

Nous allons mesurer le courant ID en faisant varier la tension VDD qui est la tension appliquée entre le Drain et la Source et en gardant constante la tension VGG qui est la tension appliquée entre la Grille et la Source. Dans ce cas $VDD = VDS$ et $VGG = VGS$

Les courbes de la figure 1.5 représentent la caractéristique de $ID = f(VDS)$ à $VGS = cste$

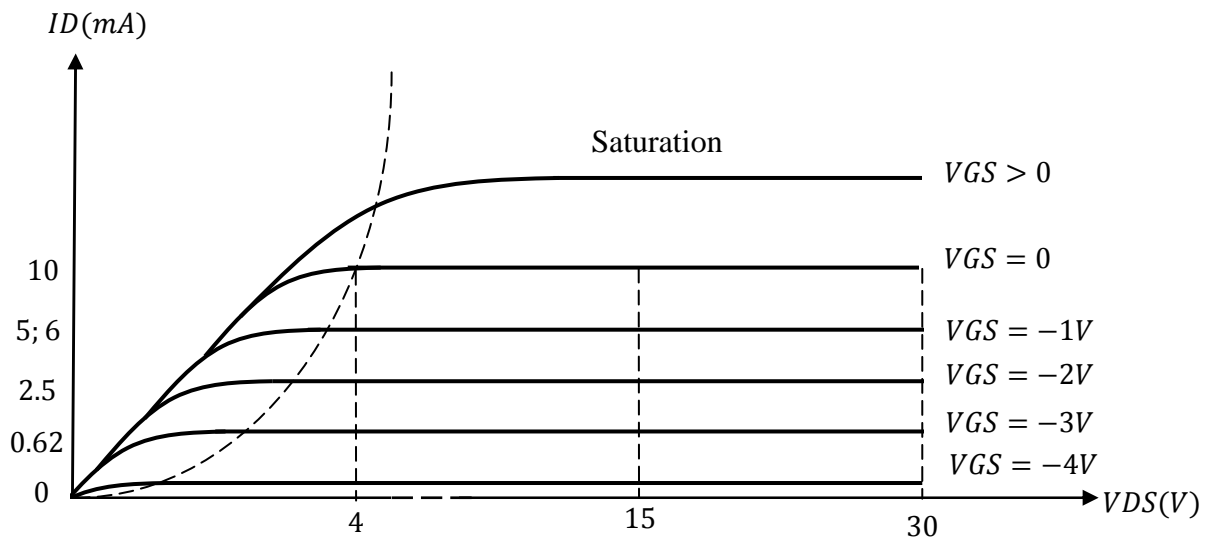


Figure 1.5

1.3.1 Caractéristique de transconductance

De la figure 1.5 on peut tracer la caractéristique de transconductance $ID = f(VGS)$, on obtient la courbe de la figure 1.6. Dans ce cas VGS est toujours négative car le transistor TEC à jonction est à canal N, Pour le transistor TEC à jonction à canal P, VGS sera toujours positive.

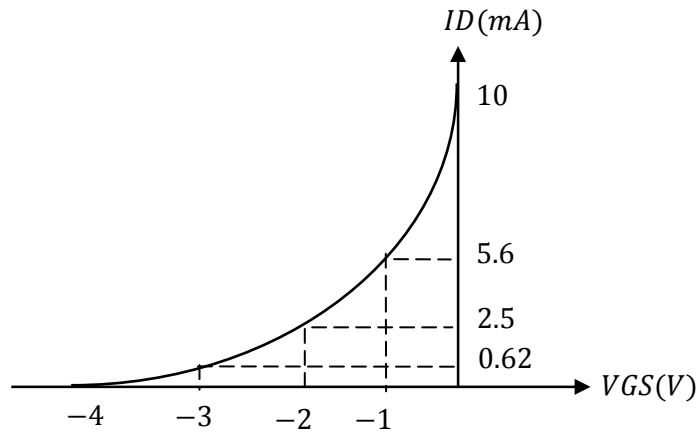


Figure 1.6

De la *figure 1.6* on déduit que la courbe de $ID = f(VGS)$ est **une courbe parabolique**. Cette courbe parabole est appelée **conductance de transfert** ou **caractéristique de transconductance**. On voit donc que cette caractéristique est sous forme d'un **arc**. On peut démontrer que l'équation de la courbe de caractéristiques de transconductance est de la forme :

$$ID = IDSS \left(1 - \frac{VGS}{VGS0}\right)^2 \quad (1.1)$$

$VGS0$ étant la tension pour laquelle $ID = 0$, elle est appelée tension de pincement et on la note parfois par VP , car dans ce cas le canal se ferme par les 2 couches de déplétions vu précédemment et le courant ID ne peut pas passer ou passe difficilement.

$IDSS$ est le courant Drain de saturation.

Donc de cette équation, on peut calculer le courant drain pour chaque valeur de la tension grille.

Dans la *figure 1.4* on a considéré un transistor JFET à canal N donc VGS est dans ce cas négative.

Exemple $VGS0 = -4V$, $IDSS = 4mA$ et $VGS = -3V$, calculer ID .

On trouve $ID = 0.25 mA$

1.3.2 La caractéristique de transconductance normalisée

On peut mettre l'équation (1.1) sous la forme :

$$\frac{ID}{IDSS} = \left(1 - \frac{VGS}{VGS0}\right)^2 \quad (1.2)$$

On peut tracer ensuite la courbe de $\frac{ID}{IDSS} = f\left(\frac{VGS}{VGS0}\right)$, *figure 1.7*

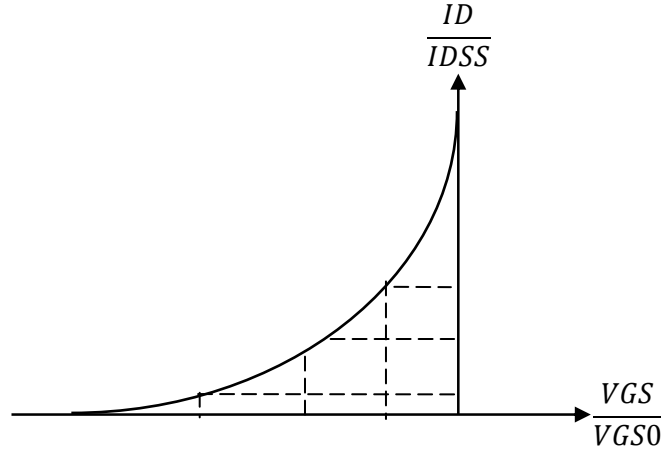


Figure 1.7

Donc pour polariser un TEC à jonction ou JFET au milieu de sa gamme des courants utiles, on doit trouver ID à peu près égal à la moitié de $IDSS$. D'où

$$VGS = \frac{VGS0}{4} \quad (1.3)$$

C'est la polarisation médiane.

1.3.3 La transconductance gm

On définit la transconductance gm ou transconductance mutuelle par :

$$gm = \frac{\Delta ID}{\Delta VGS} \quad (1.4)$$

Exemple

Calculer gm à partir de la courbe, *figure 1.8*

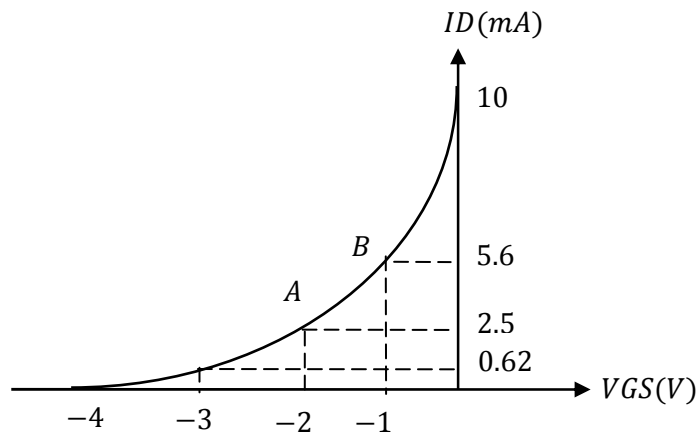


Figure 1.8

$$gm = \frac{\Delta ID}{\Delta VGS} = \left| \frac{IDB - IDA}{VGSB - VGSA} \right| = \left| \frac{5.6 - 2.5}{-1 - (-2)} \right| = 3.1 \frac{mA}{V} = 3.1 \cdot 10^{-3} \Omega^{-1}$$

On peut trouver gm en calculant dans l'équation (1.1) la dérivée de ID par rapport à V_{GS} on trouve:

$$gm = gm0 \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS0}} \right) \quad (1.5)$$

Avec $gm0 = -\frac{2 ID_{SS}}{V_{GS0}}$

1.4 LE MOSFET (EN : METAL OXIDE FIELD EFFECT TRANSISTOR)

De la même manière que le transistor JFET, il existe un autre type de transistor à effet de champ dont la grille est électriquement isolée du flux principal de courant dans le canal. Il s'appelle le transistor à effet de champ à grille isolée ou **IGFET** (EN : Insulated **G**ate **F**ield **E**ffect **T**ransistor). Le type le plus courant d'IGFET et le **MOSFET** (EN : **M**etal **O**xide **S**emiconductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor).

Le nom des électrodes du MOSFET sont similaires au JFET : Grille, Drain, Source. Il existe également une quatrième électrode qui contact le substrat (EN : bulk or body). Cette électrode est généralement court-circuitée avec l'électrode de source et sa représentation est souvent omise.

1.4.1 La structure du MOSFET

Le MOSFET est un dispositif dont l'effet de champ est contrôlé par une tension. De la même manière que le JFET, le MOSFET correspond à une résistance dont la valeur est contrôlée par la tension de grille. La dimension de la technologie est caractérisée par la longueur L défini sur la Fig. 13. Ainsi lorsque $L=0.18\mu\text{m}$, on parlera ainsi de technologie $0.18\mu\text{m}$.

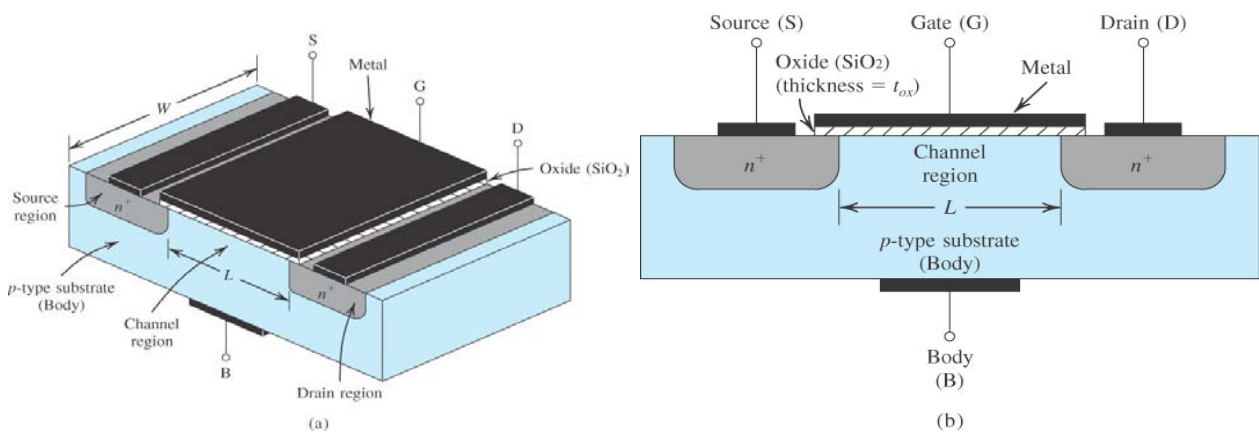


Fig. 13 Vue d'un MOSFET en 3D (gauche) et en coupe (droite)

Le transistor MOSFET diffère du JFET car son électrode de grille est électriquement isolée du canal semiconducteur par un oxyde mince. Cette isolation par rapport au canal lui donne une résistance d'entrée extrêmement élevée, soit dans les Mega-ohms. On considérera souvent qu'il n'y a pas de courant qui circule à travers la grille.

De la même manière que les JFET, cette résistance d'entrée très élevée permet l'accumulation de charges électrostatiques importantes. De ce fait, les MOSFETs sont sensibles aux décharges électrostatiques (ESD) et doivent être manipulés en conséquence.

Comme le courant de grille est extrêmement petit, on pourra considérer que le courant de drain est égal au courant de source :

$$I_G = 0 \Rightarrow I_D = I_S$$

Il existe deux types de transistors suivant le dopage du canal. Les MOS à canal P ou **PMOS** et les MOS à canal N ou **NMOS**. Ces deux types se sous-divisent en deux :

- **Les transistors à déplétion** ou appauvrissement (EN: depletion) : Ces transistors nécessitent une tension grille-source V_{GS} afin de bloquer le transistor. Ils sont équivalents à un interrupteur normalement fermé (EN: Normally closed)
- **Les transistors à enrichissement** (EN: enhancement): Ces transistors nécessitent une tension grille-source V_{GS} afin d'enclencher le transistor. Ils sont équivalents à un interrupteur normalement ouvert (EN: Normally open)

Les symboles et la structure de base des deux configurations de MOSFET sont donnés ci-dessous:

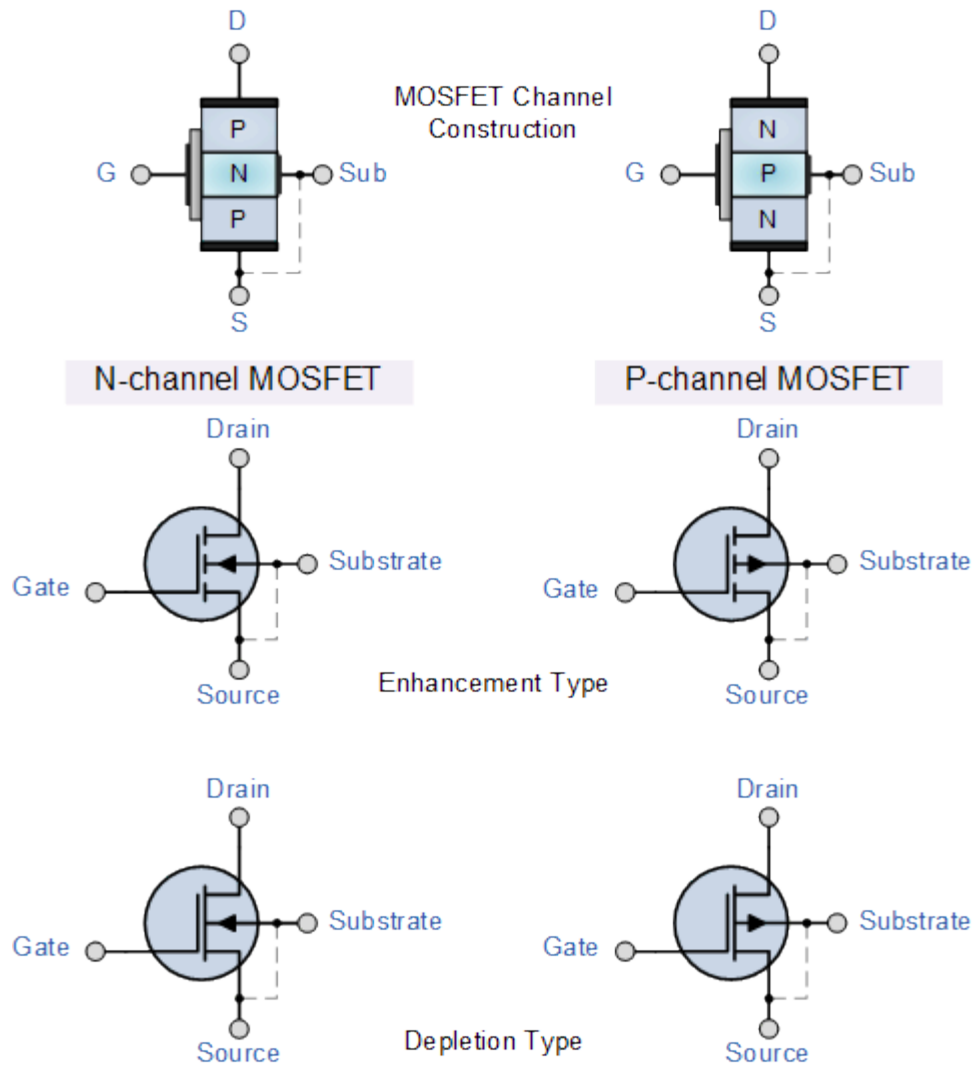


Fig. 14 Symboles et structure des MOSFETS à canal n ou p.

Les quatre symboles des MOSFET ci-dessus montrent une électrode additionnelle appelée substrat. Celle-ci n'est pas utilisée comme entrée ou sortie, mais pour fixer le potentiel du substrat. Cette électrode est souvent omise dans le symbole.

Dans les symboles ci-dessus, la ligne qui relie le drain à la source symbolise le canal. Si la ligne est continue alors il s'agit d'un transistor à « déplétion » (normalement conducteur) et si la ligne est discontinue il s'agit d'un transistor MOSFET à enrichissement (normalement bloqué). La direction de la flèche indique s'il s'agit d'un dispositif à canal p ou à canal n.

1.4.2 Principe de fonctionnement du MOSFET

La structure du MOSFET est très différente de celle du JFET. Le MOSFET à déplétion et celui à enrichissement utilisent le champ électrique produit par l'électrode de grille afin de changer le nombre de porteurs de charges (électrons pour un canal n ou les trous pour le canal p) dans le canal. L'électrode de grille est placée au dessus d'un oxyde mince alors que les électrodes de drain et de source sont placées sur une zone de type n (voir Fig. 15).

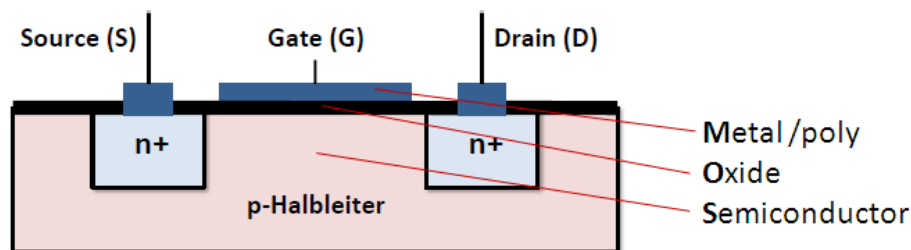


Fig. 15 Représentation schématique du transistor MOSFET

Dans le cas du JFET, nous avons vu qu'il était nécessaire de polariser la jonction PN en inverse. Dans le cas du MOSFET, cette limitation n'est pas présente. La grille peut être polarisée positivement ou négativement. Cette propriété le rend particulièrement adapté pour être utilisé comme interrupteur ou comme porte logique car il est non-conducteur sans avoir besoin d'appliquer une tension. De plus, le fait qu'ils aient une très grande résistance de grille signifie que sa consommation est très faible.

Nous allons maintenant voir plus en détails les deux types de transistors MOSFET, les transistors à enrichissement et les transistors à déplétion.

Le MOSFET à enrichissement

Le transistor MOSFET à enrichissement est plus courant que celui à déplétion. Dans ce cas, Il n'existe pas de canal entre les zones de type n de la source et du drain car le canal n'est presque pas ou pas dopé, il est ainsi non-conducteur. Le chemin entre les électrodes Source et Drain est bloqué. La résistance source-drain se monte à quelques TΩ! Le transistor est ainsi bloqué (EN : Normally « OFF »).

Un courant ne circulera au travers du canal drain – source que si la tension de grille (V_{GS}) est plus élevée que la tension de seuil (EN : threshold voltage) (V_{th}). La tension positive va repousser les trous hors du canal en attirant les électrons vers la couche d'oxyde (Fig. 16). Le canal est ainsi formé et le courant peut circuler.

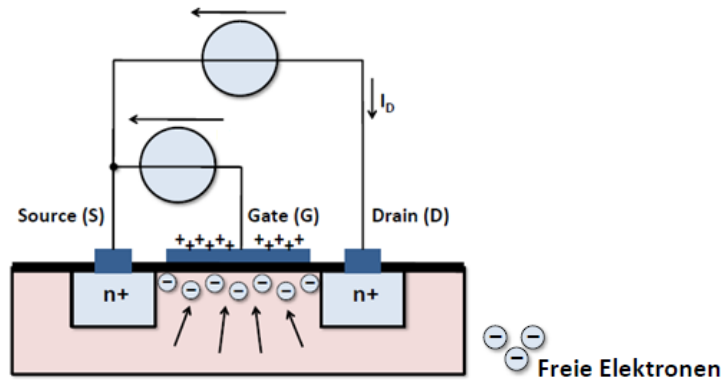


Fig. 16 Représentation schématique de la formation du canal dans un MOSFET

Dès qu'une petite tension V_{DS} est appliquée entre la Source et le Drain (max 0.2V), un courant peut s'écouler. Le MOSFET est dans le **domaine Ohmique**. La conductivité de ce canal est proportionnelle à la tension de grille V_{GS} . (Fig. 17).

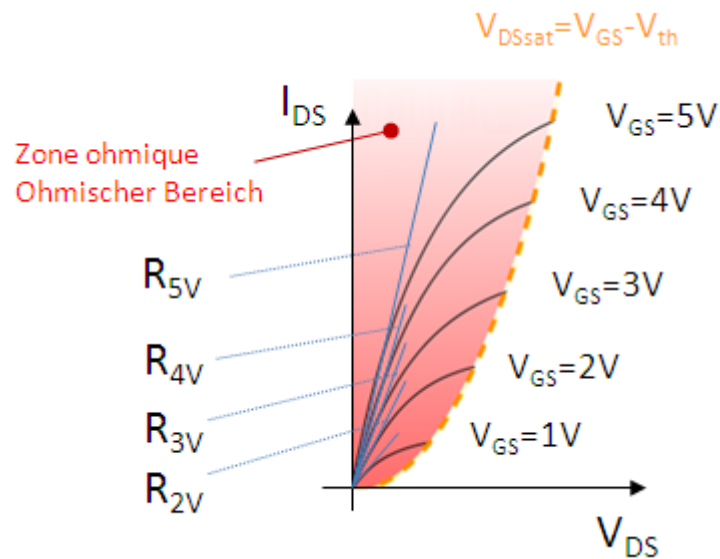


Fig. 17 Caractéristique d'un MOSFET dans la région linéaire ou ohmique.

Si la tension V_{DS} est encore augmentée, il y a une perte de tension V_{DS} le long du canal. Il en résulte que la tension entre la grille et les différents points le long du canal est variable. Elle varie entre V_{GS} (à proximité de la source) à $V_{GS} - V_{DS}$ (à proximité du drain). Comme la profondeur du canal dépend de cette tension celle-ci sera variable le long du canal (Fig. 18).

Lorsque la tension drain-source V_{DS} atteint une valeur telle que la tension grille-canal côté drain atteint la tension de seuil, c'est-à-dire : $V_{GS} - V_{DS} = V_{th}$ la profondeur du canal à l'extrémité drain devient voisine de 0; on dit qu'il y a pincement (EN : pinch- off) du canal ou **saturation** du MOSFET (Fig. 18).

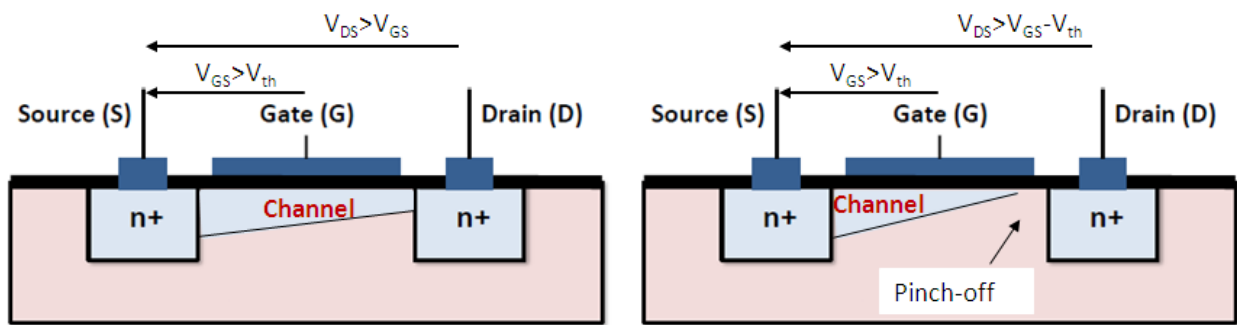


Fig. 18 Allure du canal lorsque la tension V_{DS} augmente. On remarque la profondeur variable du canal (gauche) qui peut conduire au phénomène de pincement (droite)

Toute augmentation de V_{DS} au delà de cette valeur sera sans effet sur l'intensité du courant Drain I_D . On remarquera que la caractéristique du MOSFET (Fig. 19) devient plate dans la zone de saturation.

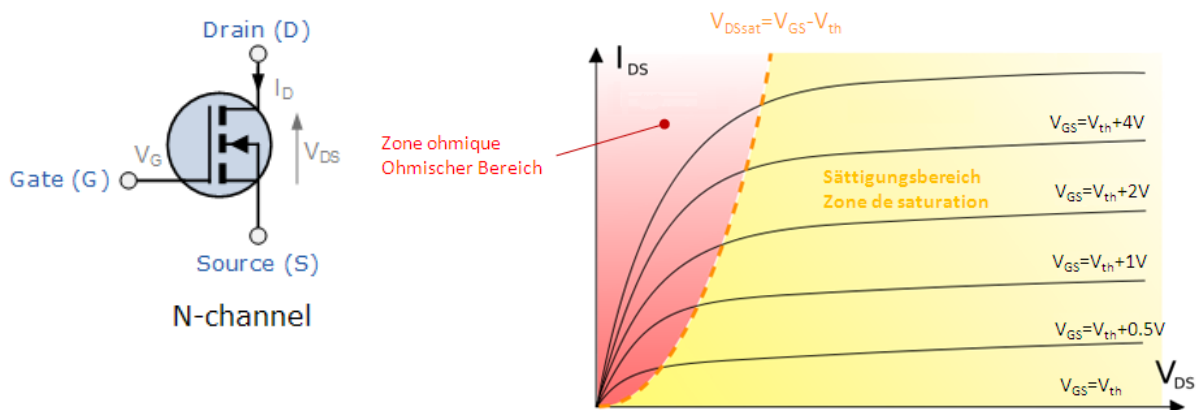


Fig. 19 Symbole et caractéristique du MOSFET à canal n à enrichissement.

Vous trouverez ici une animation Flash permettant de voir l'effet des tensions sur le MOSFET à canal n :

<http://www-g.eng.cam.ac.uk/mmg/teaching/linearcircuits/mosfet.html>

Les MOSFETs à enrichissement sont d'excellents interrupteurs dus à leur faible résistance lorsqu'ils sont enclenchés et à leur extrême résistance lorsqu'ils sont bloqués. Ces circuits sont utilisés dans les circuits logiques et dans les circuits à commutation de puissance sous la forme de circuits **CMOS** (Complementary MOS). Ces circuits utilisent des PMOS (Canal P) et des NMOS (Canal N) qui fonctionnent de manière complémentaire (voir plus loin)

Le MOSFET à déplétion

Le MOSFET à déplétion est moins usuel que le MOSFET à enrichissement. Il est normalement conducteur (EN : normally « ON ») sans l'application d'une tension de grille. Cependant, l'application d'une tension grille-source (V_{GS}) va bloquer le dispositif, de manière similaire à un JFET. Pour un MOSFET à canal N, une tension de grille positive va élargir le canal et accroître le courant drain source. Si la tension de grille est négative, le courant sera au contraire réduit (voir Fig. 10).

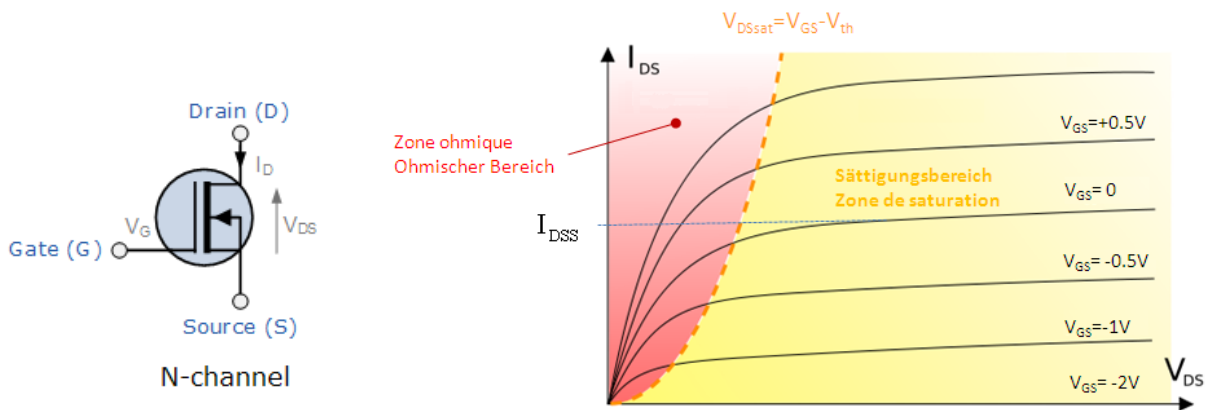


Fig. 20 Symbole et caractéristique d'un MOSFET à déplétion à canal n

1.4.3. Modélisation du MOSFET:

Pour de faibles valeurs de V_{DS} , la caractéristique du MOSFET est linéaire et ce dernier peut être modélisé comme une résistance dont la valeur R_{DS} vaut :

$$R_{DS} = \frac{\partial V_{DS}}{\partial I_D} = \frac{1}{2K(V_{GS} - V_{th})}$$

Où K est le paramètre de transconductance en $[A/V^2]$ qui va dépendre de la technologie et de la géométrie utilisée. On remarquera R_{DS} peut être contrôlée par la tension V_{GS} .

Si on augmente encore la tension V_{DS} , le courant I_D devient ensuite quadratique suivant l'équation:

$$I_D = 2KV_{DS} \left(V_{GS} - V_{th} - \frac{V_{DS}}{2} \right)$$

On peut vérifier que le courant est maximum lorsque:

$$\frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} = 0$$

C'est à dire que:

$$\frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} = 2K(V_{GS} - V_{th}) - 2KV_{DS} = 0$$

Ou :

$$V_{DS} = (V_{GS} - V_{th}) = V_{DS\text{ Sat}}$$

Il s'agit de la tension de saturation. Pour des tensions plus hautes que $V_{DS\text{ sat}}$ le canal est pincé et le courant est alors saturé à la valeur $I_{D\text{ Sat}}$

En remplaçant $V_{DS\text{ Sat}}$ dans I_D on trouve alors le courant de saturation $I_{D\text{ Sat}}$:

$$I_{D\text{ Sat}} = K(V_{GS} - V_{th})^2$$

Dans cette zone, le courant est indépendant de la tension V_{DS} . La caractéristique complète du MOSFET est résumée dans la Fig. 21.

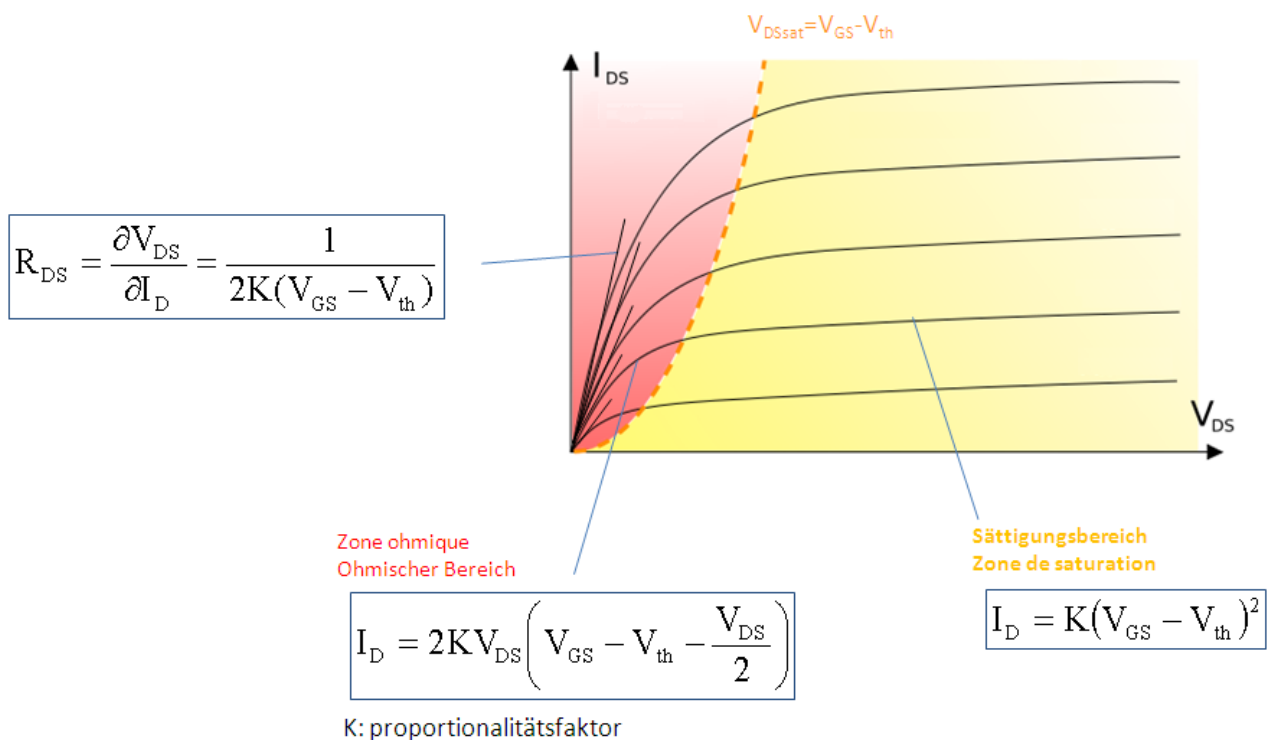


Fig. 21 Modélisation de la caractéristique du MOSFET

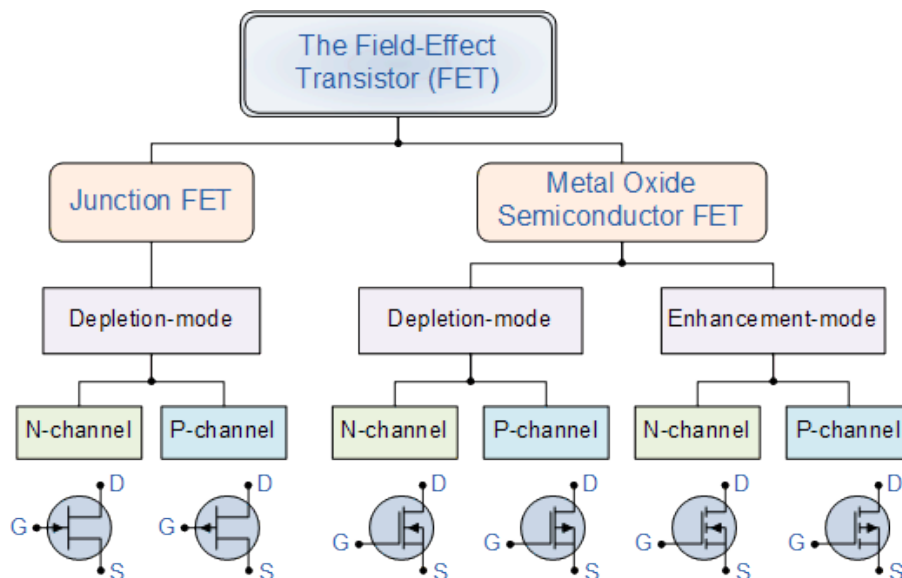


Fig. 31 Résumé des transistors à effet de champ.

1.5 Comparaison entre un FET et un transistor bipolaire

Les transistors à effet de champ peuvent être utilisés pour remplacer les transistors bipolaires dans les circuits électroniques. Une comparaison simple entre leurs caractéristiques est donnée ci-dessous :

FET	Transistor bipolaire (BJT)
Faible gain en tension	Haut gain en tension
Haut gain en courant	Faible gain en courant
Très haute impédance d'entrée	Faible impédance d'entrée
Haute impédance de sortie	Faible impédance de sortie
Génère peu de bruit	Génère un bruit moyen
Vitesse de commutation élevée	Vitesse de commutation moyenne
Sensible à l'électricité statique (ESD)	Robuste
Dispositif contrôlé en tension	Dispositif contrôlé en courant