

## 5. Le transistor à effet de champ

### 5.1. INTRODUCTION

Dans le chapitre sur le transistor bipolaire (Bipolar junction transistor, BJT), nous avons vu que le courant de sortie sur le collecteur est proportionnel au courant d'entrée sur la base. Le transistor bipolaire est donc un dispositif piloté par un courant. Le transistor à effet de champ (EN : **Field effect transistor** ou **FET**) utilise une tension sur la borne d'entrée du transistor, appelée la base afin de contrôler le courant qui le traverse. Cette dépendance se base sur l'effet du champ électrique généré par l'électrode de base (d'où le nom de transistor à effet de champ). Le transistor à effet de champ est ainsi un transistor commandé en tension.



Fig. 1 Exemples de transistors à effet de champ typiques

Le transistor à effet de champ est un dispositif qui possède trois bornes de connexion selon une terminologie qui lui est propre. La comparaison avec le transistor bipolaire est donnée ci-dessous (Fig. 2) :

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

Fig. 2 Comparaison entre les bornes du transistor bipolaire et du transistor à effet de champ.

Le transistor à effet de champ a des caractéristiques très voisines de son homologue, le transistor bipolaire ; il possède un haut rendement, fonctionne instantanément, il est robuste et bon-marché. Il peut ainsi remplacer son cousin, le transistor bipolaire dans la plupart des applications.

Les transistors à effet de champ peuvent être beaucoup plus petits que leur équivalent bipolaire. Grâce à leur faible consommation de puissance, ils sont idéaux pour les circuits intégrés, telle que les circuits digitaux CMOS.

Le transistor bipolaire comporte deux types de constructions différentes, **NPN** et **PNP**, qui décrit l'arrangement physique des couches de type P et de type N qui le compose. On retrouve la même classification pour les transistors à effet de champ. Il y a les transistors à effet de champ à canal n (EN : **N-channel FET**) et ceux à canal p (EN : **P-channel FET**)

Le courant entre l'électrode de **drain** et de **source** va passer dans un canal (EN : channel) qui peut être constitué soit d'un semiconducteur de type p, soit d'un semiconducteur de type n. Le contrôle de ce courant se fait au travers de la tension appliquée sur l'électrode de **grille** (EN: gate).

Comme son nom l'indique, les transistors bipolaires sont « **bipolaires** », parce qu'ils emploient deux types de porteurs de charges, des électrons et des trous. Le transistor à effet de champ est au contraire un dispositif « **unipolaire** » qui dépend seulement de la conduction d'électrons (canal n) ou de trous (canal p).

Le transistor à effet de champ a un avantage majeur sur le transistor bipolaire, son impédance d'entrée ( $R_{in}$ ) est très élevée (Mega Ohm), alors que celle du transistor bipolaire est comparativement basse. Cela a deux conséquences. D'une part, le courant de grille, de même que la consommation sont extrêmement bas. D'autre part, cela signifie que ces composants sont très sensibles à l'électricité statique (EN : Electrostatic discharge ou ESD).

Il y a deux types principaux de transistors à effet de champ, le JFET (EN : Junction Field Effect Transistor) et le IGFET (EN : Insulated-gate Field Effect Transistor) qui est plus connu sous le nom de **MOSFET** (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor).

## 5.2. LE JFET

Nous avons vu précédemment que le transistor bipolaire est construit en mettant bout à bout deux jonctions PN au travers desquelles le courant émetteur-collecteur va passer. La construction du JFET est très différente. Celui-ci est principalement constitué d'un canal, c'est à dire d'un matériau semi-conducteur de type P ou de type N qui permet aux porteurs majoritaire de circuler entre le drain et la source (**Fig. 3**)

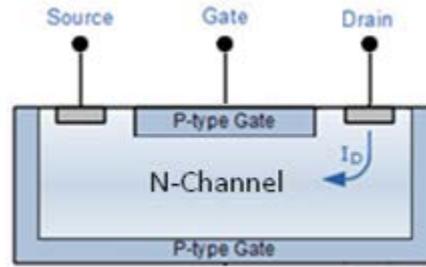


Fig. 3 Structure de base du transistor JFET à canal N.

Il y a deux type de transistors JFET: les JFET à canal N et les JFET à canal P. Le JFET à canal N est dopé avec des donneurs et la conduction est dominée par le flux de porteurs majoritaires, soit des électrons. De la même manière, le canal P est dopé avec des accepteurs et la conduction se fait par les trous.

Il y a également un troisième contact, qui est appelé la grille (EN: gate). Celui-ci est constitué d'un matériau de type P (resp. de type N dans le cas d'un JFET à canal P) formant ainsi une jonction PN avec le canal.

Les symboles ainsi qu'une représentation schématique des transistors JFET à canal N et P sont donnés ci-dessous.

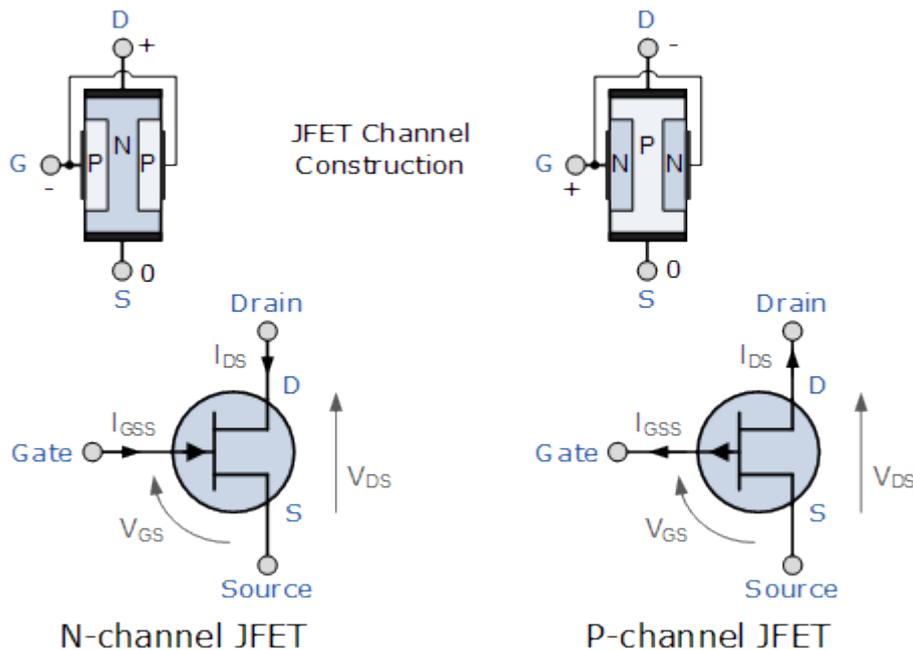


Fig. 4 Représentation schématique d'un JFET à canal N et à canal P ainsi que leurs symboles respectifs.

La majeure partie des transistors JFET sont à canal n et nous nous concentrerons sur ce type dans les explications ci-dessous.

Le canal n du transistor à effet de champ représente un chemin résistif. La jonction PN entre la grille et le canal est polarisée en inverse. Il en résulte une zone de déplétion (non conductrice). Lorsque la tension de grille est de 0V ( $V_{GS} = 0$ ) et qu'une petite tension ( $V_{DS}$ ), est appliquée entre le drain et la source, la zone de déplétion est très fine. C'est là que le courant à travers le canal,  $I_D$  est le plus grand. Ce courant s'appellera le courant maximum de saturation ( $I_{DSS}$ ). Le JFET est alors fortement conducteur.

Comme la jonction PN grille-canal est polarisée en inverse, le courant qui va la traverser sera très faible et sera même fréquemment négligé. Dans ce cas, le courant de source ( $I_S$ ) sera égal au courant de drain ( $I_D$ ).

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

Si l'on applique maintenant une tension  $V_{GS}$  négative, alors la couche de déplétion devient plus grande. La section du canal devient alors plus faible (Fig. 5), réduisant le courant qui le traverse. La résistance du canal est ainsi augmentée.

Si l'on continue de réduire la tension de grille, le courant diminue jusqu'au point où celui-ci devient zéro. La tension à laquelle le canal est fermé s'écrit ( $V_{GS\ off}$ ).

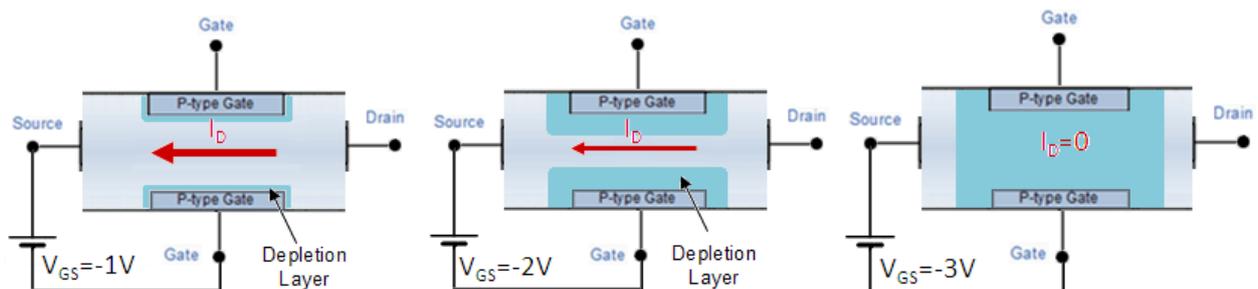


Fig. 5 Rétrécissement du canal en fonction de la tension de grille  $V_{GS}$  appliquée.

L'amplitude du courant circulant dans le canal drain-source est ainsi contrôlée par la tension appliquée sur l'électrode de grille. Le canal se comporte comme une résistance ohmique ajustable au travers de la tension de la grille (Fig. 6)

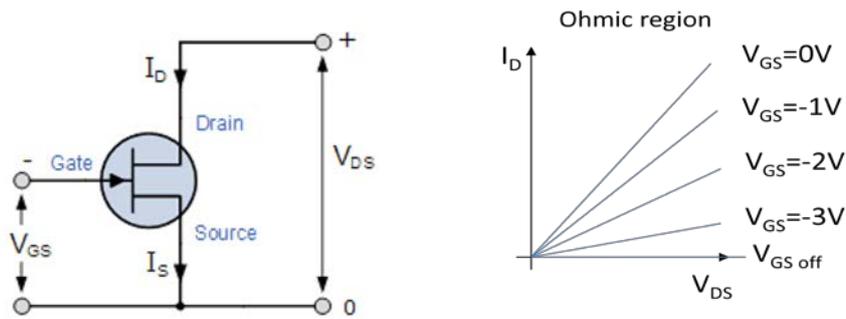


Fig. 6 Transistor JFET dans la zone ohmique. Le courant  $I_D$  est proportionnel à la tension  $V_{DS}$  et la pente est réglable à l'aide de la tension  $V_{GS}$ .

Considérons maintenant le cas où la tension  $V_{DS}$  devient importante. Un gradient de tension se forme ainsi le long du canal. La tension devient de moins en moins positive en allant du drain à la source. La jonction PN est ainsi fortement polarisée en inverse près du drain et faiblement près de la source. La largeur du canal augmente ainsi; près du drain la zone de déplétion est plus large et le canal est plus étroit (Fig. 7). Ce rétrécissement de la section du canal va réduire la résistance de celui-ci.

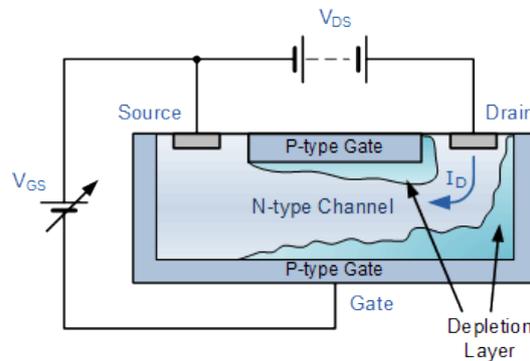


Fig. 7 Géométrie du canal lorsque la tension VDS devient importante

Si maintenant la grille est connectée à la source et que l'on augmente la tension drain-source  $V_{DS}$ , le courant va augmenter jusqu'à ce que le canal soit complètement fermé (Fig. 8). Cette tension ( $V_P$ ) est appelée la tension de pincement (EN : pinched-off voltage).

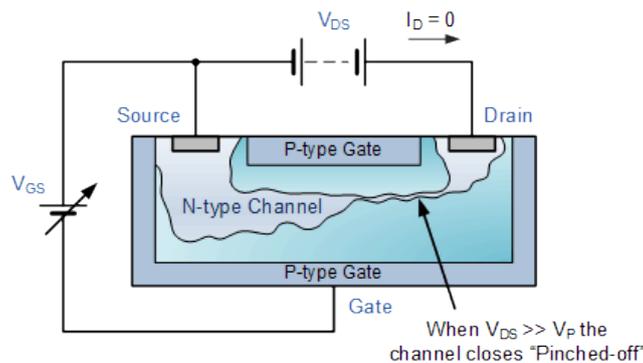


Fig. 8 Pincement du canal JFET

On trouvera par ailleurs la relation suivante :

$$V_P = -V_{GS\ off}$$

Dès qu'il y a pincement du canal, le courant  $I_D$  cesse de croître et  $V_{DS}$  a peu ou plus d'effet. Seul  $V_{GS}$  permet alors de contrôler le courant dans le canal. Le transistor se trouve alors dans sa zone active (aussi appelé zone de saturation) et il fonctionne comme une source de courant contrôlée par la tension de grille.

Remarque : Le JFET à canal P fonctionne de la même manière que le JFET à canal N décrit ci-dessus à la seule différence près que :

- 1) Le courant dans le canal est dû à la conduction des trous et non des électrons. Il est donc inversé.
- 2) La polarité de la tension de grille doit être inversée afin de polariser la jonction PN dans le bon sens.

### 5.2.1. Le modèle du JFET

Le JFET agit comme une résistance contrôlée dont la résistance ( $R_{DS}$ ) varie entre zéro lorsque  $V_{GS} = 0$  et devient maximum lorsque la tension de grille devient très négative. Dans les conditions normales, la tension de grille est toujours négative par rapport à la source. Il est essentiel que cette tension ne devienne jamais positive. En effet, dans ce cas, la diode PN deviendrait alors passante et tout le courant de drain passerait par la grille, ce qui endommagerait le JFET.

La caractéristique typique d'un transistor JFET à canal N est donnée ci-dessous (Fig. 9):

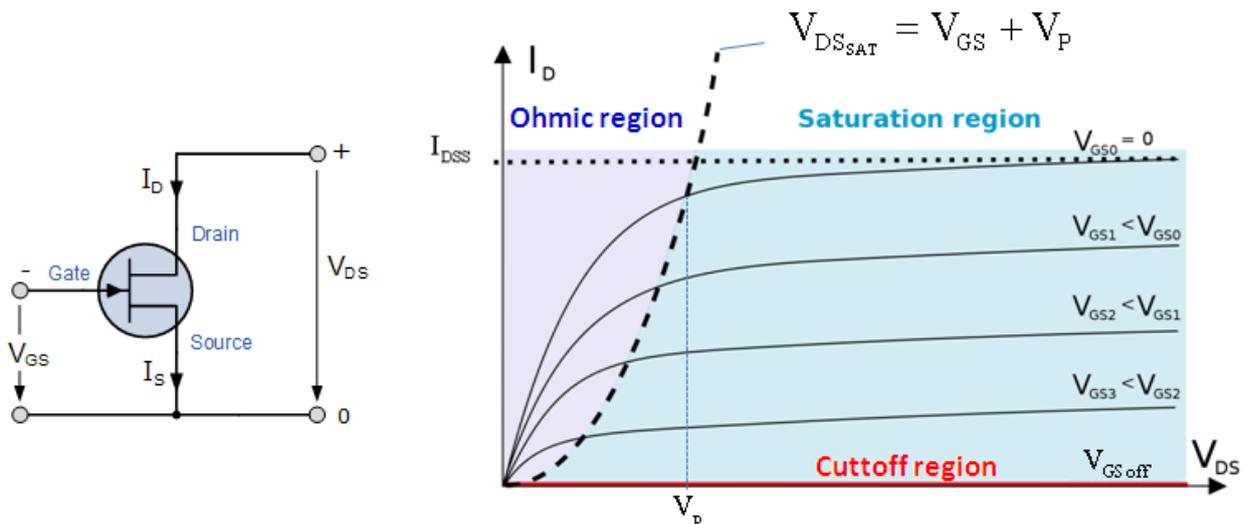


Fig. 9 Symbole et caractéristique de sortie typique d'un JFET.

La Fig. 9 définit les quatre zones de travail d'un JFET :

- La **zone ohmique** (EN: Ohmic region): Lorsque  $V_{DS}$  est très petite, le JFET fonctionne comme une résistance contrôlée.
- La **zone de blocage** (EN: Cutoff region): Lorsque la tension  $V_{GS}$  est suffisamment négative, le canal est fermé et le courant  $I_D=0$ . Le JFET est alors similaire à un circuit ouvert.
- La **zone active** ou de **saturation** (EN: active or saturation region): Le JFET agit comme une source de courant contrôlée par la tension de gate. La tension drain-source  $V_{DS}$  a peu ou pas d'effet dans cette zone.
- La **zone de claquage** (EN: breakdown region): La tension  $V_{DS}$  entre le drain et la source est suffisamment haute pour créer un claquage du canal résistif. Le courant  $I_D$  augmente alors de manière incontrôlée. Cette région n'est pas indiquée sur la Fig. 9. Elle se situerait sur la partie droite.

De la même manière, on peut définir la caractéristique de transfert du transistor JFET (Fig. 10).

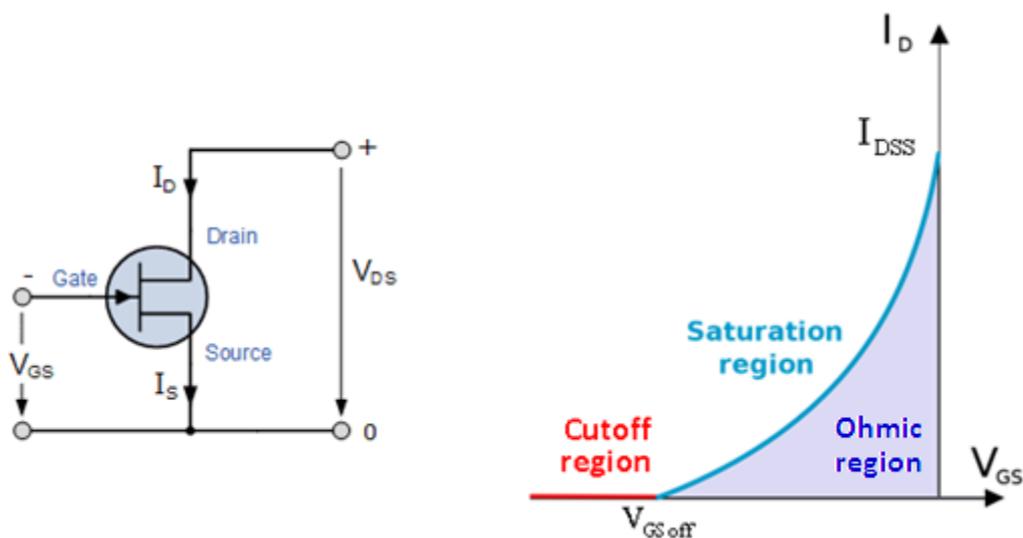


Fig. 10 Symbole et caractéristique de transfert typique d'un transistor JFET

Le courant de drain  $I_D$  est égal à zéro ( $I_D=0$ ) lorsque  $V_{GS} = V_{GS\ off}$ . Il croît jusqu'à un courant maximum  $I_{DSS}$  lorsque  $V_{GS} = 0$ . Lorsque le transistor est dans la zone de saturation (ou zone active), la caractéristique de transfert complète peut être calculée à l'aide de la relation suivante :

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS\ off}} \right)^2$$

Et en connaissant le courant  $I_D$  et la tension drain-source  $V_{DS}$ , on peut calculer la résistance du canal à l'aide de la relation suivante :

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

Les équations décrivant le JFET dans ses différentes régions sont données dans la Fig. 11

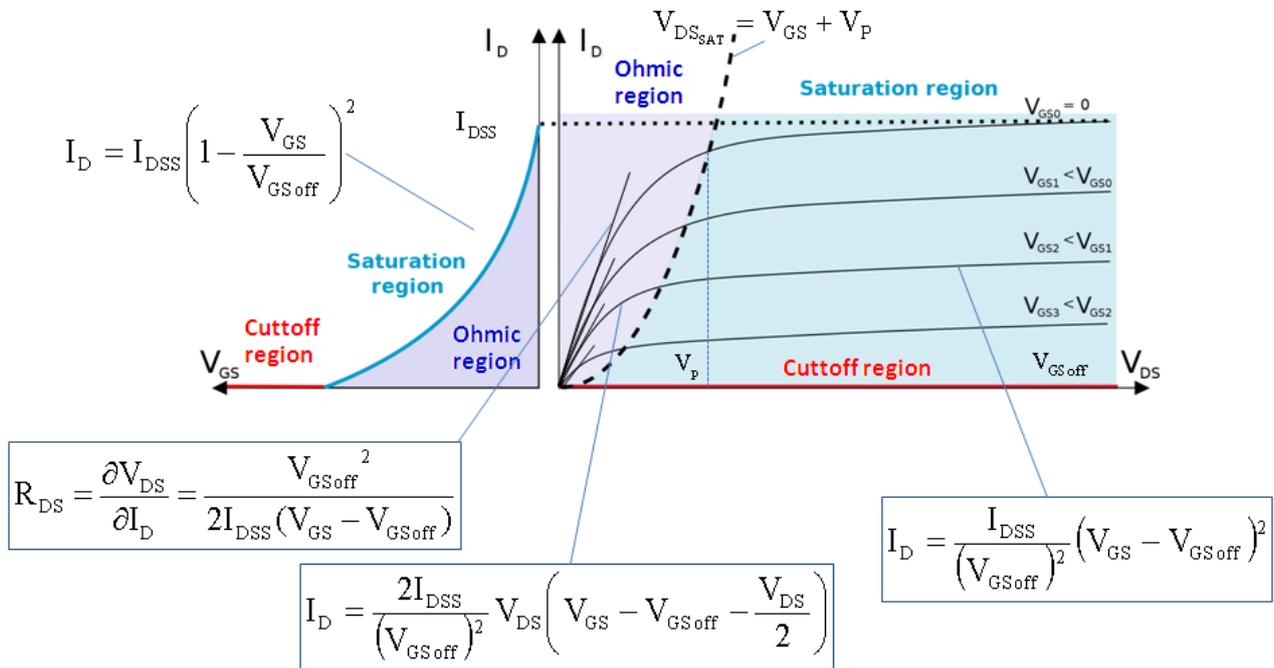


Fig. 11 Equations caractérisant le transistor JFET

### 5.2.2. L'amplificateur JFET

De la même manière que le transistor bipolaire, le JFET peut être utilisé comme étage d'amplification (Fig. 12) avec une caractéristique très semblable à celle du bipolaire. L'avantage principal du JFET réside essentiellement dans la très importante impédance d'entrée.

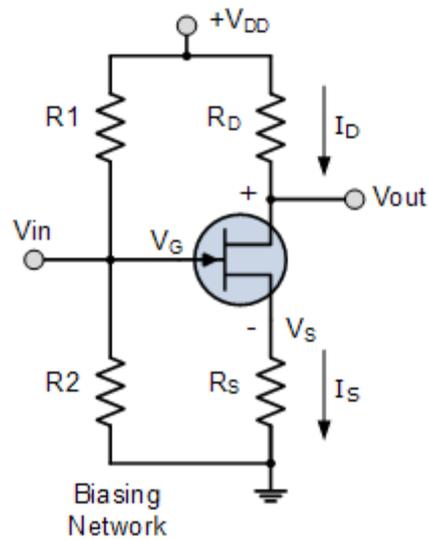


Fig. 12 Le JFET utilisé comme amplificateur

Ce montage source commune est polarisée par un diviseur de tension formé par les résistances  $R_1$  et  $R_2$ . La tension aux bornes de la résistance de source est généralement fixée à 25% de  $V_{DD}$ , soit :

$$V_s = I_D R_S = \frac{V_{DD}}{4}$$

Après avoir choisi le courant de drain, on peut déterminer la valeur de la résistance de source  $R_S$ .

$$V_s = V_G - V_{GS}$$

$$I_D = \frac{V_s}{R_S} = \frac{V_G - V_{GS}}{R_S}$$

Comme le courant de grille est zéro la tension peut directement être calculée par :

$$V_G = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{DD}$$

Le film ci-dessous offre un bon résumé du fonctionnement des transistors JFET :

- <http://www.youtube.com/watch?v=-z2bJnPgil>

## 5.3. 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 contacte le substrat (EN : bulk or body). Cette électrode est généralement court-circuitée avec l'électrode de source et sa représentation est souvent omise.

### 5.3.1. 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  $0.18\mu\text{m}$ .

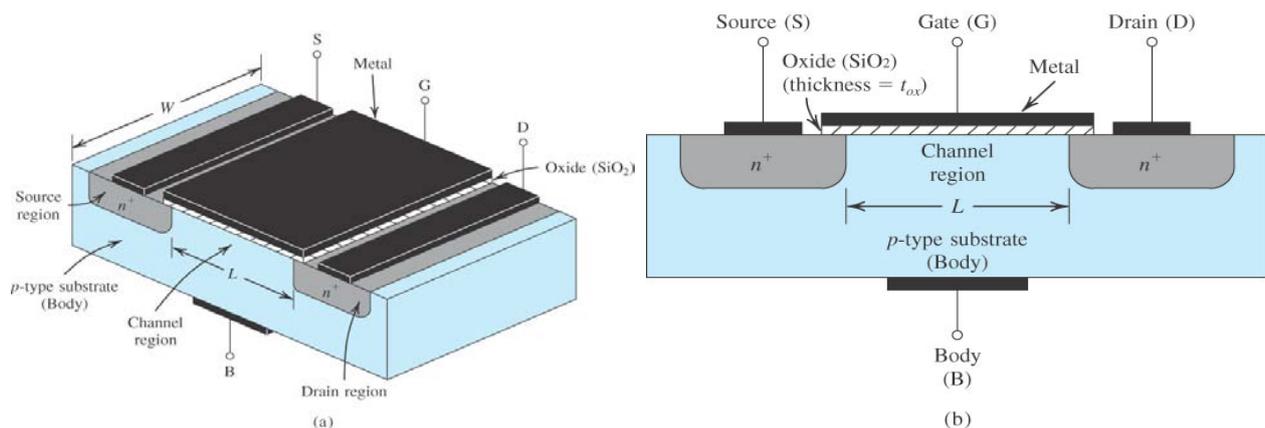


Fig. 13 Vue d'un MOSFET en 3D (gauche) et en coupe (droite)

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:

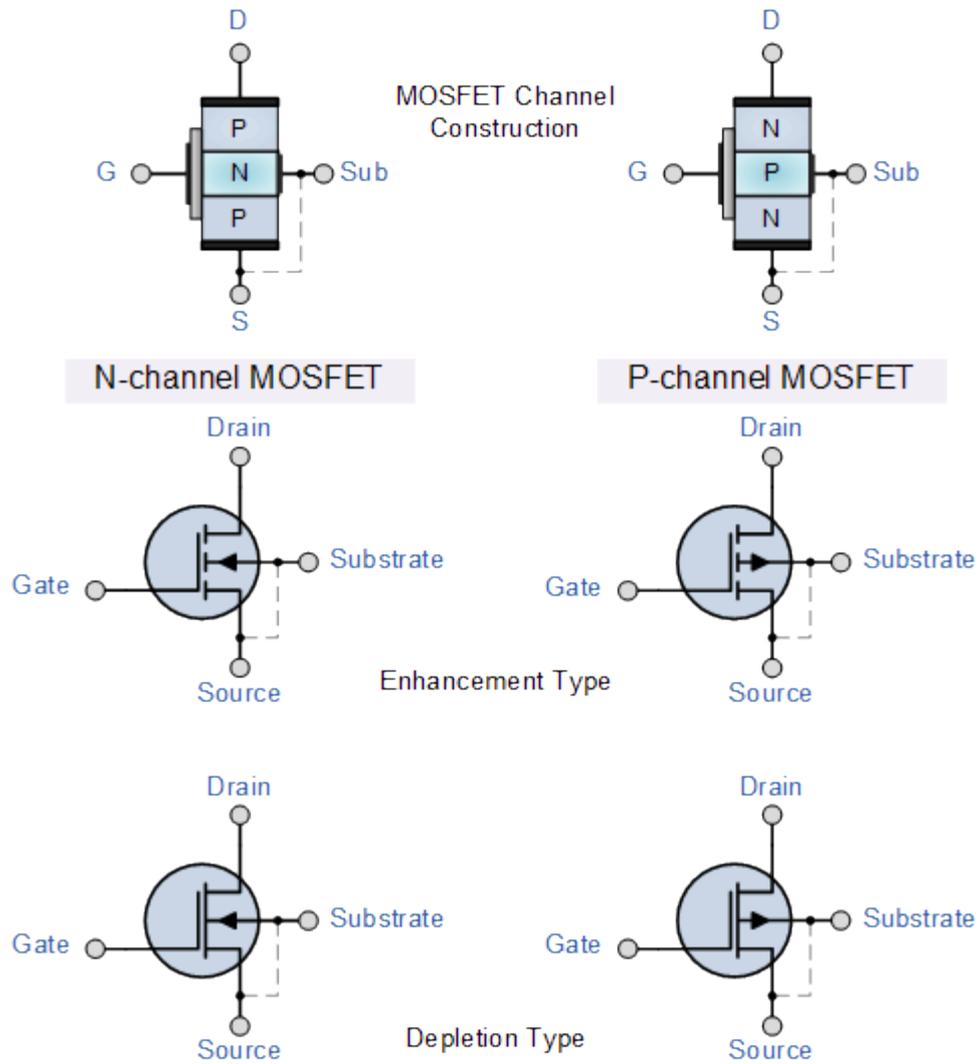


Fig. 14 Symboles et structure des MOSFETS à canal n ou p.

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.

### 5.3.2. 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).

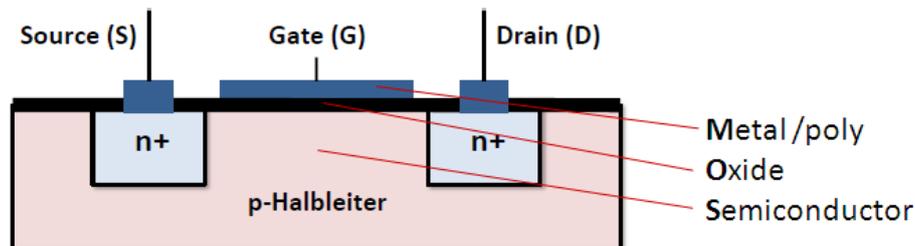


Fig. 15 Représentation schématique du transistor MOSFET

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.

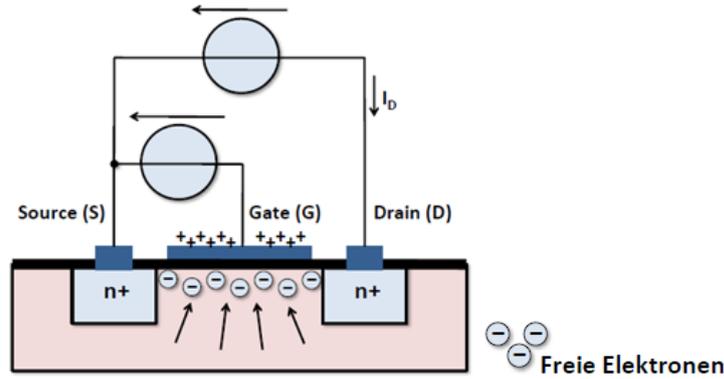


Fig. 16 Représentation schématique de la formation du canal dans un MOSFET

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).

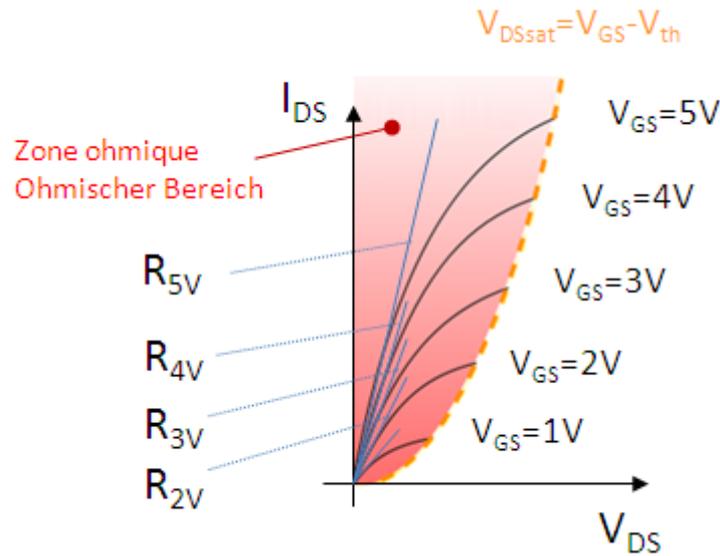


Fig. 17 Caractéristique d'un MOSFET dans la région linéaire ou ohmique.

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).

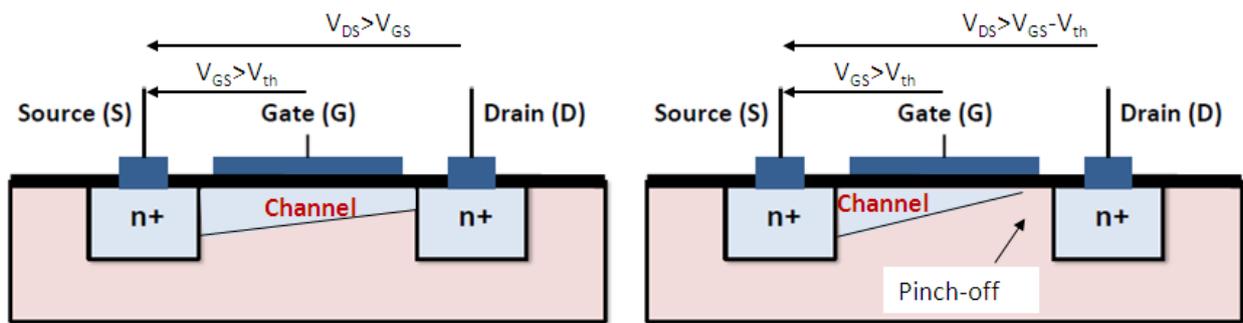


Fig. 18 Allure du canal lorsque la tension  $V_{DS}$  augmente. On remarque la profondeur variable du canal (gauche) qui peut conduire au phénomène de pincement (droite)

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.

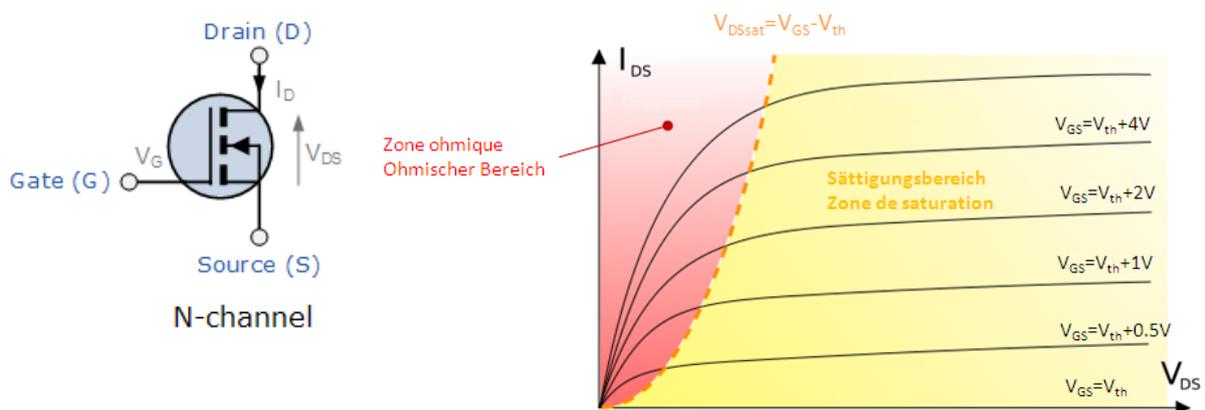


Fig. 19 Symbole et caractéristique du MOSFET à canal n à enrichissement.

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).

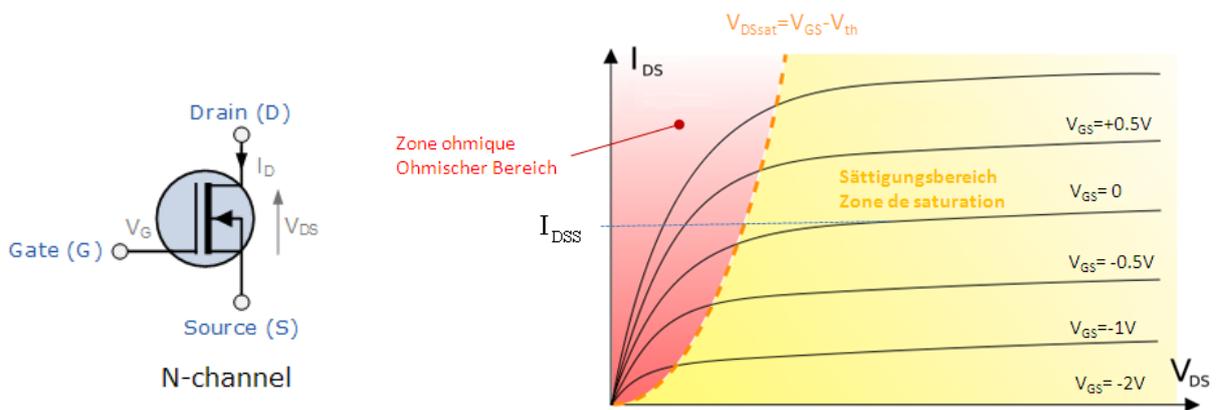


Fig. 20 Symbole et caractéristique d'un MOSFET à déplétion à canal n

### 5.3.3. 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.

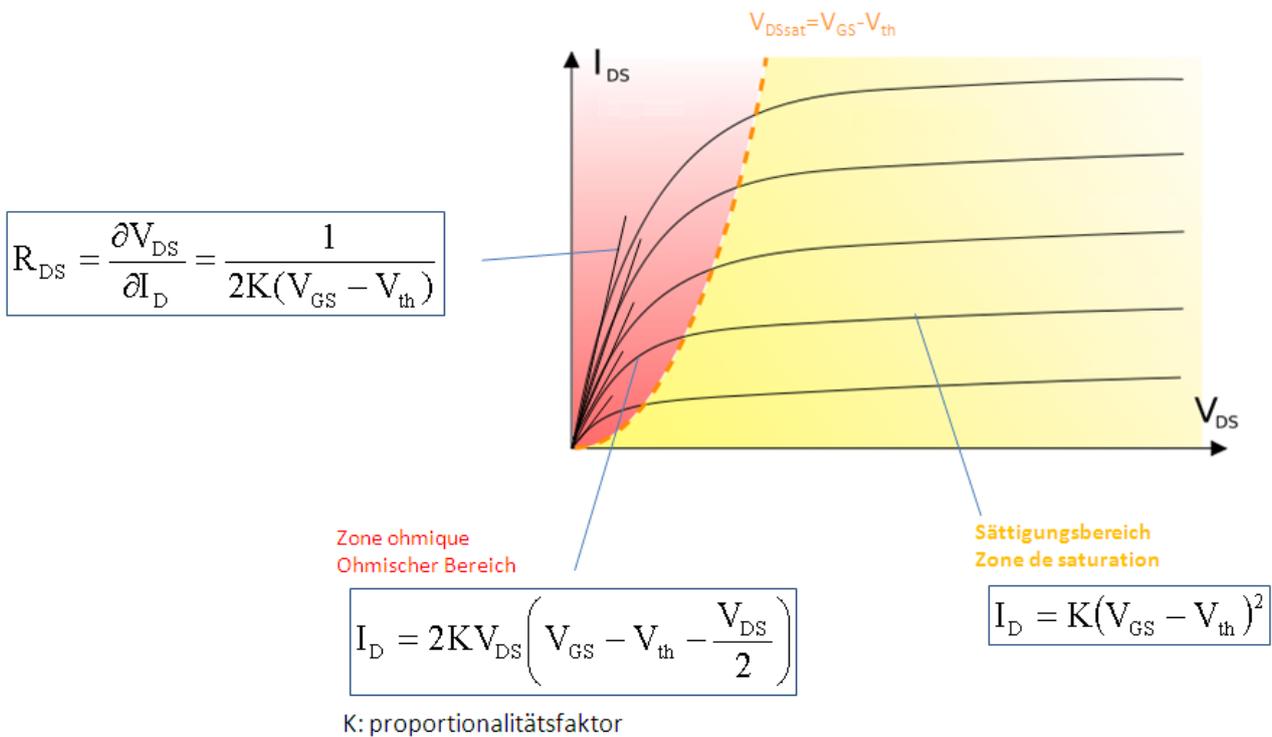


Fig. 21 Modélisation de la caractéristique du MOSFET

### 5.3.4. Les applications du MOSFET

Les MOSFETs sont des dispositifs actifs fabriqués à l'aide de différents matériaux semiconducteurs qui peuvent devenir isolant ou conducteur lorsqu'on applique une faible tension sur la grille. Ils sont principalement utilisés comme interrupteur (électronique digitale) ou comme amplificateur (électronique analogique). Ils fonctionnent alors dans trois régions différentes :

- La **zone ohmique** (EN: Ohmic region): Lorsque  $V_{GS} > V_{th}$  et que  $V_{DS} > V_{GS}$ , le MOSFET fonctionne comme une résistance contrôlée par la tension  $V_{GS}$ .
- La **zone de blocage** (EN: Cutoff region): Lorsque la tension  $V_{GS} < V_{th}$ , le canal est fermé et le courant  $I_D=0$ . Le MOSFET est alors similaire à un circuit ouvert.
- La **zone active** ou zone de **saturation** (EN: active or saturation region): Lorsque  $V_{GS} > V_{th}$ . Le MOSFET est dans la zone de courant constant. Le transistor est totalement passant et délivre son courant maximum  $I_{D\text{ Sat}}$ . Le MOSFET est similaire à un circuit fermé.

#### Le MOSFET utilisé comme interrupteur

Prenons un MOSFET à enrichissement monté comme dans le schéma ci-dessous (Fig. 22).

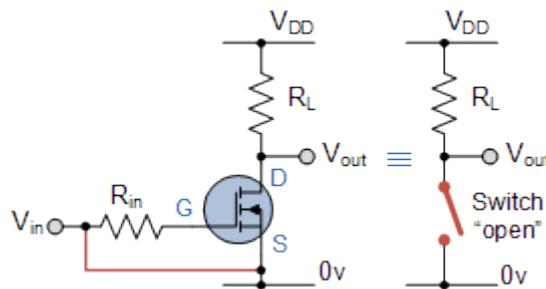


Fig. 22 Le MOSFET fonctionnant dans la zone de blocage

Lorsque la tension d'entrée sur la grille ( $V_{in}$ ) est zéro, la tension grille source est inférieure à la tension de seuil et le transistor est bloqué. La résistance du canal est extrêmement élevée et le courant de drain est nul ( $I_D = 0$ ). La sortie  $V_{OUT}$  est ainsi égale à la tension d'alimentation  $V_{DD}$ . Le transistor correspond ainsi à un interrupteur ouvert (EN : switch open).

Inversement (voir Fig. 23), lorsque la tension d'entrée est à l'état haut ( $V_{in} = V_{DD}$ ), la tension grille source est supérieure à la tension de seuil et le transistor est saturé. La résistance du canal est extrêmement

faible ( $R_{DS(on)} < 0.1\Omega$ ). On considérera souvent qu'elle est négligeable. Le courant de drain prend ainsi sa valeur maximale :

$$I_D = V_{DD} / R_L.$$

La sortie  $V_{OUT}$  est alors égale à  $V_{DS} = 0V$  pour une saturation idéale. Le transistor correspond ainsi à un interrupteur fermé.

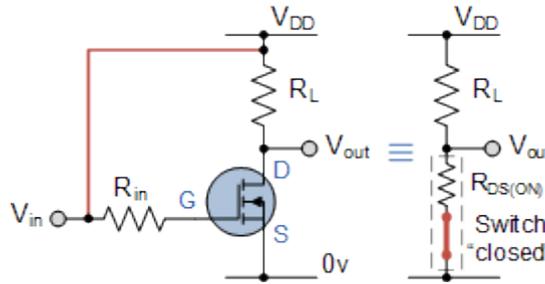


Fig. 23 Le MOSFET fonctionnant dans la zone de saturation

Si l'on regarde la caractéristique du MOSFET (voir Fig. 24), travaillant en interrupteur, celui-ci n'aura que deux états possibles se situant sur la droite de travail :

- Au point A le transistor est saturé et correspond à un interrupteur fermé.
- Au point B le transistor est bloqué et correspond à un interrupteur ouvert.

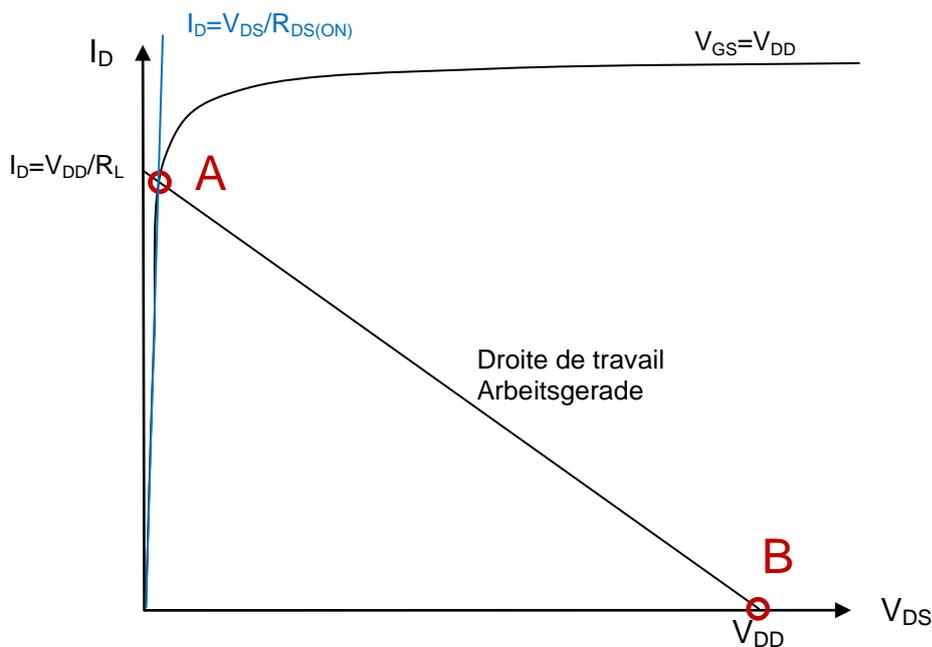


Fig. 24 La caractéristique du MOSFET fonctionnant comme interrupteur

Le MOSFET correspond à un interrupteur très efficace qui peut travailler à des vitesses beaucoup plus élevées que le transistor bipolaire.

### Exemple d'application : l'interrupteur MOSFET

Dans le circuit ci-dessous le MOSFET à canal N est utilisé pour allumer ou éteindre une lampe (LED)

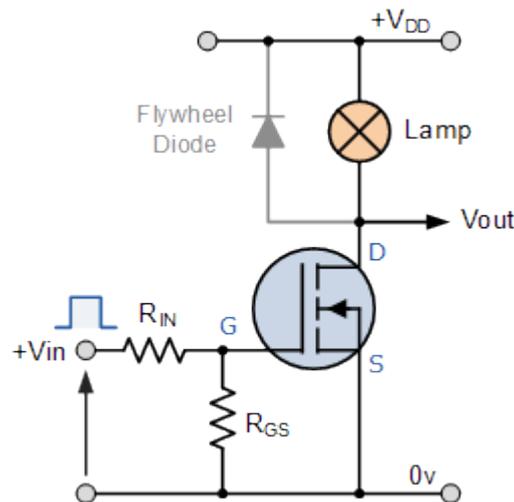


Fig. 25 MOSFET utilisé comme interrupteur

Supposons que la lampe peut travailler à  $V=6V$ ,  $P=24W$ . La résistance drain source du MOSFET en saturation,  $R_{DS(on)}$  est de  $0.1\Omega$ . Calculez la puissance dissipée dans l'interrupteur :

Le courant qui traverse la lampe est de :

$$P = V \cdot I_D \Rightarrow I_D = \frac{P}{V} = \frac{24}{6} = 4A$$

La puissance dissipée dans le MOSFET est donnée par:

$$P_D = I_D^2 \cdot R_{DS} = 4^2 \cdot 0.1 = 1.6W$$

Il est ainsi important dans les applications de puissance de choisir un MOSFET avec une résistance de canal  $R_{DS(on)}$  aussi faible que possible. La perte et l'échauffement correspondant sont ainsi minimisés. Le risque que le MOSFET devienne trop chaud et soit détruit est ainsi minimisé. Les MOSFETs de puissance ont des valeurs de  $R_{DS(on)} < 0.01 \Omega$ .

La limitation principale d'un MOSFET est son courant maximum. Il se reflète également dans le paramètre  $R_{DS(on)}$  car celui-ci correspond à :

$$R_{DS(on)} = \frac{V_{DS}}{I_D}$$

Plus  $R_{DS(on)}$  sera petit et plus  $I_D$  sera grand pour une tension  $V_{DS}$  donnée. Il est donc a nouveau intéressant de sélectionner un MOSFET avec une résistance  $R_{DS(on)}$  qui soit faible. Pour les applications hautes puissances, les transistors bipolaires sont généralement plus appropriés.

### Interrupteur MOSFET à canal P.

Jusqu'à présent, nous avons étudié le NMOS comme interrupteur lorsque celui-ci est placé entre la résistance de charge et la masse. Dans certaines applications, il est plus pratique d'avoir la charge directement connectée à la masse. Dans ce cas, on utilise un PMOS à enrichissement (voir Fig. 26). Le transistor est ainsi directement connecté à l'alimentation, comme le serait un transistor PNP. On remarquera que la source est en haut sur ce schéma.

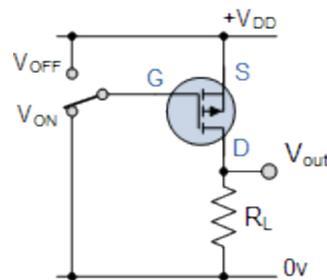


Fig. 26 Interrupteur MOSFET à canal P.

Dans un dispositif de type P, le courant de drain va dans la direction négative, et lorsqu'une tension grille source négative est appliquée (comme sur la figure), le transistor est passant (ON). Dans le cas contraire, il sera bloqué (OFF). Il est également possible de se passer de résistance et de connecter un PMOS en série avec un NMOS (voir Fig. 27) qui fonctionneront de manière complémentaire sous la forme de circuits **CMOS** (Complementary MOS).

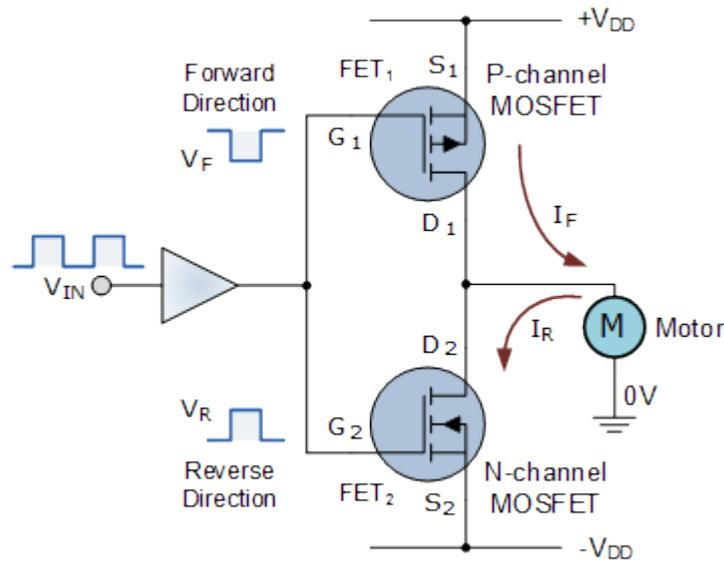


Fig. 27 Commande moteur de type CMOS

Le moteur est connecté aux drains des deux transistors. La source du NMOS est connectée à l'alimentation négative alors que la source du PMOS est connectée à l'alimentation positive. Les grilles des transistors sont à la même tension.

Lorsque l'entrée est à son état bas, le MOSFET à canal P est enclenché et le moteur tourne dans une direction. Seule la tension d'alimentation positive  $+V_{DD}$  est utilisée

Lorsque l'entrée est dans son état haut, le MOSFET à canal P est déclenché et le MOSFET à canal N s'enclenche. Le moteur tourne maintenant dans la direction opposée car l'entrée du moteur est maintenant connectée à l'alimentation négative  $-V_{DD}$ .

Cette même technologie se prête très bien à l'implémentation de fonctions digitales :

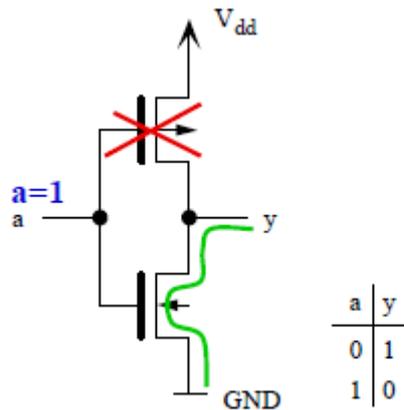


Fig. 28 Inverseur CMOS

Le principe de fonctionnement est le suivant. Si l'entrée  $a$  à  $V_{dd}$ , (1 logique), le transistor PMOS est bloqué et le transistor NMOS conduit. La sortie  $y$  est à la masse, ce qui correspond à un 0 logique. Et inversement, si l'entrée est à la masse (0 logique), le transistor PMOS est passant, le transistor NMOS est bloqué. La sortie  $y$  se trouve à  $V_{dd}$  ce qui correspond à un 1 logique. La fonction est donc bien celle d'un inverseur.

Pour finir cette section on remarquera à la Fig. 29 qu'il est très facile de combiner un NMOS avec un PMOS sur le même substrat, ce qui fait l'attrait de la technologie CMOS.

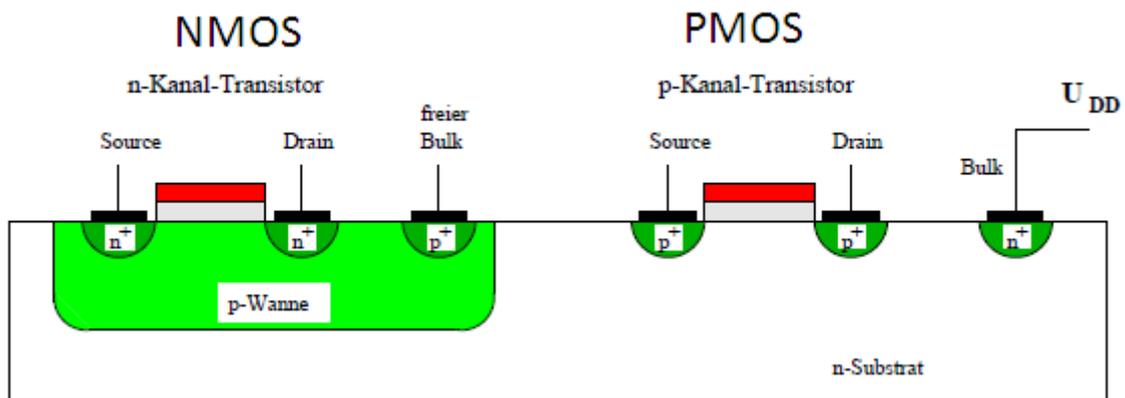


Fig. 29 Coupe d'un transistor NMOS et PMOS sur un même substrat.

## L'amplificateur MOSFET

De manière similaire au JFET, le MOSFET peut être utilisé comme amplificateur (Fig. 30). Le transistor utilisé dans ce cas est un NMOS à enrichissement. La grille est polarisée par les résistances  $R_1$  et  $R_2$ . Le signal de sortie est inversé car lorsque la tension de grille est basse, le transistor est bloqué et  $V_D$  (Vout) est élevée. Inversement, lorsque  $V_G$  est élevé, le transistor est conducteur et la tension  $V_D$  (Vout) est basse.

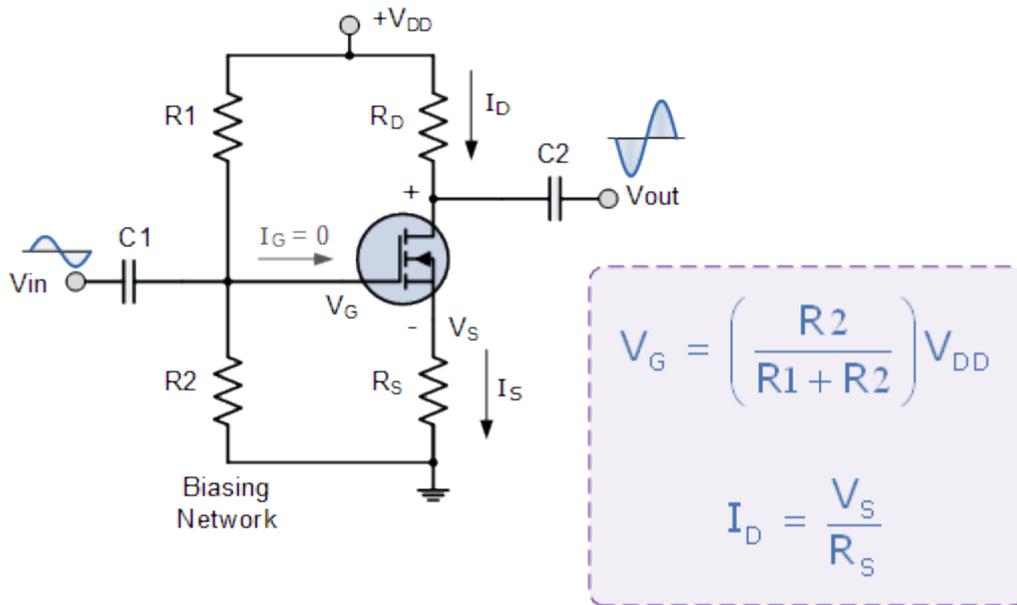


Fig. 30 Amplificateur NMOS enrichissement

## 5.4. Résumé sur les MOSFETs

Le MOSFET a une résistance de grille extrêmement élevée. Le courant entre la source et le drain est contrôlé par la tension de grille. En raison de cette résistance d'entrée extrêmement haute ainsi que d'un gain élevé, le MOSFET peut facilement être endommagé par l'électricité statique s'il n'est pas correctement protégé. Le MOSFET est idéal comme interrupteur électronique car sa consommation de courant est extrêmement faible. Les applications typiques du MOSFET sont les microprocesseurs, les mémoires et les portes logiques.



		Art und Symbol Type et symbole	Steuer- und Ausgangskennlinie Caractéristique d'entrée et de sortie
EN: enhancement DE: Anreicherungstyp FR: enrichissement	NMOS		
	PMOS		
EN: depletion DE: Verarmungstyp FR: appauvrissement	NMOS		
	PMOS		

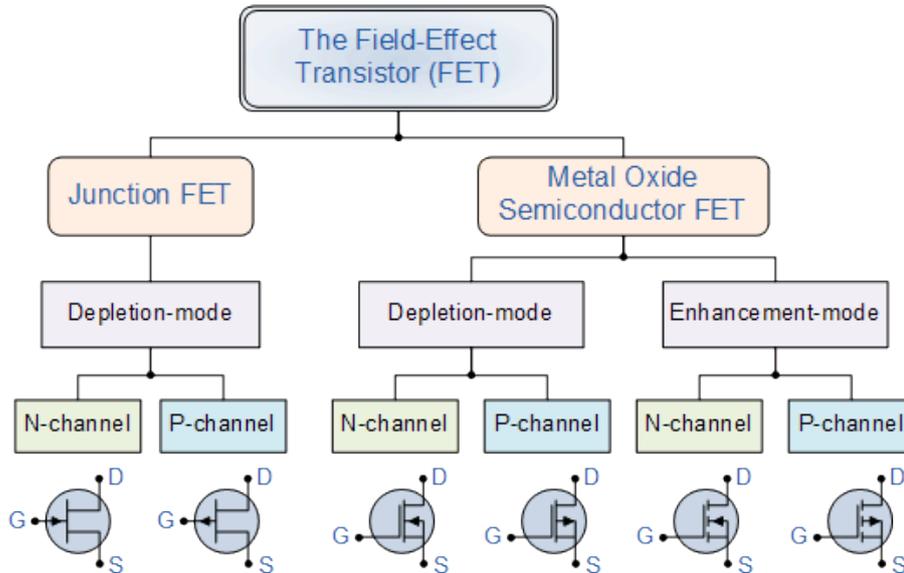


Fig. 31 Résumé des transistors à effet de champ.

## 5.5. 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

## 5.6. Références:

Anglais : [1] [http://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran\\_5.html](http://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_5.html), June 2012

[2] «Electrical Engineering, principles and applications», 5<sup>th</sup> edition, Allan R. Hambley, 2011

Français : [3] « Principes d'électronique : Cours et exercices corrigés », A.P. Malvino, 7<sup>ème</sup> édition, 2008

Allemand : [4] « Elektronik und Schaltungstechnik“, 2. Auflage, Hanser, 2011

## 5.7. Vocabulaire

English	Deutsch	Français
Field effect transistor	Der Feldeffekttransistor	Le transistor à effet de champ
JFET	Sperrschicht-FET	JFET
depletion	Verarmung/selbstleitend	appauvrissement
enhancement	Anreicherung/selbstsperrend	enrichissement
The channel	Der Kanal	Le canal
The pinched-off voltage	Die Abschnür- oder pinch-off-Spannung $V_p$	La tension de pincement