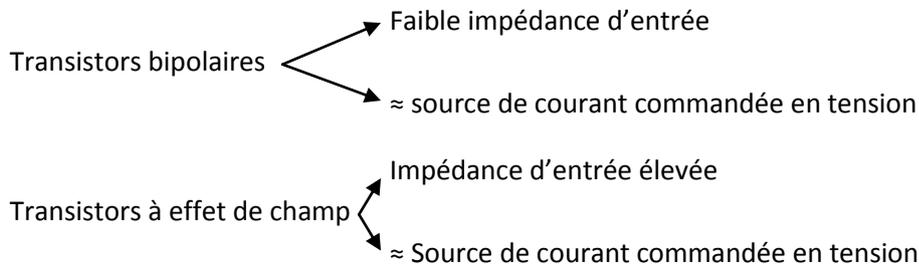


# Les transistors à effet de champ

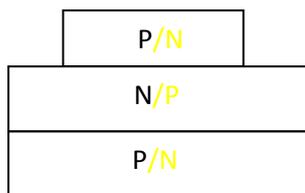
---

Intro :



## I) Transistors à effet de champ à jonction

TEC – JFET (Junction Field Effect Transistor)



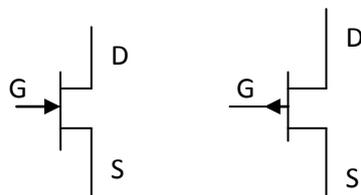
- JFET Canal N
- JFET Canal P

Composition : Un morceau de cristal de silicium dopé, "appelé canal", entouré de 2 cristaux de silicium dopés différemment.

Les 2 zones qui entourent le canal sont reliées entre elles et forment la **grille** de JFET.

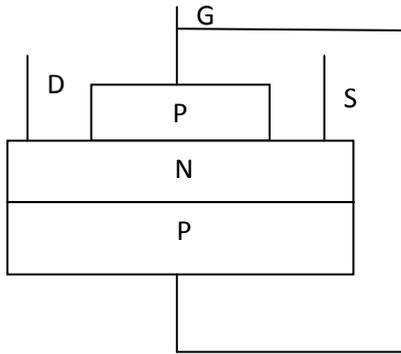
2 électrodes déposées sur le canal forment le **drain** et la **source** de JFET

Symbole :



JFET Canal N

## II) Caractéristiques des transistors à effet de champ. Cas du JFET canal N



Principe : Canal constitue un dipôle qui sera conducteur selon la valeur de la tension entre la grille et la source  $V_{GS}$ .

- ➔ Si  $V_C \leq V_{GS} \leq 0$  = Le canal Drain-Source est conducteur
- ➔ Si  $V_{GS} \leq V_C$  = Le canal Drain-Source est bloqué

Rq : Lorsqu'il est conducteur, le canal est parcouru par un courant appelé courant de drain et note  $I_D$

$V_C$  = tension de blocage = caractéristique du JFET  $\approx -5V$  pour un JFET Canal N

Lorsque le transistor est conducteur, il présente 2 types de comportements selon la tension de Drain et la Source.

Si  $0 \leq V_{DS} \leq V_p$ , le canal se comporte comme une résistance – Le courant de Drain est proportionnel à la tension  $V_{DS}$

La valeur de cette résistance dépend de la tension  $V_{GS}$ .

On dit que le JFET fonctionne dans sa zone résistive ou ohmique.

Si  $V_{DS} > V_p$ , le courant  $I_D$  dépend presque plus de  $V_{DS}$  et devient donc quasiment constant. On dit que le transistor fonctionne dans sa zone linéaire.

Le courant  $I_D$  est alors proportionnel à  $V_{GS}$ .

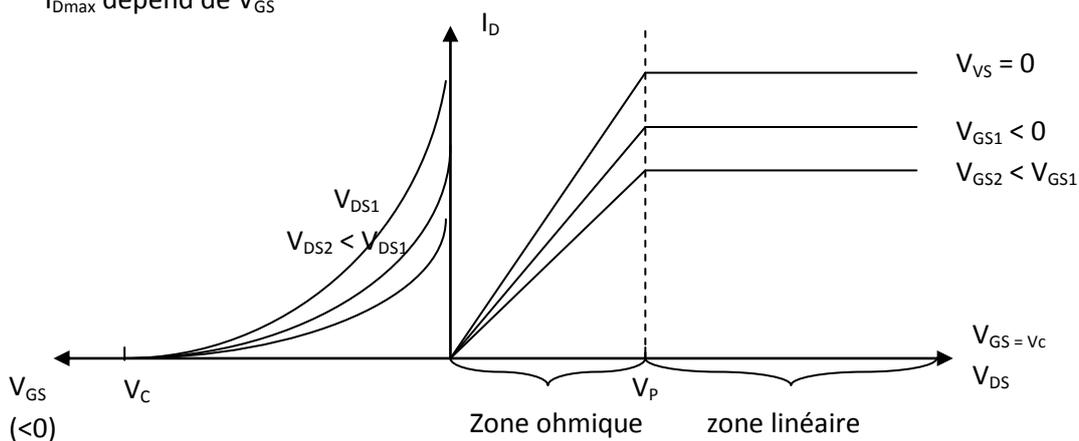
La tension  $V_p$  est appelée tension de pincement du JFET

Elle est de l'ordre de 2 à 3 v pour un JFET canal N.

Pour une tension  $V_D$ , donnée, le courant de drain  $I_D$  varie en fonction de la tension  $V_{GS}$  selon l'équation suivante

$$I_D = I_{Dmax}(1 - V_{GS}/V_C)^2$$

$I_{Dmax}$  dépend de  $V_{GS}$

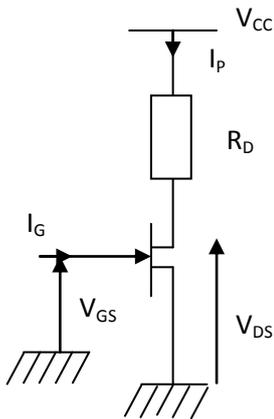


### III) Polarisation d'un transistor à effet de champ

Polariser un JFET revient à l'insérer dans un montage de sorte que son point de fonctionnement, en régime continu, soit situé dans sa zone de fonctionnement linéaire.

⇒ Pour un JFET, il faudra que  $V_{DS} \geq V_p$

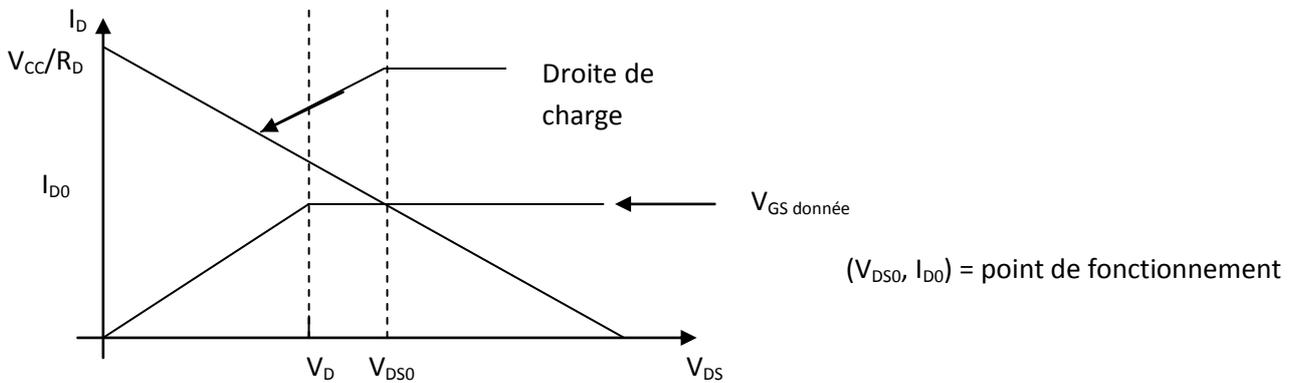
Ex : Circuit de polarisation par résistance de drain



Rq : Le courant de grille  $i_G$  est très faible (Haute impédance d'entrée)

Il est, la plupart du temps, négligé

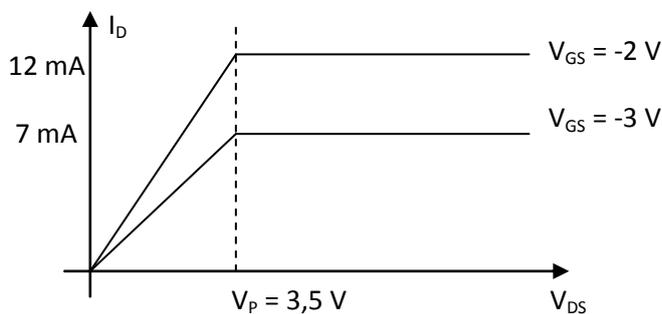
Si  $V_{GS}$  est donnée, la caractéristique  $I_D = f(V_{GS})$  est entièrement déterminée



De plus,  $I_D = (V_{CC} - V_{DS})/R_D =$  Equation de la droite de charge

1) On considère un JFET a canal N

Ce JFET est polarise par une résistance de drain



$$V_{CC} = 15 \text{ V}$$

Pour chacun des cas suivants, indiquez si le transistor est polarisé dans sa zone linéaire ou non, et donnez la valeur du courant de drain.

- a)  $R_D = 100 \Omega$       $V_{GS} = -2 \text{ V}$
- b)  $R_D = 3 \text{ k}\Omega$       $V_{GS} = -2 \text{ V}$
- c)  $R_D = 1 \text{ k}\Omega$       $V_{GS} = -3 \text{ V}$

$$V_{CC} = U_R + V_{DS}$$

$$V_{DS} = V_{CC} - U_R$$

$$V_{DS} = V_{CC} - I_D R_D$$

$$\text{a) } V_{DS} = 15 - 12 \cdot 10^{-3} \times 100 = 13,8 \text{ V}$$

Oui

$$I_D = 12 \text{ mA}$$

$$\text{b) } V_{DS} = 15 - 12 \cdot 10^{-3} \times 3 \cdot 10^3 = -21 \text{ V}$$

⇒ Comme  $V_{GS} < 0$ , le JFET est polarisé dans sa zone ohmique

⇒ Canal Drain-Source  $\approx$  Resistance

Calcul de la résistance du Canal Drain-Source

$$R_{DS} = 3,5 / 12 \cdot 10^{-3} = 292 \Omega$$

$$V_{CC} = R_D I_D + R_{DS} I_D \Rightarrow I_D = V_{CC} / (R_D + R_{DS}) = 4,6 \text{ mA}$$

$$V_{DS} = R_{DS} \times I_D = 1,3 \text{ V} < V_P$$

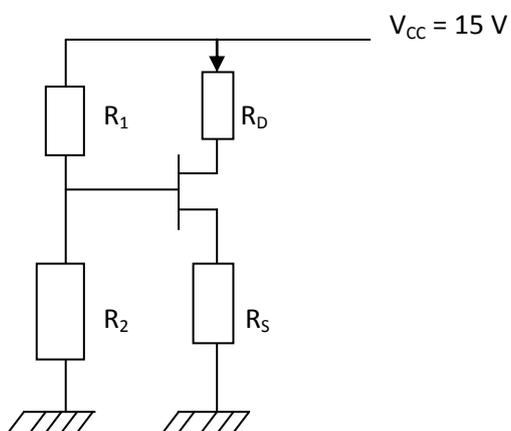
c) Hyp. Polarisation dans zone linéaire

$$V_{DS} = -3 \text{ V} \Rightarrow I_D = 7 \text{ mA}$$

$$V_{DS} = 8 \text{ V} > 3,5 \Rightarrow \text{Hyp vérifiée}$$

### Exercices :

On considère un JFET à canal N



$$R_1 = 800 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 400 \text{ k}\Omega$$

$R_D$  ?  $R_S$  ? pour que le transistor soit polarisé dans sa zone linéaire si  $V_{GS} = -2 \text{ V}$

Polarisation zone linéaire  $\Rightarrow V_{DS} > 3,5 \text{ V}$   
 $I_D = 12 \text{ mA}$  (car  $V_{GS} = -2 \text{ V}$ )

$$V_{GS} = V_{CC} \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = 5 \text{ V}$$

$$\text{Comme } V_{GS} = -2 \text{ V} \Rightarrow V_S = 7 \text{ V} \Rightarrow R_S = 7\text{V}/12\text{mA} = 583 \Omega$$

$$V_{DS} > V_P$$

$$V_{CC} - R_D I_D - V_S > V_P$$

$$R_D I_D < V_{CC} - V_S - V_P$$

$$R_D < (V_{CC} - V_S - V_P) / I_D = 375 \Omega$$

#### IV) Schéma équivalent en régime linéaire

Propriété du régime linéaire

➔ Proportionnalité entre le courant de drain et tension  $V_{GS}$  (i.e. JFET parcouru par un courant commandé par une tension)

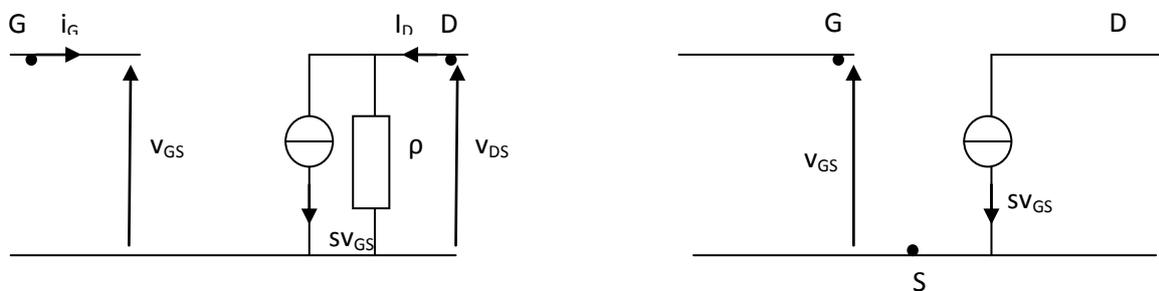
Supposons le JFET polarisé dans sa zone linéaire.

Si on superpose un signal variable  $v_{GS}$  à la tension de polarisation  $V_{GS}$ , des variations  $i_D$  et  $v_{GS}$  apparaissent autour des valeurs continues de polarisation  $I_D$  et  $V_{GS}$

$$\text{On montre que } i_D = s v_{GS} + I_D$$

$S$  = pente dynamique du transistor Transconductance du JFET (de l'ordre de  $10^{-3} \text{ S}$  pour les JFET usuels)

$\rho$  = résistance dynamique du transistor. En général, considérée comme  $\infty$



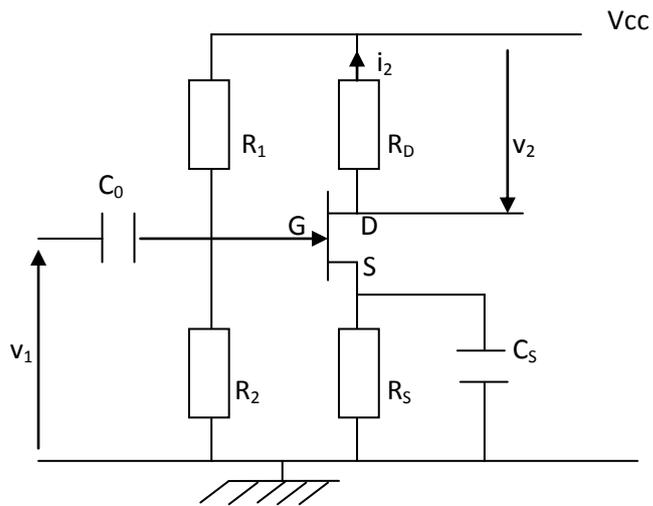
Exercices :

Montage amplificateur a source commune

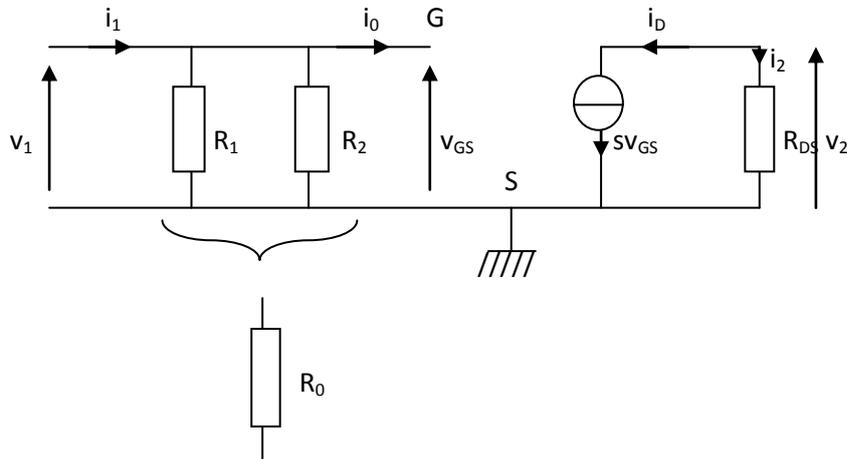
On suppose le JFET polarisé dans sa zone linéaire

Déterminer :

- Amplificateur en tension et en courant
- Impédance d'entrée



On pourra poser  $R_0 = (R_1 R_2) / (R_1 + R_2)$



. Amplification en tension  $A_v = v_2/v_1$

$$\left. \begin{aligned} v_2 &= R_D \cdot i_2 = -R_D i_d = -sR_D v_{GS} \\ v_1 &= v_{GS} \end{aligned} \right\} A_v = -sR_D v_{GS} / v_{GS} = -sR_D$$

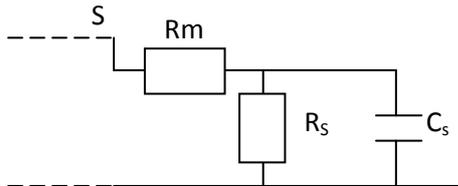
. Amplification en courant  $A_i = i_2/i_1$

$$\left. \begin{aligned} i_2 &= -i_D = -sV_{GS} \\ i_1 &= V_{GS}/R_D \end{aligned} \right\} A_i = -s R_0$$

. Impédance d'entrée  $Z_c = V_e/i_e = R_0$

Montage amplificateur a source commune avec découplage partiel de la résistance de source

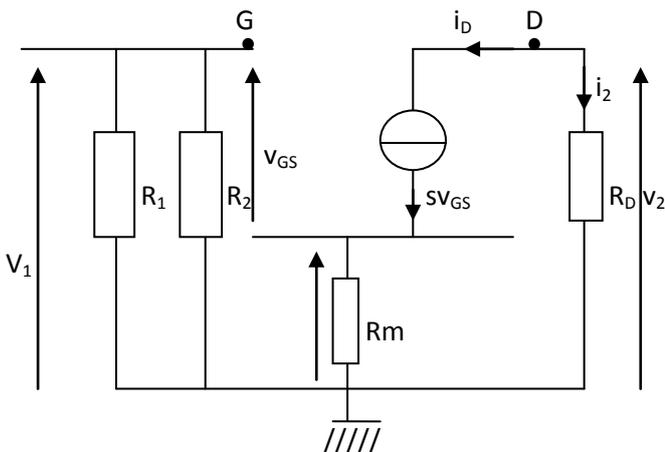
Le JFET est polarisé dans sa zone linéaire



Déterminer :

- Amplification en tension

Que se passe t-il si  $R_m \gg 1/s$



$$A_v = v_2/v_1 \quad v_2 = R_D i_2 = -sR_D V_{GS}$$

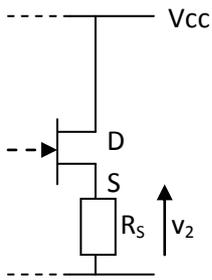
$$v_1 = v_{GS} + sR_m v_{GS} = (1 + sR_m)v_{GS}$$

$$\Rightarrow A_v = -sR_D/(1 + sR_m) \text{ si } R_m \gg 1/s \quad A_v = -sR_D/sR_m$$

$$A_v = -R_D/R_m$$

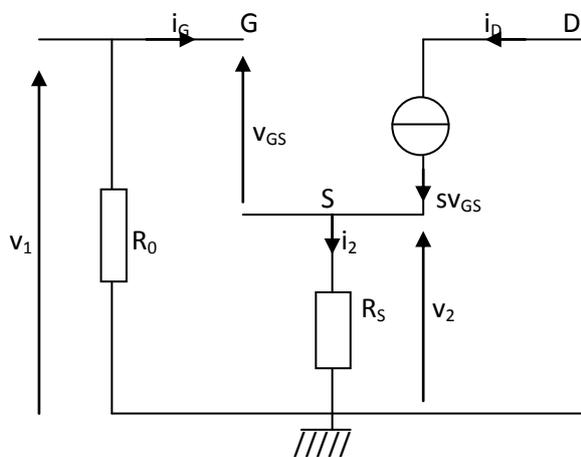
Amplificateur a drain commun

Le JFET est polarisé dans sa zone linéaire



Amplifications en courant et en tension ?

Impédance de sortie ?



Amplification en tension  $A_v = v_2/v_1$

$$\left. \begin{aligned} v_2 &= R_S s v_{GS} \\ v_1 &= v_{GS} + v_e = (1 + s R_S) \cdot v_{GS} \end{aligned} \right\} \Rightarrow A_v = s R_S / (1 + s R_S)$$

Amplification en courant  $A_i = i_2/i_1$

$$\begin{aligned} i_2 &= s v_{GS} \\ i_1 &= v_1 / R_0 = ((1 + s R_S) v_{GS}) / R_0 \Rightarrow A_i = s R_0 / (1 + s R_S) \end{aligned}$$

Impédance de sortie

$Z_s = -v_2/i_2$  quand on a annulé  $v_1$

$$\left. \begin{aligned} v_{GS} &= -v_s = -v_2 \\ i_2 &= s v_{GS} = -s v_2 \end{aligned} \right\} \boxed{Z_s = -v_2/i_2 = -v_2/(-s v_2) = 1/s}$$

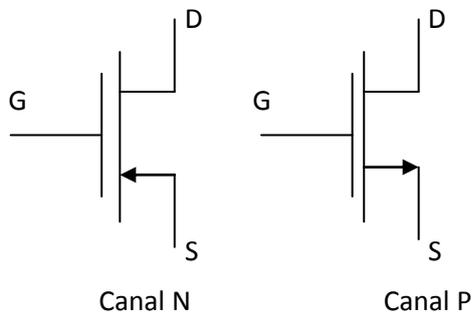
## V) Transistors MOS

MOS = Metal Oxyd Semi-conductor

Dans ces transistors, la grille est isolée par une couche d'oxyde de silicium.

⇒ Le courant de grille est rigoureusement nul.

2 types de MOSFET :



## VI) Transistor à effet de champ en commutation

### 1) Introduction

Technologie TTL : (Transistor Transistor Logic)

- Transistors bipolaires
- Réputés être rapides
- Très gourmands en énergie

Technologie CMOS : (Complementary Metal Oxyd semi-conductor)

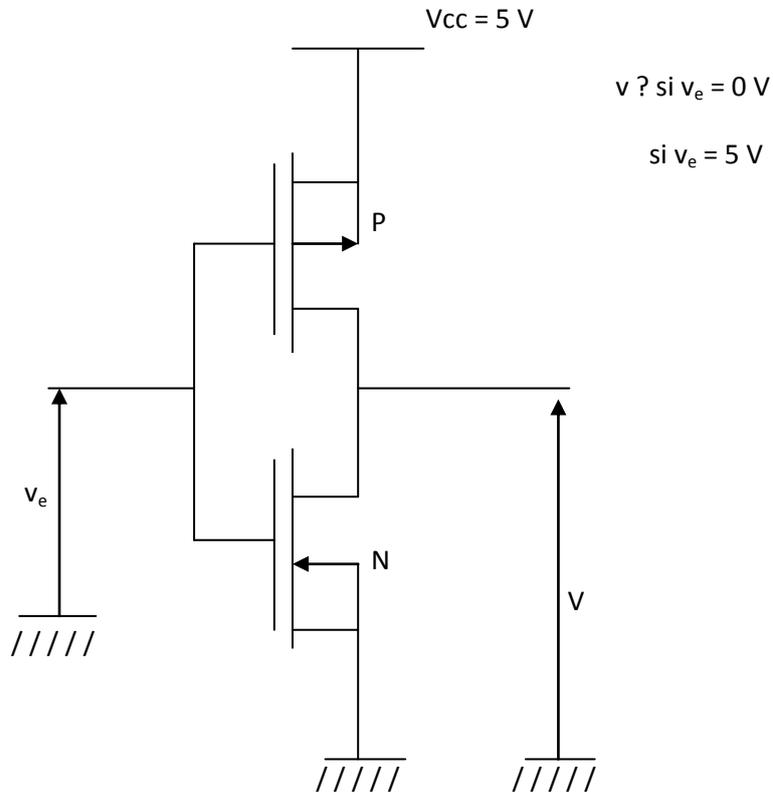
- MOSFET
- Faible consommation
- Composants commandés en tension
- Impédance d'entrée  $\infty$
- Aujourd'hui, les composants sont suffisamment rapides pour les applications courantes

### 2) Commutation

- JFET Canal N
  - Bloqué si  $v_{GS} = -5 \text{ V}$
  - Conducteur si  $v_{GS} = 0 \text{ V}$
- JFET Canal P
  - Bloqué si  $v_{GS} = 5 \text{ V}$
  - Conducteur si  $v_{GS} = 0 \text{ V}$
- MOSFET Canal N
  - Bloqué si  $v_{GS} = 0 \text{ V}$
  - Conducteur si  $v_{GS} = 5 \text{ V}$
- MOSFET Canal P

- Bloqué si  $v_{GS} = 0 \text{ V}$
- Conducteur si  $v_{GS} = -5 \text{ V}$

### 3) Portes logiques : Exemples



Si  $v_e = 0 \text{ V} = v_G$

. Transistor P :

$$v_{GS} = v_G - v_S = 0 - 5 = -5 \text{ V}$$

⇒ Conducteur

. Transistor N :

$$v_{GS} = v_G - v_S = 0 - 0 = 0 \text{ V}$$

⇒ Bloqué

Si  $v_e = 5 \text{ V} = v_G$

. Transistor P :

$$v_{GS} = v_G - v_S = 5 - 5 = 0 \text{ V}$$

⇒ Bloqué

. Transistor N :

$$v_{GS} = v_G - v_S = 5 - 0 = 5 \text{ V}$$

⇒ Bloqué

Schéma de la porte NAND ?

