



Cours 6 : Le transistor à effet de champ (FET)

Le FET

1. Le JFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Le FET

Le **transistor à effet de champ** (Field Effect Transistor, FET) est un transistor qui se base sur l'utilisation d'un champ électrique (dont l'origine est une tension) pour faire varier le courant le traversant.

On va parler dans ce cours de 2 transistors FET : le JFET et le MOSFET

Le FET

1. Le JFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Le JFET

Le FET

1. Le JFET

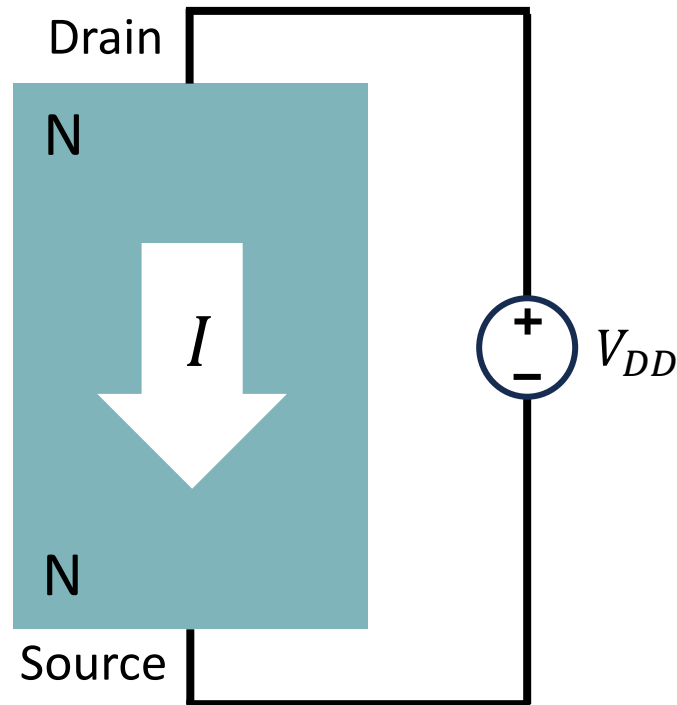
A. Principe de fonctionnement

- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Principe de fonctionnement



- La figure montre un échantillon d'un semi-conducteur dopé N. L'alimentation en tension V_{DD} entraîne les électrons libres dans le matériau de la **source** vers l'extrémité supérieure appelée **drain**. Le courant I (opposé par convention au sens de circulation des électrons) est alors maximal.
- A la différence d'un BJT, les porteurs de charges qui diffusent dans le matériau semi-conducteur sont de nature unique : les électrons dans le cas d'un FET canal N. (Rappel dans un BJT : les électrons ET les trous diffusent.)

Le FET

1. Le JFET

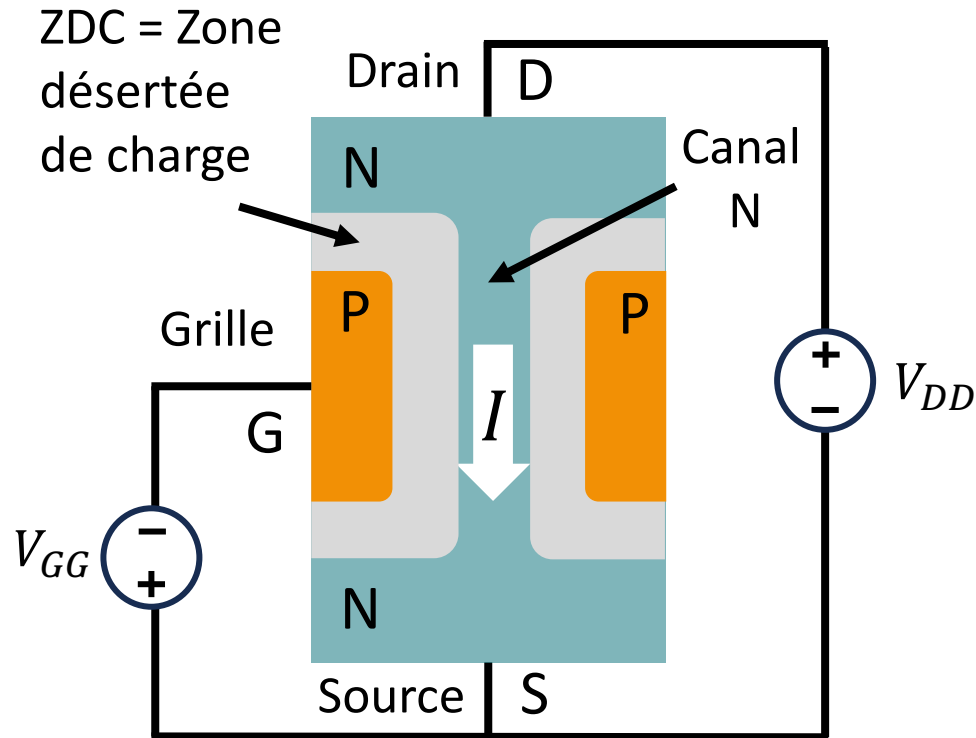
A. Principe de fonctionnement

- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Effet de champ



- Afin de pouvoir modifier le courant I , on cherche à **moduler les dimensions du canal**. Pour ce faire, on ajoute deux zones reliées entre-elles dopée P. Cela crée une jonction PN que l'on polarise en inverse pour créer une large ZDC grâce à deux tensions extérieures $V_{GS} < 0$ et $V_{DD} > 0$.
- L'expression « **effet de champ** » vient du fait qu'en modifiant le champ électrique (situé dans la ZDC) grâce aux tensions extérieures, on modifie la largeur du canal et donc la possibilité de faire passer, ou pas, le courant I dans ce canal. Cela revient à dire que « **les transistors FET sont commandés en tension** ».

Faire passer un courant ou l'en empêcher s'appelle faire de la commutation :

- Champ faible : les ZDC sont petites et donc canal ouvert ($I \neq 0$) : transistor passant.
- Champ fort : les ZDC sont tellement larges qu'elles se peuvent se toucher et dans ce cas le canal est alors fermé ($I = 0$) : transistor bloqué.

Le FET

1. Le JFET

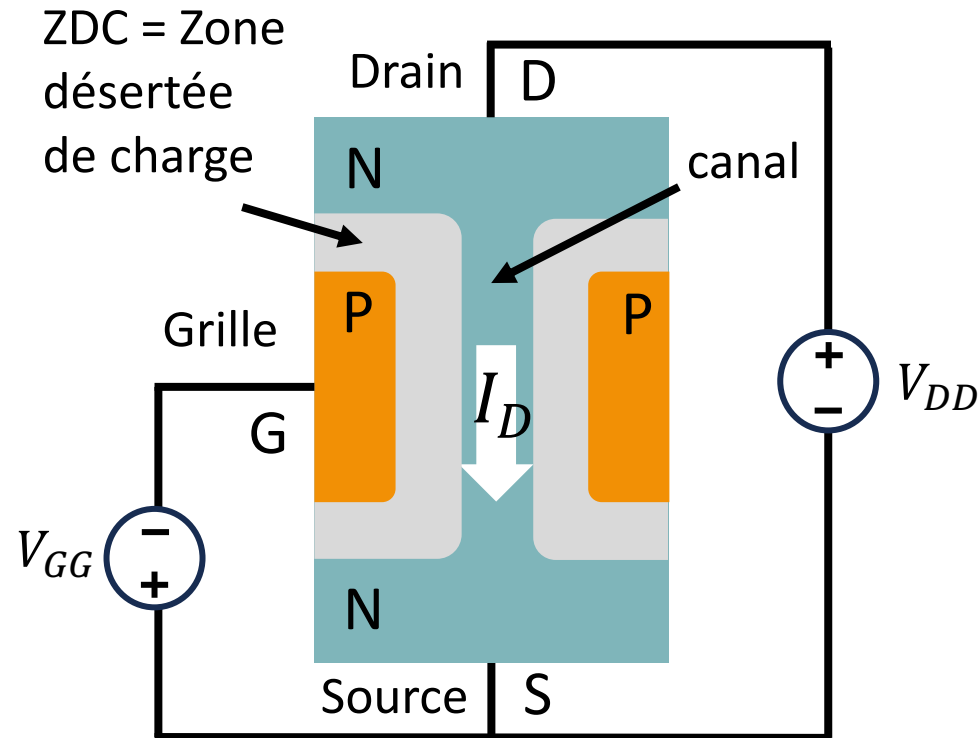
A. Principe de fonctionnement

- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Polarisation inverse de la grille



- Le courant I circulant dans le canal est ce qu'on appelle le **courant drain** noté à l'avenir I_D . Tout courant entrant dans le canal (I_D) est égal au courant sortant du canal (I_S). Donc $I_D = I_S$.
- Puisque la jonction Grille-Source est polarisée en inverse, on a tout le temps le courant grille $I_G \approx 0$

Le FET

1. Le JFET

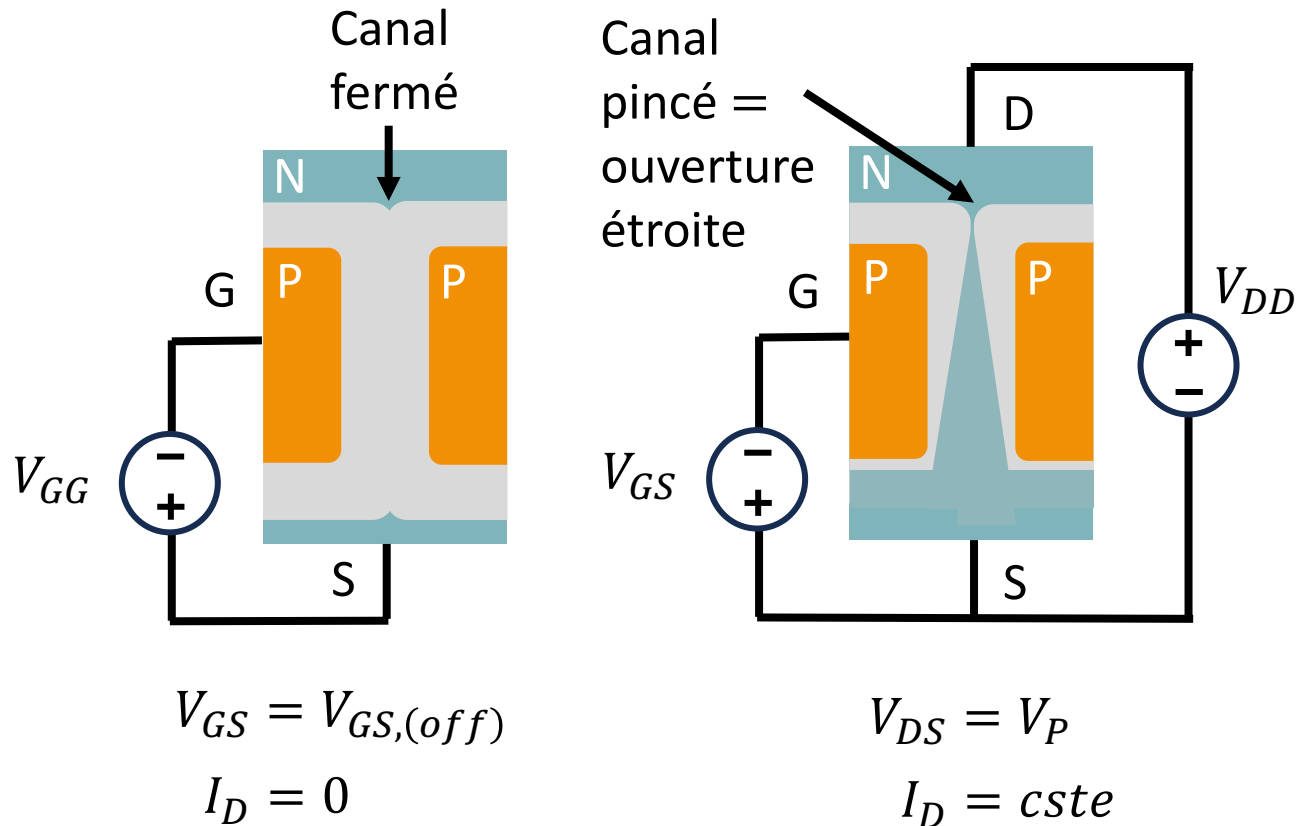
A. Principe de fonctionnement

- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Il est important de noter un point important : la différence entre **la tension de blocage $V_{GS,(off)}$** qui est la tension grille-source V_{GS} très négative à partir de laquelle le canal est complètement fermé et qui a pour conséquence qu'aucun courant drain ne circule ($I_D = 0$) et la **tension de pincement $V_P = V_{DS}$** pour laquelle le canal est très très étroit mais qui permet à partir de là une circulation constante du courant drain ($I_D = cste$).



- Lorsque V_{DS} augmente le canal se rétrécit et se déforme du côté du drain car la ZDC est plus forte de ce côté à cause du « + » de V_{DD} .
- Ce rétrécissement est compensé par une dérive plus forte des électrons libres au niveau du pincement. Un champ électrique vertical important accélère les e^- .
 \Rightarrow Il en résulte non pas $I_D \rightarrow 0$ mais $I_D = cste$

Le FET

1. Le JFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Inconvénients de l'impédance d'entrée très élevée

Dire que le courant grille $I_G \approx 0$ revient à dire que **l'impédance d'entrée est presque infinie** (plusieurs centaines de mégaOhms). C'est un avantage par rapport au BJT. Mais si cette impédance élevée est une caractéristique qui en fait un excellent choix pour des applications sensibles où le signal d'entrée est faible, comme les capteurs et les amplificateurs d'instruments, il présente aussi des inconvénients :

- **Augmentation de la sensibilité au bruit thermique** : Bien que le FET soit moins sensible au bruit de courant dû à son très faible courant d'entrée (on parle là du courant de grille $I_G \approx 0$), la forte impédance d'entrée amplifie le bruit de tension thermique (bruit Johnson), généré naturellement par l'agitation thermique des porteurs de charges à l'intérieur du semi-conducteur en équilibre thermique.
- **Sensibilité accrue aux charges parasites** : Avec une impédance d'entrée élevée, le circuit est beaucoup plus réceptif aux charges électrostatiques et aux variations du champ électrique. **Cela peut induire du bruit dans le signal, affectant la qualité de la transmission.**

Le FET

1. Le JFET

A. Principe de fonctionnement

B. Symboles

C. Caractéristiques

D. Polarisation

E. Régime dynamique

F. Commutation

G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

A. Principe de fonctionnement

B. Symboles

C. Doc technique

D. Caractéristiques

E. Polarisation

F. JFET VS MOSFET

EXERCICE : 1. Extraire de la Datasheet du JFET 2N5486 la valeur du courant grille à la température de 25°C pour une tension $V_{GS} = -20\text{V}$.
2. En déduire la valeur de l'impédance d'entrée de ce JFET.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^{\circ}\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic		Symbol	Min	Typ	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS						
Gate–Source Breakdown Voltage	($I_G = -1.0\text{ }\mu\text{Adc}$, $V_{DS} = 0$)	$V_{(BR)GSS}$	-25	–	–	Vdc
Gate Reverse Current	($V_{GS} = -20\text{ Vdc}$, $V_{DS} = 0$)	I_{GSS}	–	–	-1.0	nAdc
	($V_{GS} = -20\text{ Vdc}$, $V_{DS} = 0$, $T_A = 100^{\circ}\text{C}$)		–	–	-0.2	μAdc
Gate Source Cutoff Voltage	($V_{DS} = 15\text{ Vdc}$, $I_D = 10\text{ nAdc}$)	$V_{GS(off)}$	-2.0	–	-6.0	Vdc

1. Le courant grille est égal à $I_G = 1\text{nA}$, à 25°C
2. L'impédance d'entrée est directement donnée par la loi d'Ohm :

$$R_{in} = \frac{V_{GS}}{I_G} = \frac{20}{1 \times 10^{-9}} = 20\,000\text{M}\Omega$$

Conformément aux attentes, cette valeur est extrêmement élevée.

Le FET

1. Le JFET

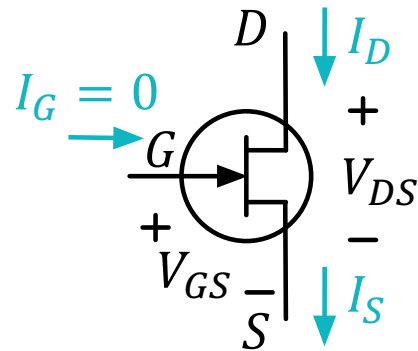
- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Symboles

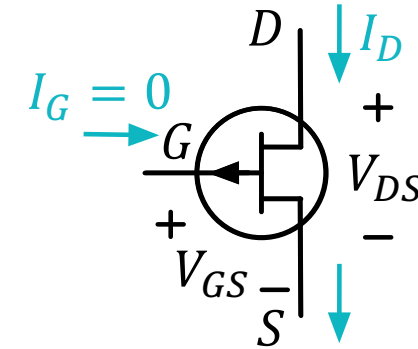
JFET à canal N



$$\begin{aligned} V_{GS} &< 0 \\ V_{DS} &> 0 \\ I_D &> 0 \end{aligned}$$

Les électrons libres circulent de la source vers le drain

JFET à canal P



$$\begin{aligned} V_{GS} &> 0 \\ V_{DS} &< 0 \\ I_D &< 0 \end{aligned}$$

Les trous circulent de la source vers le drain

Le FET

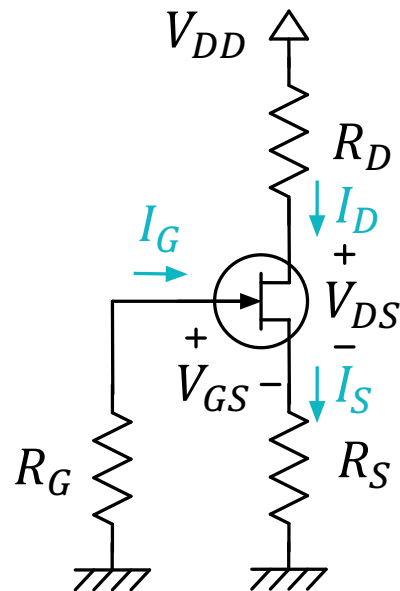
1. Le JFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

EXERCICE : Calculer V_{DS} et V_{GS} pour un courant drain : $I_D = 5 \text{ mA}$
On donne : $R_G = 10 \text{ M}\Omega$, $R_D = 1 \text{ k}\Omega$, $R_S = 220 \Omega$ et $V_{DD} = 15 \text{ V}$

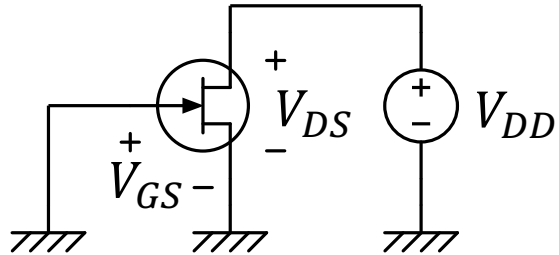


- Potentiel au point D : $V_D = V_{DD} - R_D I_D = 10 \text{ V}$
- Courant source I_S :
C'est le courant du canal, donc $I_S = I_D = 5 \text{ mA}$
- Potentiel V_S à la source : $V_S = R_S I_S = 1,1 \text{ V}$
- Tension V_{DS} : **$V_{DS} = V_D - V_S = 8,9 \text{ V}$**
- Potentiel V_G à la grille
Le courant grille étant approximativement égal à zéro, cela implique que $V_G = R_G I_G \approx 0 \text{ V}$
- Tension V_{GS} : **$V_{GS} = V_G - V_S = -1,1 \text{ V}$**
On remarque au passage que $V_{GS} < 0$ ce qui est bien conforme à une polarisation inverse de la jonction PN entre la grille et la source.

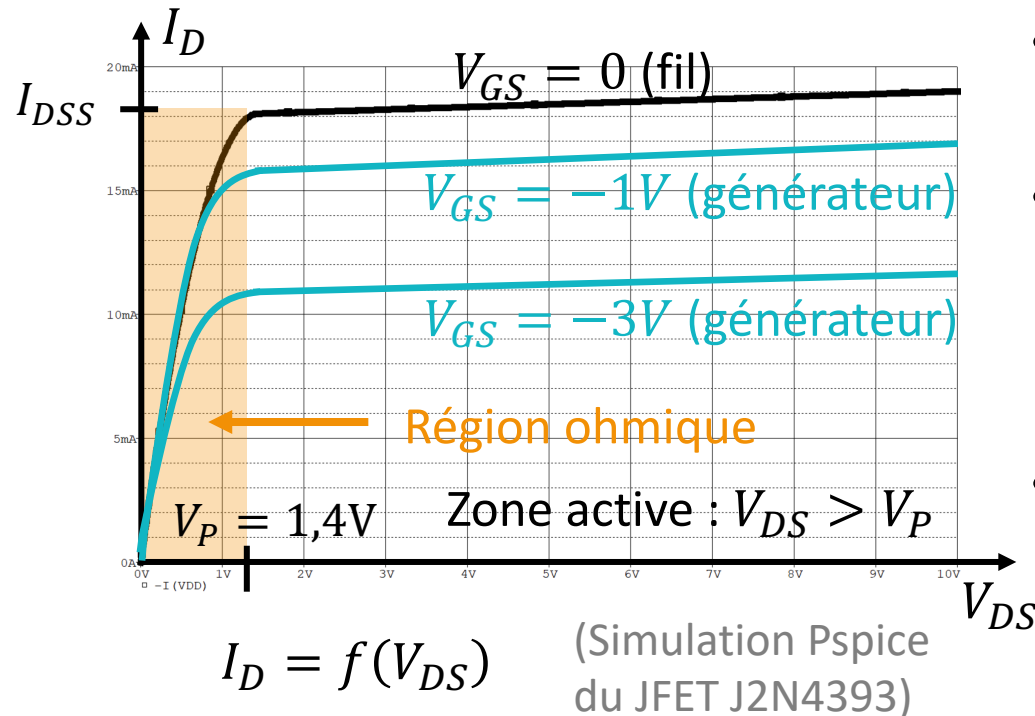
Le FET

Caractéristiques

Comme dit précédemment, pour avoir un courant drain maximal I_{DSS} il faut que le canal soit le plus large possible. Pour cela il suffit d'avoir $V_{GS} = 0$, c'est-à-dire il faut relier la grille à la source par un fil.



A partir de ce moment on augmente la tension V_{DS} en augmentant la tension extérieure V_{DD} . Forcément le courant drain I_D augmente.



- Jusqu'à la tension de pincement notée V_P le courant augmente lorsque V_{DS} augmente.
- Lorsque la tension de pincement est atteinte le courant est maximal et à peu près constant. On le nomme $I_D = I_{DSS}$. Ici $I_{DSS} = 18,5mA$ et $V_P = 1,4V$
- On définit la résistance ohmique du JFET :

$$R_{DS} = \frac{V_P}{I_{DSS}} = 76\Omega$$

Le FET

1. Le JFET

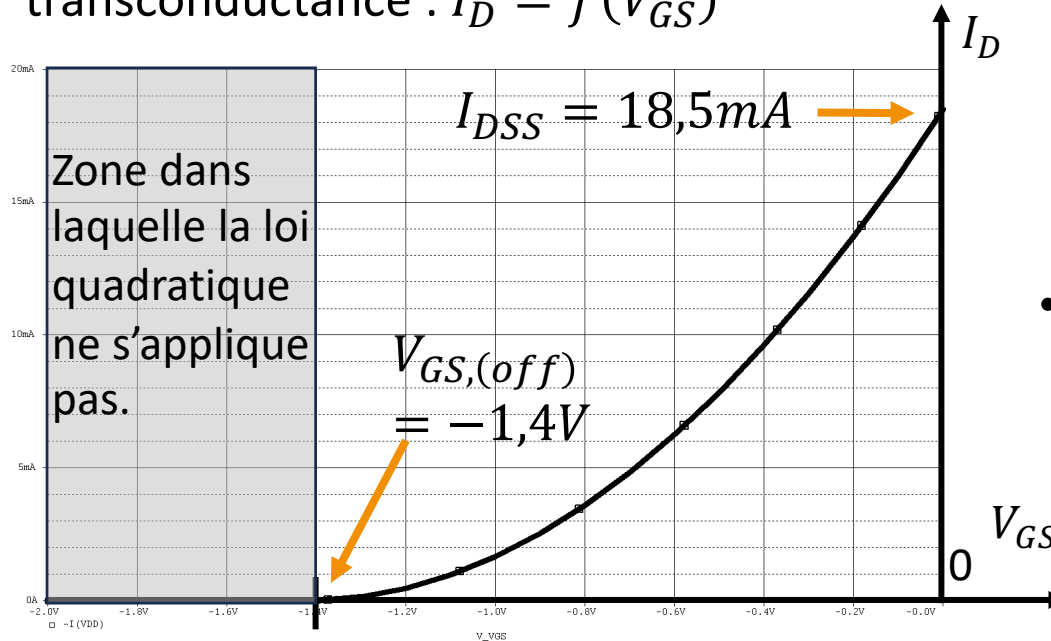
- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Caractéristiques

Caractéristique de transfert ou courbe de transconductance : $I_D = f(V_{GS})$



(Simulation Pspice du JFET J2N4393)

Ce n'est pas une coïncidence que ces deux tensions soient égales, effectivement, c'est la valeur pour laquelle les deux zones désertées se rejoignent. Les datasheets ne donnent jamais V_P mais donnent toujours $V_{GS(off)}$

- L'équation de la caractéristique $I_D = f(V_{GS})$ montre une courbe obéissant à une loi quadratique en régime actif :

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

- On remarque que la tension de blocage $|V_{GS(off)}| = |-1,4V| = 1,4V$ est la même valeur que la tension de pincement $V_P = 1,4V$ lue précédemment sur la caractéristique $I_D = f(V_{DS})$

		min		max	
$V_{GS(off)}$	Gate-Source Cutoff Voltage	$V_{DS} = 20 V, I_D = 1.0 nA$			
		4391	- 4.0	- 10	V
		4392	- 2.0	- 5.0	V
	Datasheet du JFET J2N4393	4393	- 0.5	- 3.0	V

Le FET

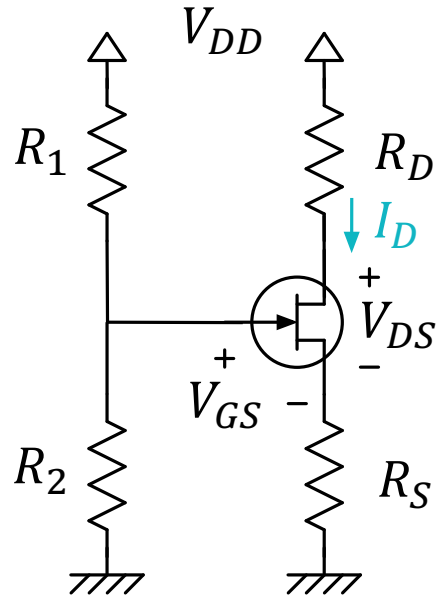
1. Le JFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Polarisation par diviseur de tension

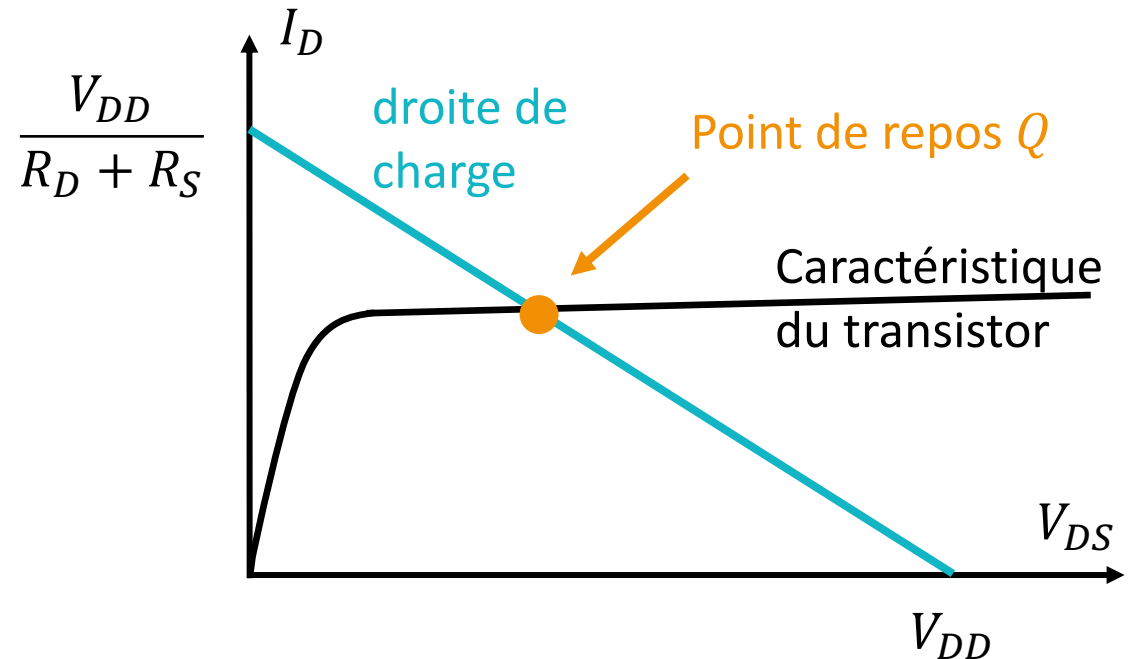


La maille drain donne instantanément :

$$V_{DD} = (R_D + R_S)I_D + V_{DS}$$

D'où l'équation de la droite de charge : $I_D = f(V_{DS})$

$$I_D = -\frac{1}{R_D + R_S} V_{DS} + \frac{V_{DD}}{R_D + R_S}$$



Le FET

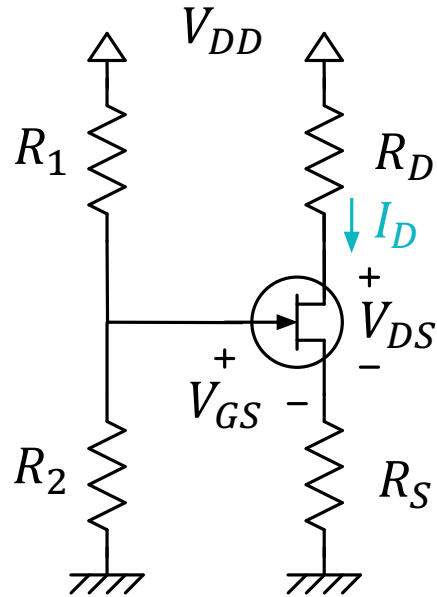
1. Le JFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Polarisation par diviseur de tension



EXERCICE : Calculer les coordonnées du point de repos Q (V_{DS} et I_D) avec $I_{DSS} = 8 \text{ mA}$

On donne : $R_1 = 2,1 \text{ M}\Omega$, $R_2 = 270 \text{ k}\Omega$, $R_D = 2,4 \text{ k}\Omega$,
 $R_S = 1,5 \text{ k}\Omega$, $V_{DD} = 24 \text{ V}$, $V_{GS(off)} = -4 \text{ V}$

$$V_{Th} = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} V_{DD} = \mathbf{2,734 \text{ V}} \quad R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \mathbf{239,2 \text{ k}\Omega}$$

$$I_D = I_S \Rightarrow I_D = \frac{V_{Th} - V_{GS}}{R_S} \quad (1) \quad \text{On ne connaît pas } V_{GS} !$$

$$\text{La fonction de transfert donne : } I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(Off)}} \right)^2 \quad (2)$$

L'égalité des deux expressions (1) et (2) de I_D donne une équation du second degré en V_{GS}

Les solutions sont : $V_{GS1} = -7,736 \text{ V}$ et $V_{GS2} = -1,597 \text{ V}$

On retient uniquement V_{GS2} car $V_{GS2} > V_{GS(off)} \Rightarrow V_{GS} = \mathbf{-1,597 \text{ V}}$

- (1) donne $I_D = \mathbf{2,887 \text{ mA}}$

- La maille drain donne $V_{DS} = V_{DD} - (R_D + R_S)I_D = \mathbf{12,74 \text{ V}}$

1. Le JFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Régime dynamique – la transconductance

- La transconductance, nommée g_m est un paramètre clé dans la conception et l'analyse d'un JFET. Elle est définie par :

$$g_m = \left(\frac{dI_D}{dV_{GS}} \right)_{V_{DS}=cste}$$

Autrement dit, g_m est la pente de la courbe de transfert $I_D = f(V_{GS})$.
Unité : le Siemens S

- Elle mesure la qualité du contrôle du courant drain I_D par la tension grille-source V_{GS} . Plus elle est importante, meilleur est le contrôle du courant drain par V_{GS} .

EXERCICE : Supposons qu'un JFET ait une transconductance g_m de $5000\mu S$ (ou $5mS$) et qu'on lui applique une variation de $1V$ de V_{GS} . Calculer la variation de courant drain correspondante.

$$\Delta I_D = g_m \Delta V_{GS} \Rightarrow \Delta I_D = 5 \times 10^{-3} \times 1 = 5mA$$

Ainsi une variation de 1 volt au niveau de la tension grille-source entraîne une variation de $5mA$ du courant drain I_D .

Le FET

1. Le JFET

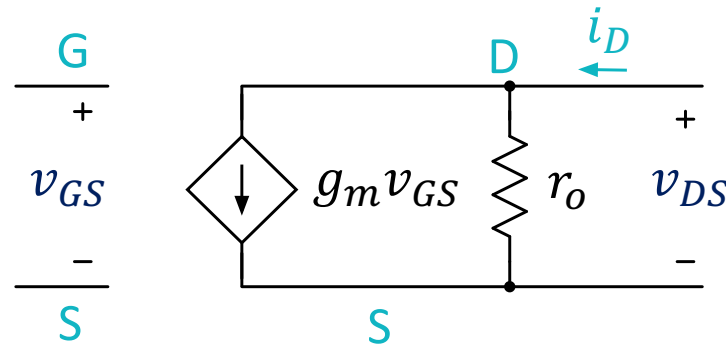
- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Régime dynamique – Modèle équivalent BF

- A l'instar du BJT, nous pouvons remplacer le schéma du JFET par son modèle équivalent pour des petits signaux.



R_o n'ayant qu'un impact faible dans les calculs sera omis sauf avis contraire dans un exercice.

- A partir de l'expression de $I_D = f(V_{GS})$ donnée précédemment, on dérive I_D par rapport à V_{GS} et on trouve l'expression de la transconductance :

$$g_m = \frac{2I_{DSS}}{|V_P|} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)$$

Le FET

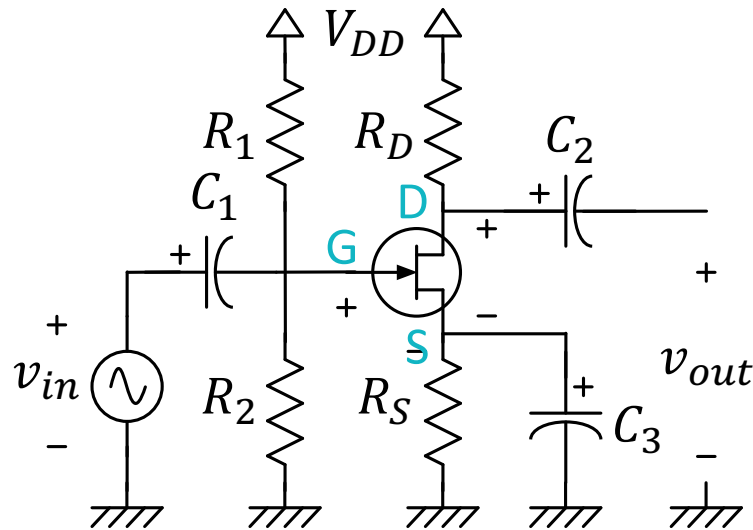
1. Le JFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

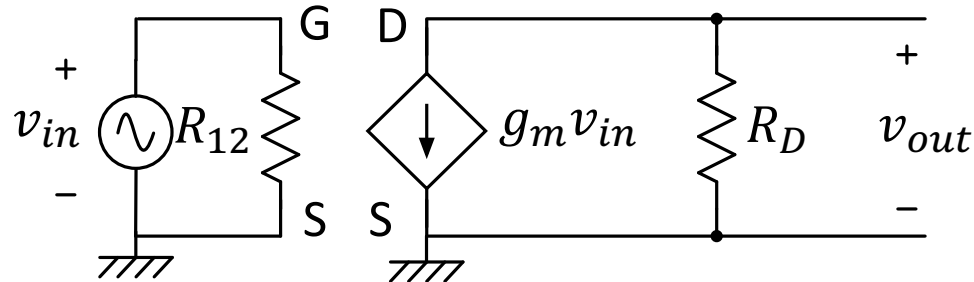
- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Régime dynamique – Ampli source commune



- Les condensateurs de liaison C_1 et C_2 et le condensateur de découplage C_3 sont des fils en AC.
- C_1 étant un fil, le signal d'entrée v_{in} attaque directement la grille, de plus $v_{in} = v_{GS}$ car C_3 est un fil.
- L'impédance d'entrée R_{GS} du transistor tendant vers l'infini ne sera pas mise sur le schéma.

D'où le schéma équivalent en AC



$$Z_{in} = R_{12} = R_1 // R_2$$

$$Z_{out} = R_D$$

$$\Rightarrow v_{out} = -R_D g_m v_{in}$$

D'où l'expression du gain en tension, à vide (c'est-à-dire sans la charge R_L)

$$A_V = \frac{v_{out}}{v_{in}} = g_m R_D > 100$$

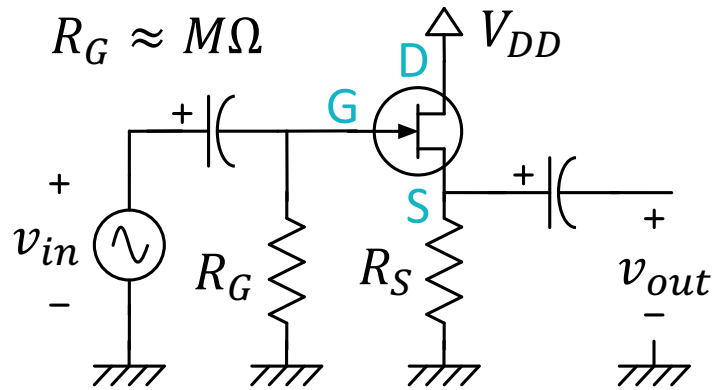
Intérêt du montage : adapté à l'amplification car gain élevé (déphasé de $\pi/2$)

Le FET

1. Le JFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

Régime dynamique – Ampli drain commun



Le schéma final à droite montre que :

- $Z_{in} = R_G \approx M\Omega$ et $Z_{out} = R_S$
- $v_{out} = +R_S g_m v_{GS}$
- Le schéma nous montre aussi que : $v_{in} - v_{GS} - v_{out} = 0$
 $\Rightarrow v_{in} = +(1 + R_S g_m) v_{GS}$
 $\Rightarrow A_V = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{R_S g_m}{1 + R_S g_m} \approx 1$

Intérêt du montage : adapté au suiveur car $A_V \approx 1$ et Z_{in} élevé. (Montage appelé « source suiveuse »)

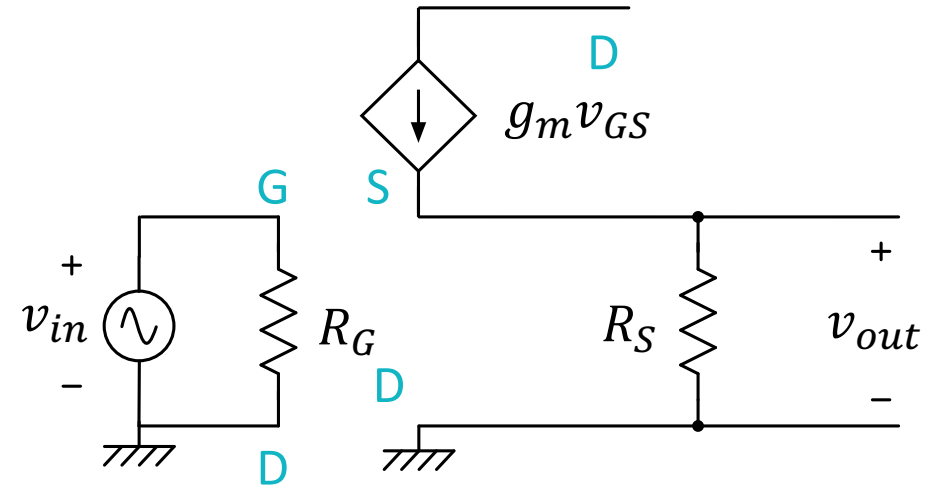


Schéma équivalent intermédiaire en AC

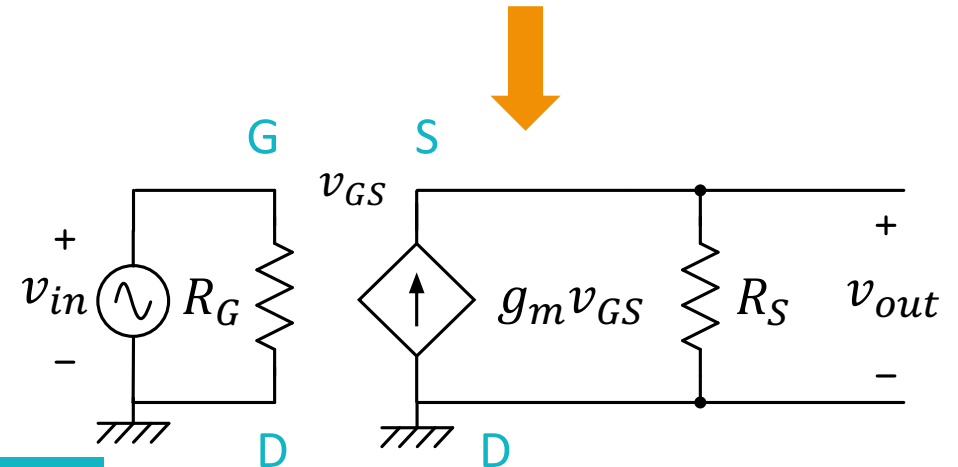


Schéma final en AC

Le FET

1. Le JFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

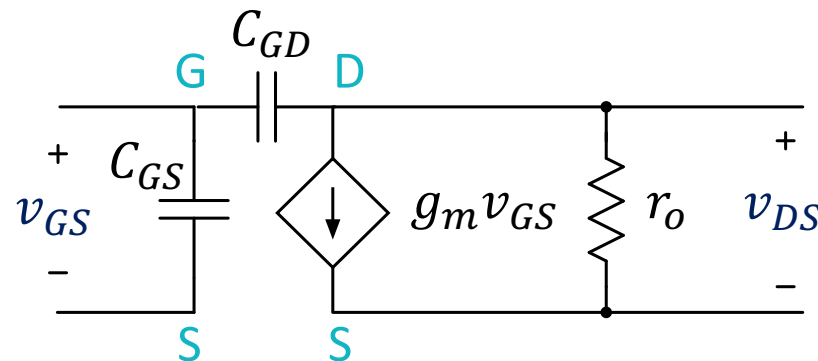
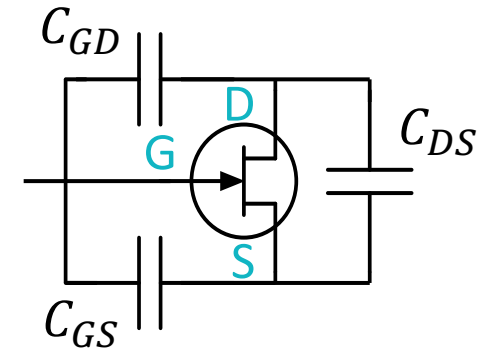
2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

POUR INFO

Régime dynamique – Modèle équivalent HF

- Si la fréquence augmente, des **capacités parasites intrinsèques au transistor** C_{GS} , C_{GD} et C_{DS} doivent être prises en compte. Elles proviennent des jonction PN polarisées en inverse.
- Les deux premières sont du même ordre de grandeur (quelques pF), tandis que la dernière est plus faible et peut être négligée.



Le FET

1. Le JFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Commutation

Outre le montage « source suiveuse » la commutation analogique est une autre application majeure du JFET. Dans ce cas le JFET se comporte comme un interrupteur qui transmet ou bloque le petit signal alternatif.

- Si $V_{GS} < V_{GS(off)}$ alors $I_D = 0$, donc le transistor est bloqué. On le remplace par un interrupteur ouvert.
- Si $V_{GS} = 0$ le canal est complètement ouvert et le point de repos se trouve dans la zone ohmique. On remplace le transistor par sa résistance R_{DS} .

La résistance ohmique du JFET ayant déjà été définie auparavant : $R_{DS} = \frac{V_P}{I_{DSS}}$

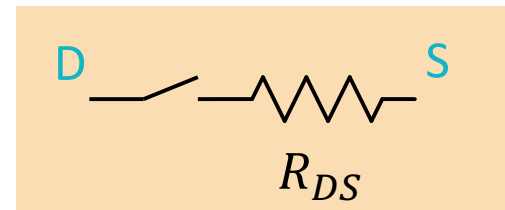
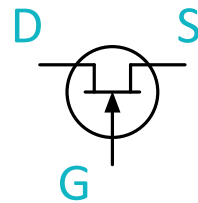


Schéma équivalent du JFET en commutation

Le FET

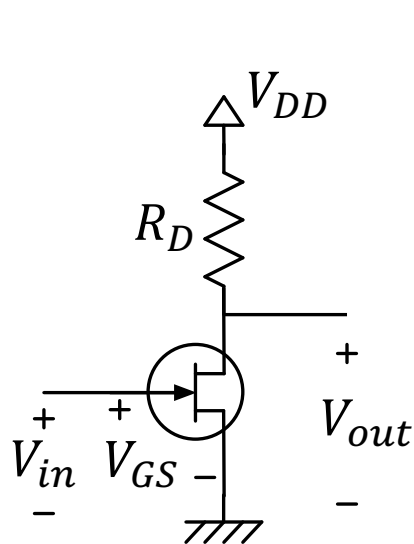
1. Le JFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

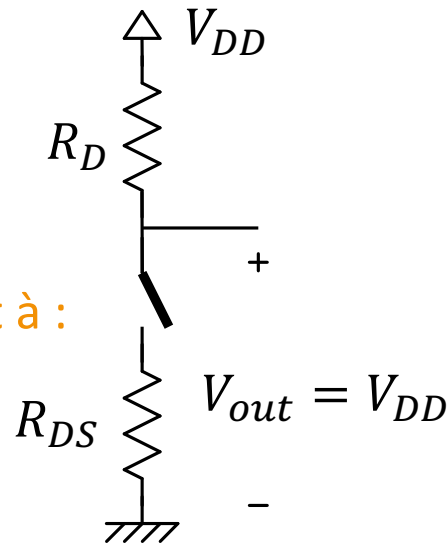
2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

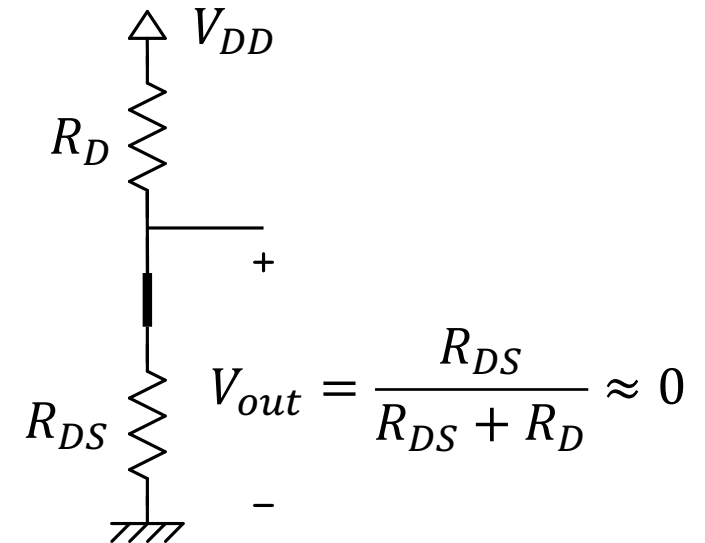
Hypothèse : $R_D \gg R_{DS}$



Équivalent à :



Ou :



Si $V_{in} = V_{GS} < V_{GS,(off)}$,
Le transistor est équivalent
à interrupteur est ouvert

On retiendra :
si $V_{in} < V_{GS,(off)}$ alors $V_{out} = V_{DD}$

Si $V_{in} = V_{GS} \geq 0$, l'interrupteur
est fermé. Le transistor est
équivalent à sa résistance R_{DS}

On retiendra :
si $V_{in} \geq 0$ alors $V_{out} \approx 0$

Le FET

1. Le JFET

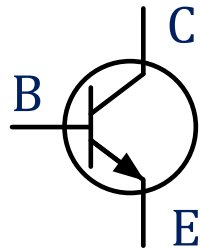
- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

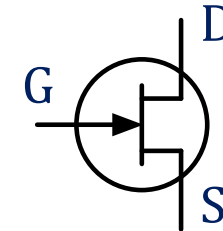
Résumé : Comparatif BJT vs JFET

BJT



- Contrôlé en **courant** $I_C = \beta I_B$
- Bipolaire (électrons et trous)
- $I_C \approx I_E$
- $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$ (transistor en Silicium)
- Consommation + +
- Impédance d'entrée — —
- Stabilité thermique — —
- Gain d'amplification + +
- Taille du transistor + +

JFET



- Contrôlé en **tension** $I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$
- Unipolaire (électrons ou trous)
- $I_D = I_S$
- $I_G = 0$
- Consommation — —
- Impédance d'entrée + +
- Stabilité thermique + +
- Gain d'amplification — —
- Taille du transistor — —

Le FET

1. Le JFET
 - A. Principe de fonctionnement
 - B. Symboles
 - C. Caractéristiques
 - D. Polarisation
 - E. Régime dynamique
 - F. Commutation
 - G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET
 - A. Principe de fonctionnement
 - B. Symboles
 - C. Doc technique
 - D. Caractéristiques
 - E. Polarisation
 - F. JFET VS MOSFET

Le MOSFET

Le FET

1. Le JFET

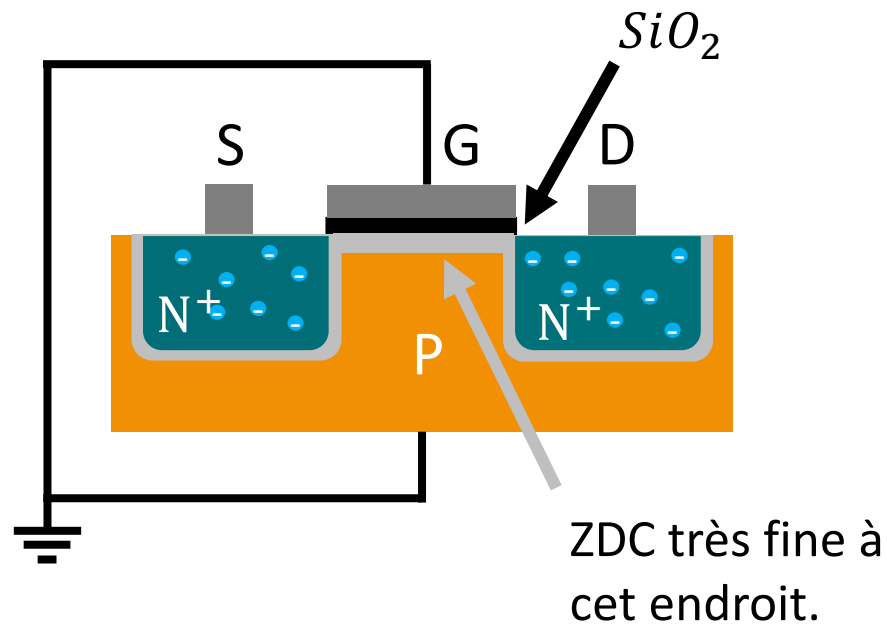
- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Principe de fonctionnement

- Dans un MOSFET, il y a 3 électrodes : source S , grille G et drain D, comme dans le JFET. Dans un N-MOSFET la source est dopée N. Sous la grille il y a une fine couche de silice SiO_2 , (en noir sur le schéma) et sous la couche de SiO_2 se trouve une ZDC très fine puis le substrat dopé P. Le drain est dopé N.



$V_{GS} = 0$: Transistor bloqué

Dans l'explication qui suit on part dans un premier temps de la tension drain-source $V_{DS} = 0$.

- Ensuite on part du potentiel au point G nul : $V_G = 0$. On n'observe aucun courant débité entre le drain et la source.
- A ce stade de l'expérience : sous la couche de silice SiO_2 , Il n'y a que le dopage P avec la Zone désertée de charge (ZDC).

Le FET

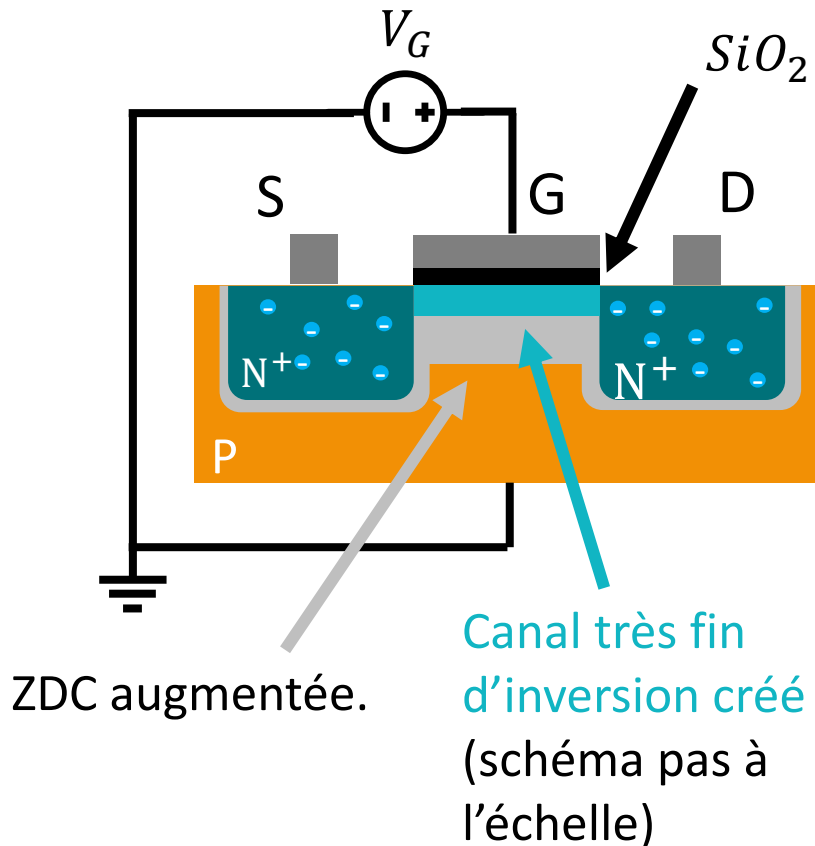
1. Le JFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

- Quand on augmente V_G pour le rendre positif, dans un premier temps les trous proches de la ZDC sont chassés dans la zone neutre du substrat (= la zone P) ce qui a pour conséquence d'augmenter la largeur de la ZDC sous SiO_2 . Ça laisse une zone négative sous la grille sans trous (par contre les anions dont les trous étaient associés sont toujours présents près de la couche de SiO_2 , formant une zone négative).



- Ensuite on augmente encore plus le potentiel V_G au niveau de la grille, les électrons libres de la zone N (de la source et du drain) vont réussir à quitter leur réservoir dopé N et vont s'agglutiner sous la couche de SiO_2 . Il faut donc bien comprendre que ce phénomène arrive dans un deuxième temps : c'est seulement quand il n'y a plus de trous sous SiO_2 que les électrons libres de la zone N viennent s'agglutiner sous la couche de SiO_2 . Et ces électrons libres forment alors un canal de quelques nanomètres d'épaisseur appelé « canal d'inversion », inversion car on a inversé le substrat : dans cette zone P au lieu d'avoir des trous on a maintenant des électrons libres.

Le FET

1. Le JFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

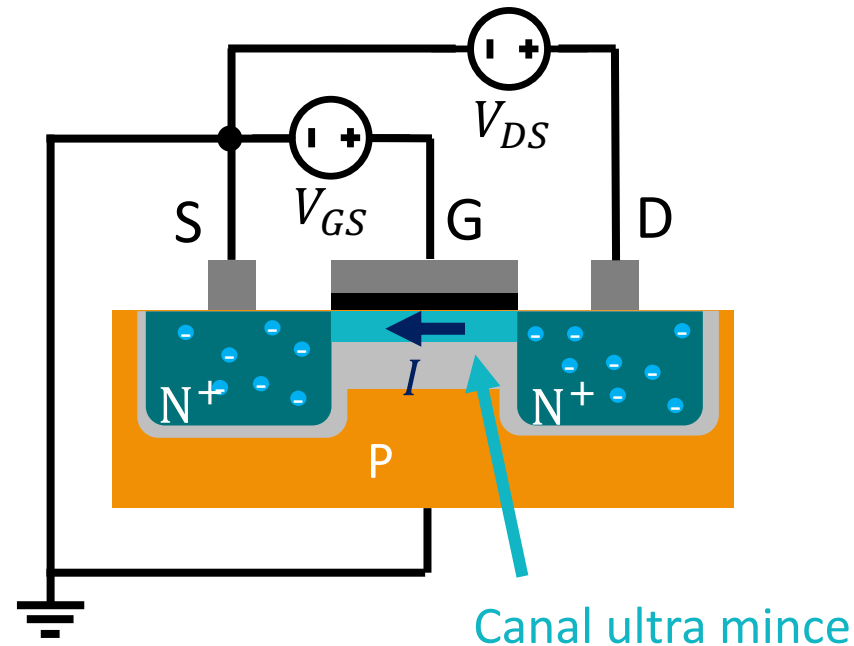
2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Depuis le début de l'explication on était à $V_{DS} = 0$.

On a mis une tension $V_{GS} > 0$ ce qui a eu pour conséquence de créer un canal d'électrons libres sous la couche de SiO_2 . Ce canal ne bouge pas.

Maintenant on applique une tension $V_{DS} > 0$



- Les électrons libres qui se trouvaient dans ce canal sont alors accélérés sous l'effet du champ électrique créé par la tension V_{DS} . Ils se déplacent de la source vers le drain.
- Le courant d'électrons libres se développe uniquement au niveau de ce canal, sous la couche de SiO_2 .
- Le sens du courant I est opposé au sens de déplacement des électrons libres. I est orienté du drain vers la source.

Le FET

1. Le JFET

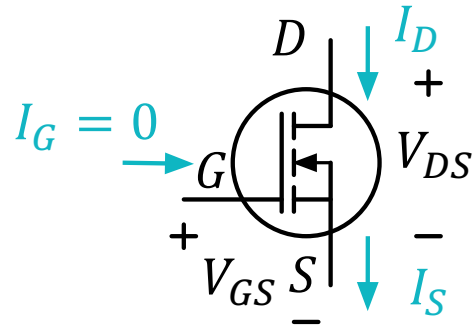
- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Symboles

N-MOSFET



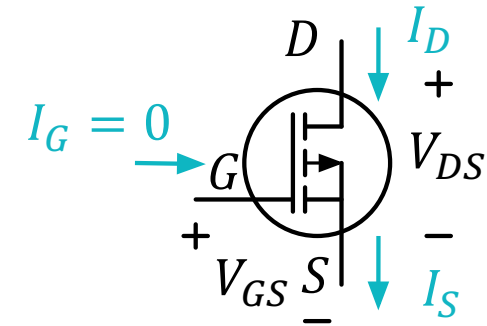
$$\begin{aligned} V_{GS} &> V_T \\ V_{DS} &> 0 \\ I_S = I_D &> 0 \end{aligned}$$

Le canal d'inversion est constitué d'électrons libres. Ceux-ci circulent de la source vers le drain

Le courant de grille est nul grâce à l'isolant SiO_2 . Conséquence : impédance d'entrée infinie.

V_T = tension de seuil à partir de laquelle le transistor n'est plus bloqué.

P-MOSFET



$$\begin{aligned} V_{GS} &< -V_T \\ V_{DS} &> 0 \\ I_S = I_D &> 0 \end{aligned}$$

Le canal d'inversion est constitué de trous. Ceux-ci circulent du drain vers la source (pour un $V_{DS} > 0$)

Le FET

1. Le JFET

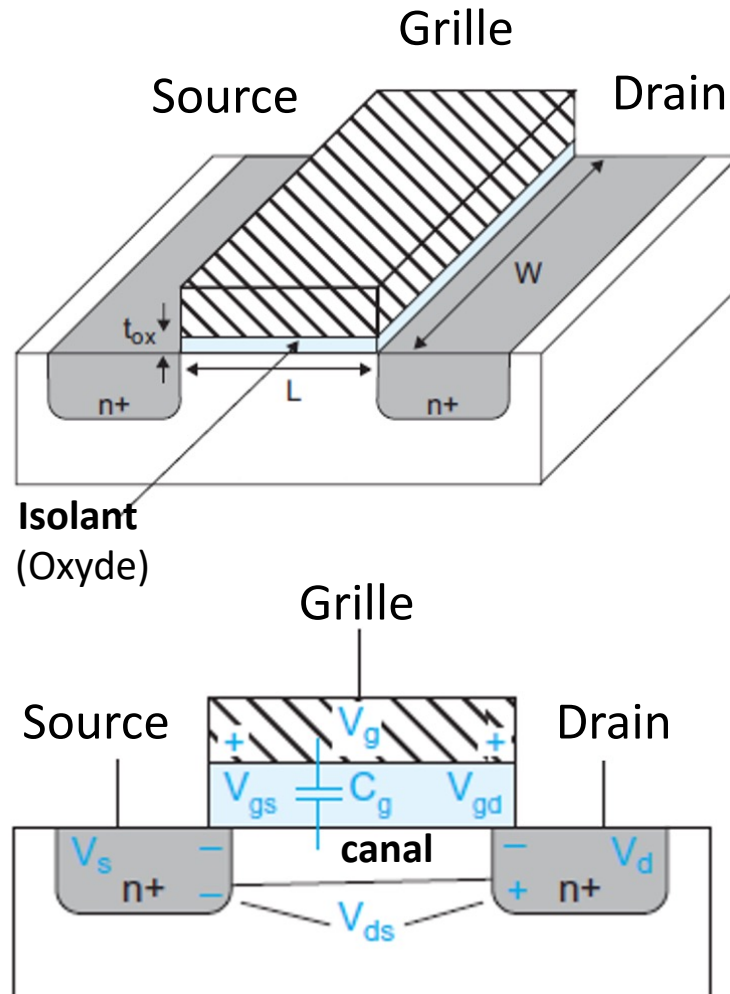
- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. **Doc technique**
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Doc technique

POUR INFO



■ On distingue :

▷ Des paramètres **géométriques**

L : la longueur du canal

W : le développement (largeur) de la grille

t_{ox} : l'épaisseur de la couche d'isolant en Oxyde

▷ Des paramètres **technologiques**

$K'_n = \mu_n C_{ox}$: Facteur de gain [$\mu A/V^2$]

μ_n : mobilité des électrons [cm^2/Vs]

$C_{ox} = \epsilon_{ox}/t_{ox}$: capacité surfacique de grille [F/cm^2]

t_{ox} : épaisseur d'oxyde de grille [nm]

ϵ_{ox} : permittivité du SiO_2 [F/m]

$\lambda = 1/V_A$: Coefficient de modulation de la longueur du canal [V^{-1}]

V_A : Tension d'Early [V]

■ Les procédés technologiques de production sont limités d'un fondeur à un autre. Cela impose ainsi K'_n , μ_n , C_{ox} , et a fortiori V_T .

Le FET

1. Le JFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Fonction de transfert $I_D = f(V_{GS})$

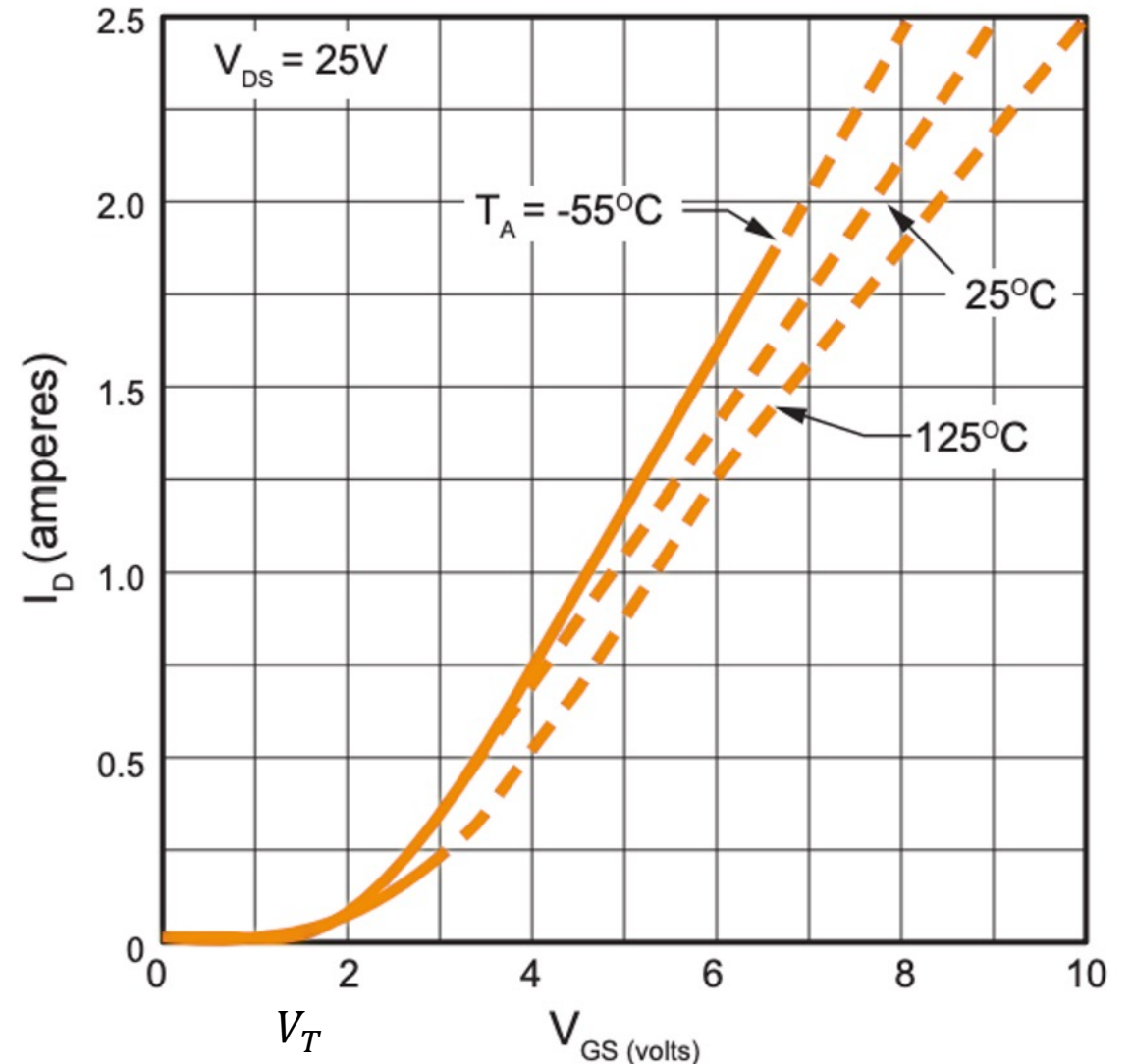
En région active le modèle est :

$$I_D = \frac{1}{2} K_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$

avec K_n , W_n et L des paramètres du modèle

On remarque que comme pour le JFET, I_D est commandé en tension (par la tension V_{GS})

- Si $V_{GS} < V_T$ (tension de seuil) alors le transistor est bloqué (région cut-off)
- Si $V_{GS} > V_T$ alors le transistor est passant



Le FET

1. Le JFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

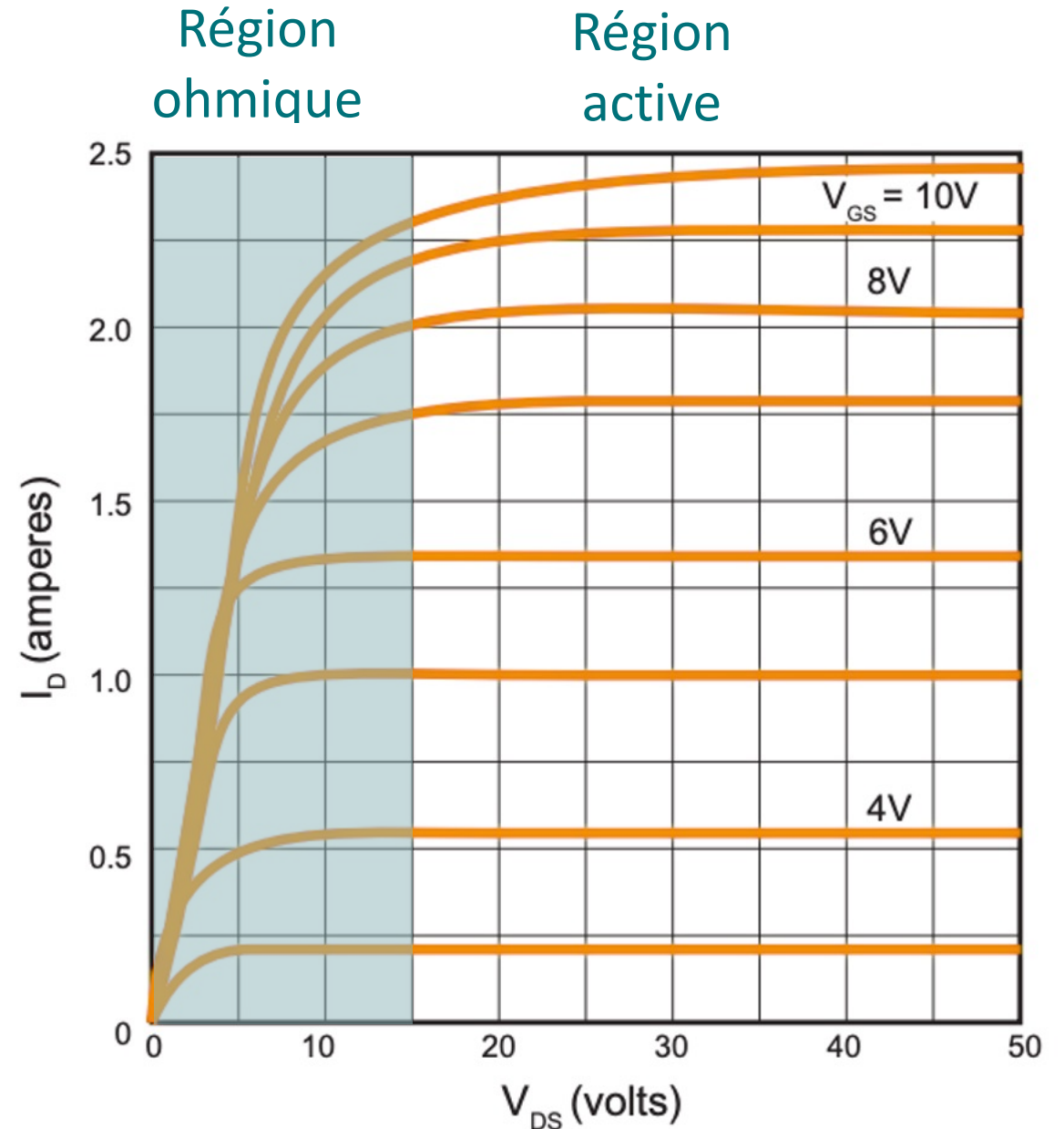
- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Caractéristique de sortie $I_D = f(V_{DS})$

- Si V_{DS} positif mais pas trop (la condition précise est $0 < V_{DS} < V_{GS} - V_T$) alors le transistor conduit et se trouve dans sa **région ohmique**, avec la résistance équivalente associée.

$$R_{DS} = V_{DS}/I_D$$

- Si V_{DS} est très positif (la condition précise est $V_{DS} > V_{GS} - V_T$) alors le canal d'inversion du transistor est pincé. On dit que le transistor fonctionne dans sa **région active**.



Le FET

1. Le JFET

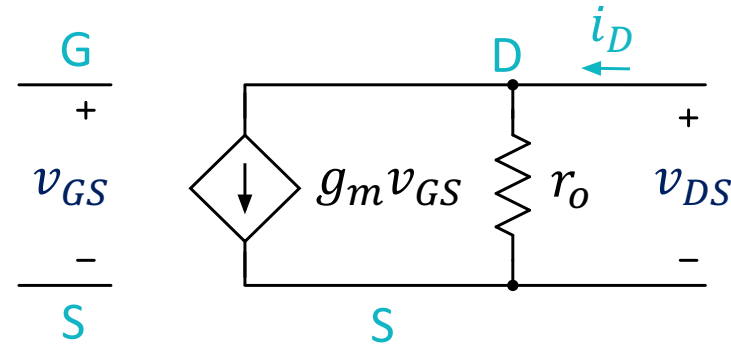
- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

Polarisation, modèle, montages

- Les montages de polarisation utilisés pour les MOSFET sont similaires à ceux utilisés pour les JFET.
- En zone active, le réseau de caractéristique $I_D = f(V_{DS})$ étant similaire pour les JFET et les MOSFET, le schéma équivalent en régime dynamique est identique.



R_o n'ayant qu'un impact faible dans les calculs sera omis sauf avis contraire dans un exercice.

- A partir de l'expression de $I_D = f(V_{GS})$ donnée précédemment, on dérive I_D par rapport à V_{GS} et on trouve l'expression de la transconductance :

$$g_m = \frac{dI_D}{dV_{GS}} = K_n \frac{W}{L} [V_{GS} - V_T] = 2 \frac{I_D}{V_{GS} - V_T}$$

- On retrouve les trois mêmes montages fondamentaux que pour les JFET : source commune, drain commun et grille commune. Ils ont des propriétés analogues.

Le FET

1. Le JFET

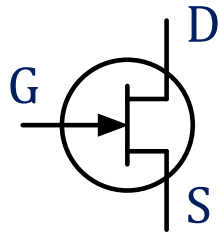
- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Caractéristiques
- D. Polarisation
- E. Régime dynamique
- F. Commutation
- G. BJT vs JFET

2. Le MOSFET

- A. Principe de fonctionnement
- B. Symboles
- C. Doc technique
- D. Caractéristiques
- E. Polarisation
- F. JFET VS MOSFET

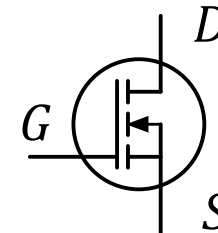
Comparatif JFET vs MOSFET

JFET



- La grille est en contact avec le canal.
- Le canal existe constamment, on le réduit en polarisant le transistor.
- La grille peut être vue comme une diode
- Forte impédance d'entrée ($> 10\text{ M}\Omega$)
- La résistance du drain est relativement élevée
- Plus difficile à fabriquer et plus coûteux que le MOSFET

N-MOSFET



- La grille est séparée du canal par un isolant.
- Le canal est créé par la polarisation.
- La grille peut être vue comme un condensateur
- Très forte impédance d'entrée ($> 10\,000\text{ M}\Omega$)
- La résistance du drain est plus faible
- Plus facile à fabriquer et moins coûteux que le JFET

Le FET

1. **Le JFET**
 - A. Principe de fonctionnement
 - B. Symboles
 - C. Caractéristiques
 - D. Polarisation
 - E. Régime dynamique
 - F. Commutation
 - G. BJT vs JFET
2. **Le MOSFET**
 - A. Principe de fonctionnement
 - B. Symboles
 - C. Doc technique
 - D. Caractéristiques
 - E. Polarisation
 - F. JFET VS MOSFET

Fin du cours