

### III.2. Etudes des transistors à effet de champ en régime dynamique.

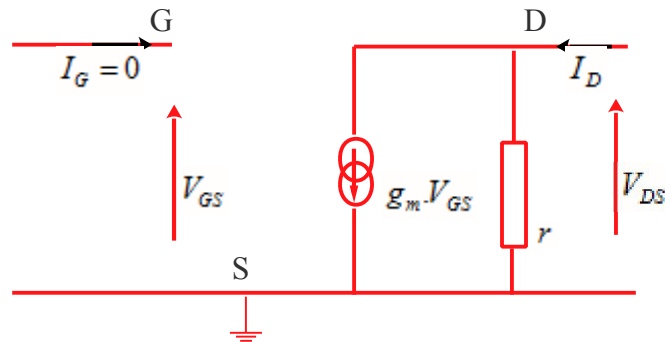
Comme nous l'avons vu dans le chapitre consacré pour les transistors bipolaires, cette étude consiste à analyser le fonctionnement d'un transistor polarisé en zone de saturation lorsqu'on applique des petites variations à l'une des grandeurs électriques.

#### III.2.1. Schéma équivalent du JFET

En régime dynamique petits signaux, on peut écrire :  $i_d = \frac{v_{ds}}{r} + g_m v_{gs}$ .

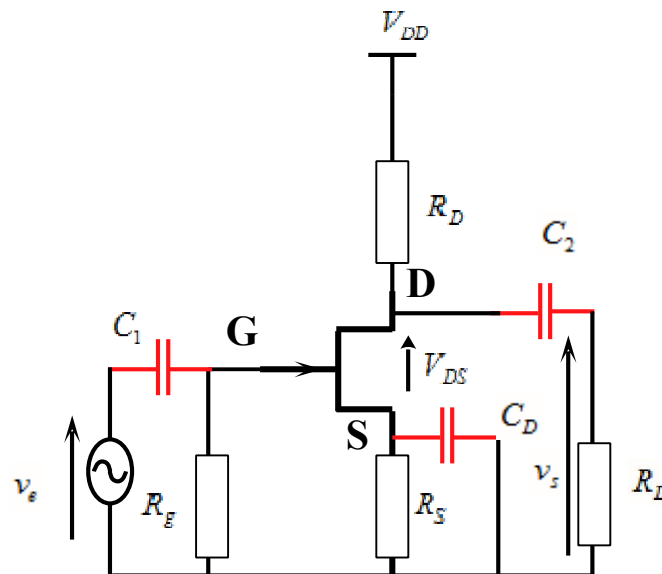
$g_m$  est la transconductance  $g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} = -\frac{2I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GSQ}}{V_P}\right)$

d'où l'on en déduit le schéma équivalent du J.FET en source commune :



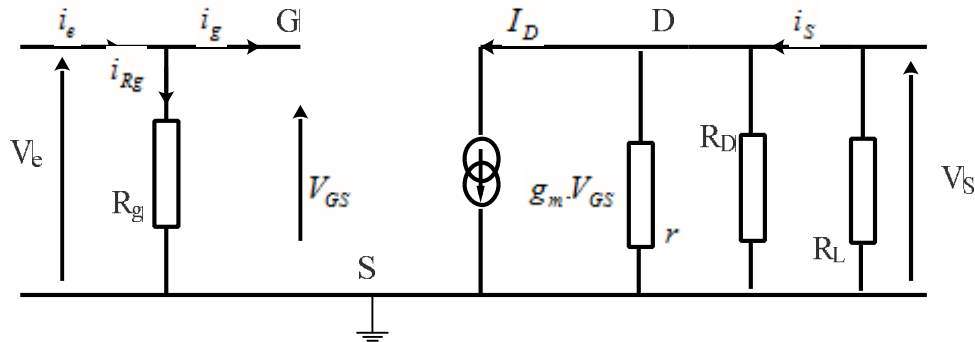
#### III.2.2. Montage amplificateur source-commune :

Soit le montage amplificateur suivant



$C_1$  et  $C_2$  sont deux condensateurs de liaison et  $C_S$  est un condensateur de découplage.

On remplace le transistor par son schéma équivalent et on suppose court-circuité la source de tension continue  $V_{DD}$ , on obtient ainsi :



### III.2.3. Paramètres caractéristiques du montage amplificateur

Gain de tension  $A_V$

$$A_V = \frac{V_s}{V_e}$$

D'après la maille d'entrée  $V_e = V_{GS}$

D'après la maille de sortie  $V_s = -g_m V_{GS} R_{eq}$  avec  $R_{eq} = r // R_D // R_L$

Donc  $A_V = -g_m R_{eq}$

Résistance d'entrée  $R_e$

$$R_e = \frac{V_e}{i_e}$$

D'après le schéma on a  $i_e = i_{R_g} + i_g$  et  $i_g = 0 \Rightarrow i_e = i_{R_g} = \frac{V_e}{R_g}$

Donc  $R_e = R_g$ .

Résistance de sortie  $R_s$

$$R_s = \left. \frac{V_s}{i_s} \right|_{V_e=0, R_L \text{ déconnectée.}}$$

Quand on court-circuite le générateur de tension  $V_e = 0$  on obtient  $V_{GS} = 0$

En D'autre part  $V_s = (r // R_D) i_s \Rightarrow R_s = r // R_D$ .

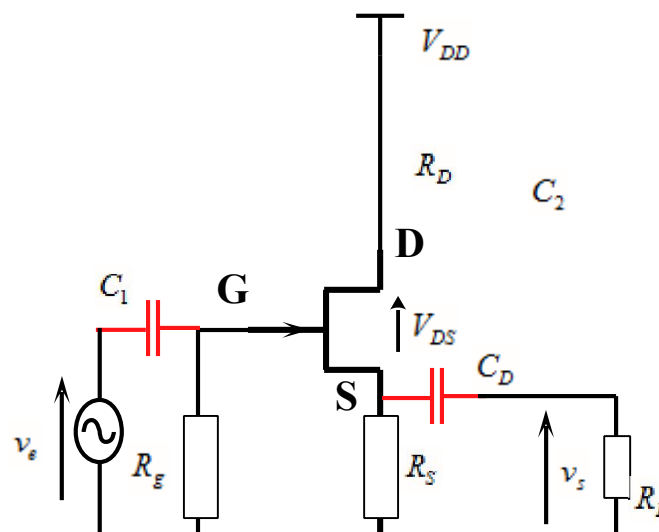
Ce montage est donc caractérisé par une très grande impédance d'entrée, une impédance de sortie moyenne et un gain en tension moyen et négatif : il existe un déphasage de  $180^\circ$  entre l'entrée et la sortie.

C'est le montage qui permet d'obtenir du gain en tension : la source étant à la masse (tension nulle en dynamique ) le signal est appliqué sur la grille : la transconductance du convertit la tension en courant  $I_D = g_m V_{GS}$  qui est converti en tension dans la résistance de charge : la tension de sortie est donc  $V_s = -g_m V_{GS} R_{eq}$  et donc le gain en tension  $A_V = -g_m R_{eq}$

Pour augmenter le gain, on cherchera à maximiser la résistance de charge R : en général, la résistance est remplacée par un source de courant, qui permet la circulation du courant de polarisation constant et en même temps une grande résistance en dynamique . Pour obtenir un très fort gain en tension, on utilisera souvent la structure Cascade qui permet de réaliser de très fortes impédances.

### III.2.4. Montage amplificateur à Drain commun

Le montage amplificateur à drain commun est représenté dans la figure suivante

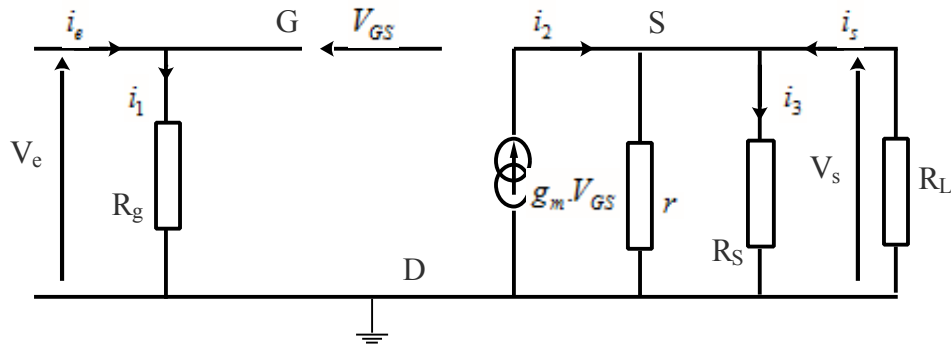


En régime dynamique comme le cas et du même principe presque que le transistor bipolaire à collecteur commun, on court-circuite les condensateurs C1 et C2 pour qu'ils deviennent des fils et aussi on court-circuite la tension continues donc  $V_{DD}$ .

Alors l'appellation du Montage par le drain commun du a la tension d'entrée qui est appliquée au borne de la grille G et la sortie qui est prélevée au borne de la source S.

Donc le drain reste dans ce cas libre et donc le montage s'appelle le montage à drain commun.

Après avoir appliqué les deux étapes citées dans le paragraphe précédente nous passerons à la schématisation du montage alors le schéma équivalent sera comme suit :



L'étude en régime dynamique consiste à trouver les paramètres principaux du transistor à savoir le gain de tension, le gain en courant, la résistance d'entrée et de sortie.

### Le gain de tension

D'après la maille d'entrée :  $V_e = V_s + V_{GS}$

D'autre part la maille de sortie nous donne  $V_s = (r // R_S // R_L)g_m V_{GS}$

$$V_e = (r // R_S // R_L)g_m V_{GS} + V_{GS} = ((r // R_S // R_L)g_m + 1)V_{GS}$$

$$A_v = \frac{V_s}{V_e} = \frac{(r // R_S // R_L)g_m}{(r // R_S // R_L)g_m + 1}$$

### Résistance d'entrée $R_e$

$$R_e = \frac{V_e}{i_e}$$

D'après le schéma on a  $i_e = i_1 + i_g$  et  $i_g = 0 \Rightarrow i_e = i_1 = \frac{V_e}{R_g}$

Donc  $R_e = R_g$ .

### Résistance de sortie $R_s$

$$R_s = \left. \frac{V_s}{i_s} \right|_{V_e=0, R_L \text{ déconnectée.}}$$

Quand on court-circuite le générateur de tension  $V_e = 0$  on obtient  $V_e = V_s + V_{GS} = 0$

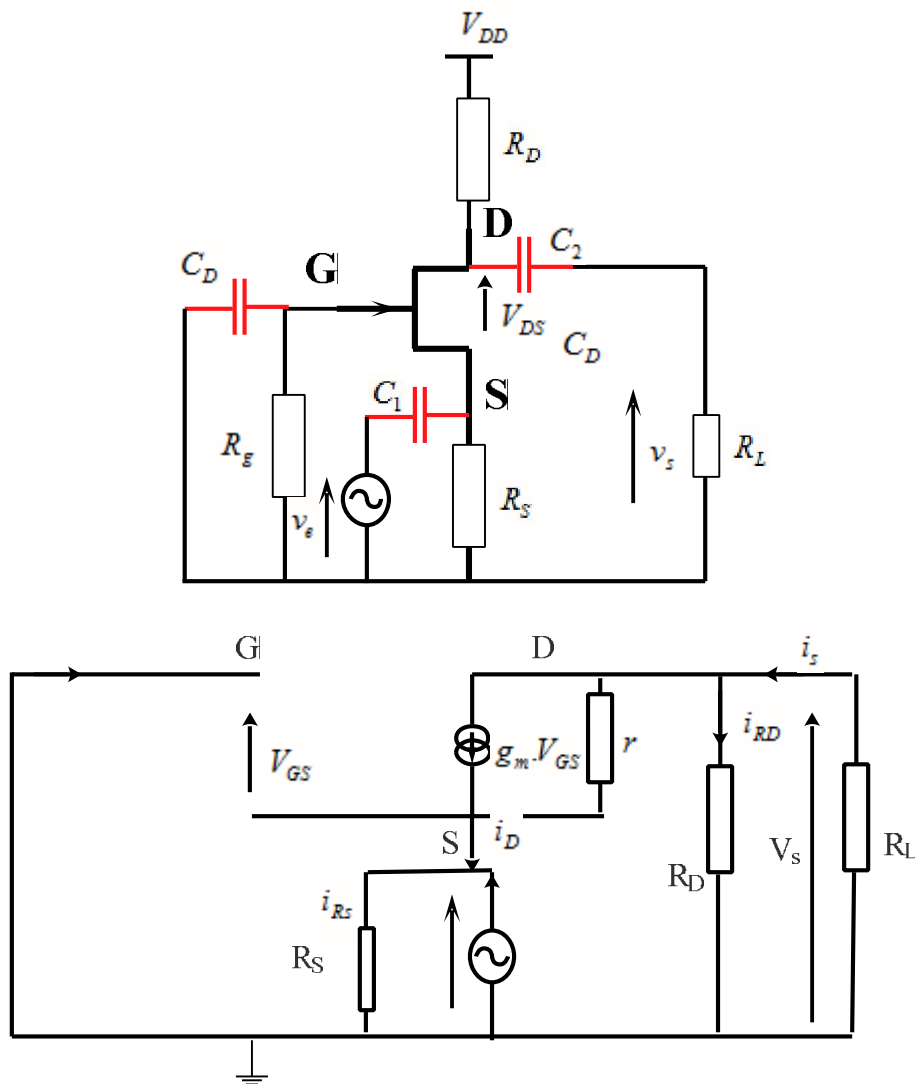
$$V_s = -V_{GS}$$

En D'autre part  $V_s = R_s i_3 \Rightarrow V_s = R_s(i_s + i_2) = R_s(i_s + g_m V_{GS})$

Puisque  $V_s = -V_{GS}$  donc  $V_s = R_s i_s - R_s g_m V_s \Rightarrow V_s(1 + R_s g_m) = R_s i_s$

Au final  $R_s = \frac{V_s}{i_s} = \frac{R_s}{1 + R_s g_m}$

### III.2.5. Montage amplificateur à grille Commune



Le gain de tension

D'après la maille d'entrée :  $V_e = -V_{GS}$

D'autre part la maille de sortie nous donne

$$\begin{aligned}
V_s &= -R_D // R_L (g_m V_{GS} + \frac{V_e - V_s}{r}) \\
&= -R_D // R_L (-g_m V_e + \frac{V_e - V_s}{r}) \\
V_s (1 - \frac{R_D // R_L}{r}) &= -R_D // R_L (-g_m + \frac{1}{r}) V_e \\
A_v = \frac{V_s}{V_e} &= \frac{-R_D // R_L (-g_m r + 1)}{r - R_D // R_L}
\end{aligned}$$

Résistance d'entrée  $R_e$

$$R_e = \frac{V_e}{i_e}$$

D'après le schéma on a  $i_e = i_{RS} - i_D$  et  $i_{RS} R_s = V_e$

$$i_D = g_m V_{GS} + \frac{V_e - V_s}{r}$$

Donc  $i_{RS} = i_e + g_m V_{GS} + \frac{V_e - V_s}{r}$

On remplace  $V_s$  par  $A_v V_e$

Donc  $R_s i_{RS} = R_s (i_e - g_m V_e + \frac{V_e - A_v V_e}{r})$

$$R_s i_e = V_e (1 + R_s g_m - \frac{R_s (1 - A_v)}{r})$$

$$R_e = \frac{V_e}{i_e} = \frac{R_s}{1 + R_s g_m - \frac{R_s (1 - A_v)}{r}}$$

Résistance de sortie  $R_s$

$$R_s = \left. \frac{V_s}{i_s} \right|_{V_e=0, R_L \text{ déconnectée.}}$$

$$V_s = (R_D // R_L) i_s$$

Donc  $R_s = \frac{V_s}{i_s} = R_D // R_L$

### III.3. Transistor à Effet de Champ MOSFET :

#### III.3.1 La structure du MOSFET

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** (: **I**nsulated **G**ate **F**ield **E**ffect **T**ransistor). Le type le plus courant d'IGFET est le **MOSFET** (**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. Cette électrode est généralement court-circuitée avec l'électrode de source et sa représentation est souvent omise.

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.

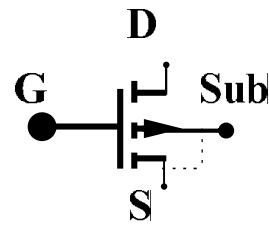
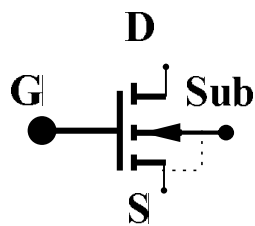
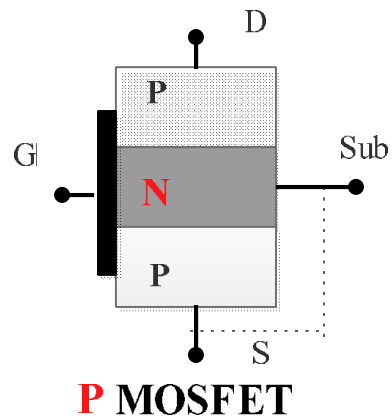
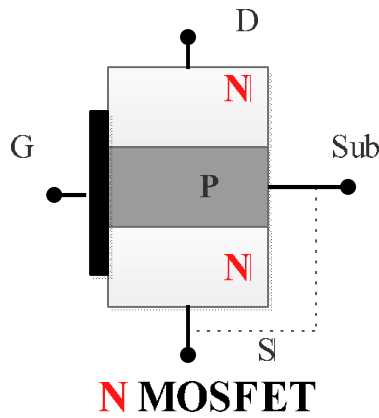
Le transistor MOSFET diffère du JFET car son électrode de grille est électriquement isolée du canal semi-conducteur par un oxyde mince. Cette isolation par rapport au canal lui donne une résistance d'entrée extrêmement élevée, soit dans les Méga-ohms. On considérera souvent qu'il n'y a pas de courant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

Comme le courant de grille est extrêmement petit, on pourra considérer que le courant de drain est égal au courant de source :  $I_G = 0$  alors  $I_D = I_S$

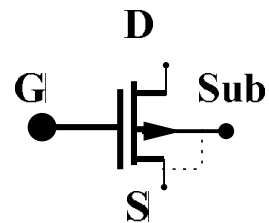
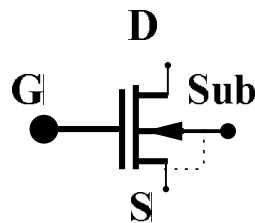
Il existe deux types de transistors suivant le dopage du canal. Les MOS à canal P ou PMOS et les MOS à canal N ou NMOS. Ces deux types se sous-divisent en deux :

- Les transistors à déplétion ou appauvrissement : Ces transistors nécessitent une tension grille-source  $V_{GS}$  afin de bloquer le transistor. Ils sont équivalents à un interrupteur normalement fermé.
- Les transistors à enrichissement: Ces transistors nécessitent une tension grille-source  $V_{GS}$  afin d'enclencher le transistor. Ils sont équivalents à un interrupteur normalement ouvert.

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



**Type à enrichissement**



**Type à déplétion**

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.

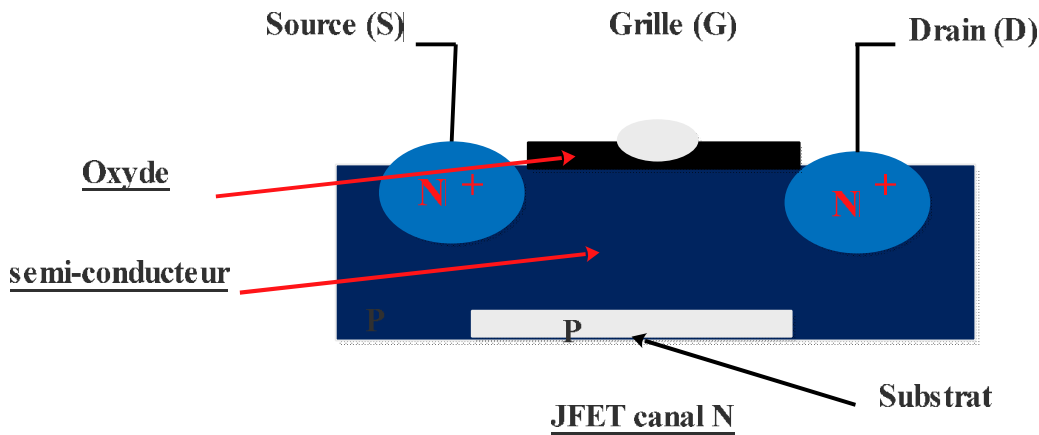
Dans les symboles ci-dessus, la ligne qui relie le drain à la source symbolise le canal. Si la ligne est continue alors il s'agit d'un transistor à « déplétion » (normalement conducteur) et si la ligne est discontinue il s'agit d'un transistor MOSFET à enrichissement (normalement bloqué). La direction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

### III.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.



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**.

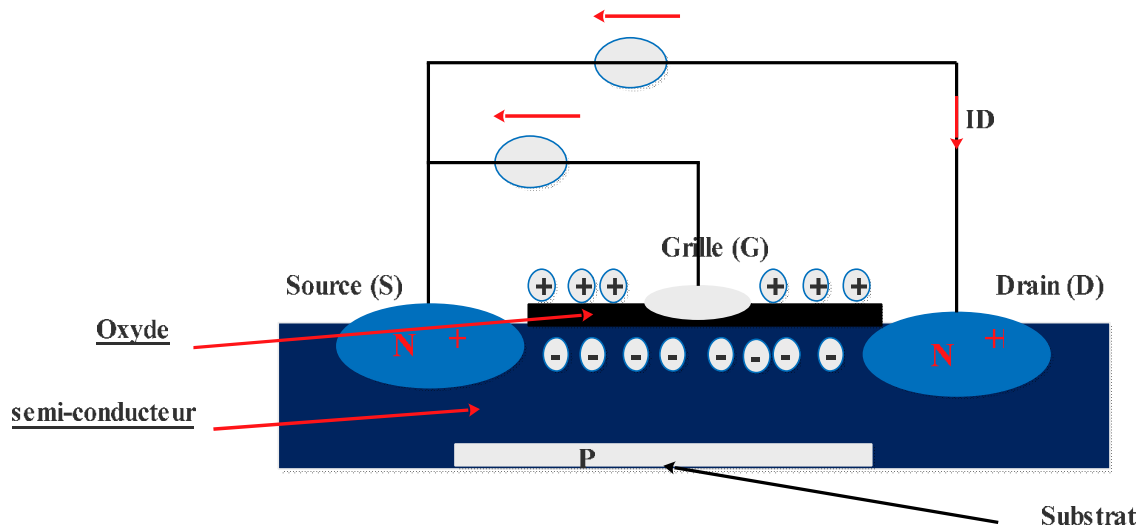
### III.3.3. Le MOSFET à enrichissement:

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 k $\Omega$ ! Le transistor est ainsi bloqué.

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. La tension positive va repousser les trous

hors du canal en attirant les électrons vers la couche d'oxyde. Le canal est ainsi formé et le courant peut circuler.

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

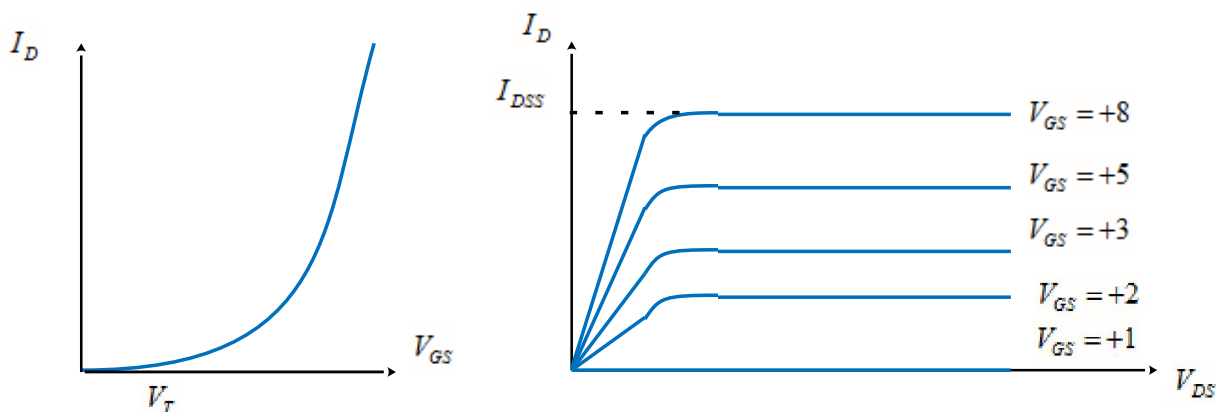


Formation du canal dans un MOSFET à enrichissement.

### III.3.4. Réseau caractéristiques de NMOS à Enrichissement

Le comportement d'un MOSFET à canal N peut être décrit par la fonction

$I_D = f(V_{GS}, V_{DS})$  avec une tension de seuil  $V_T$ , comme indiqué les caractéristiques ci-dessous:



Caractéristique du MOSFET à enrichissement canal N

Ces caractéristiques peuvent être divisées en trois régions :

**Région de blocage :** Lorsque  $V_{GS} < V_T$ , aucun courant ne traverse la source et le drain, en raison des deux jonctions PN, c'est-à-dire  $I_D = 0$ , indépendamment de  $V_{DS}$  Région de Triode (ohmique) :

Lorsque  $V_{GS} < V_T$  et  $V_{GD} = V_{GS} - V_{DS} > V_T$ , Certains électrons dans le substrat de type P (porteurs minoritaires) sont tirés vers la grille pour former une couche d'inversion proche de la grille pour former un canal de type N avec une certaine résistance entre S et D.  $I_D$  augmente linéairement comme  $V_{DS}$  augmente, avec un coefficient  $\frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D}$  et non linéairement avec  $V_{GS}$  augmente (pour tirer plus d'électrons vers la grille pour améliorer la conductivité du canal n, le courant  $I_D$  devient ensuite quadratique suivant l'équation :

$$I_D = 2K \left[ (V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{1}{2}V_{DS}^2 \right], \text{ K : paramètre de conduction}$$

**Région de saturation:**

Lorsque  $V_{GS} > V_T$  mais  $V_{DS}$  augmente encore, la tension  $V_{GD} = V_{GS} - V_{DS}$  entre la grille et le canal électronique près du drain devient petit et le canal électronique proche du drain se rétrécit. En particulier, lorsque la tension entre la grille et le drain est inférieure à la tension de seuil:

$$V_{GD} = V_{GS} - V_{DS} < V_T$$

Le canal électronique à l'extrémité drain est presque fermé (pincée) et  $I_D$  est saturé et maintenu à une valeur constante, même si  $V_{DS}$  augmente encore,  $V_{DS}$  plus élevé tend à attirer plus d'électrons vers le drain d'une part, mais aussi à améliorer l'effet de pincement sur l'autre. Maintenant,  $I_D$  n'est affecté que par  $V_{GS}$

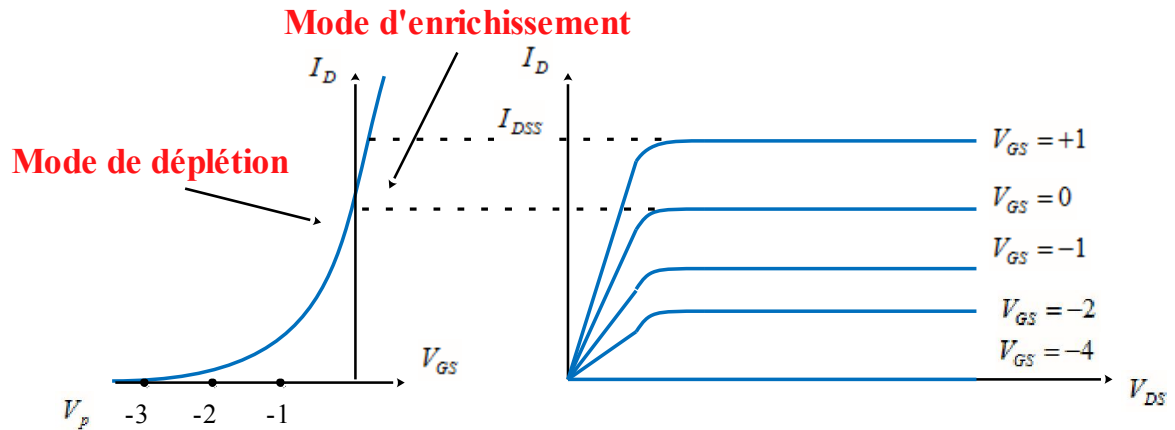
$$I_D = \begin{cases} 0 & \text{si } V_{GS} < V_T \\ K[V_{GS} - V_T]^2 & \text{si } V_{GS} > V_T, V_{GD} = V_{GS} - V_{DS} < V_T \end{cases}$$

**III.3.5.Le MOSFET à déplétion :**

Le MOSFET à déplétion est moins usuel que le MOSFET à enrichissement. Il est normalement conducteur 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

### Réseau caractéristiques de NMOS à appauvrissement



MOSFET à appauvrissement (ou à déplétion) peut être utilisé avec une grille positive ou négative. Lorsque la grille est positive par rapport à la source, elle fonctionne dans le mode enrichissement et lorsque la grille est négative par rapport à la source, comme illustré en figure ci-dessus, il fonctionne en déplétion.

Lorsque le drain est rendu positif par rapport à la source, un courant de drain s'écoulera, même avec un potentiel de zéro et le MOSFET fonctionnant en mode Enrichissement. Dans ce mode de fonctionnement, la grille attire les porteurs de charge négatifs du substrat P vers le canal N et réduit ainsi la résistance du canal et augmente le courant de drain. Plus la grille est positive, plus il y a de courant de drain.

D'autre part, lorsque la grille est rendue négative par rapport au substrat, la grille repousse certains des porteurs de charge négatifs hors du canal N. Cela crée une région d'appauvrissement dans le canal, comme illustré en figure ci-dessus, et augmente donc la résistance du canal et réduit le courant de drain. Plus la grille est négative, moins il y a de courant de drain. Dans ce mode de fonctionnement, le dispositif est appelé MOSFET en mode déplétion. Ici, trop de tension de grille négative peut pincer le canal. Ainsi, l'opération est similaire à celle de JFET.

**Remarque :** L'analyse d'un circuit MOSFET en mode d'appauvrissement est presque identique à celle d'un circuit JFET. La seule différence est l'analyse pour une grille positive.

**Merci pour votre compréhension**