

# Cours d'Électronique : Les transistors

A. Arciniegas  
F. Boucher  
V. Gauthier  
N. Wilkie-Chancellier  
A. Bouzzit

IUT Cergy-Pontoise, Dep GEII, site de Neuville



CERGY PARIS  
UNIVERSITÉ



IUT  
CERGY-PONTOISE



1 Généralités

2 Transistor bipolaire BJT

3 Transistor MOSFET

## Généralités

**Transistor** = transfer resistor

**Transistor** = transfer resistor

Deux modes d'utilisation des transistors :

**Transistor** = transfer resistor

Deux modes d'utilisation des transistors :

## Analogue

- Briques de base des circuits intégrés analogiques (dont l'amplificateur opérationnel) ou des amplificateurs à composants discrets :

**Transistor** = transfer resistor

Deux modes d'utilisation des transistors :

## Analogique

- Briques de base des circuits intégrés analogiques (dont l'amplificateur opérationnel) ou des amplificateurs à composants discrets :
  - générateur et miroir de courant
  - amplificateurs différentiels
  - amplificateurs en courant ou en tension

**Transistor** = transfer resistor

Deux modes d'utilisation des transistors :

## Analogue

- Briques de base des circuits intégrés analogiques (dont l'amplificateur opérationnel) ou des amplificateurs à composants discrets :
  - générateur et miroir de courant
  - amplificateurs différentiels
  - amplificateurs en courant ou en tension
- Fonctions du traitement analogique du signal :

**Transistor** = transfer resistor

Deux modes d'utilisation des transistors :

## Analogique

- Briques de base des circuits intégrés analogiques (dont l'amplificateur opérationnel) ou des amplificateurs à composants discrets :
  - générateur et miroir de courant
  - amplificateurs différentiels
  - amplificateurs en courant ou en tension
- Fonctions du traitement analogique du signal :
  - linéaires : addition, soustraction et multiplication...
  - non-linéaires : conversion exponentielle, logarithmique...

**Transistor** = transfer resistor

Deux modes d'utilisation des transistors :

## Analogique

- Briques de base des circuits intégrés analogiques (dont l'amplificateur opérationnel) ou des amplificateurs à composants discrets :
  - générateur et miroir de courant
  - amplificateurs différentiels
  - amplificateurs en courant ou en tension
- Fonctions du traitement analogique du signal :
  - linéaires : addition, soustraction et multiplication...
  - non-linéaires : conversion exponentielle, logarithmique...

## « Tout ou rien » ou commutation

- Circuits intégrés numériques, circuits de commande divers.
- Alimentation à découpage, onduleurs.
- Amplification numérique.

Deux grandes familles :

Deux grandes familles :

- Transistor bipolaire (BJT)

Deux grandes familles :

- Transistor bipolaire (BJT)
- Transistor à effet de champ (dont le MOSFET)

# Transistor bipolaire BJT

**BJT** : *Bipolar Junction Transistor*

**BJT** : *Bipolar Junction Transistor*

Deux types :

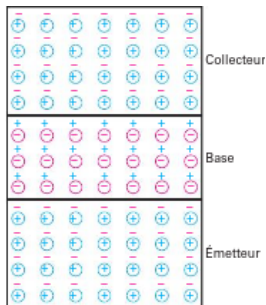
- PNP
- **NPN**

# Généralités et modèle physique (1/2)

**BJT** : *Bipolar Junction Transistor*

Deux types :

- PNP
- **NPN**



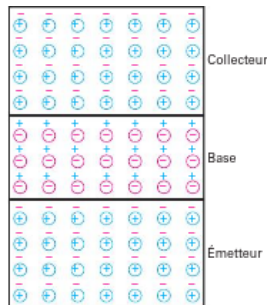
Structure d'un transistor NPN (d'après A. Malvino).

# Généralités et modèle physique (1/2)

**BJT** : *Bipolar Junction Transistor*

Deux types :

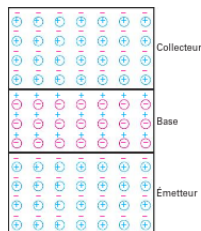
- PNP
- **NPN**



Structure d'un transistor NPN (d'après A. Malvino).

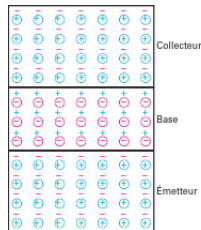
Trois zones dopées :

- émetteur
- base (faiblement)
- collecteur

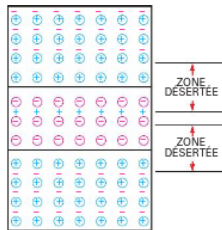


Régions du transistor avant  
diffusion  
(d'après A. Malvino).

# Généralités et modèle physique (2/2)

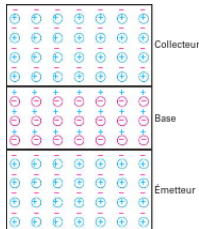


Régions du transistor avant diffusion  
(d'après A. Malvino).

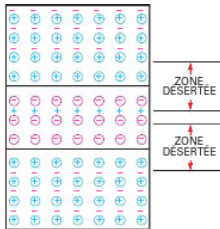


Régions du transistor après diffusion  
(d'après A. Malvino).

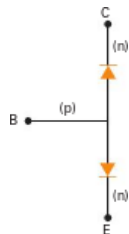
# Généralités et modèle physique (2/2)



Régions du transistor avant diffusion  
(d'après A. Malvino).

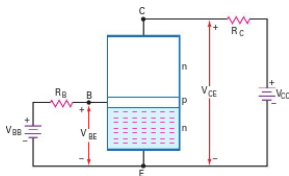


Régions du transistor après diffusion  
(d'après A. Malvino).



Modèle équivalent  
(d'après A. Malvino).

# Transistor polarisé

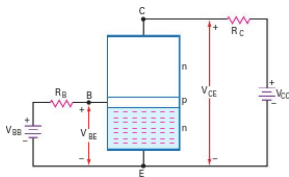


Transistor polarisé  
(d'après A. Malvino).

Rôles :

- Émetteur : injecter ses électrons libres dans la base.
- Base : transmettre les électrons injectés par l'émetteur au collecteur.
- Collecteur : collecter la plus grande partie des électrons de la base.

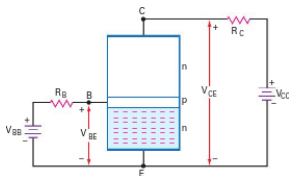
# Transistor polarisé



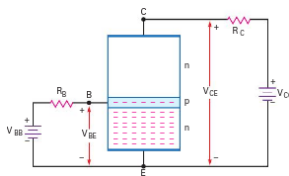
Transistor polarisé  
(d'après A. Malvino).

À l'instant où la polarisation directe est appliquée sur la diode émetteur, les électrons ne sont pas encore entrés dans la base.

# Transistor polarisé



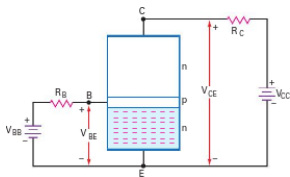
Transistor polarisé  
(d'après A. Malvino).



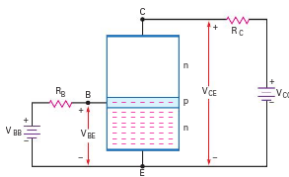
L'émetteur injecte des  
électrons libres dans la  
base (d'après A. Malvino).

Si  $V_{BB} > V_{BE}$ , les électrons de l'émetteur passent dans la base (**courant  $I_E$** ).

# Transistor polarisé



Transistor polarisé  
(d'après A. Malvino).

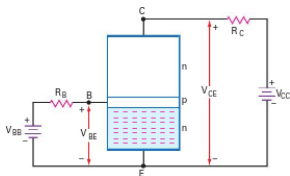


L'émetteur injecte des  
électrons libres dans la  
base (d'après A. Malvino).

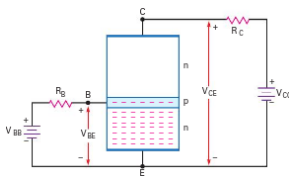
Si  $V_{BB} > V_{BE}$ , les électrons de l'émetteur passent dans la base (**courant  $I_E$** ).

Seul un petit nombre d'électrons libres se recombinaient avec des trous dans la base.

# Transistor polarisé



Transistor polarisé  
(d'après A. Malvino).



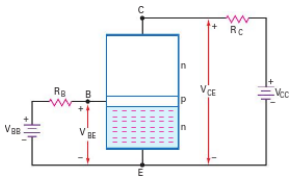
L'émetteur injecte des  
électrons libres dans la  
base (d'après A. Malvino).

Si  $V_{BB} > V_{BE}$ , les électrons de l'émetteur passent dans la base (**courant  $I_E$** ).

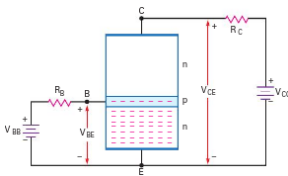
Seul un petit nombre d'électrons libres se recombinent avec des trous dans la base.

Un **courant  $I_B$**  circule à travers  $R_B$  car la diode émetteur est passante.

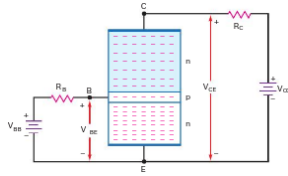
# Transistor polarisé



Transistor polarisé  
(d'après A. Malvino).



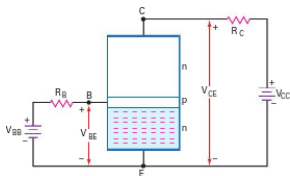
L'émetteur injecte des  
électrons libres dans la  
base (d'après A. Malvino).



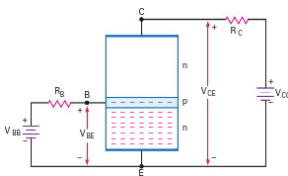
Les électrons libres de la  
base vont dans le  
collecteur. (d'après A.  
Malvino).

Presque tous les électrons de l'émetteur vont dans le collecteur.

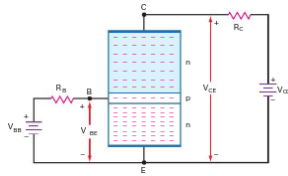
# Transistor polarisé



Transistor polarisé  
(d'après A. Malvino).



L'émetteur injecte des  
électrons libres dans la  
base (d'après A. Malvino).

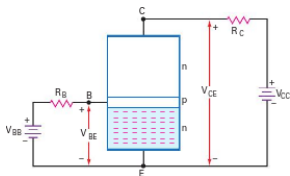


Les électrons libres de la  
base vont dans le  
collecteur. (d'après A.  
Malvino).

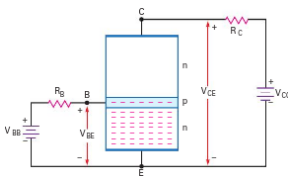
Presque tous les électrons de l'émetteur vont dans le collecteur.

Une fois arrivés, ils ressentent l'attraction de la tension  $V_{CC}$ .

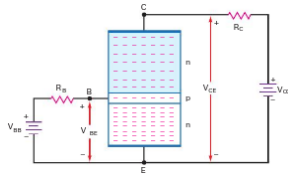
# Transistor polarisé



Transistor polarisé  
(d'après A. Malvino).



L'émetteur injecte des  
électrons libres dans la  
base (d'après A. Malvino).



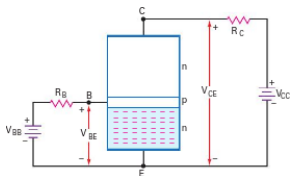
Les électrons libres de la  
base vont dans le  
collecteur. (d'après A.  
Malvino).

Presque tous les électrons de l'émetteur vont dans le collecteur.

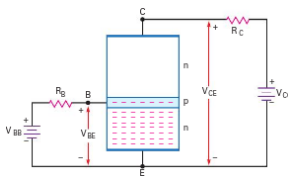
Une fois arrivés, ils ressentent l'attraction de la tension  $V_{CC}$ .

Ils traversent le collecteur et la résistance  $R_C$  pour atteindre le pôle positif de l'alimentation  $V_{CC}$  (**courant  $I_C$** ).

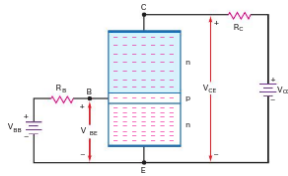
# Transistor polarisé



Transistor polarisé  
(d'après A. Malvino).



L'émetteur injecte des  
électrons libres dans la  
base (d'après A. Malvino).

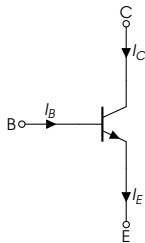


Les électrons libres de la  
base vont dans le  
collecteur. (d'après A.  
Malvino).

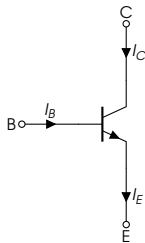
## Résumé

Polarisation directe de la diode émetteur :

- Circulation des courants  $I_E$  et  $I_B$ .
- Traversée des électrons de l'émetteur vers le collecteur en raison de la minceur et faible dopage de la base  $\rightarrow$  circulation du courant  $I_C$ .



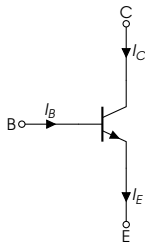
Symbole graphique du transistor NPN.



En appliquant la loi de Kirchhoff à la jonction :

$$I_E = I_B + I_C$$

Symbole graphique du transistor NPN.



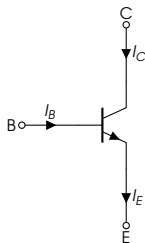
En appliquant la loi de Kirchhoff à la jonction :

$$I_E = I_B + I_C$$

Symbole graphique du transistor NPN.

## Relations entre courants

- $I_C \approx I_E \rightarrow \alpha = \frac{I_C}{I_E} \approx 1$



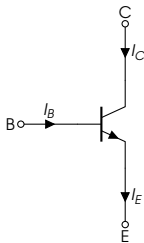
En appliquant la loi de Kirchhoff à la jonction :

$$I_E = I_B + I_C$$

Symbole graphique du transistor NPN.

## Relations entre courants

- $I_C \approx I_E \rightarrow \alpha = \frac{I_C}{I_E} \approx 1$
- $I_B \ll I_C \rightarrow \beta = \frac{I_C}{I_B}, 100 < \beta < 300$



En appliquant la loi de Kirchhoff à la jonction :

$$I_E = I_B + I_C$$

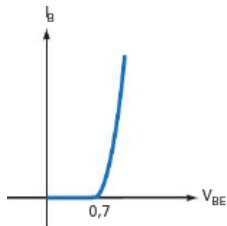
Symbole graphique du transistor NPN.

## Relations entre courants

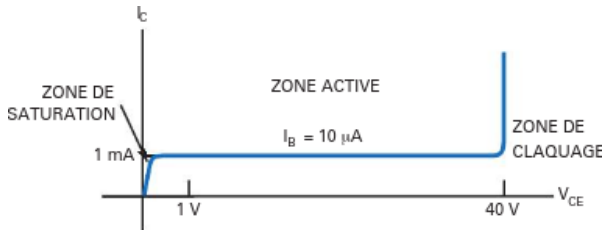
- $I_C \approx I_E \rightarrow \alpha = \frac{I_C}{I_E} \approx 1$
- $I_B \ll I_C \rightarrow \beta = \frac{I_C}{I_B}, 100 < \beta < 300$

$\beta$  est le **gain en courant**

# Caractéristiques



Caractéristique de la base  
(d'après A. Malvino)



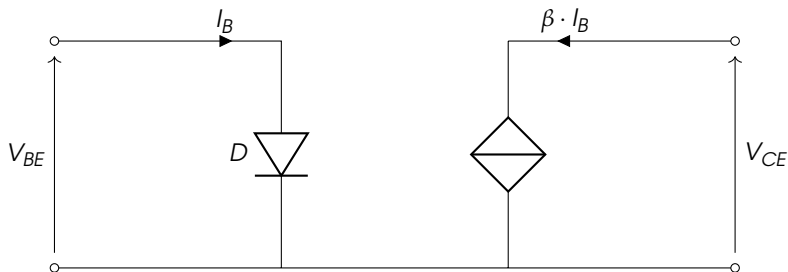
Caractéristique du collecteur  
(d'après A. Malvino)

Le transistor BJT est un composant **non-linéaire**.

2 jonctions  $\rightarrow$  4 modes de fonctionnement :

Mode	Jonction BE	Jonction BC	Comportement
Amplificateur	Passante	Bloquée	Amplificateur de courant quasi-linéaire
Amplificateur dégradé	Bloquée	Passante	Amplificateur de courant quasi-linéaire, mode inversé et aux caractéristiques dégradées
Bloqué	Bloquée	Bloquée	Interrupteur ouvert
Saturé	Passante	Passante	Interrupteur fermé

# Modèle électrique en mode amplificateur de courant



## Transistor MOSFET

**MOSFET** : *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*

**MOSFET** : *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*

Deux types :

- Canal P
- **Canal N**

**MOSFET** : *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*

Deux types :

- Canal P
- **Canal N**

Deux "modes" de fabrication :

- D-MOSFET ou à appauvrissement (applications en amplification RF)
- **E-MOSFET ou à enrichissement** (applications en commutation numérique)

# Généralités et modèle physique

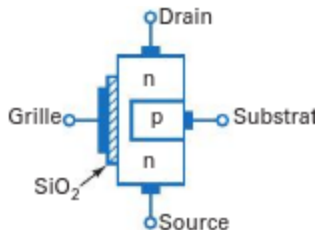
**MOSFET** : *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*

Deux types :

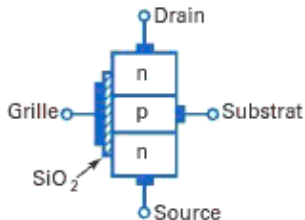
- Canal P
- **Canal N**

Deux "modes" de fabrication :

- D-MOSFET ou à appauvrissement (applications en amplification RF)
- **E-MOSFET ou à enrichissement** (applications en commutation numérique)



Structure d'un MOSFET à appauvrissement (d'après A. Malvino).



Structure d'un MOSFET à enrichissement (d'après A. Malvino).

**Concept fondamental** : Quand la tension grille est nulle, le courant drain est nul ; pour cette raison, un E-MOSFET est *normalement* « off » (off : non conducteur).

**Concept fondamental** : Quand la tension grille est nulle, le courant drain est nul ; pour cette raison, un E-MOSFET est *normalement* « off » (off : non conducteur).

## Transistors BJT et MOSFET

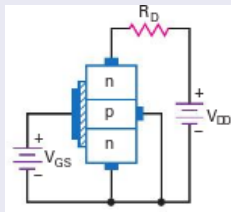
Paramètres	BJT	MOSFET
Entrée	$V_{BE}, I_B$	$V_{GS}, I_G = 0$
Sortie	$V_{CE}, I_C$	$V_{DS}, I_D$

**Concept fondamental** : Quand la tension grille est nulle, le courant drain est nul ; pour cette raison, un E-MOSFET est *normalement* « off » (off : non conducteur).

## Transistors BJT et MOSFET

Paramètres	BJT	MOSFET
Entrée	$V_{BE}, I_B$	$V_{GS}, I_G = 0$
Sortie	$V_{CE}, I_C$	$V_{DS}, I_D$

## Principe



- $I_D > 0$  si  $V_{GS} > 0$

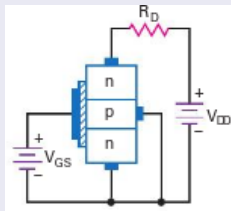
Polarisation d'un MOSFET à enrichissement (d'après A. Malvino).

**Concept fondamental** : Quand la tension grille est nulle, le courant drain est nul ; pour cette raison, un E-MOSFET est *normalement* « off » (off : non conducteur).

## Transistors BJT et MOSFET

Paramètres	BJT	MOSFET
Entrée	$V_{BE}, I_B$	$V_{GS}, I_G = 0$
Sortie	$V_{CE}, I_C$	$V_{DS}, I_D$

## Principe



Polarisation d'un MOSFET à enrichissement (d'après A. Malvino).

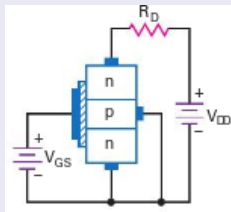
- $I_D > 0$  si  $V_{GS} > 0$
- Attraction des électrons libres dans la région P vers la grille.

**Concept fondamental :** Quand la tension grille est nulle, le courant drain est nul ; pour cette raison, un E-MOSFET est *normalement* « off » (off : non conducteur).

## Transistors BJT et MOSFET

Paramètres	BJT	MOSFET
Entrée	$V_{BE}, I_B$	$V_{GS}, I_G = 0$
Sortie	$V_{CE}, I_C$	$V_{DS}, I_D$

## Principe



Polarisation d'un MOSFET à enrichissement (d'après A. Malvino).

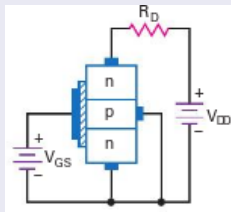
- $I_D > 0$  si  $V_{GS} > 0$
- Attraction des électrons libres dans la région P vers la grille.
- Recombinaison des électrons libres avec les trous au voisinage du  $\text{SiO}_2$ .

**Concept fondamental :** Quand la tension grille est nulle, le courant drain est nul ; pour cette raison, un E-MOSFET est *normalement* « off » (off : non conducteur).

## Transistors BJT et MOSFET

Paramètres	BJT	MOSFET
Entrée	$V_{BE}, I_B$	$V_{GS}, I_G = 0$
Sortie	$V_{CE}, I_C$	$V_{DS}, I_D$

## Principe



Polarisation d'un MOSFET à enrichissement (d'après A. Malvino).

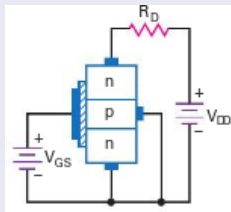
- $I_D > 0$  si  $V_{GS} > 0$
- Attraction des électrons libres dans la région P vers la grille.
- Recombinaison des électrons libres avec les trous au voisinage du  $\text{SiO}_2$ .
- Si  $V_{GS} \gg 0$ , les trous près du  $\text{SiO}_2$  sont comblés.

**Concept fondamental** : Quand la tension grille est nulle, le courant drain est nul ; pour cette raison, un E-MOSFET est *normalement* « off » (off : non conducteur).

## Transistors BJT et MOSFET

Paramètres	BJT	MOSFET
Entrée	$V_{BE}, I_B$	$V_{GS}, I_G = 0$
Sortie	$V_{CE}, I_C$	$V_{DS}, I_D$

## Principe



Polarisation d'un MOSFET à enrichissement (d'après A. Malvino).

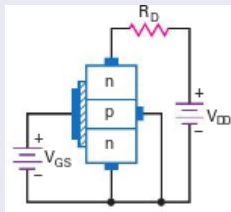
- $I_D > 0$  si  $V_{GS} > 0$
- Attraction des électrons libres dans la région P vers la grille.
- Recombinaison des électrons libres avec les trous au voisinage du  $SiO_2$ .
- Si  $V_{GS} \gg 0$ , les trous près du  $SiO_2$  sont comblés.
- Enfin, attraction des électrons présents dans les régions n+ → création du canal.

**Concept fondamental** : Quand la tension grille est nulle, le courant drain est nul ; pour cette raison, un E-MOSFET est *normalement* « off » (off : non conducteur).

## Transistors BJT et MOSFET

Paramètres	BJT	MOSFET
Entrée	$V_{BE}, I_B$	$V_{GS}, I_G = 0$
Sortie	$V_{CE}, I_C$	$V_{DS}, I_D$

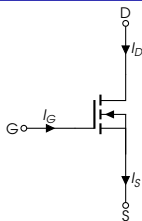
## Principe



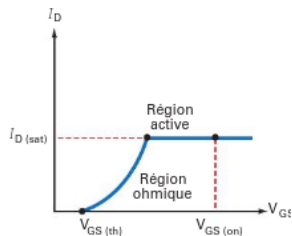
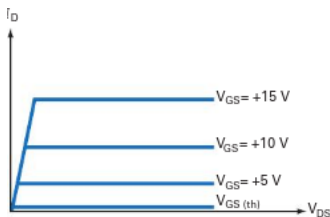
Polarisation d'un MOSFET à enrichissement (d'après A. Malvino).

En conclusion, si  $V_{GS}$  est supérieure à une **tension de seuil**  $V_{GS(th)}$ , le canal est créé et l'E-MOSFET est « on » (on : conducteur)

# Symbole électrique et courbes du courant drain

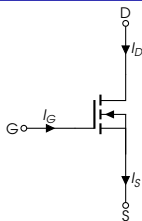


Symbole graphique  
du transistor  
E-MOSFET à canal N.

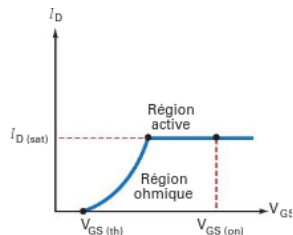
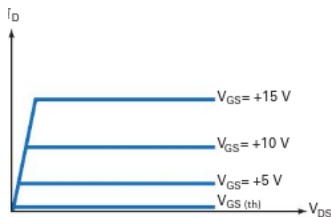


Courbes caractéristiques de l'E-MOSFET (d'après A. Malvino).

# Symbole électrique et courbes du courant drain



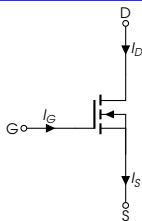
Symbole graphique  
du transistor  
E-MOSFET à canal N.



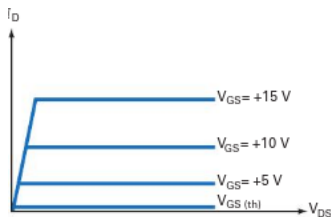
Courbes caractéristiques de l'E-MOSFET (d'après A. Malvino).

- $V_{GS} < V_{GS(th)}$  : transistor bloqué,  $I_D = 0$ .
- $V_{GS} \geq V_{GS(th)}$  : transistor passant,  $I_D > 0$ .

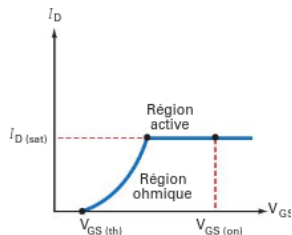
# Symbole électrique et courbes du courant drain



Symbole graphique  
du transistor  
E-MOSFET à canal N.



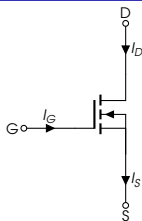
Courbes caractéristiques de l'E-MOSFET (d'après A. Malvino).



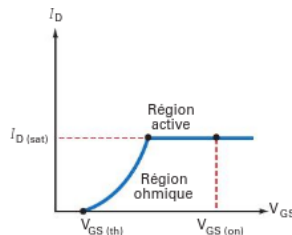
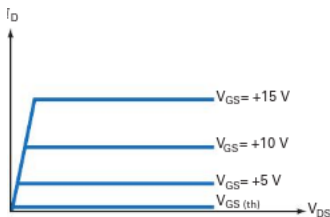
- $V_{GS} < V_{GS(th)}$  : transistor bloqué,  $I_D = 0$ .
- $V_{GS} \geq V_{GS(th)}$  : transistor passant,  $I_D > 0$ .

Le transistor MOSFET est un composant **non-linéaire**.

# Symbole électrique et courbes du courant drain



Symbole graphique  
du transistor  
E-MOSFET à canal N.



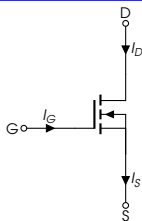
Courbes caractéristiques de l'E-MOSFET (d'après A. Malvino).

## Remarques sur la zone passante

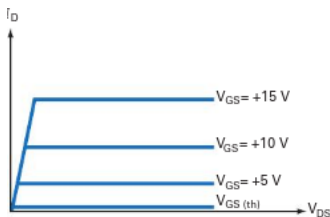
Dans la région ohmique, le transistor est équivalent à une résistance  $R_{DS(on)}$  (donnée constructeur),

- $R_{DS(on)} = \frac{V_{DS(on)}}{I_{D(on)}}$
- $0 \leq V_{DS} \leq V_{GS} - V_{GS(th)}$
- $I_D < K_n (V_{GS} - V_{GS(th)})^2$ , avec  $K_n$  le paramètre de transconductance liée à la fabrication.

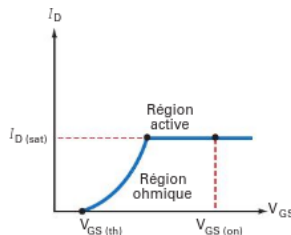
# Symbole électrique et courbes du courant drain



Symbole graphique  
du transistor  
E-MOSFET à canal N.



Courbes caractéristiques de l'E-MOSFET (d'après A. Malvino).



## Remarques sur la zone passante

Dans la région ohmique, le transistor est équivalent à une résistance  $R_{DS(on)}$  (donnée constructeur),

- $R_{DS(on)} = \frac{V_{DS(on)}}{I_{D(on)}}$
- $0 \leq V_{DS} \leq V_{GS} - V_{GS(th)}$
- $I_D < K_n (V_{GS} - V_{GS(th)})^2$ , avec  $K_n$  le paramètre de transconductance liée à la fabrication.

Dans la région active ou de saturation,

- $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{GS(th)}$
- $I_D = K_n (V_{GS} - V_{GS(th)})^2$

## Définitions

- **Commutation** : Passage brusque, pour un élément actif, de l'état bloqué à l'état saturé, ou inversement.

## Définitions

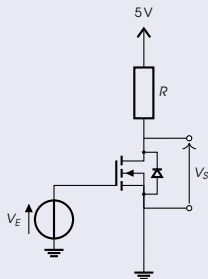
- **Commutation** : Passage brusque, pour un élément actif, de l'état bloqué à l'état saturé, ou inversement.
- **Électronique de commutation** : applications en électro-technique et électronique numérique.

## Définitions

- **Commutation** : Passage brusque, pour un élément actif, de l'état bloqué à l'état saturé, ou inversement.
- **Électronique de commutation** : applications en électro-technique et électronique numérique.

## Exemple : Commutation avec une charge résistive

Utilisation d'un MOSFET de puissance pour alimenter une charge de  $22\ \Omega$  :



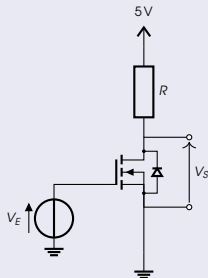
- $V_{CC} = 5\text{ V}$
- $0 \leq V_E \leq 5\text{ V}$
- $V_{GS(th)} = 2\text{ V}$

## Définitions

- **Commutation** : Passage brusque, pour un élément actif, de l'état bloqué à l'état saturé, ou inversement.
- **Électronique de commutation** : applications en électro-technique et électronique numérique.

## Exemple : Commutation avec une charge résistive

Utilisation d'un MOSFET de puissance pour alimenter une charge de  $22\ \Omega$  :



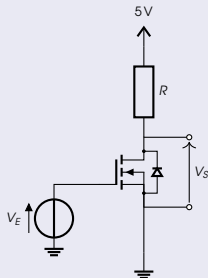
- $V_{CC} = 5\text{ V}$
- $0 \leq V_E \leq 5\text{ V}$
- $V_{GS(th)} = 2\text{ V}$
- Pour  $V_E = 0\text{ V}$ , nous remplaçons le MOSFET par son schéma équivalent bloqué car  $V_E < V_{GS(th)}$ .

## Définitions

- **Commutation** : Passage brusque, pour un élément actif, de l'état bloqué à l'état saturé, ou inversement.
- **Électronique de commutation** : applications en électro-technique et électronique numérique.

## Exemple : Commutation avec une charge résistive

Utilisation d'un MOSFET de puissance pour alimenter une charge de  $22\ \Omega$  :



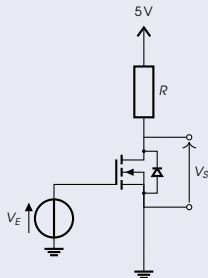
- $V_{CC} = 5\text{ V}$
- $0 \leq V_E \leq 5\text{ V}$
- $V_{GS(th)} = 2\text{ V}$
- Pour  $V_E = 0\text{ V}$ , nous remplaçons le MOSFET par son schéma équivalent bloqué car  $V_E < V_{GS(th)}$ .
- Loi de mailles à la sortie :  $V_S = V_{DS} = V_{CC}$  car  $I_D = 0$ .

## Définitions

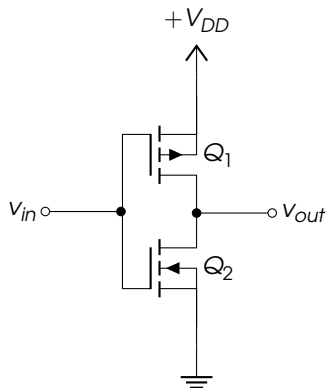
- **Commutation** : Passage brusque, pour un élément actif, de l'état bloqué à l'état saturé, ou inversement.
- **Électronique de commutation** : applications en électro-technique et électronique numérique.

## Exemple : Commutation avec une charge résistive

Utilisation d'un MOSFET de puissance pour alimenter une charge de  $22\ \Omega$  :



- $V_{CC} = 5\text{ V}$
- $0 \leq V_E \leq 5\text{ V}$
- $V_{GS(th)} = 2\text{ V}$
- Pour  $V_E = 0\text{ V}$ , nous remplaçons le MOSFET par son schéma équivalent bloqué car  $V_E < V_{GS(th)}$ .
- Loi de mailles à la sortie :  $V_S = V_{DS} = V_{CC}$  car  $I_D = 0$ .
- Pour  $V_E = 5\text{ V}$ ,  $V_{GS} > V_{GS(th)}$ , donc le transistor est passant,  $I_D \neq 0$  et  $V_S \approx 0$  à condition que  $R \gg R_{DS}$  (si zone ohmique).



Inverseur logique CMOS

$v_{in}$	$V_{GSN}$	$V_{GSP}$	NMOS	PMOS	$v_{out}$
0	0	$-V_{DD}$	bloqué	passant	$V_{DD}$
$V_{DD}$	$V_{DD}$	0	passant	bloqué	0