

Résumé de cours M1 Microélectronique

Module : Physique des composants semi-conducteurs 1

Prof. Abdelhamid BENHAYA

Directeur du Laboratoire d'Electronique Avancée

Responsable Salle Blanche

Département d'Electronique

Faculté de Technologie

Université Batna 2

<https://youtu.be/6Fvg3Zb-7ec>

Domaines d'intérêt:

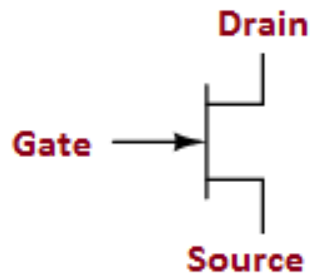
Technologie des semi-conducteurs

(Matériaux et dispositifs photovoltaïques)

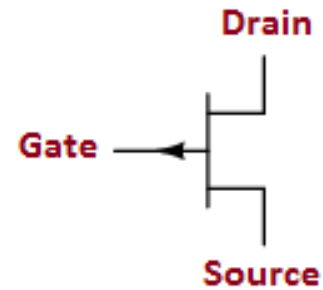
e-mail: a.benhaya@univ-batna2.dz
benhaya_abdelhamid@yahoo.fr

Tel: +213 (0)7 73 87 37 84

- 1: Drain
- 2: Source
- 3: Gate

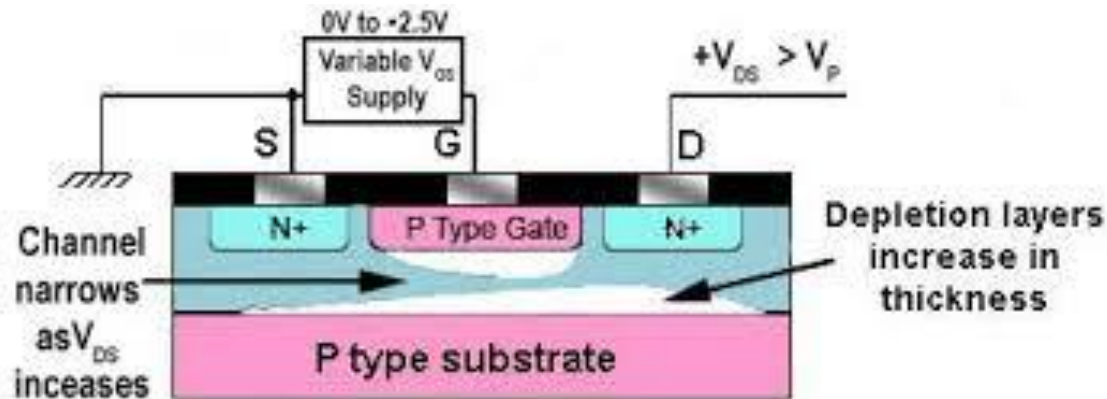


N-Type Channel



P-Type Channel

Transistor JFET



BIBLIOGRAPHIE

Langue Anglaise

1. Marius Grundmann, The Physics of Semiconductors, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
2. S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, JOHN WILEY & SONS, 2007.
3. Paul R. GREY, ROBERT G. MEYER, Paul J. Hurst and Stephen H. Lewis, Analysis and Design of Analog Integrated Circuits, John Wiley & Sons, 2001
4. <http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/contents.htm>
5. https://learnabout-electronics.org/fet_02.php

Langue Française

1. A. Vapaille et R. Castagné, Dispositifs et circuits semi-conducteurs, Physique et technologie, dunod, 1987.
2. CHRISTIAN ET HELENE NGÖ, Introduction à la physique des semi-conducteurs, Dunod, 1998.
3. H. MATHIEU, physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Dunod, 2001.
4. <https://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/>
5. <http://koeniguer.perso.cegetel.net/ips/ips.html>

Plan de l'exposé

Paramètres de base et structure d'un JFET;

- Définitions;
- Différents types de JFETs

Fonctionnement d'un JFET sans polarisation de la grille

- Evolution de la caractéristique $I(V)$

Fonctionnement avec polarisation de la grille;

- Evolution de la caractéristique $I(V)$

Modélisation en régime statique

- Hypothèses simplificatrices;
- Largeur de la ZCE;
- Caractéristique $I_D(V_{GS})$;
- Caractéristique de transfert;

Schéma équivalent d'un JFET

Transistor JFET

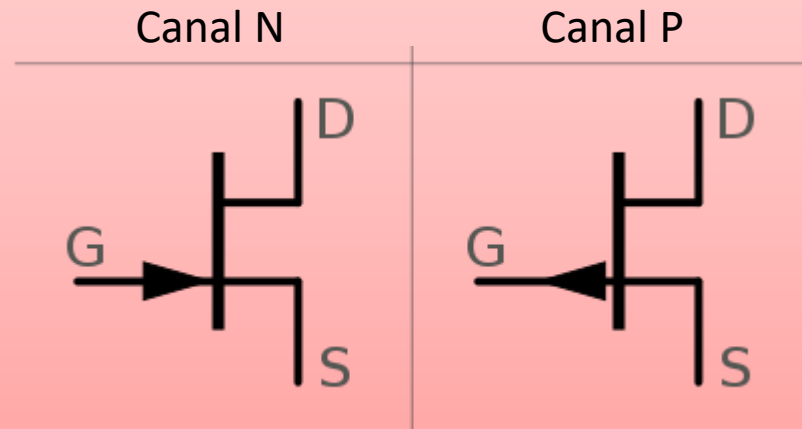
Paramètres de base et structure

Transistor JFET

Définition

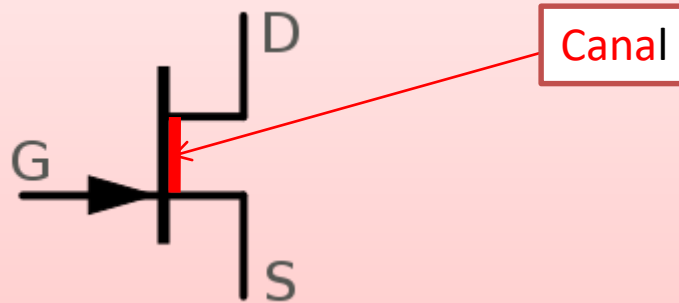
Un transistor FET (**Field effet transistor**) est un dispositif **unipolaire** (conduction **par électrons**, donc un FET à **canal n**; ou par **trous**, donc un FET à **canal p**).

Il est constitué de **trois pôles** : **la source (S)**, **le drain (D)** et **la grille (G)**.



Transistor JFET

Rôle des trois électrodes



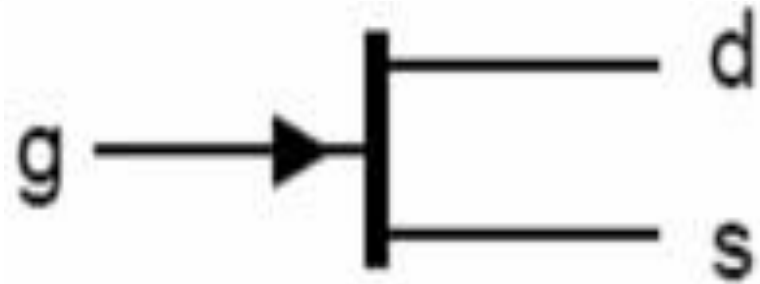
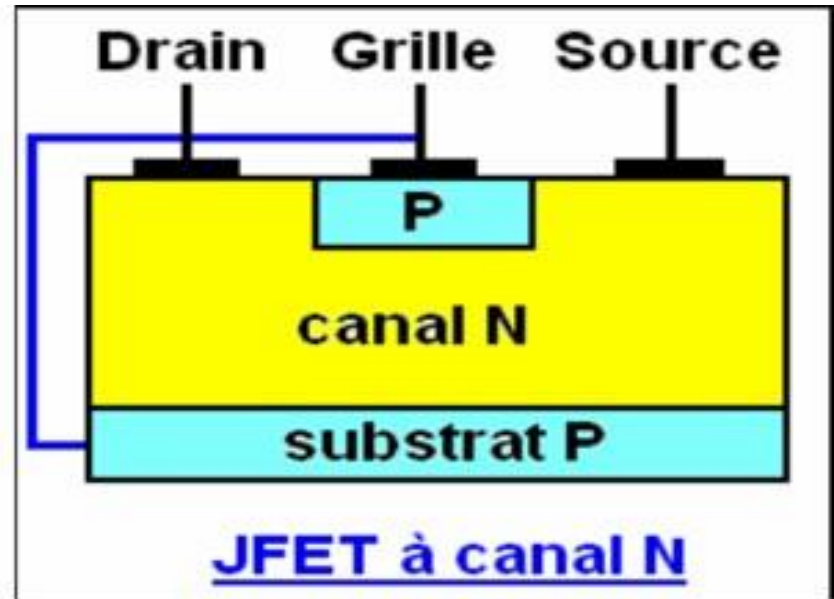
- une électrode qui injecte les porteurs dans la structure : **la source (S)**
- une électrode qui recueille les porteurs : **le drain (D)**
- une électrode où est appliqué la tension de commande : **la grille (G)**

N.B.: la partie de semi-conducteur située sous la grille est appelée le **canal**.

Transistor JFET

Structure d'un JFET à CANAL 'N'

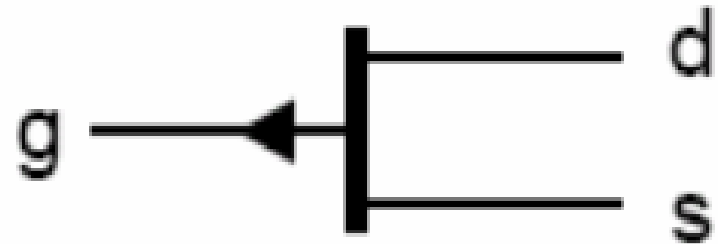
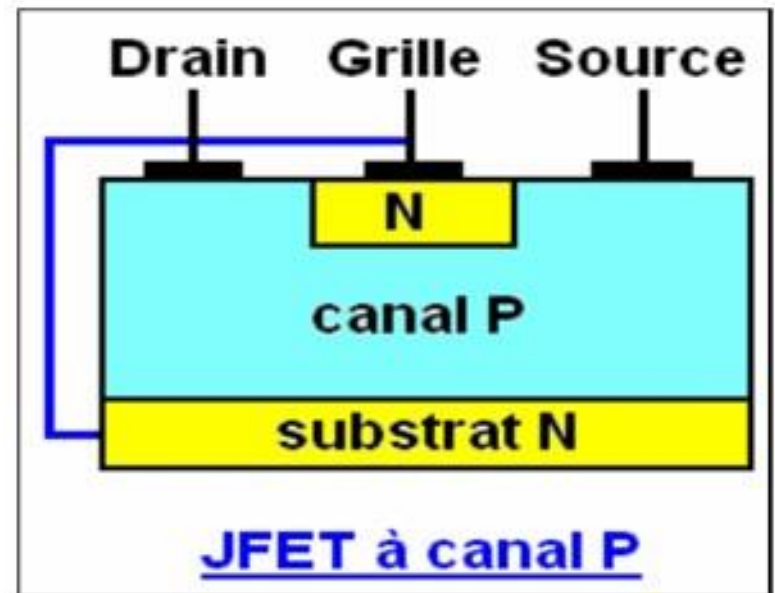
- **Le canal** est de **type 'N'**, la grille de **type P** (P⁺ sous la grille)
- **Porteurs** : **électrons** majoritaires d'un **Semi-conducteur 'N'**, traversent le canal de la **source** vers **le drain**.
- **Sens du courant** : drain ---> source, donc le **drain** est à un potentiel **positif** par rapport à la **source**.
- La **jonction grille-canal** polarisée en **inverse** donc la **grille doit être à un potentiel négatif** par rapport à la **source**.



Transistor JFET

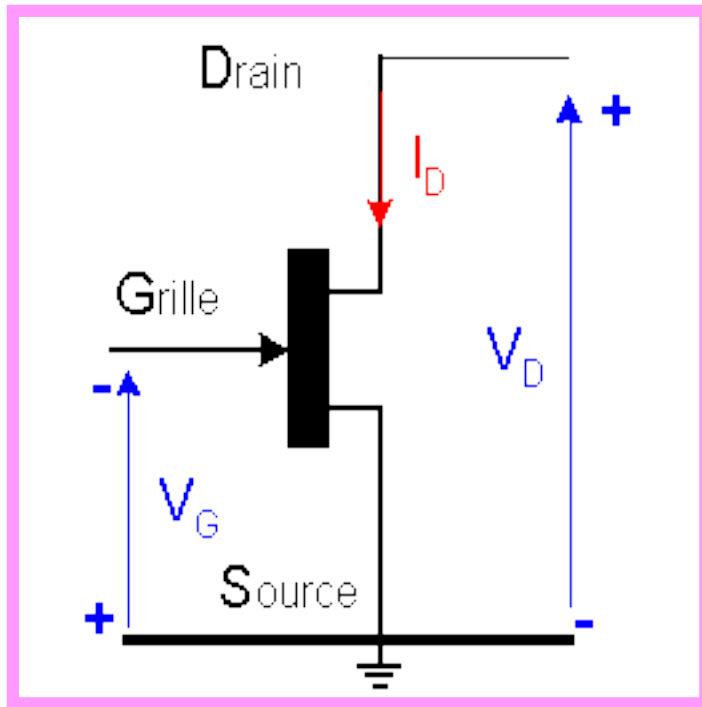
Structure d'un JFET à CANAL ' P '

- Le canal est de type 'P', la grille de type N (N⁺ sous la grille)
- Porteurs : **trous** majoritaires d'un Semi-conducteur 'P', traversent le canal de la **source** vers le **drain**.
- Sens du courant : source ---> drain, donc le **drain** est à un potentiel **négatif** par rapport à la source.
- La **jonction grille canal** polarisée en **inverse** donc **la grille doit être à un potentiel positif** par rapport à la source.

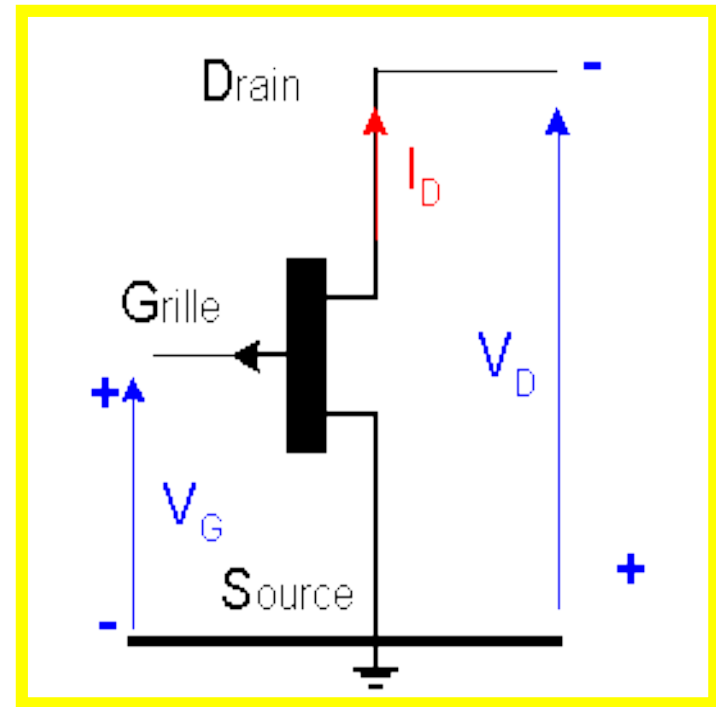


Transistor JFET

JFET CANAL ' N '



JFET CANAL ' P '



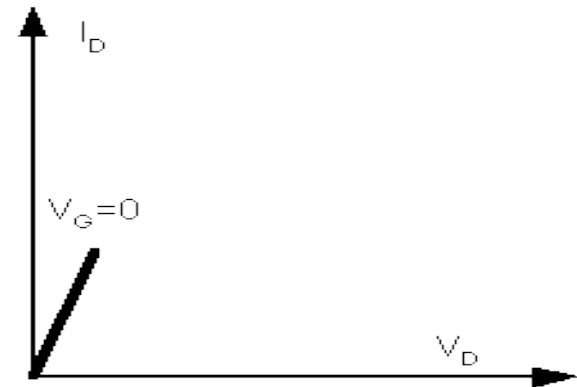
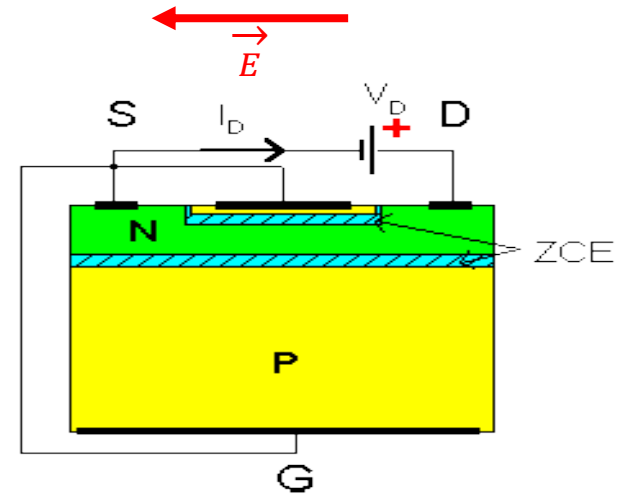
Transistor JFET

**Fonctionnement sans polarisation
de la grille**

Transistor JFET

Fonctionnement **sans polarisation de la grille** (grille et source à la masse)

- Pour les **faibles valeurs de la tension drain source**, le courant entre la source et le drain est faible. Le potentiel dans le canal est pratiquement le même de la source au drain.
- La grille est fortement dopée P, le canal est dopé N : la ZCE s'étend uniquement dans le canal et elle est d'épaisseur constante.
- Les porteurs peuvent circuler de la source vers le drain dans un canal d'épaisseur constante, donc la résistance entre source et drain est constante.
- Dans ces conditions (faible tension V_D), le courant drain I_D varie linéairement en fonction de la tension V_D .

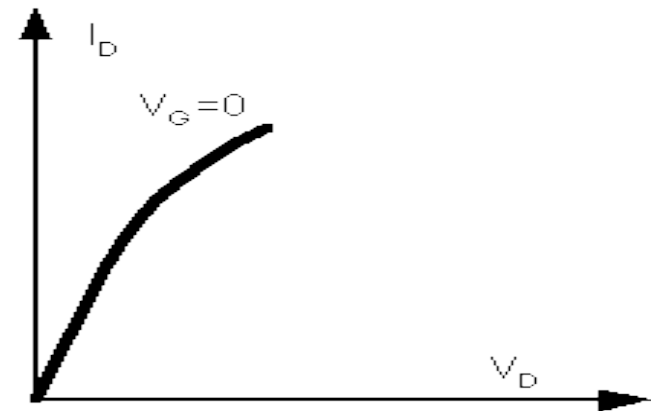
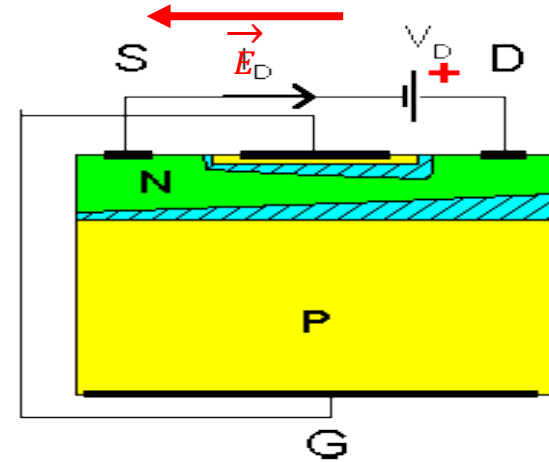


Pour les faibles tensions drain-source, le JFET se comporte comme une résistance constante.

Transistor JFET

Fonctionnement sans polarisation de grille (grille et source à la masse)

- Pour les **tensions drain source plus importantes**; le potentiel dans le canal est de plus en plus positif quand on se rapproche du drain.
- La jonction grille-canal est de plus en plus polarisée en inverse au fur et à mesure que l'on se rapproche du drain. Sa zone désertée s'étend de plus en plus dans le canal.
- Les porteurs circulent de la source vers le drain dans un canal dont l'épaisseur diminue au fur et à mesure que l'on se rapproche du drain.
- Dans ces conditions, le courant drain I_D ne varie plus linéairement en fonction de la tension V_D .

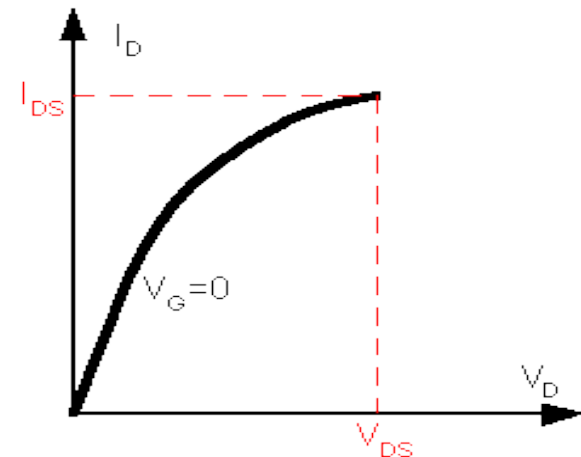
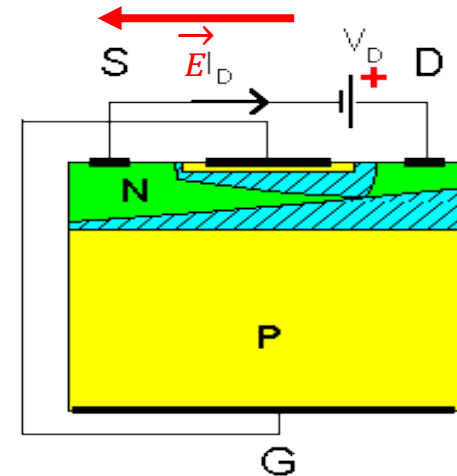


Pour des tensions drain-source notables, la caractéristique $I(V)$ n'est plus linéaire

Transistor JFET

Fonctionnement sans polarisation de grille (grille et source à la masse)

- Lorsque la **tensions drain source atteint une valeur particulière V_p (tension de pincement)** Les **deux ZCE** (celles des jonctions grille-canal supérieure et inférieure) **se rejoignent du côté drain**. Il y a **pincement du canal**.
- Ce phénomène intervient lorsque le potentiel dans le canal atteint une valeur particulière **V_{p0} : la tension interne de pincement**.
- Dans ces conditions, **le courant drain I_D atteint une valeur caractéristique: le courant de saturation I_{DS}** .

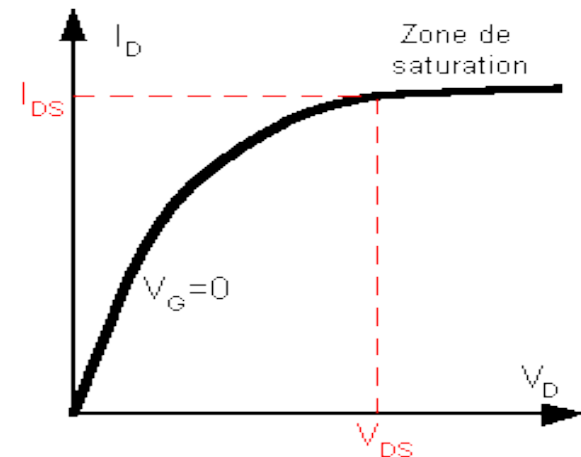
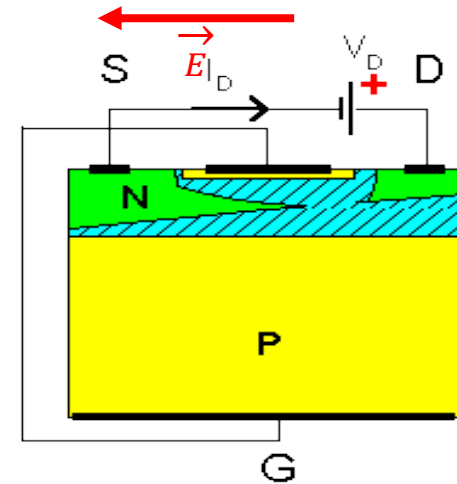


Pour une tension drain-source égale à la tension de pincement ($V_{DS} = V_p$), le courant atteint une valeur caractéristique du composant I_{DS} : courant de saturation.

Transistor JFET

Fonctionnement sans polarisation de grille (grille et source à la masse)

- Lorsque la tension drain-source $V_D > V_p$ (tension de pincement), le point de pincement progresse dans le canal en direction de la source. La tension entre le début et la fin de la zone entièrement désertée est : $V_D - V_p$. Compte tenu de la petite taille de cette zone entièrement désertée, il y règne un champ électrique longitudinal très intense.
- On pourrait penser que cette zone empêche les électrons d'atteindre le drain. Ce n'est pas le cas car la présence du champ électrique longitudinal propulse les électrons présents à l'entrée de la zone vers le drain.
- En conséquence, le courant drain est égal au courant créé par les électrons qui se présentent à l'entrée de la zone entièrement désertée donc il est constant et égal à I_{DS} .



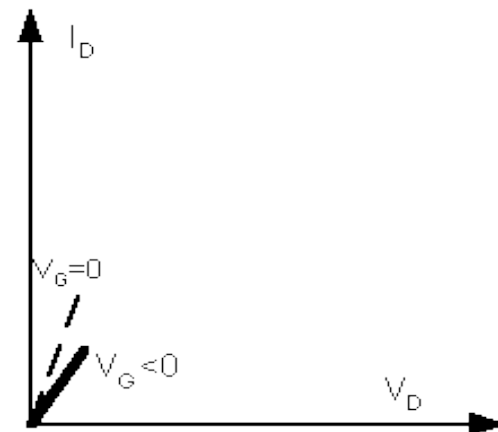
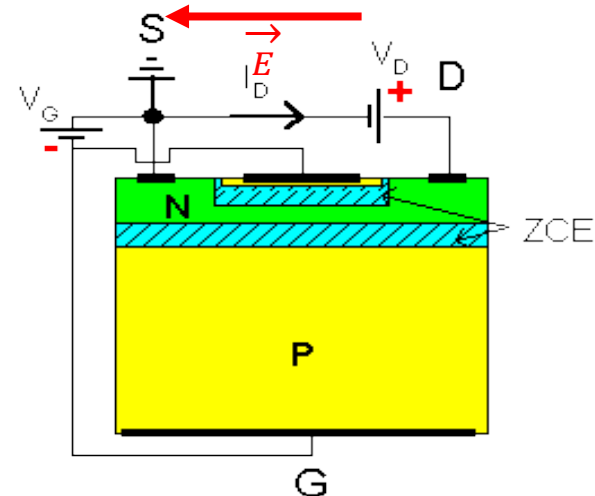
Transistor JFET

**Fonctionnement avec polarisation
de grille**

Transistor JFET

Fonctionnement avec polarisation de grille

- Pour un JFET à canal 'N', la grille doit être négative ($V_G < 0$) par rapport à la source donc au drain ($V_D > V_S$). Le courant grille est toujours insignifiant (c'est le courant traversant une jonction polarisée en inverse)
- Pour les faibles valeurs de la tension drain-source, la zone désertée a la même épaisseur tout le long du canal, ce dernier est de plus en plus étroit quand la tension grille devient de plus en plus négative.
- Les caractéristiques $I(V)$ sont linéaires. La résistance présentée par le composant devient de plus en plus grande quand la grille est de plus en plus négative par rapport à la source. Elle est égale à l'infini quand $V_G = -V_p$.



V_D faibles et $0 < V_G < V_p$ le JFET se comporte comme une résistance commandée en tension.

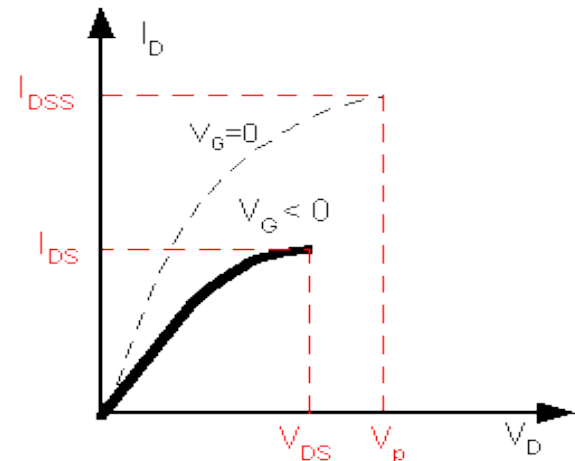
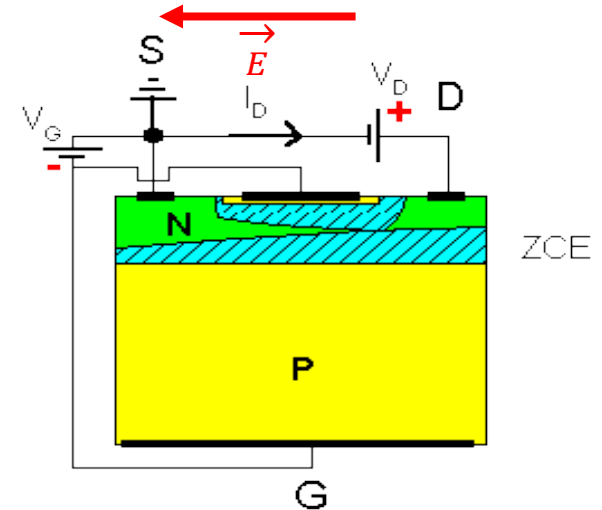
Transistor JFET

Fonctionnement avec polarisation de grille

- Pour les **tensions drain-source plus importantes**; la jonction grille canal est de plus en plus polarisée en inverse au fur et à mesure que l'on se rapproche du drain. Les porteurs circulent dans un canal de plus en plus étroit quand ils s'approche du drain.

Dans ces conditions , le **courant drain I_D ne varie plus linéairement** en fonction de la tension V_D .

- Pour une tension V_{DS} (**tension de saturation**) le phénomène de pincement apparaît et **le courant atteint sa valeur de saturation I_{DS}** . Mais cette valeur est inférieure à celle obtenue pour $V_G = 0$ que l'on notera I_{DSS} : **courant de saturation maximum**.

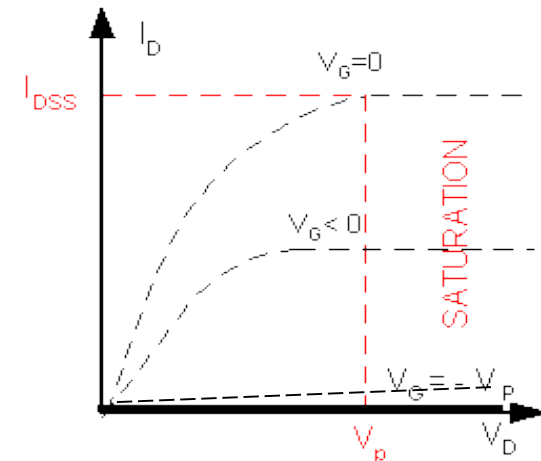
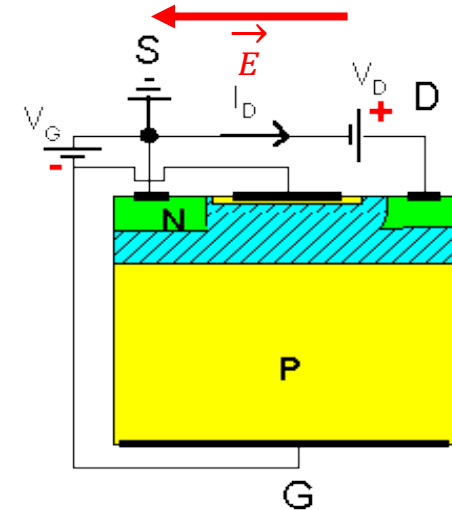


Pour des tensions drain-source notables, la caractéristique $I(V)$ n'est plus linéaire

Transistor JFET

Fonctionnement avec polarisation de grille

- pour $V_G = -V_p$ ou pour des valeurs plus négatives, les deux ZCE se rejoignent sur toute la partie du canal située sous la grille. Il n'y a plus aucun courant : on dit que le **JFET est bloqué**.
- La résistance entre la source et le drain est infinie et le composant peut être considéré comme un circuit ouvert.



Transistor JFET

Fonctionnement avec polarisation de grille

Utilisation du JFET en pratique

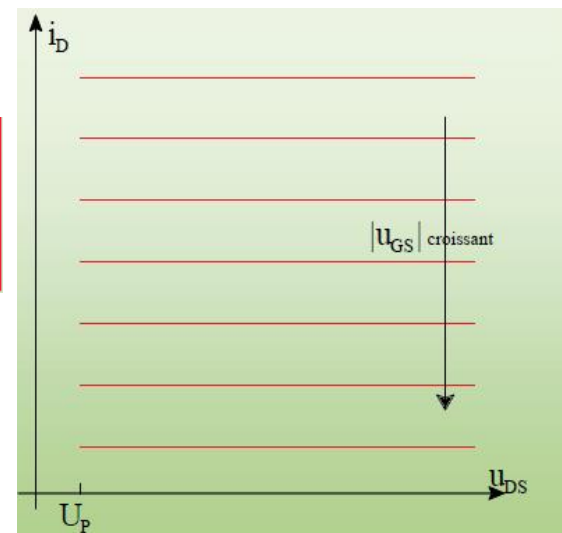
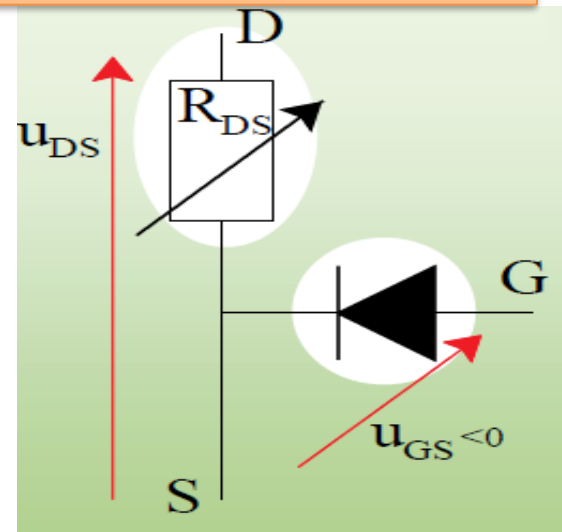
En pratique, on utilise le JFET dans deux modes bien distincts :

- *En zone linéaire où il sert de résistance commandée en tension.*
- *En zone de saturation où il peut être considéré comme un générateur de courant commandé par une tension.*

$$R_{DS} = \frac{R_{DS0}}{1 - \left| \frac{u_{GS}}{U_P} \right|}$$

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \left| \frac{u_{GS}}{U_P} \right| \right)^2$$

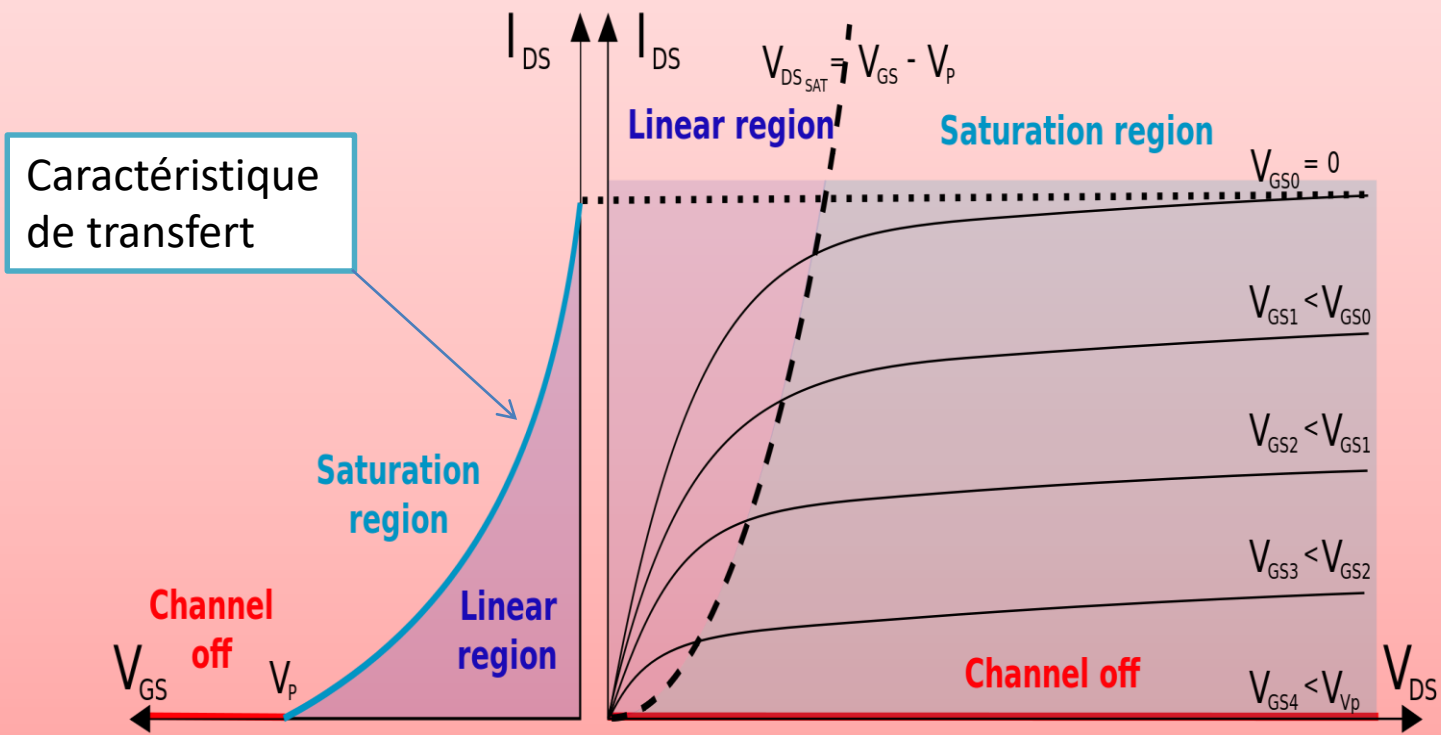
R_{DS0} : Résistance drain-source à $U_{GS} = 0$
 U_P : tension de pincement (1 à 10 V)



Transistor JFET

Fonctionnement avec polarisation de grille

Caractéristique I(V)



Transistor JFET

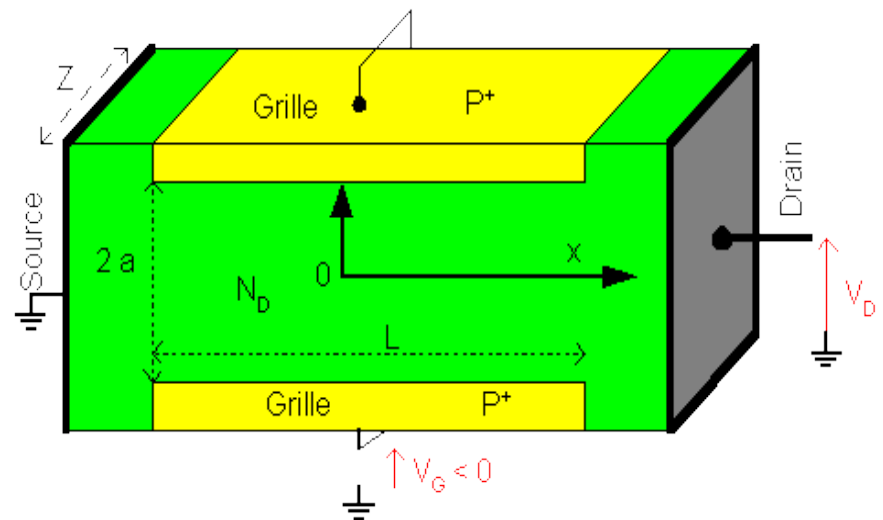
Modélisation en régime statique

Transistor JFET

Modélisation en régime statique

Hypothèses simplificatrices

- la longueur du canal (L) est au moins 2 fois plus importante que l'épaisseur ($2a$), on considère un JFET "long".
- les deux grilles sont identiques, de largeur Z et fortement dopées "P".
- les jonctions grille-canal sont supposées planes et abruptes.
- le dopage du canal est uniforme = N_D .
- la mobilité des porteurs dans le canal est constante et indépendante du champ électrique présent



Transistor JFET

Modélisation en régime statique

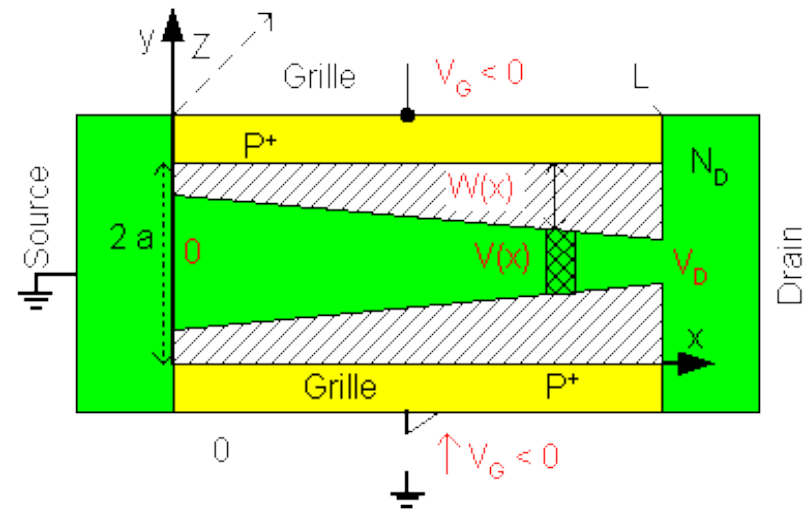
Largeur de la ZCE

- A cause de la tension drain-source, dans le canal, il existe un potentiel tel que : $V(0) = 0$ à la source, $V(L) = V_D$ au drain et à l'abscisse x : $V(x)$.
- De ce fait l'épaisseur W de la ZCE de chaque jonction n'est pas constante, en l'absence de tension grille elle vaut à l'abscisse x :

$$W(x) = \sqrt{\frac{2 \epsilon}{q} \frac{1}{N_D} (V_b + V(x))}$$

- V_b est la tension de barrière des 2 jonctions grille-canal supposées identiques.
- Si on applique une tension V_G sur chaque grille, l'épaisseur devient :

$$W(x) = \sqrt{\frac{2 \epsilon}{q} \frac{1}{N_D} (V_b + V(x) - V_G)}$$



Transistor JFET

Modélisation en régime statique

Caractéristique $I_D(V_{GS})$

La **résistance d'une tranche** de canal située à l'abscisse x et d'épaisseur dx est:

$$dR = \frac{1}{\sigma_n Z} \frac{dx}{2(a - w(x))} \quad \text{où} \quad \sigma_n = q N_D \mu_n \quad \text{Conductivité du canal}$$

Le **passage du courant I_D** dans cette tranche entraîne **une différence de potentiel** :

$$dV = I_D dR = \frac{I_D dx}{2 q N_D \mu_n Z (a - W(x))}$$

On intègre de $x = 0$ à $x = L$, l'expression $dV [a - W(x)]$, on obtient :

$$\int_0^{V_D} \left[a - \sqrt{\frac{2 \epsilon}{q} \frac{1}{N_D} (V_b + V(x) - V_G)} \right] dV = \int_0^L \frac{I_D}{2 q N_D \mu_n Z} dx$$

Si on pose

$$G_0 = \frac{2 q N_D \mu_n a Z}{L} \quad \text{Conductance du canal} \quad V_{p0} = \frac{q N_D a^2}{2 \epsilon} \quad \text{tension interne de pincement}$$

On obtient:

$$I_D = G_0 \left[V_D - \frac{2}{3 V_{p0}^{1/2}} \left((V_D + V_b - V_G)^{3/2} - (V_b - V_G)^{3/2} \right) \right]$$

Transistor JFET

Modélisation en régime statique

Caractéristique de transfert

Le **pincement du canal** survient pour **une tension drain-source** :

$$V_{Dsat} = V_{p0} - V_b + V_G$$

L'expression du **courant drain-source** devient dans ces conditions :

$$I_{Dsat} = \frac{G_0 V_{p0}}{3} + G_0 (V_b - V_G) \left[\frac{2}{3} \sqrt{\frac{V_b - V_G}{V_{p0}}} - 1 \right]$$

Cette relation exprime **la variation du courant de saturation** en fonction de la **tension grille**, c'est la caractéristique de transfert.

En pratique, on assimile souvent **la caractéristique de transfert** à une **parabole** donnée par **la relation empirique** :

$$I_D = I_{Dss} \left(1 - \frac{V_G}{V_P} \right)^2$$

Transistor JFET

Modélisation en régime statique

Zones linéaires de la caractéristique statique.

Dans ce cas on a: $V_D \ll V_b - V_G$ et effectuer le développement :

$$(V_D + V_b - V_G)^{3/2} = (V_b - V_G)^{3/2} + 3/2 (V_b - V_G)^{1/2} V_D + \dots$$

en l'appliquant à la relation:

$$I_D = G_0 \left[V_D - \frac{2}{3 V_{p0}^{1/2}} \left((V_D + V_b - V_G)^{3/2} - (V_b - V_G)^{3/2} \right) \right]$$

On obtient:

$$I_D = G_0 \left[1 - \sqrt{\frac{V_b - V_G}{V_{p0}}} \right] V_D$$

Conclusions: Cette relation montre que:

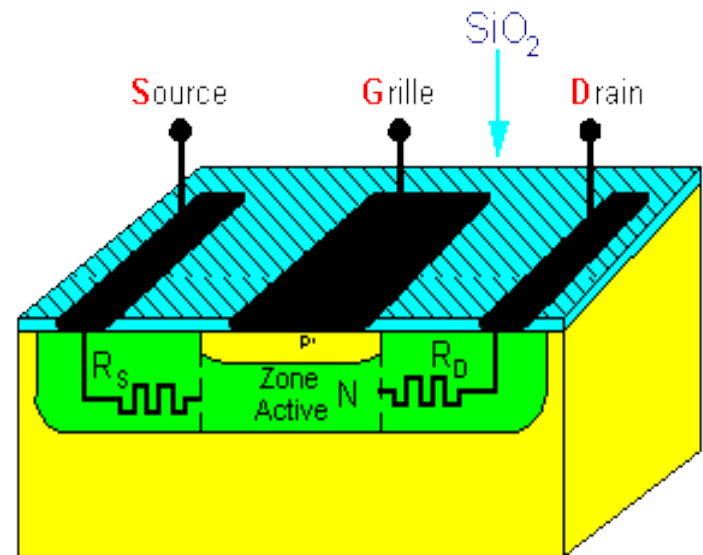
- I_D varie **linéairement** en fonction de V_D (région linéaire).
- $I_D = G(V_G) \cdot V_D$: On voit que plus **la tension grille devient négative**, plus **la conductance diminue**. Le composant se comporte comme **une résistance commandée en tension**.
- Quand $V_b - V_G = V_{p0}$, **la résistance** drain-source est devenue **infinie**, le canal **est fermé**.

Transistor JFET

Modélisation en régime statique

Résistances d'accès

- La partie du canal qui est sous l'influence de l'action de la grille s'appelle zone active.
- L'épaisseur de semi-conducteur entre les contacts de drain et de source et la zone active introduit des résistances constantes (non affectées par la tension grille) appelées résistances d'accès (R_S : résistance d'accès de source, R_D résistance d'accès de drain).
- Dans les régions linéaire, R_S et R_D augmente la valeur de la résistance drain source.
- Dans les régions de saturation, la contribution de R_D est faible, mais celle de R_S est importante (réduction du courant drain et cherche à la minimiser au maximum).



Régimes de fonctionnement

fonctionnement en régime petit signal.

Il faut distinguer deux modes de fonctionnement différents :

- **Régime statique**

Les grandeurs électriques envisagées (courant, tension) sont toutes continues (statiques) et repérées par des majuscules : (exemple : tension drain-source V_{DS} , courant drain I_D).

- **Régime dynamique**

Les grandeurs électriques envisagées dépendent du temps (exemple : tension drain-source $V_{DS}(t)$, courant drain $I_D(t)$).

N.B.: Un régime dynamique particulier est le *régime petit signal* (électronique linéaire) où les grandeurs électriques sont formées par une valeur statique plus une petite variation dynamique autour de cette valeur :

$$V_{DS}(t) = V_{DS} + v_{DS}(t) = V_{DS} + V_{DS} \sin(t) \text{ (cas d'un régime sinusoïdal)}$$
$$I_D(t) = I_D + i_D(t) = I_D + I_D \sin(t) \text{ (cas d'un régime sinusoïdal)}$$

Schéma équivalent d'un JFET

Régimes petits signaux en dynamique

1. Circuit d'entrée entre grille et source

r_{gs} : Résistance d'entrée ($\approx 10^{10}\Omega$) qui traduit la fuite d'une jonction en inverse.

r_s : résistance série entre le contact source et la région du canal ($\approx 50\Omega$).

C_{GS} : Capacité d'entrée (\approx pF) qui est la capacité d'une jonction en inverse.

2. Circuit de sortie entre drain et source

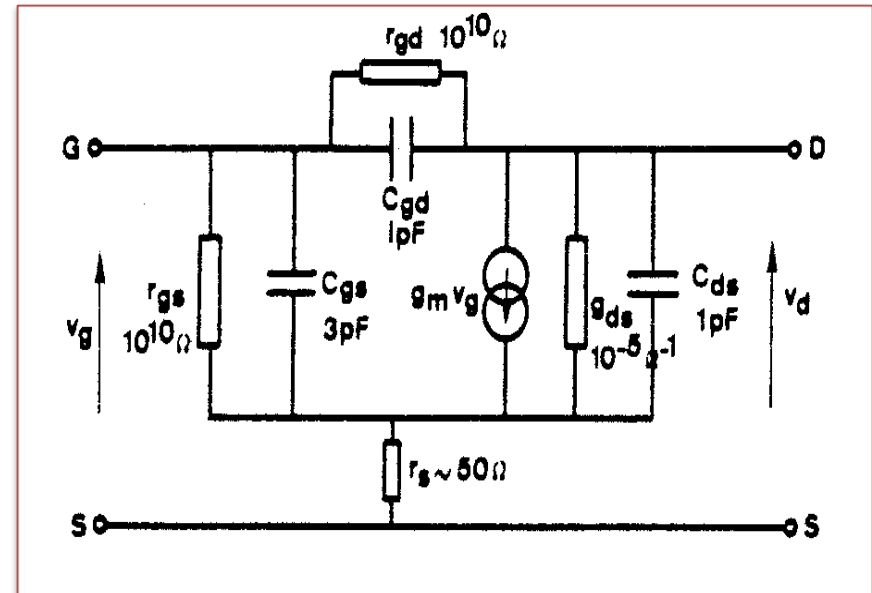
C_{ds} : Capacité de sortie (\approx pF)

$g_m V_{GS}$: Générateur de courant ($g_m \approx 10^{-3}\Omega^{-1}$).

g_{DS} : conductance de sortie ($g_{DS} \approx 10^{-5}\Omega^{-1}$ en saturation).

3. Élément de réaction entre grille et drain

r_{gd} et C_{GD} qui sont les éléments symétriques de r_{gs} et C_{GS} .



Pour plus de détails, voir Référence 3

Schéma équivalent d'un JFET

Expressions des grandeurs utiles

1. Transistor JFET

Comportement en grands signaux	
Grandeur	Expression
Courant de drain	$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 = \frac{I_{DSS}}{V_P^2} (V_P - V_{GS})^2$
Comportement faibles signaux en régime direct active	
Transconductance	$g_m = -\frac{2I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)$
Résistance de sortie	$r_o = \frac{1}{\lambda I_D}$
Capacité grille-source	$C_{gs} = \frac{C_{gs0}}{\left(1 + \frac{V_{GS}}{\Psi_c}\right)^{\frac{1}{3}}}$
Capacité grille-drain	$C_{gd} = \frac{C_{gd0}}{\left(1 - \frac{V_{GD}}{\Psi_0}\right)^{\frac{1}{3}}}$
Capacité grille-substrat	$C_{gss} = \frac{C_{gss0}}{\left(1 - \frac{V_{GSS}}{\Psi_0}\right)^{\frac{1}{2}}}$
Fréquence de transition	$f_T = \frac{1}{2\pi} \frac{g_m}{C_{gs} + C_{gd} + C_{gss}}$