

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

Généralités (1/2)

Transistor = transfer resistor

Généralités (1/2)

Transistor = transfer resistor

Deux modes d'utilisation des transistors :

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 :

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 :

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 :

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...

Généralités (1/2)

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

Généralités et modèle physique (1/2)

BJT : *Bipolar Junction Transistor*

Généralités et modèle physique (1/2)

BJT : *Bipolar Junction Transistor*

Deux types :

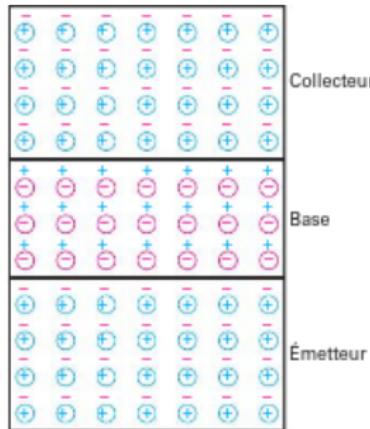
- PNP
- NPN

Généralités et modèle physique (1/2)

BJT : Bipolar Junction Transistor

Deux types :

- PNP
- NPN



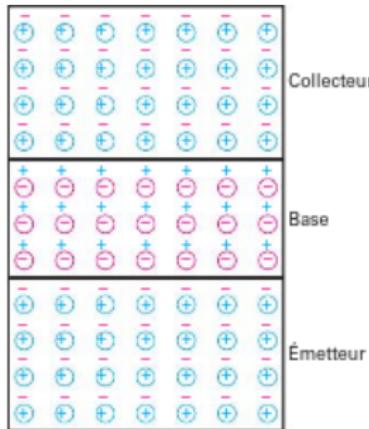
Structure d'un transistor NPN (d'après A. Malvino).

Généralités et modèle physique (1/2)

BJT : Bipolar Junction Transistor

Deux types :

- PNP
- NPN

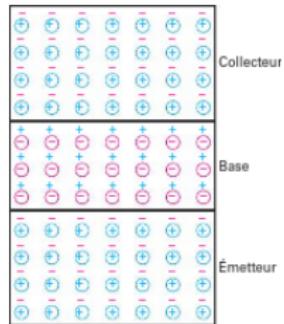


Structure d'un transistor NPN (d'après A. Malvino).

Trois zones dopées :

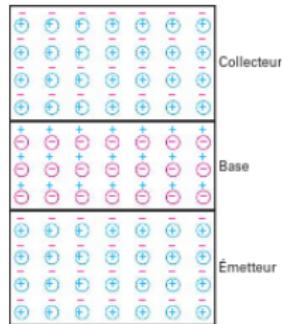
- émetteur
- base (faiblement)
- collecteur

Généralités et modèle physique (2/2)

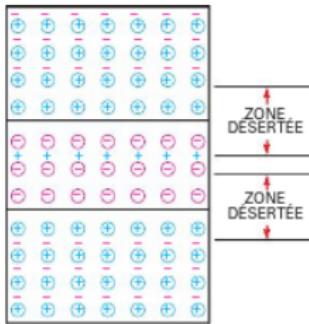


Régions du transistor avant
diffusion
(d'après A. Malvino).

Généralités et modèle physique (2/2)

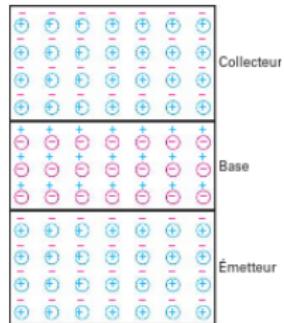


Régions du transistor avant diffusion
(d'après A. Malvino).

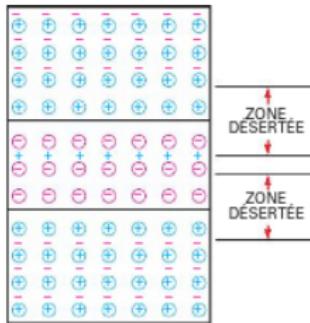


Régions du transistor après diffusion
(d'après A. Malvino).

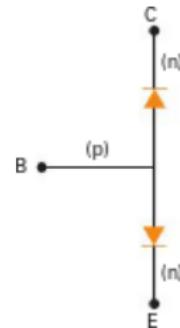
Généralités et modèle physique (2/2)



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

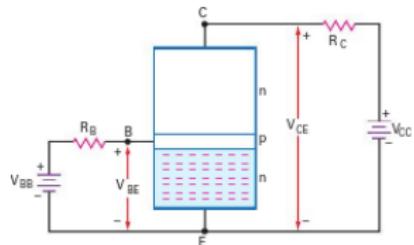


Régions du transistor après diffusion
(d'après A. Malvino).



Modèle équivalent
(d'après A. Malvino).

Transistor polarisé

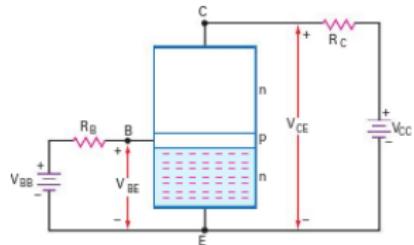


Transistor polarisé
(d'après A. Malvino).

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.

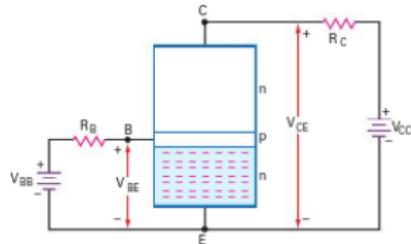
Transistor polarisé



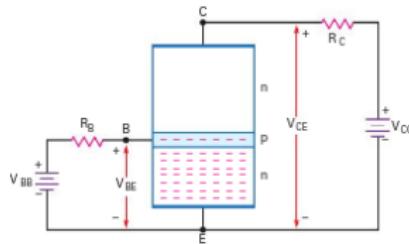
Transistor polarisé
(d'après A. Malvino).

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



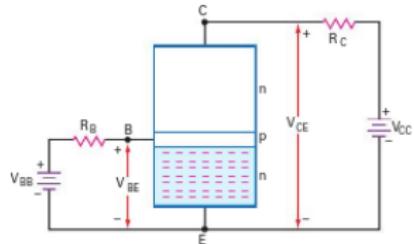
Transistor polarisé
(d'après A. Malvino).



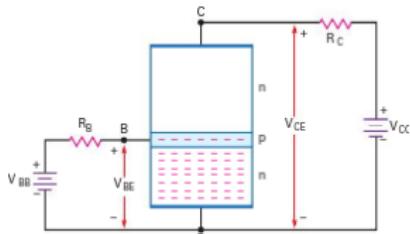
L'émetteur injecte des électrons libres dans la base (d'après A. Malvino).

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).

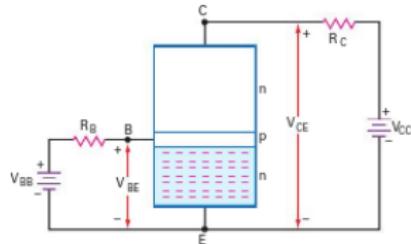


L'émetteur injecte des électrons libres dans la base (d'après A. Malvino).

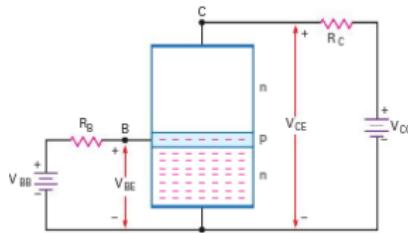
Si $V_{BB} > V_{BE}$, les électrons de l'émetteur passent dans la base (**courant I_E**).

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

Transistor polarisé



Transistor polarisé
(d'après A. Malvino).



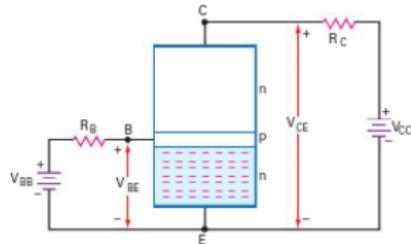
L'émetteur injecte des électrons libres dans la base
(d'après A. Malvino).

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

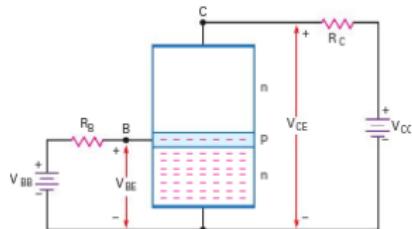
Seul un petit nombre d'électrons libres se recombinent avec des trous dans la base.

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

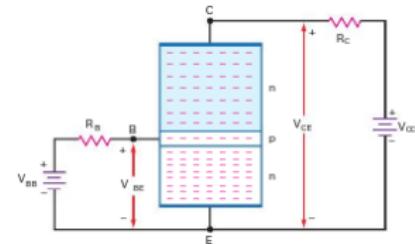
Transistor polarisé



Transistor polarisé
(d'après A. Malvino).



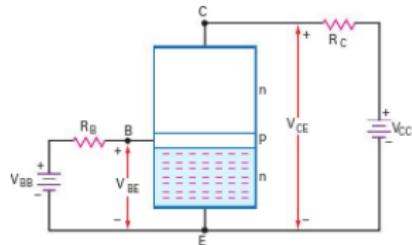
L'émetteur injecte des électrons libres dans la base (d'après A. Malvino).



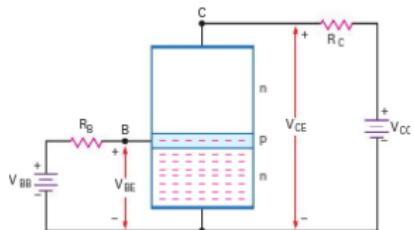
Les électrons libres de la base vont dans le collecteur. (d'après A. Malvino).

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

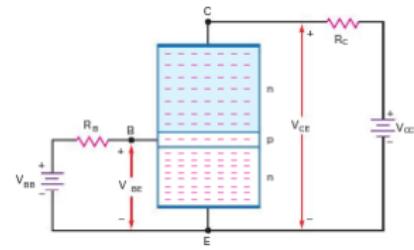
Transistor polarisé



Transistor polarisé
(d'après A. Malvino).



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

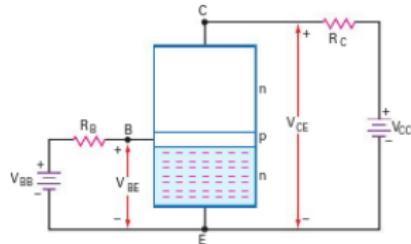


Les électrons libres de la base vont dans le collecteur. (d'après A. Malvino).

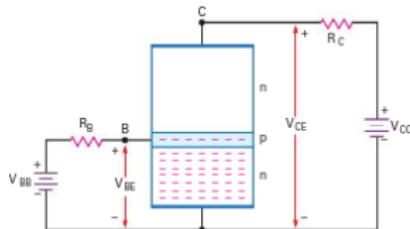
Presque tous les électrons de l'émetteur vont dans le collecteur.

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

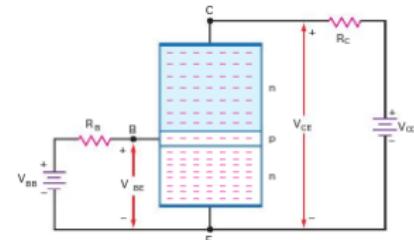
Transistor polarisé



Transistor polarisé
(d'après A. Malvino).



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



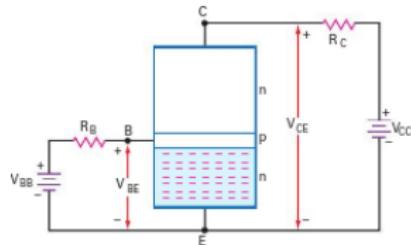
Les électrons libres de la base vont dans le collecteur.
(d'après A. Malvino).

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

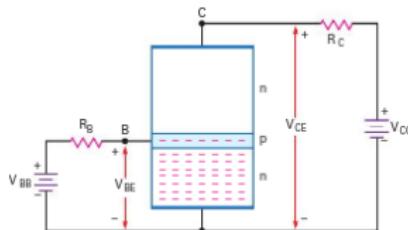
Une fois arrivés, ils ressentent l'attraction de la tension V_{CC} .

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

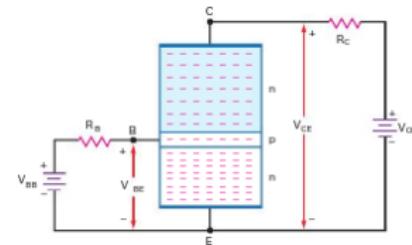
Transistor polarisé



Transistor polarisé
(d'après A. Malvino).



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



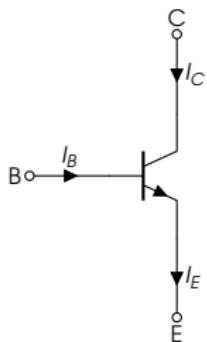
Les électrons libres de la base vont dans le collecteur. (d'après A. Malvino).

Résumé

Polarisation directe de la diode émetteur :

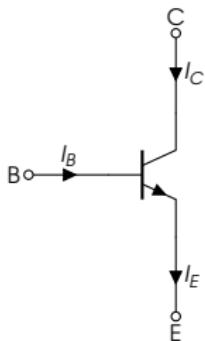
- Circulation des courants I_E et I_B .
- Traversée des électrons de l'émetteur vers le collecteur en raison de la minceur et faible dopage de la base → circulation du courant I_C .

Courants du transistor



Symbole graphique du transistor NPN.

Courants du transistor

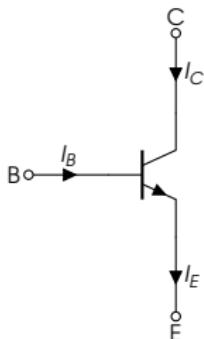


En appliquant la loi de Kirchhoff à la jonction :

$$I_E = I_B + I_C$$

Symbole graphique du transistor NPN.

Courants du transistor



En appliquant la loi de Kirchhoff à la jonction :

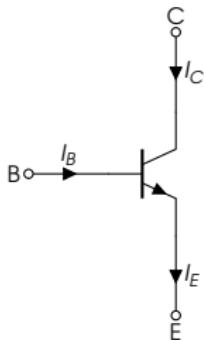
$$I_E = I_B + I_C$$

Symbol graphique du transistor NPN.

Relations entre courants

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

Courants du transistor



En appliquant la loi de Kirchhoff à la jonction :

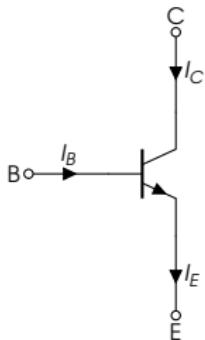
$$I_E = I_B + I_C$$

Symbol graphique du transistor NPN.

Relations entre courants

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

Courants du transistor



En appliquant la loi de Kirchhoff à la jonction :

$$I_E = I_B + I_C$$

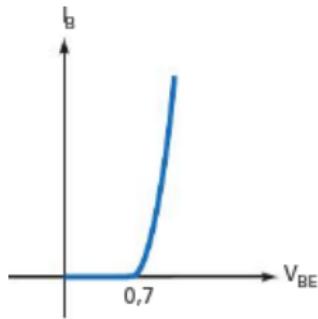
Symbol graphique du transistor NPN.

Relations entre courants

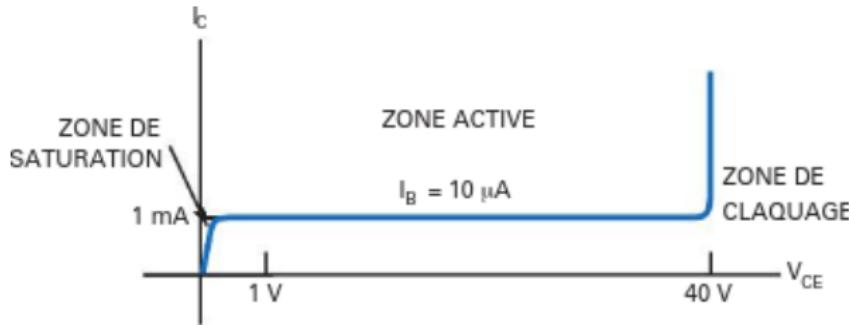
- $I_C \approx I_E \rightarrow \alpha = \frac{I_C}{I_E} \approx 1$
- $I_B \ll I_C \rightarrow \beta = \frac{I_C}{I_B}, 100 < \beta < 300$

β est le **gain en courant**

Caractéristiques



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



Caractéristique du collecteur
(d'après A. Malvino)

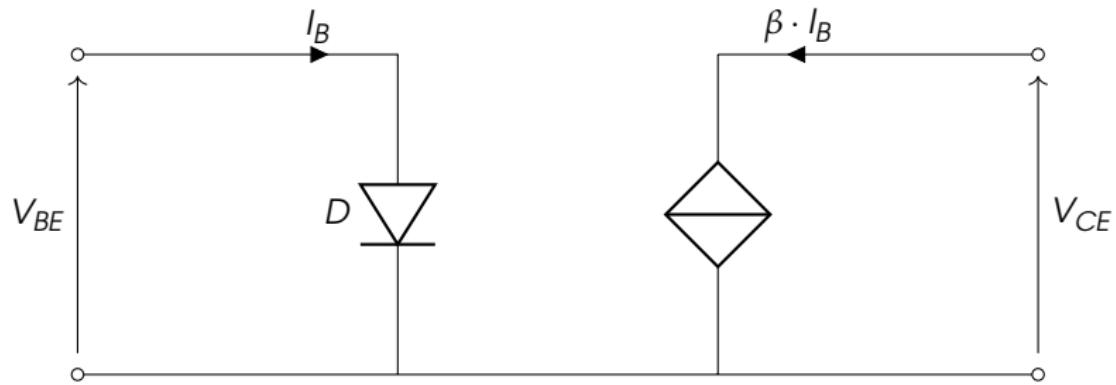
Le transistor BJT est un composant **non-linéaire**.

Zones et modes de fonctionnement

2 jonctions → 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

Généralités et modèle physique

MOSFET : *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*

Généralités et modèle physique

MOSFET : *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*

Deux types :

- Canal P
- **Canal N**

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)

Généralités et modèle physique

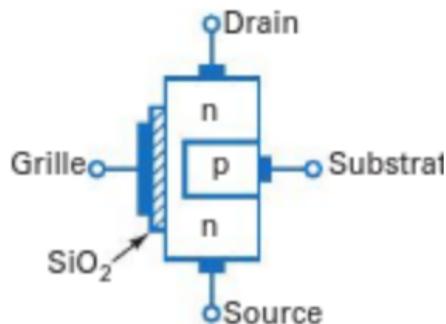
MOSFET : Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

Deux types :

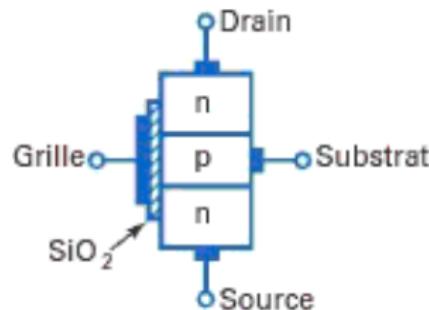
- Canal P
- **Canal N**

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).

E-MOSFET

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

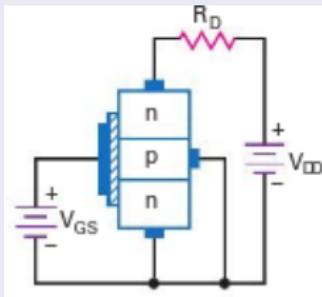
E-MOSFET

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).

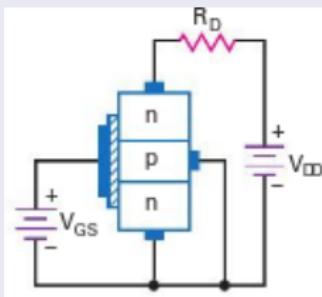
E-MOSFET

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

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

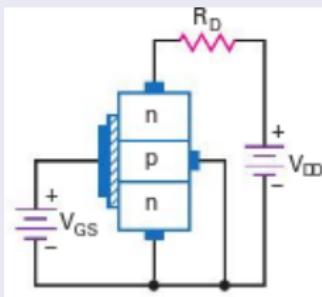
E-MOSFET

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 $V_{GS} > 0$
- Attraction des électrons libres dans la région P vers la grille.
- Recombinaison des électrons libres avec les trous au voisinage du SiO_2 .

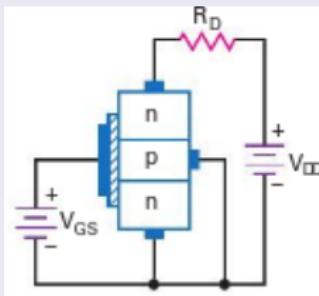
Polarisation d'un MOSFET à enrichissement (d'après A. Malvino).

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).

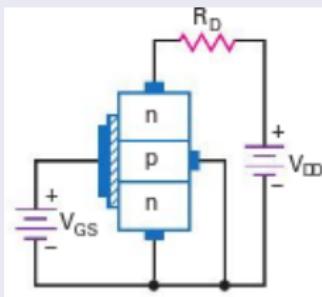
- $I_D > 0$ si $V_{GS} > 0$
- Attraction des électrons libres dans la région P vers la grille.
- Recombinaison des électrons libres avec les trous au voisinage du SiO_2 .
- Si $V_{GS} \gg 0$, les trous près du SiO_2 sont comblés.

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.

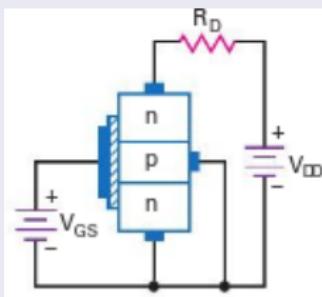
E-MOSFET

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

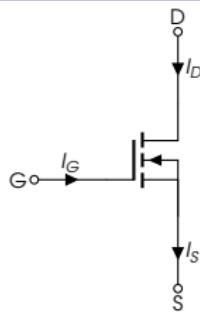
Principe



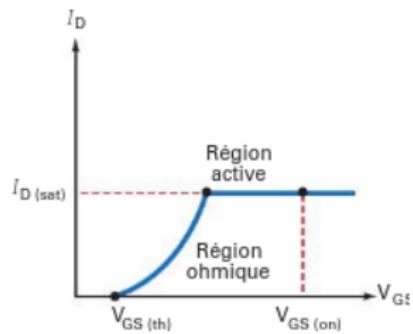
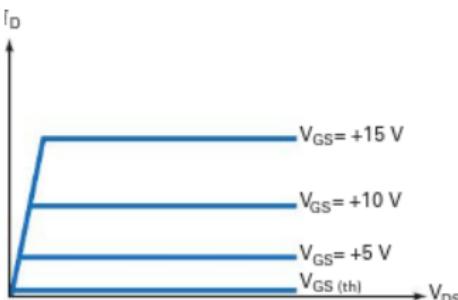
Polarisation d'un MOSFET à enrichissement (d'après A. Malvino).

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

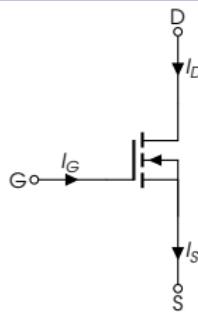


Symbol graphique
du transistor
E-MOSFET à canal N.

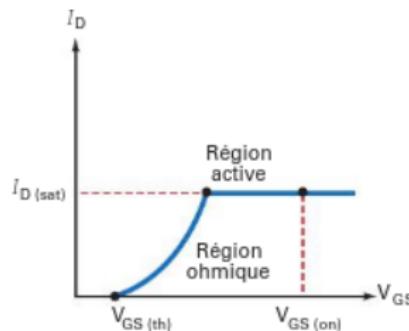
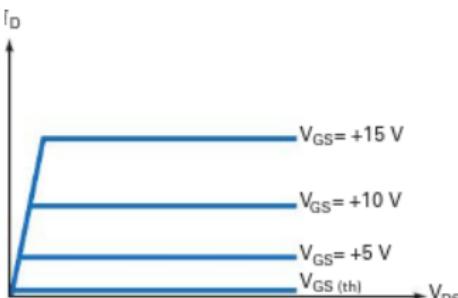


Courbes caractéristiques de l'E-MOSFET (d'après A. Malvino).

Symbole électrique et courbes du courant drain



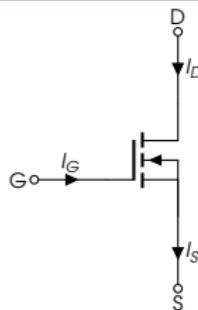
Symbole graphique
du transistor
E-MOSFET à canal N.



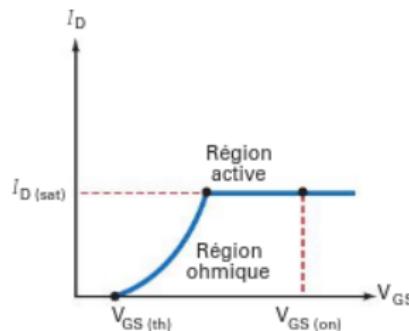
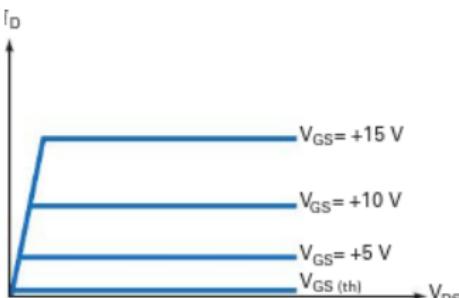
Courbes caractéristiques de l'E-MOSFET (d'après A. Malvino).

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

Symbole électrique et courbes du courant drain



Symbol graphique
du transistor
E-MOSFET à canal N.

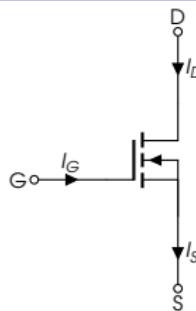


Courbes caractéristiques de l'E-MOSFET (d'après A. Malvino).

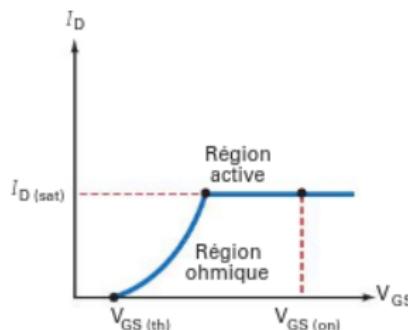
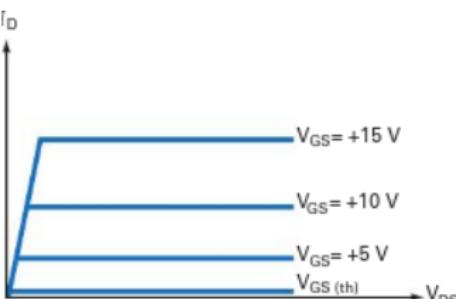
- $V_{GS} < V_{GS(th)}$: transistor bloqué, $I_D = 0$.
- $V_{GS} \geq V_{GS(th)}$: transistor passant, $I_D > 0$.

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

Symbole électrique et courbes du courant drain



Symbol graphique
du transistor
E-MOSFET à canal N.



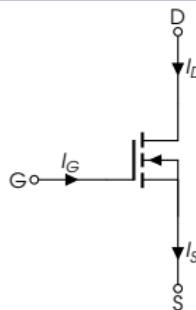
Courbes caractéristiques de l'E-MOSFET (d'après A. Malvino).

Remarques sur la zone passante

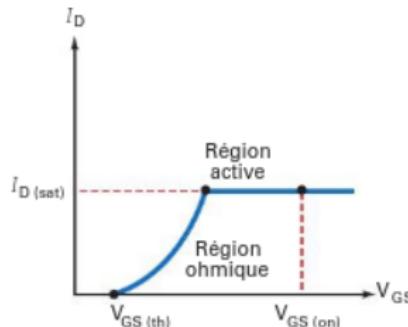
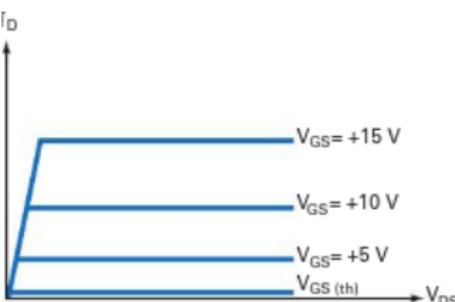
Dans la région ohmique, le transistor est équivalent à une résistance $R_{DS(on)}$ (donnée constructeur),

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

Symbole électrique et courbes du courant drain



Symbol 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),

$$R_{DS(on)} = \frac{V_{DS(on)}}{I_{D(on)}}$$

$$0 \leq V_{DS} \leq V_{GS} - V_{GS(th)}$$

$$I_D < K_n(V_{GS} - V_{GS(th)})^2, \text{ avec } K_n \text{ le paramètre de transconductance liée à la fabrication.}$$

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

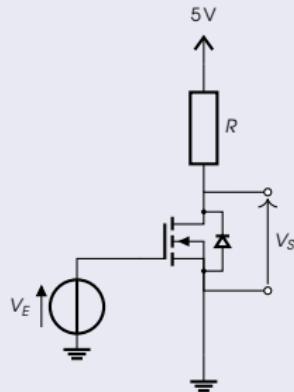
- **Commutation** : Passage brusque, pour un élément actif, de l'état bloqué à l'état saturé, ou inversement.
- **Électronique de commutation** : applications en électro-technique et électronique numérique.

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 22Ω :



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

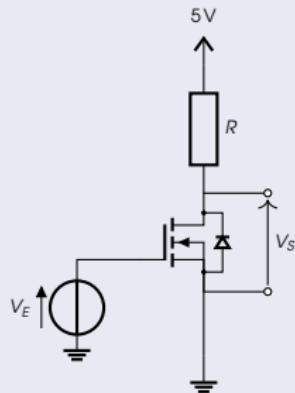
Commutation (1/2)

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 22Ω :



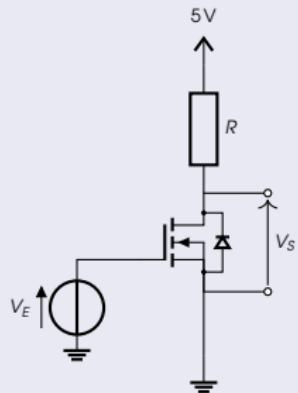
- $V_{CC} = 5 \text{ V}$
- $0 \leq V_E \leq 5 \text{ V}$
- $V_{GS(th)} = 2 \text{ V}$
- Pour $V_E = 0 \text{ V}$, nous remplaçons le MOSFET par son schéma équivalent bloqué car $V_E < V_{GS(th)}$.

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 22Ω :



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

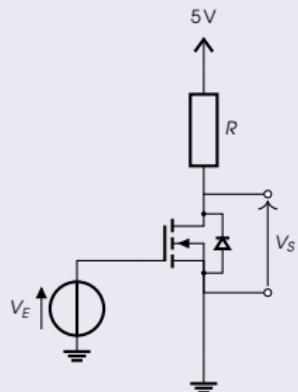
Commutation (1/2)

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.

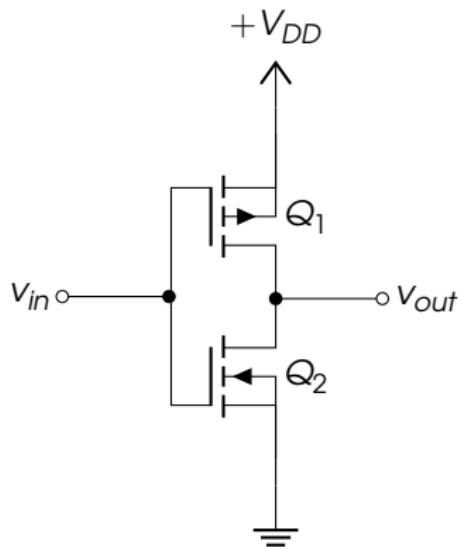
Exemple : Commutation avec une charge résistive

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).

Commutation (2/2)



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