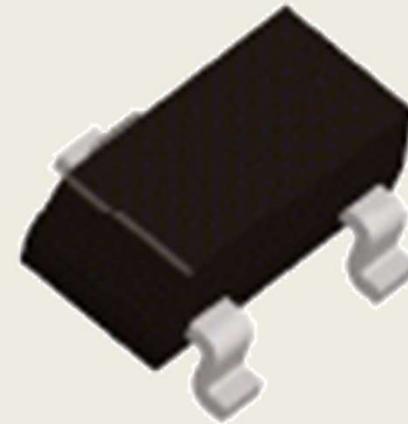


Les transistors et leurs applications

PLAN

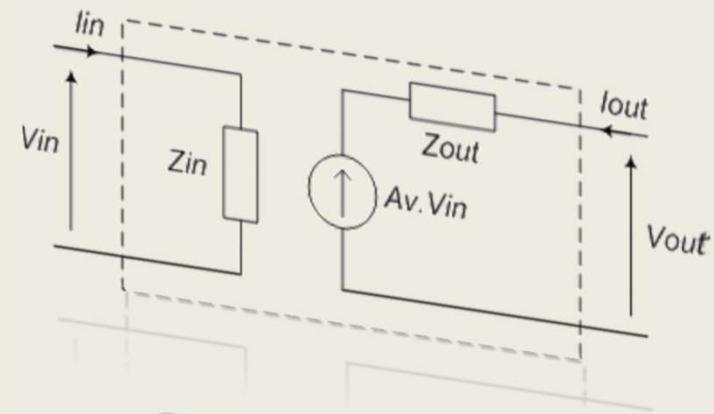
1. Les amplificateurs
2. Les transistors Bipolaires
 - 2.1. Définition
 - 2.2. La commutation
 - 2.3. L'amplification
3. Les transistors à effet de champs
 - 3.1. Définition
 - 3.2. La commutation
 - 3.3. L'amplification
4. Comparaison des deux technologies
- 5 Les applications
 - 5.1. La génération de courant
 - 5.2. La charge active
 - 5.3. La paire différentielle
 - 5.4. L'amplification de puissance
 - 5.5. L'amplificateur opérationnel
 - 5.6. L'alimentation linéaire
 - 5.7. L'adaptation de tension
 - 5.8. Les montages non linéaires



1. Les amplificateurs

PLAN

1. Les amplificateurs
2. Les transistors Bipolaires
 - 2.1. Définition
 - 2.2. La commutation
 - 2.3. L'amplification
3. Les transistors à effet de champs
 - 3.1. Définition
 - 3.2. La commutation
 - 3.3. L'amplification
4. Comparaison des deux technologies
5. Les applications
 - 5.1. La génération de courant
 - 5.2. La charge active
 - 5.3. La paire différentielle
 - 5.4. L'amplification de puissance
 - 5.5. L'amplificateur opérationnel
 - 5.6. L'alimentation linéaire
 - 5.7. L'adaptation de tension
 - 5.8. Les montages non linéaires



Equations :

$$u_1 = h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot u_2$$

$$i_2 = h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot u_2$$

Forme matricielle:

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \pi^3 \\ \pi^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mu^{31} & \mu^{33} \\ \mu^{11} & \mu^{13} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \pi^3 \\ \pi^1 \end{pmatrix}$$

1. Les amplificateurs

Modèle Quadripôle d'un amplificateur

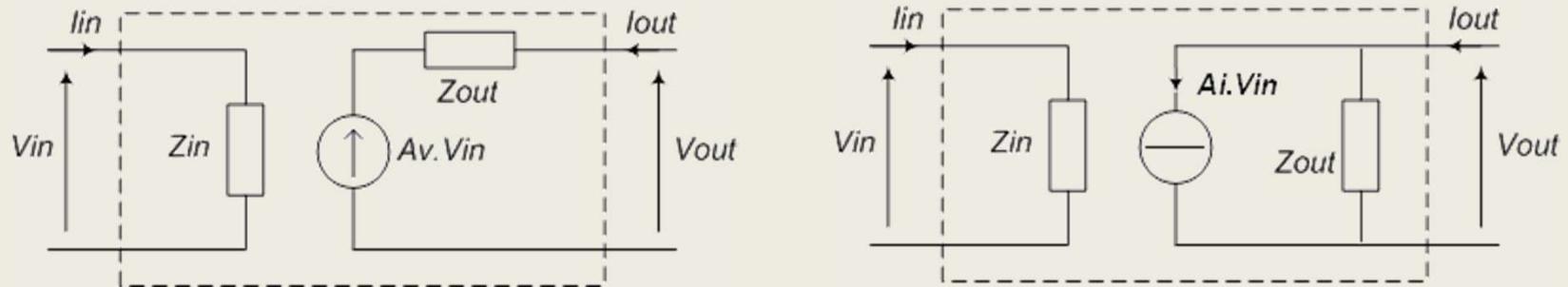
Un amplificateur peut être représenté de façon générale par :

Son impédance d'entrée (Z_{in}), son gain en tension (A_v) ou en courant (A_i) et son impédance de sortie (Z_{out}).

Le quadripôle d'un amplificateur peut être déterminé par les différentes matrices classiques (admittance, impédance et hybride)

Z_{in} , A_v , A_i et Z_{out} peuvent être exprimé avec les paramètres des différentes matrices.

La représentation la plus utilisée pour un amplificateur est la suivante:

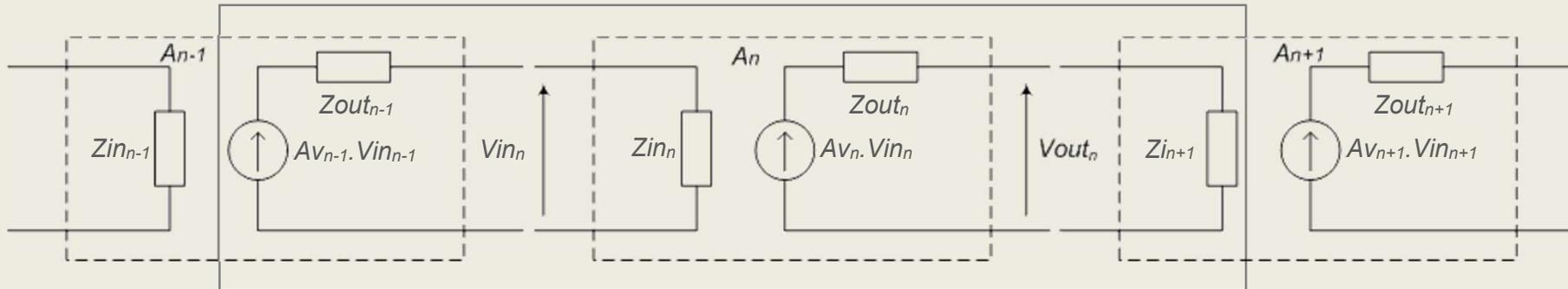


Important :

- Faire attention au sens des courants
- Vérifier si l'étude du quadripôle est effectuée à vide ou en charge.

1. Les amplificateurs

L'amplificateur de tension chargé



Le chainage des amplificateurs peut avoir une influence sur le comportement.

- La tension d'entrée Vin_n de l'amplificateur An est dépendante des impédances $Zout_{n-1}$ et Zin_n avec la relation :

$$Vin_n = Av_{n-1} \cdot Vin_{n-1} \frac{Zin_n}{Zin_n + Zout_{n-1}}$$

- La tension de sortie $Vout_n$ de l'amplificateur An est dépendante des impédances $Zout_n$ et Zin_{n+1} avec la relation :

$$Vout_n = Av_n \cdot Vin_n \frac{Zin_{n+1}}{Zin_{n+1} + Zout_n}$$

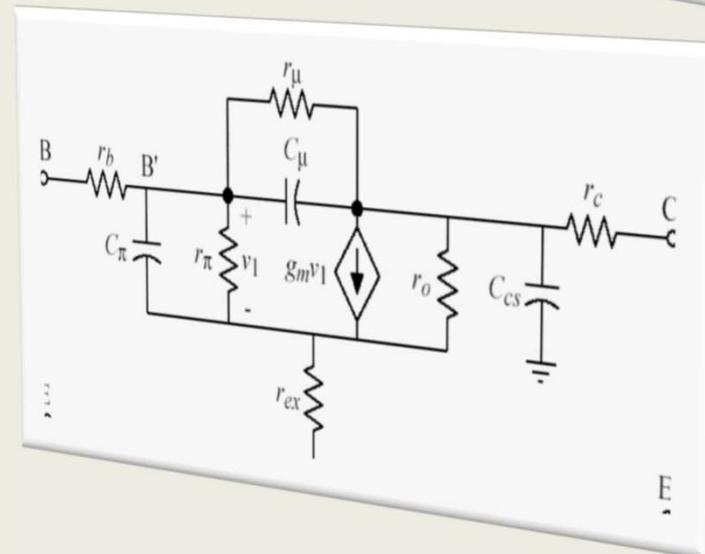
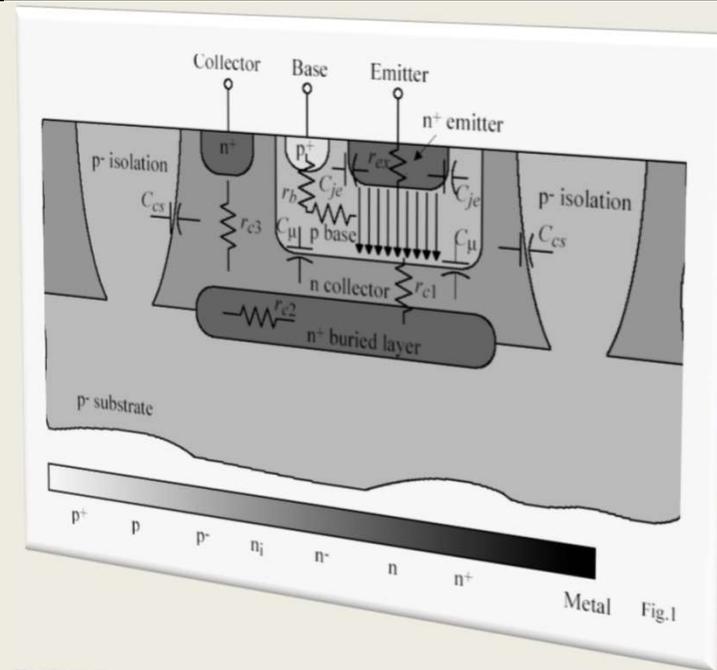
En conclusion, pour rendre un amplificateur indépendant de ces conditions il faut que

Zin soit la plus grande possible et $Zout$ la plus faible possible.

2. Les transistors bipolaires

PLAN

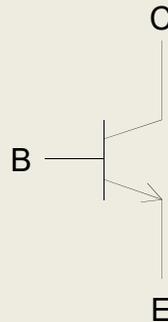
1. Les amplificateurs
2. Les transistors Bipolaires
 - 2.1. Définition
 - 2.2. La commutation
 - 2.3. L'amplification
3. Les transistors à effet de champs
 - 3.1. Définition
 - 3.2. La commutation
 - 3.3. L'amplification
4. Comparaison des deux technologies
5. Les applications
 - 5.1. La génération de courant
 - 5.2. La charge active
 - 5.3. La paire différentielle
 - 5.4. L'amplification de puissance
 - 5.5. L'amplificateur opérationnel
 - 5.6. L'alimentation linéaire
 - 5.7. L'adaptation de tension
 - 5.8. Les montages non linéaires



2. Les transistors bipolaires

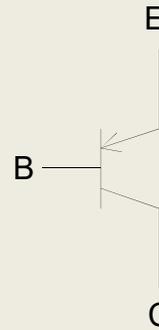
2.1. Définition

Transistor NPN



$$I_C = I_S \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right) \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right)$$

Transistor PNP



$$-I_C = I_S \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right) \left(e^{\frac{-V_{BE}}{V_T}} - 1 \right)$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_E = I_C + I_B$$

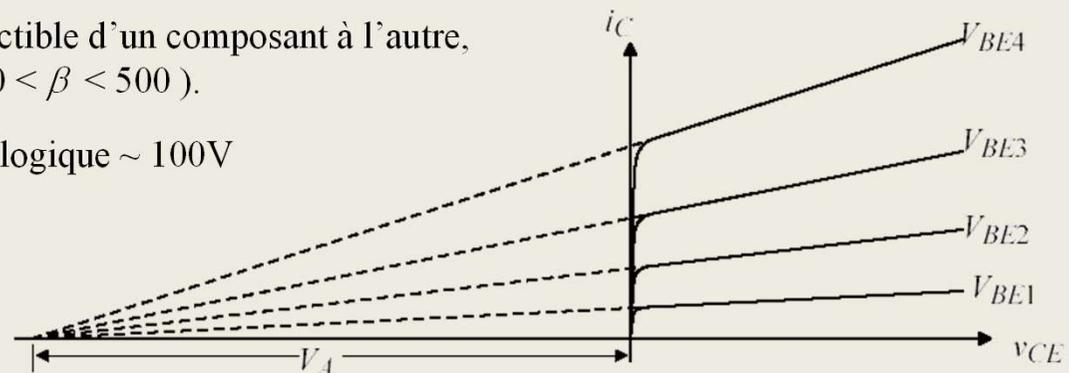
$$V_T = \frac{kT}{q}$$

I_S : Courant de saturation inverse de la jonction émetteur base $\sim 10^{-14}$ A

β : Gain en courant, Très peu reproductible d'un composant à l'autre, Défini par sa valeur minimale ($20 < \beta < 500$).

V_A : Tension d'Early, paramètre technologique ~ 100 V

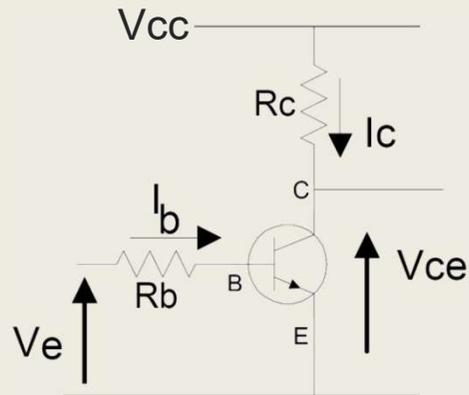
$$V_A = \frac{I_C}{\left(\frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} \right)_{V_{BE}}} - V_{CE}$$



2. Les transistors bipolaires

2.2. La commutation

Le transistor bipolaire est très utilisé en commutation. Le principe de base peut être représenté par le montage inverseur.

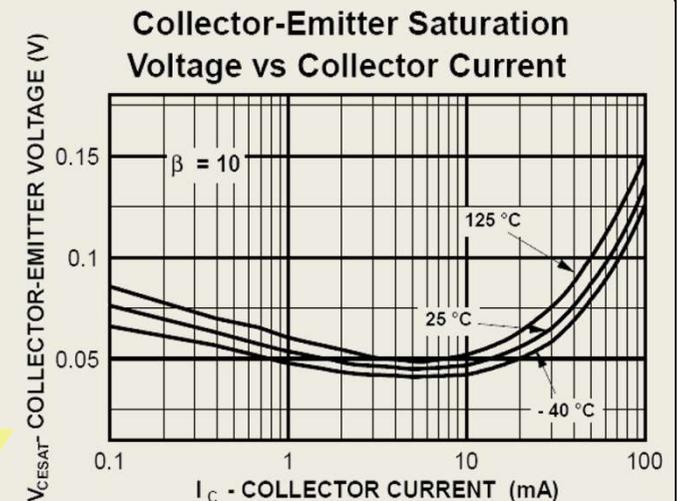


Condition de blocage (interrupteur ouvert) $I_b = 0 \Rightarrow V_{be} \ll V_{besat}$

Condition de saturation (interrupteur fermé) $I_b \gg \frac{I_c}{\beta_{min}}$

Dans ce cas, les paramètres importants sont les temps de commutation à l'ouverture et à la fermeture ainsi que la résistance en circuit ouvert R_{off} et en circuit fermé R_{on} (R_{cesat}).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
I_{CEX}	collector cut-off current	$V_{CE} = 30V, V_{EB} = 3V$	-	50	nA
I_{EBO}	emitter cut-off current	$I_C = 0; V_{EB} = 6V$	-	50	nA
Switching times (between 10% and 90% levels)					
Doc : 2N3904 Philips					
t_{on}	turn-on time	$I_{Con} = 10\text{ mA}; I_{Bon} = 1\text{ mA};$	-	65	ns
t_d	delay time	$I_{Boff} = -1\text{ mA}$	-	35	ns
t_r	rise time		-	35	ns
t_{off}	turn-off time		-	240	ns
t_s	storage time		-	200	ns
t_f	fall time		-	50	ns



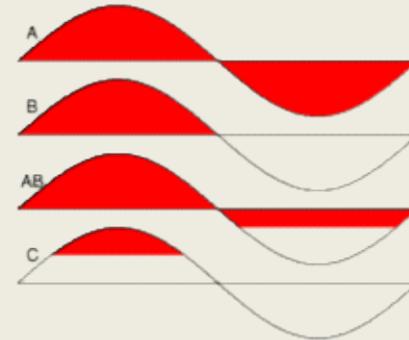
$$R_{on} = \frac{V_{cesat}}{I_c} \approx 5\Omega \quad R_{off} = \frac{V_{CEbloqué}}{I_{CEcutoff}} \approx 10^8\Omega$$

2. Les transistors bipolaires

2.3. L'amplification

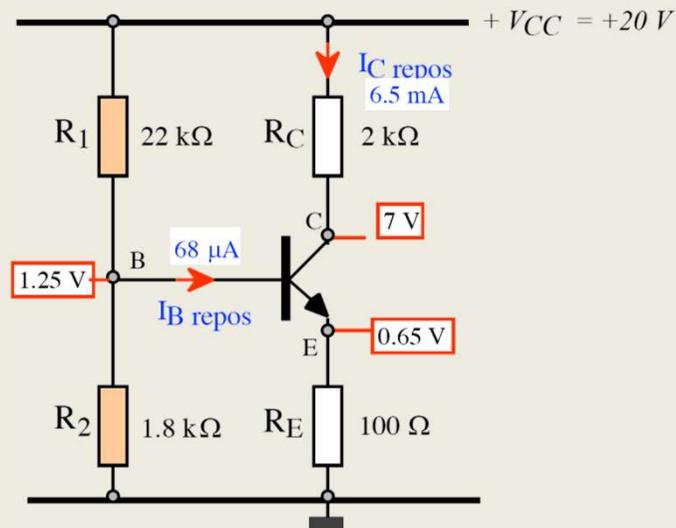
Différentes classes d'amplificateurs

A,B, AB,C Amplification analogique
D, E, F Amplification à découpage (MLI)
...



La polarisation

Pour fonctionner en amplificateur, un transistor doit être alimenté de façon à ce qu'il soit en régime linéaire. Pour cela un circuit de polarisation doit lui être appliqué.

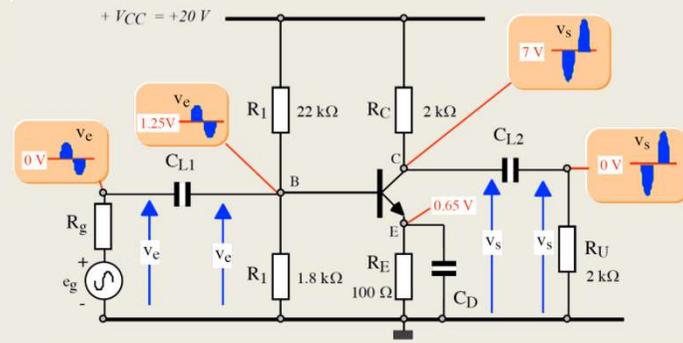
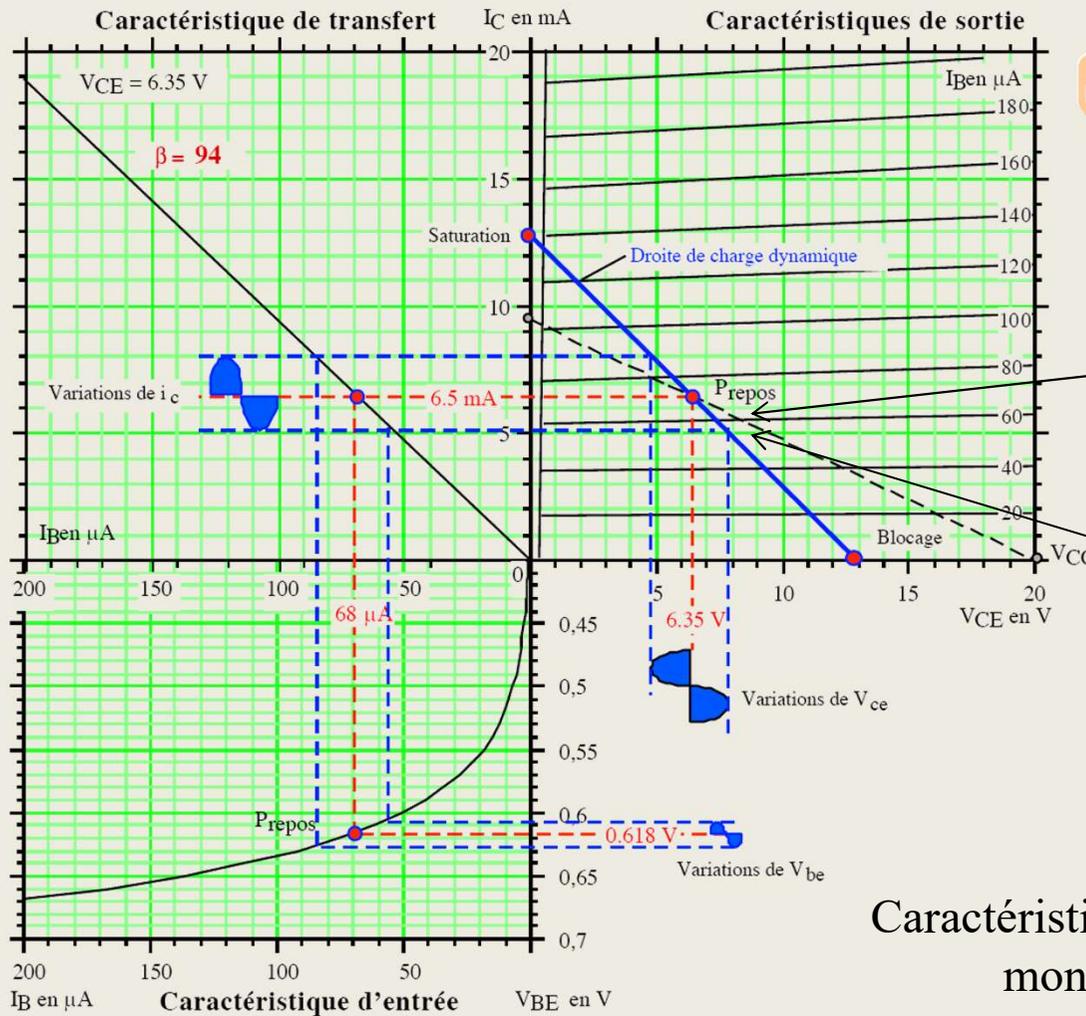


Le circuit formé par le transistor et l'ensemble des éléments doit vérifier les équations de définition

- Le rapport des différents courants I_c , I_b et I_E
- Les différentes tensions V_{BE} et $V_{CEsat} < V_{CE} < V_{CEmax}$

2. Les transistors bipolaires

2.3. L'amplification



Droite de charge statique

$$I_C \approx \frac{1}{R_E + R_C} (V_{CC} - V_{CE})$$

Droite de charge dynamique
- Passe par le point de repos

- Coefficient directeur :

$$\Delta V_{CE} = -(R_C // R_U) \Delta I_C$$

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}} = -(R_C // R_U)^{-1}$$

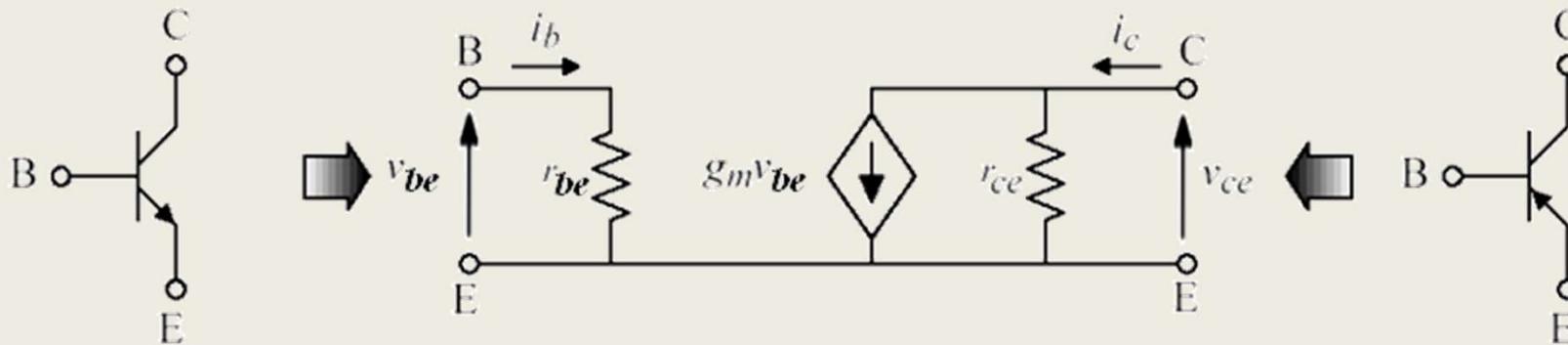
Caractéristique de transfert d'un transistor monté en Emetteur commun

2. Les transistors bipolaires

2.3. L'amplification

Modèle petit signal simplifié

Autour du point de polarisation, si les signaux d'amplification sont faibles (pas de distorsion), on linéarise le fonctionnement avec le montage suivant



$$\text{Avec : } r_{be} = R_{in} = \frac{dV_{BE}}{dI_B} \approx \beta \frac{V_T}{I_C}$$

$$r_{ce} = R_{out} = \frac{dV_{CE}}{dI_C} = \frac{V_A + V_{CE}}{I_C}$$

$$\text{Et } g_m \text{ la transconductance : } g_m = \frac{dI_C}{dV_{BE}} \approx \frac{I_C}{V_T} \quad ; \quad g_m v_{be} = \beta i_b$$

2. Les transistors bipolaires

2.3. L'amplification

Modèle petit signal réel

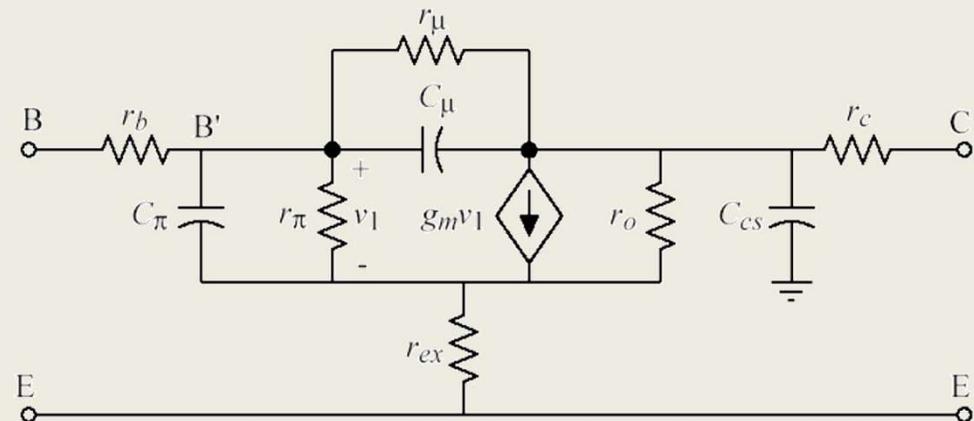
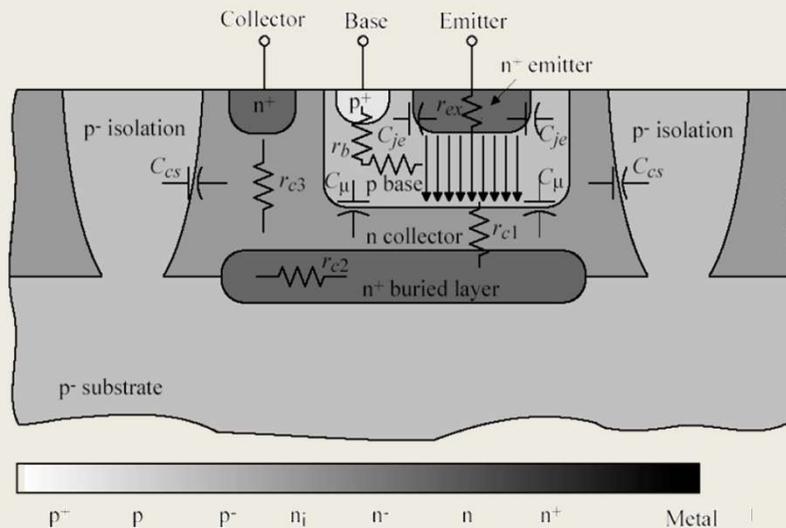


Schéma tenant compte des éléments parasites, permettant l'étude en fréquence.

A noter, la contre réaction réalisé par les éléments r_μ et C_μ qui provoquent un effet Miller.

Effet Miller : l'influence du gain d'un amplificateur inverseur sur ses propres caractéristiques d'entrée.

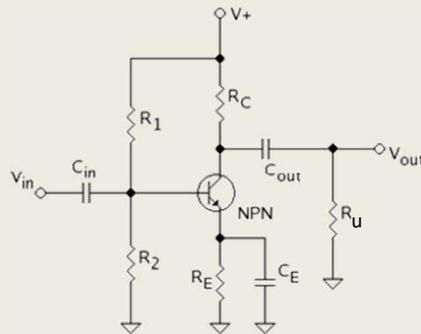
(dans le cas d'un amplificateur non-inverseur, le même effet conduit à la génération d'impédances négatives).

Conséquences : Diminutions de l'impédance d'entrée et de la bande passante du montage

2. Les transistors bipolaires

2.3. L'amplification Les montages de base

Emetteur commun



$$R_e = R_p // r_{be}$$

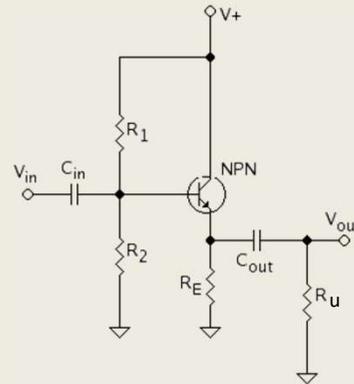
$$A_V = -\frac{\beta(r_{ce} // R_C // R_U)}{r_{be}}$$

$$R_S = R_C // r_{ce} \approx R_C$$

Avec : $R_p = R_1 // R_2$, $g_m = \frac{I_C}{V_T}$, $r_{be} = \beta \frac{V_T}{I_C}$, $r_{ce} = \frac{V_A + V_{CE}}{I_C}$

et R_G : Impédance de sortie du générateur.

Collecteur commun

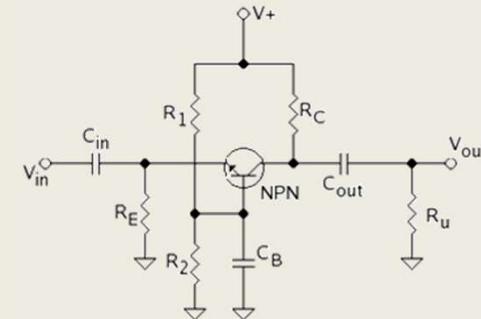


$$R_e = R_p // (r_{be} + (\beta + 1)(r_{ce} // R_E // R_U))$$

$$A_V = -\frac{(\beta + 1)(r_{ce} // R_E // R_U)}{r_{be} + (\beta + 1)(r_{ce} // R_E // R_U)} \leq 1$$

$$R_S = r_{ce} // R_E // \frac{(R_G // R_p) + r_{be}}{\beta + 1}$$

Base commune



$$R_e \approx \frac{1}{g_m} = \frac{r_{be}}{\beta}$$

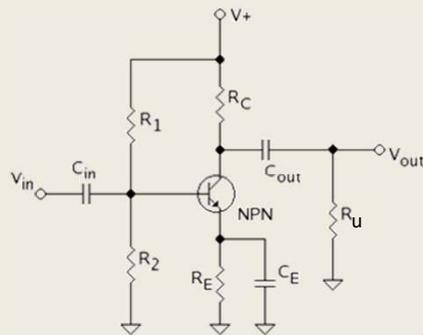
$$A_V = \left(g_m + \frac{1}{r_{ce}} \right) (r_{ce} // R_C // R_U)$$

$$R_S = R_C // (r_{ce} + (g_m r_{ce} + 1)(r_{be} // R_E // R_G))$$

2. Les transistors bipolaires

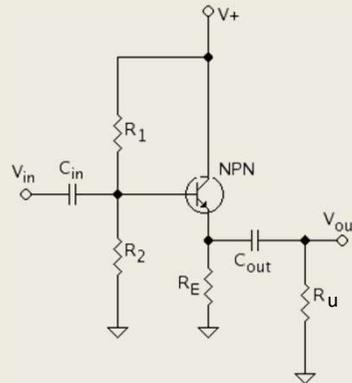
2.3. L'amplification Les montages de base

Emetteur commun



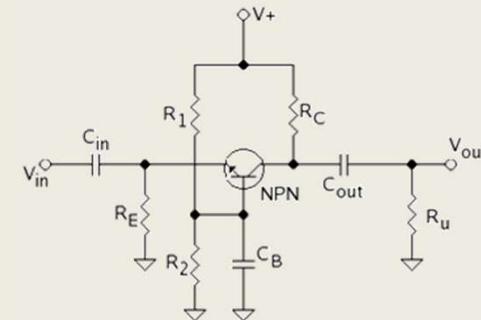
- Gain d'amplification en tension important $A_v \sim 100$
- Impédance d'entrée faible $Z_e \sim k\Omega$
- Impédance de sortie élevée $Z_s \sim R_c \sim k\Omega$

Collecteur commun



- Gain d'amplification en tension proche de l'unité
- Impédance d'entrée élevée $Z_e \sim \beta$ fois l'EC
- Impédance de sortie faible $Z_s \sim 1/\beta$ fois l'EC

Base commune



- Gain d'amplification en tension équivalent à l'EC
- Impédance d'entrée faible $Z_e \sim$ quelque dizaines d' Ω
- Impédance de sortie assez élevée $Z_s \sim$ quelque dizaine de $k\Omega$

Conclusions

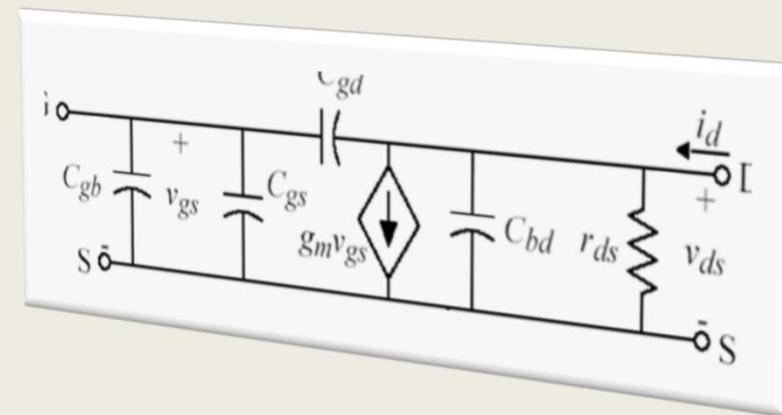
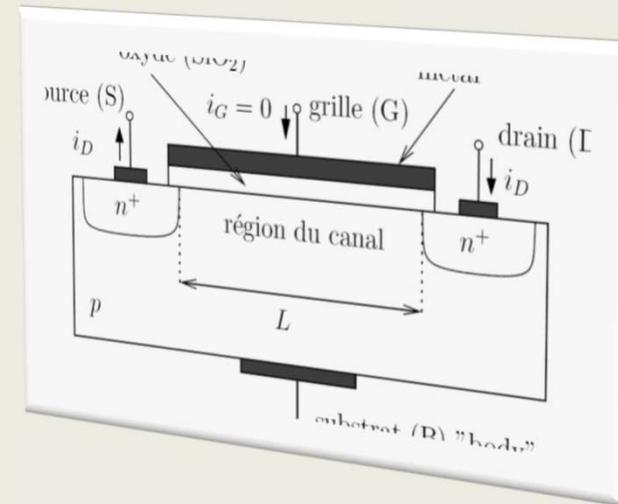
Le montage en émetteur commun est utilisé en amplificateur. Par contre, pour améliorer ses caractéristiques d'entrée et de sortie, on peut lui associer un montage en collecteur commun en amont et en aval.

Le montage à base commune est peu utilisé. Cependant, il apporte un intérêt dans les montages à haute fréquence, car l'effet de la capacité Miller est fortement diminué, ce qui permet une bande passante plus importante.

3. Les transistors à effet de champs

PLAN

1. Les amplificateurs
2. Les transistors Bipolaires
 - 2.1. Définition
 - 2.2. La commutation
 - 2.3. L'amplification
3. Les transistors à effet de champs
 - 3.1. Définition
 - 3.2. La commutation
 - 3.3. L'amplification
4. Comparaison des deux technologies
5. Les applications
 - 5.1. La génération de courant
 - 5.2. La charge active
 - 5.3. La paire différentielle
 - 5.4. L'amplification de puissance
 - 5.5. L'amplificateur opérationnel
 - 5.6. L'alimentation linéaire
 - 5.7. L'adaptation de tension
 - 5.8. Les montages non linéaires



3. Les transistors à effet de champs

3.1. Définition

Il existe plusieurs types de transistors à effet de champs. Les deux types les plus utilisés sont: les transistors JFET à canal N et P et les transistors MOSFET à enrichissement et à appauvrissement à canal N ou P. Soit 6 types de transistors.

Le JFET

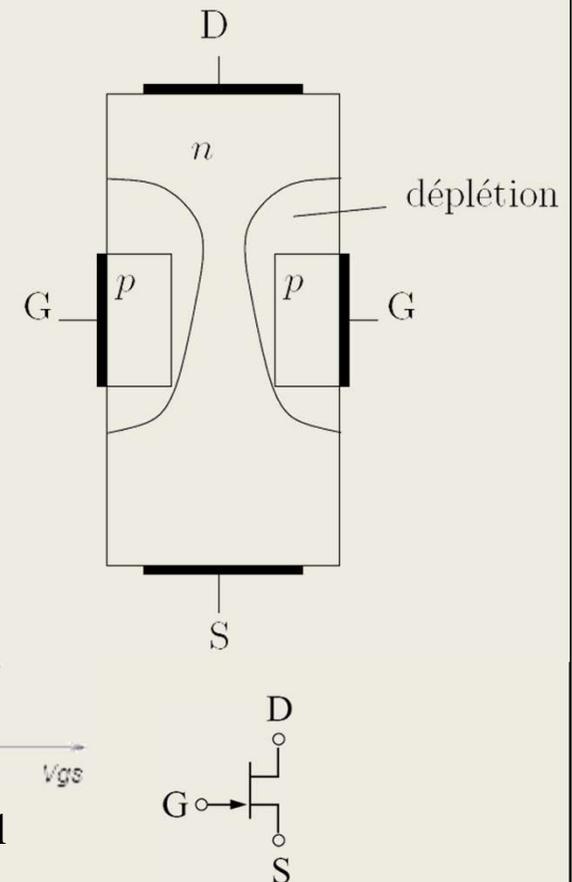
C'est un transistor FET à jonction. Le canal de conduction correspond à la région n , encadrée par deux régions p connectées à l'électrode de grille. Cette grille sert à polariser la jonction pn en inverse de façon à moduler la largeur du canal.

Le JFET conduit si $V_{GS} \geq V_p$, V_p est la tension de pincement (pinch voltage), c'est une tension inverse négative.

Cette tension est très peu reproductible d'un transistor à l'autre.

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{|V_{GS}|}{V_p}\right)^2 \left(1 + \frac{V_{DS}}{V_{AJ}}\right)$$

Où $0 \geq V_{GS} \geq V_p$ et $V_{DS} \geq V_{GS} - V_p$. I_{DSS} est le courant à V_{GS} nul



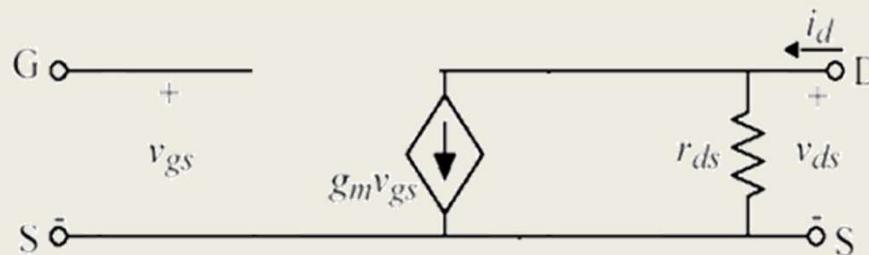
3. Les transistors à effet de champs

3.1. Définition

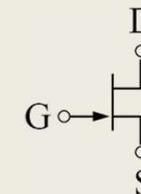
Le JFET

Le courant de grille I_G correspond au courant de fuite de la jonction pn , il n'est donc pas complètement nul. Cependant il est négligeable comparé au courant de base existant dans le bipolaire.

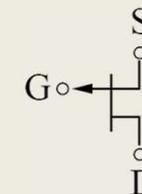
La tension V_{AJ} est un effet comparable à la tension d'Early, elle est due à la modulation de la longueur du canal de conduction par la tension V_{DS} . ($\sim 150V$)



Canal N



Canal P



$$g_m = \left[\frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right]_{V_{DS} \text{ const}} = -\frac{2}{V_P} \sqrt{I_{DSS} \cdot I_{D \text{ repos}}}$$

$$r_{ds} = \left[\frac{\partial V_{DS}}{\partial I_D} \right]_{V_{GS} \text{ const}} = \frac{|V_{AJ}| + V_{DS}}{I_D}$$

3. Les transistors à effet de champs

3.1. Définition

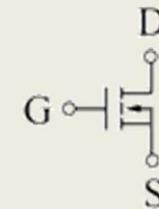
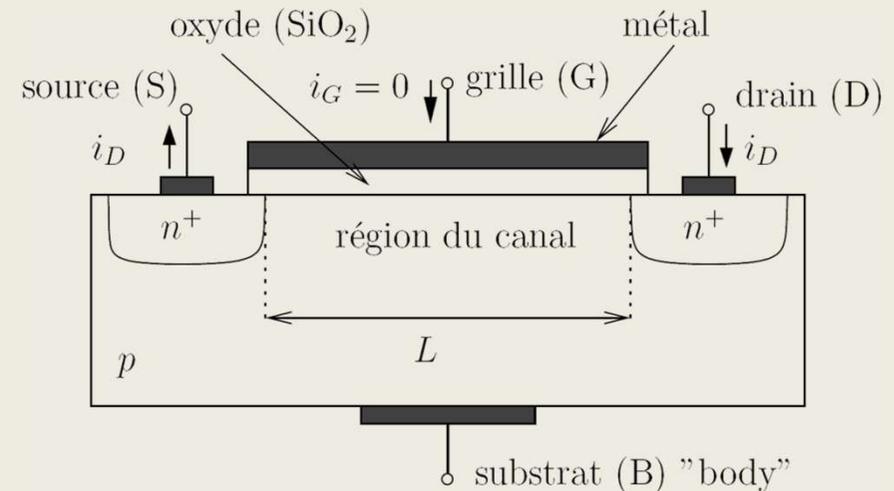
Le MOSFET

Le canal de conduction est réalisé par l'application d'un potentiel de grille V_{GS} . Lorsque ce potentiel de grille atteint la tension de seuil V_T le transistor se met à conduire.

Cette tension V_T est liée à la tension d'inversion de population dans le canal. Elle dépend des paramètres technologiques. Elle est très peu reproductible d'un transistor à l'autre.

En règle générale, le substrat (bulk) est relié à la source

L'oxyde (SiO_2) étant isolant, **le courant de grille est quasiment nul** et correspond au courant de fuite de la capacité MOS. Donc **la résistance d'entrée tend vers l'infini**.



3. Les transistors à effet de champs

3.1. Définition

Le MOSFET

Régime bloqué : $V_{GS} < V_T$ $I_D \sim 0$

Régime linéaire (Mode Triode)

$$I_D = K(2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2)$$

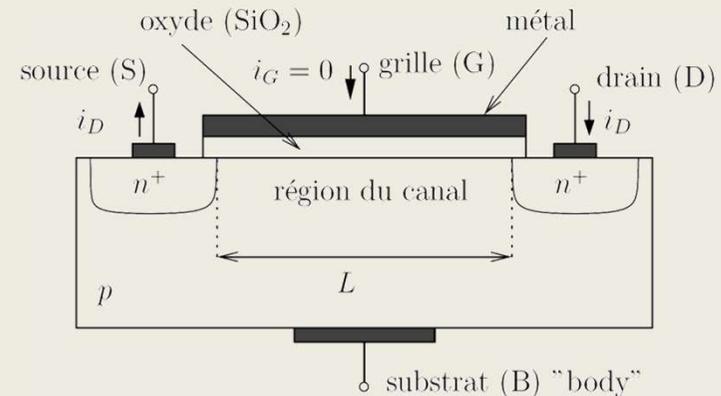
Avec $V_{GS} > V_T$ et $V_{DS} < V_{GS} - V_T$

Régime saturé (Mode pentode)

$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 \left(1 + \frac{V_{DS}}{V_A}\right)$$

Avec $V_{GS} > V_T$ et $V_{DS} > V_{GS} - V_T$

$$V_A : \text{Tension d'Early} \quad V_A = \frac{I_D}{\left(\frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}}\right)_{V_{GS}}} - V_{DS}$$



$$K = \frac{1}{2} \mu_{eff} C_{ox} \frac{W}{L}$$

μ_{eff} : Mobilité des porteurs dans le canal

C_{ox} : Capacité du condensateur de grille

W : Largeur du canal

L : Longueur du canal

$$I_{DSS} = K.V_T^2$$

3. Les transistors à effet de champs

3.2. La commutation

Le transistor MOS est très utilisé en commutation. Son énorme intérêt d'avoir un courant de grille quasiment nul, donc un courant de commande nul.

Dans ce cas, les paramètres importants sont les temps de commutation à l'ouverture et à la fermeture ainsi que la résistance en circuit ouvert R_{off} et en circuit fermé R_{on} .

R_{on} : correspond à la résistance du canal en conduction.

Elle dépend donc beaucoup de la technologie utilisée

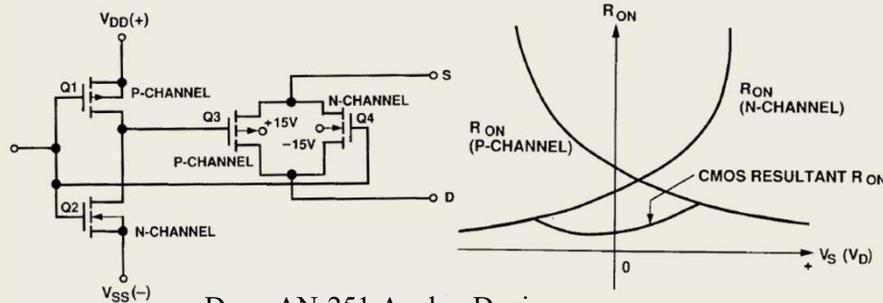
Elle est de quelque dixième d'ohm à quelque dizaines d'ohm.

$$R_{on} = \left. \frac{\partial V_{DS}}{\partial I_D} \right|_{V_{DS} \approx 0} \approx \frac{1}{2K(V_{GS} - V_T)}$$

R_{off} : correspond à la résistance du canal hors conduction.

Quelque centaines de mégohms.

Exemple : Interrupteur à base de transistors MOS complémentaires permettant un comportement d'interrupteur analogique.



Doc : AN-251 Analog Device

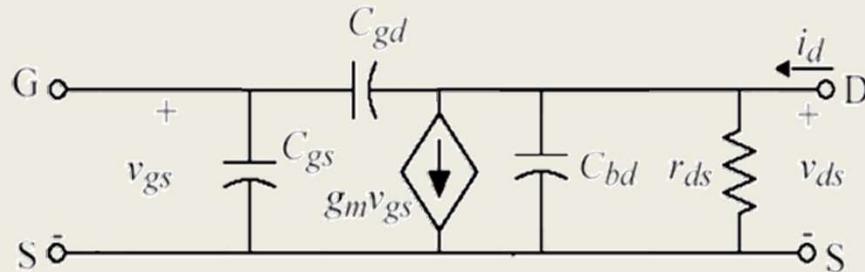
Symbol	Parameter	Test Conditions	Min	Typ	Max	Units
Off Characteristics						
BV_{DSS}	Drain-Source Breakdown Voltage	$V_{GS} = 0\text{ V}, I_D = 250\ \mu\text{A}$	100			V
$\frac{\Delta BV_{DSS}}{\Delta T_j}$	Breakdown Voltage Temperature Coefficient	$I_D = 250\ \mu\text{A}$, Referenced to 25°C		97		mV/°C
I_{DSS}	Zero Gate Voltage Drain Current	$V_{DS} = 100\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}$			1	μA
		$V_{DS} = 100\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}, T_j = 125^\circ\text{C}$			60	μA
		$V_{DS} = 20\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}$			10	nA
I_{GSS}	Gate-Body Leakage	$V_{GS} = \pm 20\text{ V}, V_{DS} = 0\text{ V}$			± 50	nA
On Characteristics (Note 2)						
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 1\text{ mA}$	0.8	1.7	2	V
$\frac{\Delta V_{GS(th)}}{\Delta T_j}$	Gate Threshold Voltage Temperature Coefficient	$I_D = 1\text{ mA}$, Referenced to 25°C		-2.7		mV/°C
$R_{DS(on)}$	Static Drain-Source On-Resistance	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 0.17\text{ A}$		1.2	6	Ω
		$V_{GS} = 4.5\text{ V}, I_D = 0.17\text{ A}$		1.3	10	
		$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 0.17\text{ A}, T_j = 125^\circ\text{C}$		2.2	12	
$I_{D(on)}$	On-State Drain Current	$V_{GS} = 10\text{ V}, V_{DS} = 5\text{ V}$	0.68			A
g_{fs}	Forward Transconductance	$V_{DS} = 10\text{ V}, I_D = 0.17\text{ A}$	0.08	0.8		S
Switching Characteristics (Note 2)						
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	$V_{DD} = 30\text{ V}, I_D = 0.28\text{ A}$		1.7	3.4	ns
t_r	Turn-On Rise Time	$V_{GS} = 10\text{ V}, R_{GEN} = 6\ \Omega$		9	18	ns
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time			17	31	ns
t_f	Turn-Off Fall Time			2.4	5	ns
Q_g	Total Gate Charge	$V_{DS} = 30\text{ V}, I_D = 0.22\text{ A}$		1.8	2.5	nC
Q_{gs}	Gate-Source Charge	$V_{GS} = 10\text{ V}$		0.2		nC
Q_{gd}	Gate-Drain Charge			0.3		nC

Doc : BSS123 Fairchild

3. Les transistors à effet de champs

3.3. L'amplification

Le MOSFET



Régime saturé:

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \approx 2\sqrt{K \cdot I_D} \approx \frac{2I_D}{V_{GS} - V_T}$$

$$r_{ds} = \frac{\partial V_{DS}}{\partial I_D} \approx \frac{|V_A| + V_{DS}}{I_D}$$

MOSFET à enrichissement

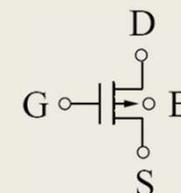
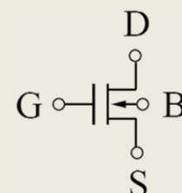
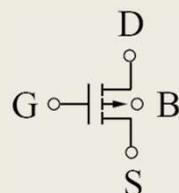
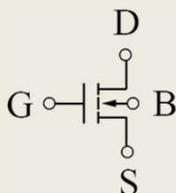
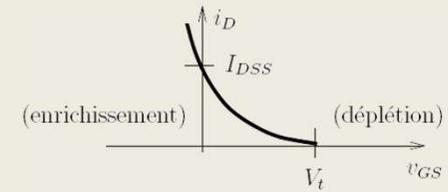
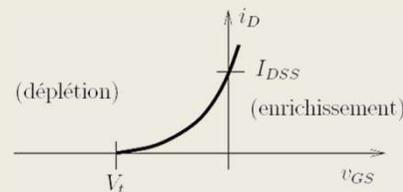
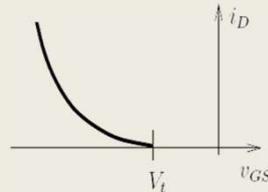
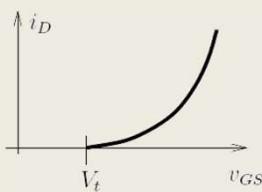
MOSFET à appauvrissement

Canal N

Canal P

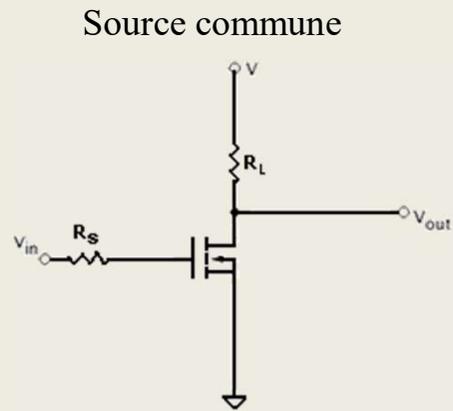
Canal N

Canal P



3. Les transistors à effet de champs

3.3. L'amplification Les montages de base

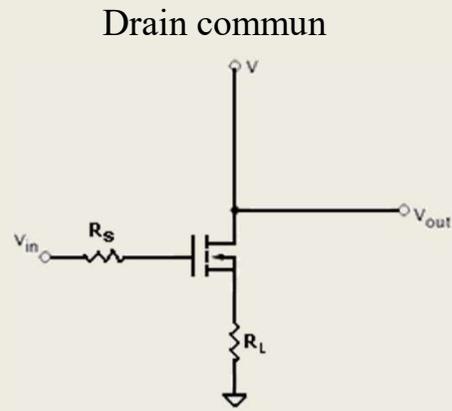


$$R_e = \infty$$

$$R_S = R_L // r_{ds} \approx R_L$$

$$A_V = -g_m (r_{ds} // R_L) \approx -g_m R_L$$

- Gain d'amplification en tension
- Impédance d'entrée très grande
- Impédance de sortie élevée

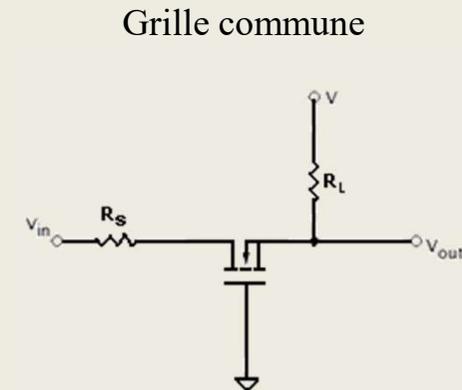


$$R_e = \infty$$

$$R_S = \frac{1}{g_m} // R_L \approx \frac{1}{g_m}$$

$$A_V = \frac{1}{1 + \frac{1}{g_m R_L}} \approx 1$$

- Gain d'amplification en tension unitaire
- Impédance d'entrée très grande
- Impédance de sortie faible



$$R_e = \frac{1}{g_m}$$

$$R_S = r_{ds} (1 + g_m R_S)$$

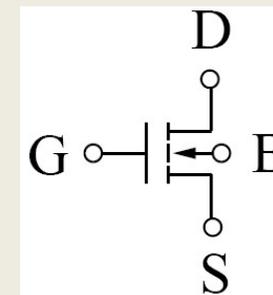
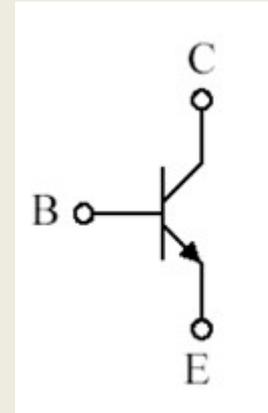
$$A_V = \frac{g_m R_L}{1 + g_m R_S}$$

- Gain d'amplification en tension unitaire
- Impédance d'entrée faible
- Impédance de sortie faible

4. Comparaison des deux technologies

PLAN

1. Les amplificateurs
2. Les transistors Bipolaires
 - 2.1. Définition
 - 2.2. La commutation
 - 2.3. L'amplification
3. Les transistors à effet de champs
 - 3.1. Définition
 - 3.2. La commutation
 - 3.3. L'amplification
4. Comparaison des deux technologies
5. Les applications
 - 5.1. La génération de courant
 - 5.2. La charge active
 - 5.3. La paire différentielle
 - 5.4. L'amplification de puissance
 - 5.5. L'amplificateur opérationnel
 - 5.6. L'alimentation linéaire
 - 5.7. L'adaptation de tension
 - 5.8. Les montages non linéaires



4. Comparaison des deux technologies

Généralités

Les bipolaires Transistors NPN et PNP

- Contrôle par courant.
- En commutation, résistance série faible si I_c important.
- Tension d'early $I_c = f(V_{be})$ non plat dans la zone linéaire.
- Impédance d'entrée faible (vue de la base).
- Consommation de courant en régime tout ou rien.
- Tension de seuil très reproductible en composants discret $V_{be} = f(I_c, I_b)$
- β défini par sont minimum.

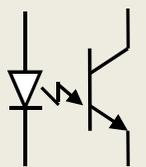
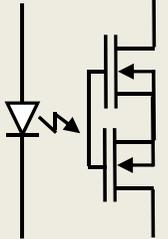
Les effet de champs JFET & MOSFET canal N ou P à enrichissement ou appauvrissement

- Contrôle en tension.
- Résistances R_{on} faible (plus forte que le bip mais moins dépendante du courant).
- Effet Early existant mais moins marqué que le bip
- Impédance d'entrée très forte (vue de la grille).
- Pas de consommation en dehors des transitions en régime tout ou rien.
- Peut de reproductibilité en composant discrets $V_{gsth} = f(V_{ds}, I_d)$ varie d'un rapport deux

4. Comparaison des deux technologies

La commutation

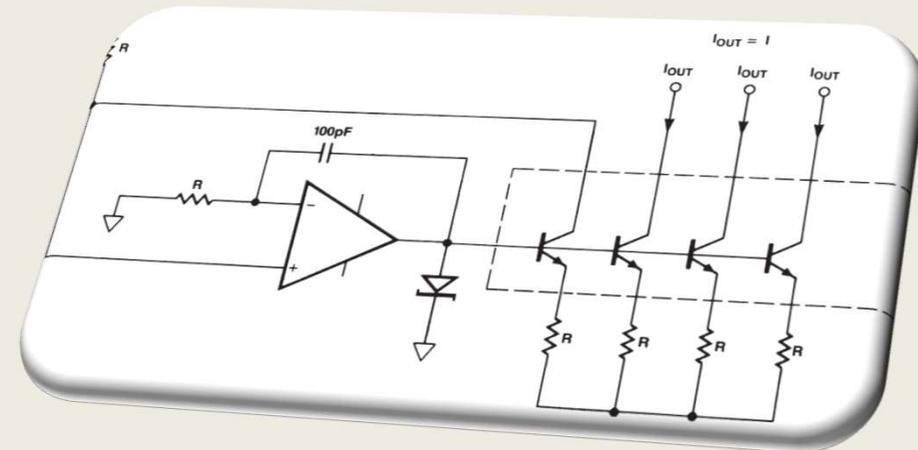
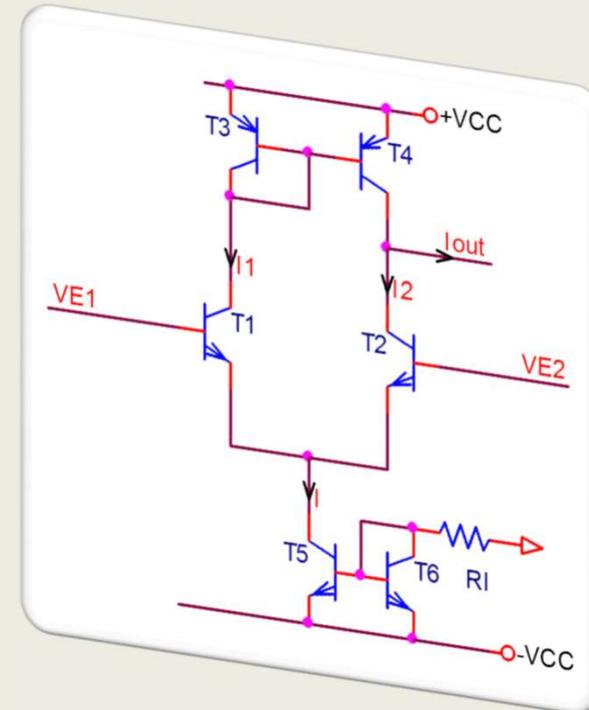
- Les points importants :**
- Temps de commutation
 - La résistance série rapportée
 - Le type de commande
 - Tensions et courants mises en jeu

Phototransistor	Relai solide	Transistor MOS	Transistor Bipolaire
 <p>TCMT1100</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fonctionne en tension flottante - Rapide, fonction de I_F $t_{\text{commutation}} < 20 \mu\text{s}$ - Unidirectionnel - Vce fonction de I_c Très fortes variations 	 <p>LH1532</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fonctionne en tension flottante - Lent $t_{\text{commutation}} > \text{ms}$ dépend de I_F - bidirectionnel - Résistance série faible $1\Omega < R_{\text{on}} < 100\Omega$ Indépendante de I_F dépend de T, I_d 	 <p>BSS123</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fonctionne en tension référencée - $t_{\text{commutation}} < 20 \text{ ns}$ dépend de I_d - Bidirectionnel $V_{\text{gs}} > V_{\text{gs(th)}}$ - Résistance série faible $100\text{m}\Omega < R_{\text{on}} < 100\Omega$ Indépendante de I_d dépend de T, V_{gs} 	 <p>FMMTL618</p> <ul style="list-style-type: none"> - Consommation de la base - Fonctionne en tension référencée - $t_{\text{commutation}} < 400 \text{ ns}$ dépend de I_c - Unidirectionnel - Résistance série faible $10\text{m}\Omega < V_{\text{cesat}}/I_c < 1\Omega$ dépend de I_c

5. Les applications

PLAN

1. Les amplificateurs
2. Les transistors Bipolaires
 - 2.1. Définition
 - 2.2. La commutation
 - 2.3. L'amplification
3. Les transistors à effet de champs
 - 3.1. Définition
 - 3.2. La commutation
 - 3.3. L'amplification
4. Comparaison des deux technologies
- 5 Les applications
 - 5.1. La génération de courant
 - 5.2. La charge active
 - 5.3. La paire différentielle
 - 5.4. L'amplification de puissance
 - 5.5. L'amplificateur opérationnel
 - 5.6. L'alimentation linéaire
 - 5.7. L'adaptation de tension
 - 5.8. Les montages non linéaires



5. Les applications

5.1. La génération de courant

Génération d'un courant pilotés en tension avec précision

Points Importants :

- la stabilité
- l'égalité des courants

⇒ Transistors identiques

Valeur du courant :

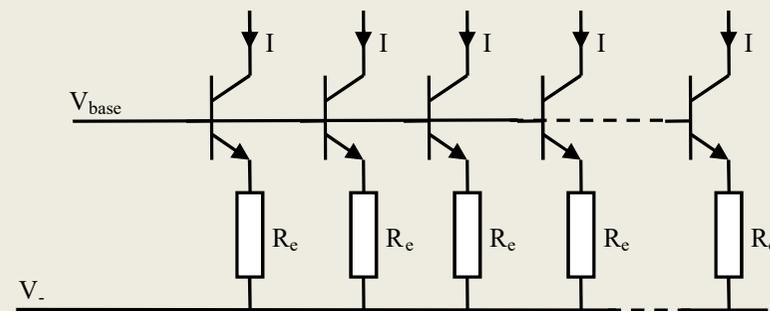
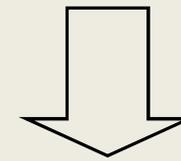
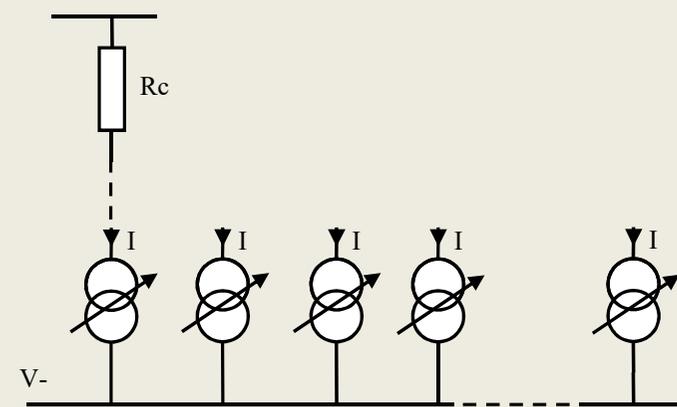
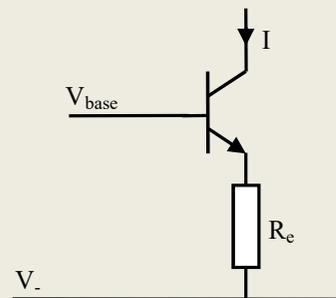
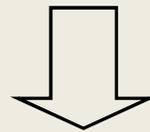
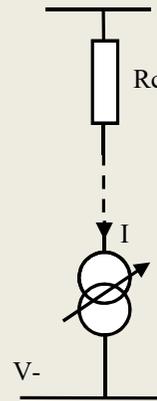
$$I = \frac{V_{base} - V_- - V_{be}}{R_e} \left(\frac{\beta + 1}{\beta} \right)$$

! Attention !

Sensible à la température

$$V_{be} \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{I_c}{I_s}$$

$$\Rightarrow \Delta I \approx \left(\frac{\beta + 1}{\beta} \right) \frac{k}{q} \ln \left(\frac{I_c}{I_s} \right) \cdot \frac{\Delta T}{R_e} \approx \frac{2 \cdot 10^{-3}}{R_e} \Delta T$$



5. Les applications

5.1. La génération de courant – le miroir de courant

Copier un courant avec précision
Permet la modulation
Sensibilité réduite à la température

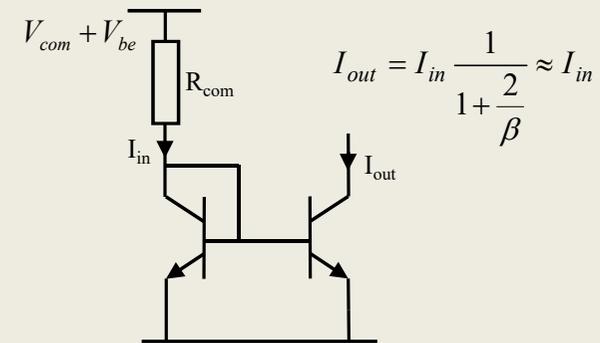
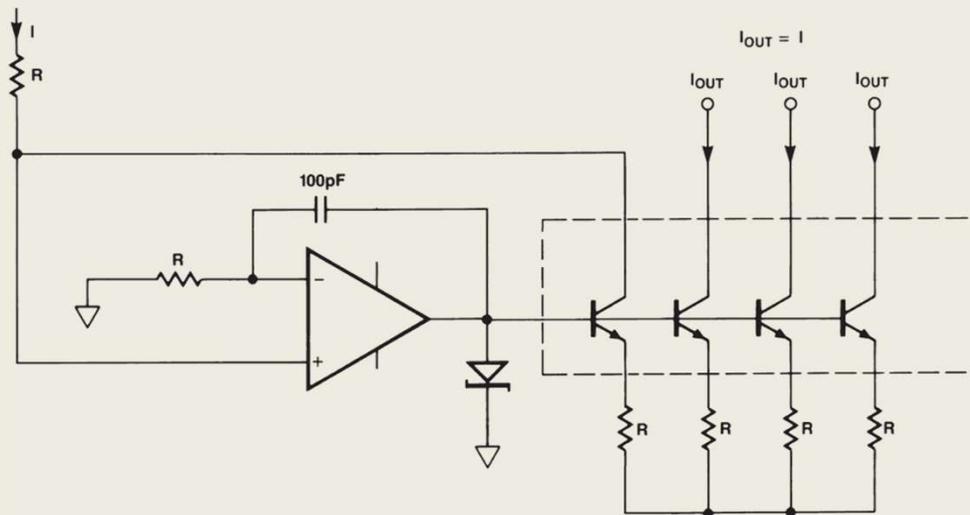
! Attention !

Il faut respecter la symétrie parfaite des transistors

⇒ Utiliser des composants spécifiques

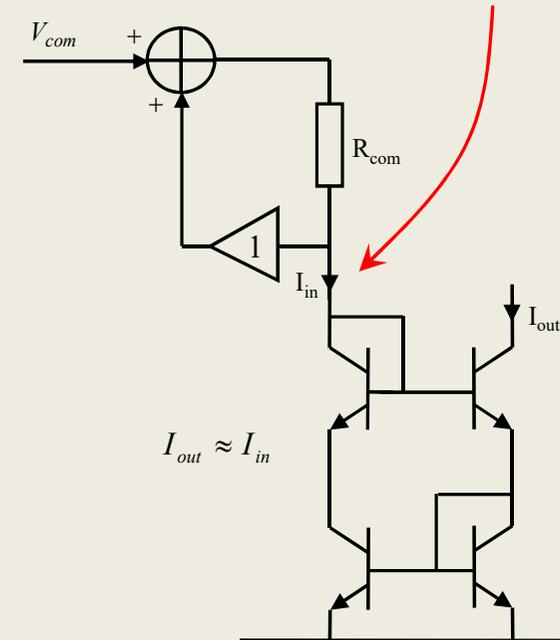
⇒ Utiliser des β élevés

Compensation en température



$$I_{out} = I_{in} \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}} \approx I_{in}$$

$$2V_{be} \approx 2 \frac{kT}{q} \ln \frac{I_c}{I_s} \Rightarrow \text{Potentiel flottant}$$

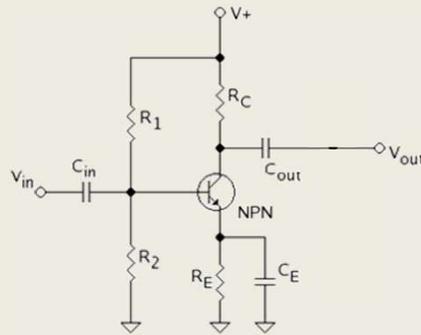


$$I_{out} \approx I_{in}$$

5. Les applications

5.2. La charge active

Elle est utilisée dans la majeure partie du temps pour limiter l'utilisation des résistances qui sont très difficilement intégrables dans les circuits intégrés. Elles peuvent également dans certains cas augmenter le gain d'amplification en jouant sur la résistance dynamique.

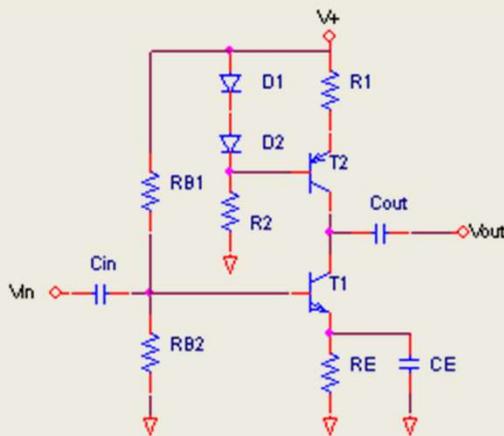


$$A_V \approx -\frac{\beta}{r_{be}}(R_C // r_{ce}) \approx -g_m \cdot R_C \approx -40 \cdot R_C I_C \quad \text{si} \quad R_C I_C \approx \frac{V_+}{2} \approx 6V ; \quad I_C \approx 2mA$$

$$\Rightarrow A_V \approx -240 \quad \text{et} \quad r_s \approx R_C \approx 3k\Omega$$

Ici le gain est limité par la tension de polarisation.

Il faut que l'impédance vue du collecteur soit très forte, avec une polarisation identique.



Dans ce cas, l'impédance vue du collecteur T₂ est : $r_c \approx r_{ce2}(1 + g_{m2}R1)$

Donc, si $V_A = 100V$ et $I_C = 2mA$

$$R1 \approx \frac{V_{be}}{I_C} \approx 300\Omega \quad \Rightarrow \quad r_c \approx r_{ce}(1 + g_m R1) = \frac{V_A}{I_C} \left(1 + \frac{I_C}{V_T} R1 \right) \approx 1.2 \cdot 10^6 \Omega$$

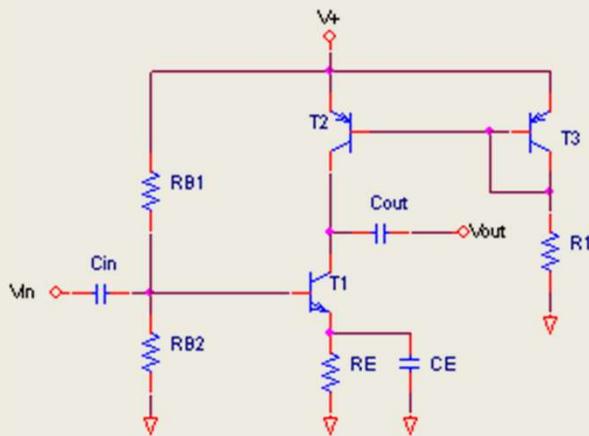
Donc le gain en tension est ici limité par la résistance dynamique de sortie du transistor 1 : $r_{ce1} \approx 50k\Omega$

$$\text{Soit un gain de : } A_V \approx -\frac{\beta}{r_{be}}(R_C // r_{ce}) = -\frac{I_C}{V_T}(r_c // r_{ce1}) \approx -4000 ; \quad r_s \approx r_{ce1}$$

5. Les applications

5.2. La charge active

Utilisation en polarisation.



Dans ce montage, l'amplificateur en émetteur commun réalisé par le transistor T1.

Si on se réfère au résultat précédent, T1 est chargé par le transistor T2, et la résistance de charge correspond à r_{ce2} .

Le courant de polarisation est réalisé grâce au miroir de courant T2, T3 et vaut :
$$I_C \approx \frac{V_+ - V_{be3}}{R1}$$

On peut donc évaluer le gain en tension de cet amplificateur :

$$A_V \approx \frac{I_C}{V_T} (R_C // r_{ce}) = \frac{I_C}{V_T} \frac{r_{ce}}{2} = \frac{I_C}{V_T} \frac{V_A}{2I_C} = \frac{V_A}{2V_T} \approx 3000$$

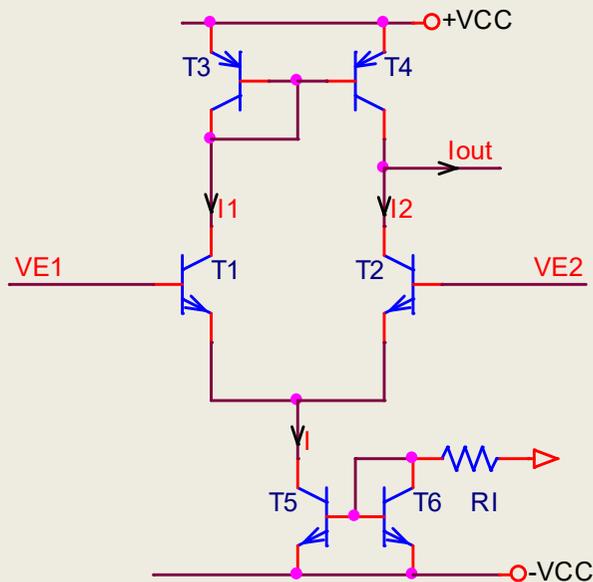
On peut donc charger une branche d'amplification sans résistance en améliorant le gain d'amplification.

Ceci, en pilotant la polarisation de la branche d'amplification en intégrant un miroir de courant.

5. Les applications

5.3. La paire différentielle

Elle est utilisée pour amplifier la différence deux tensions d'entrée. C'est un élément essentielle en électronique.



Les transistors T5 et T6 sont montés en miroir de courant.

Le courant I du collecteur T5 vaut : $I \approx \frac{V_{CC} - V_{be6}}{RI}$

Les transistors T3 et T4 sont montés en miroir de courant.

Ils imposent l'égalité des courants I_{C3} et I_{C4} et donc $I_1 = I_{out} + I_2$

de plus, le montage impose que : $I = I_1 + I_2$.

Les transistors T1 et T2 composent la paire différentielle

Si $V_{E1} = V_{E2}$

$V_{be1} = V_{be2}$, donc I_1 et I_2 sont identiques,

Alors $I_{out} = 0$

Si $V_{E1} \neq V_{E2}$ ($V_{E2} = V_{E1} + v_{e1}$)

$V_{be1} \neq V_{be2}$ donc $I_1 \neq I_2$ car : $i_c = g_m \cdot v_{be}$

Comme $I_{out} + I_2 = I_1$ Alors

$$I_{out} = g_m (V_{E1} - V_{E2})$$

! Attention !

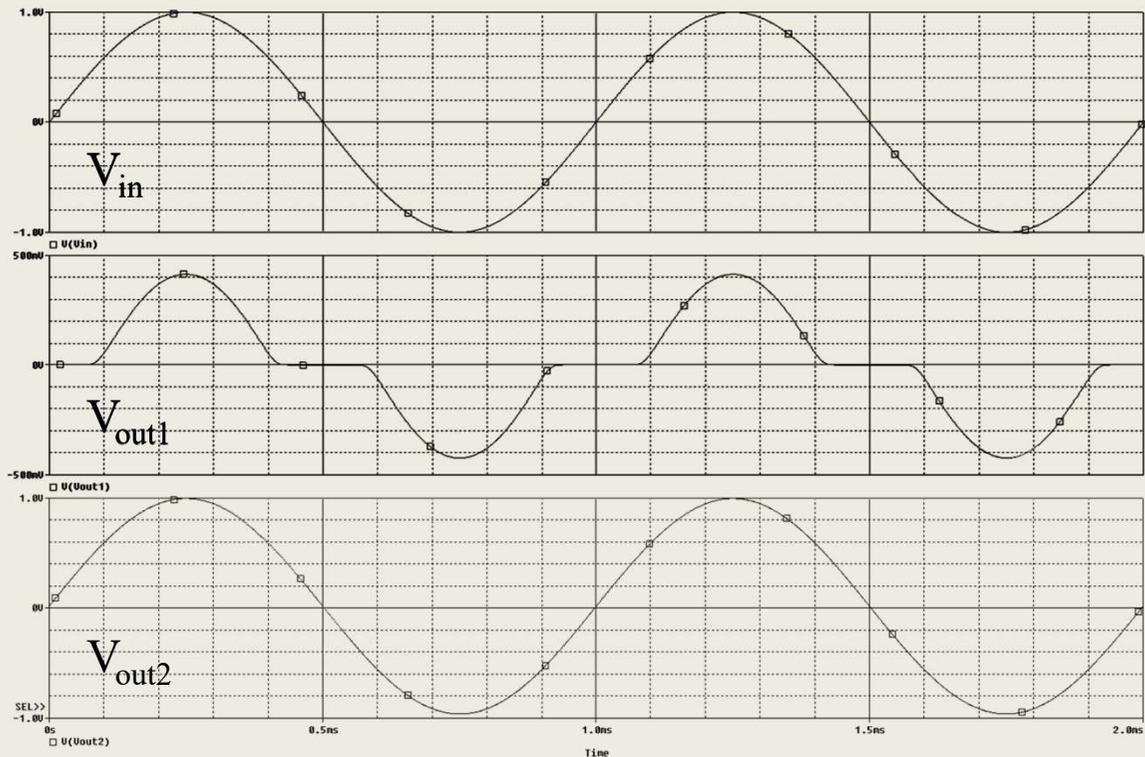
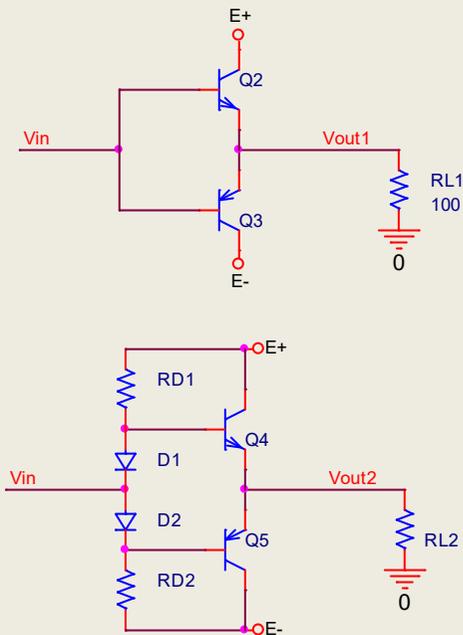
Ceci n'est vrai que pour de très petites variations autour du point de polarisation $V_{E1} - V_{E2} < V_T$

5. Les applications

5.4. L'amplification de puissance, l'étage push Pull

C'est un montage amplificateur classe B. C'est-à-dire qu'une demi période est amplifiée par le transistor correspondant monté en collecteur commun. Le gain est unitaire, il permet surtout une amplification de la puissance en sortie.

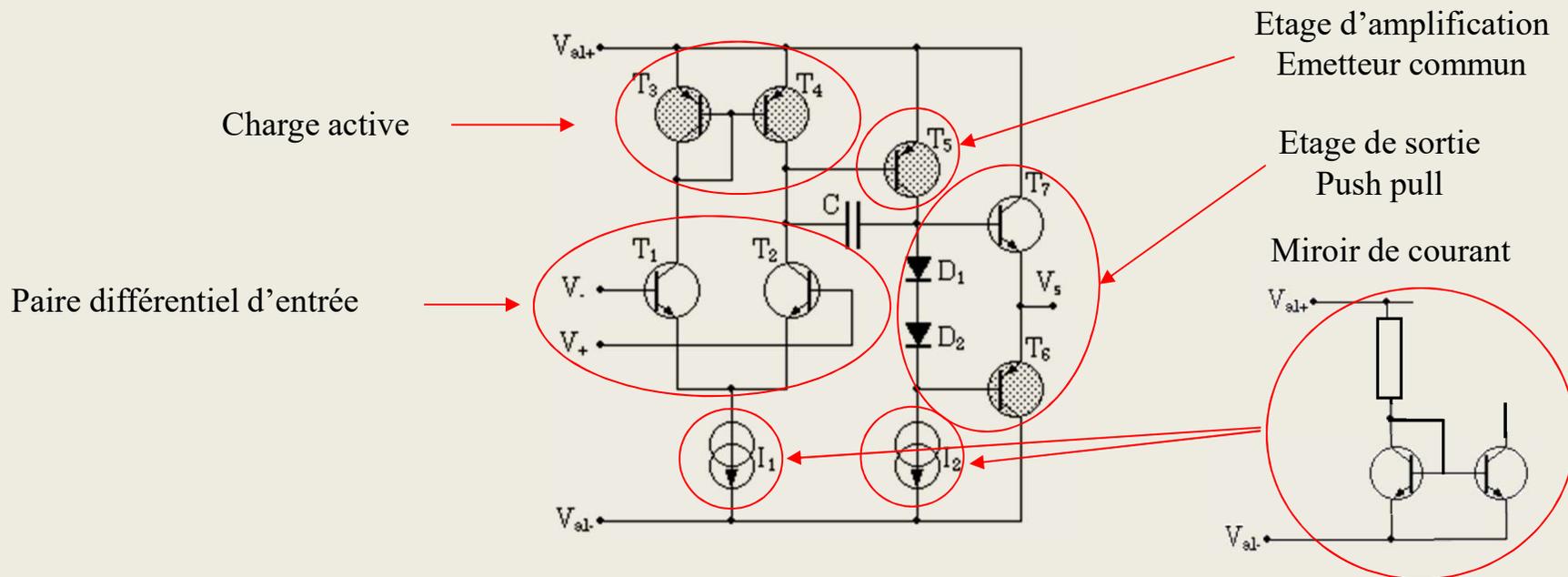
Les diodes éliminent l'effet de la distorsion due à la jonction base émetteur. (fonctionnement en classe AB)



5. Les applications

5.5. L'amplificateur opérationnel

Impédance d'entrée	10^6 à $10^{12} \Omega$
Bande passante	1MHz à 250MHz
Tension d'alimentation	<5v à qq dizaines de volts
Consommation	qq $100\mu\text{A}$ à $>10\text{mA}$
Courant de sortie	10mA à 2A
Niveau de bruit	$3.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ à $80 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
Tension d'offset	qq $10 \mu\text{V}$ à 10mV

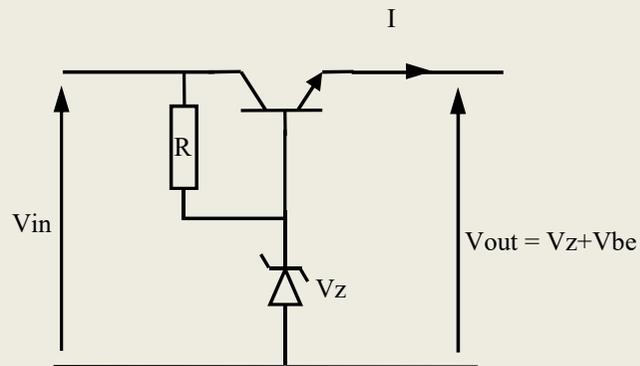


5. Les applications

5.6. L'alimentation linéaire – Le montage en ballast

Permet d'obtenir en sortie de montage une puissance importante en tension stabilisée.

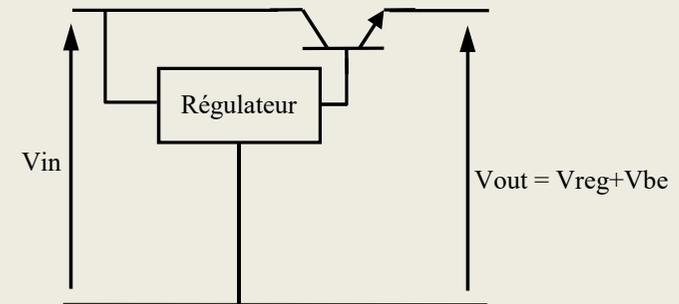
⇒ Principe du régulateur linéaire



Nécessite une tension V_{ce} minimale de fonctionnement

Rendement globale de mauvaise qualité
⇒ Perte de puissance dans le transistor

⇒ Augmenter le courant disponible d'un composant définie

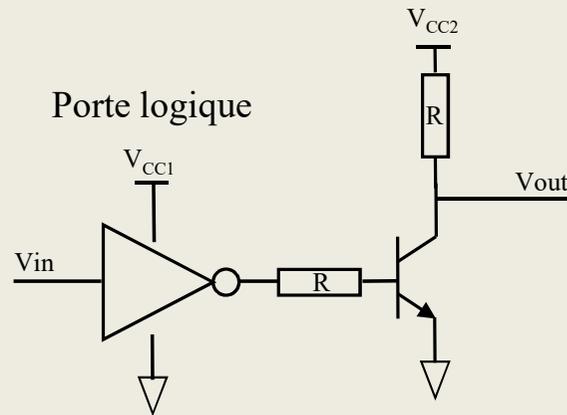


5. Les applications

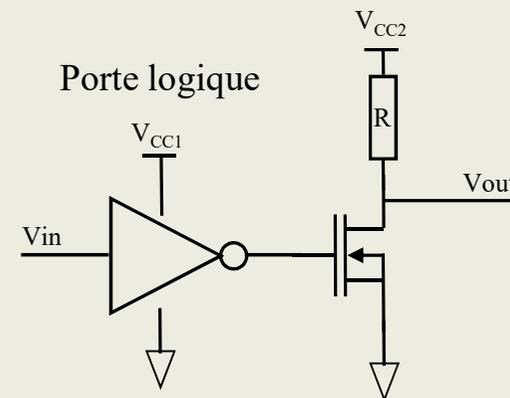
5.7. L'adaptation de tension

Dans les système multi tensions
Permet d'adapter les tensions de fonctionnement

Montages Inverseurs



Vérifier que le courant de sortie soit compatible

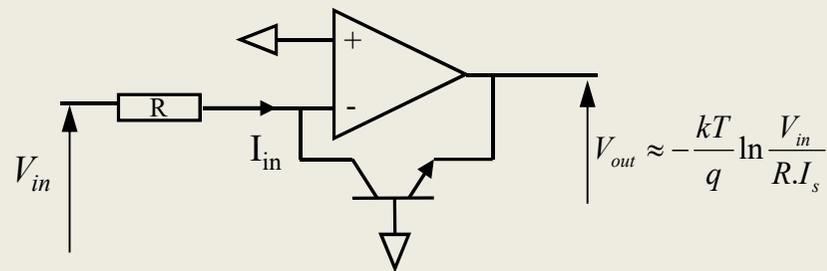


Vérifier que la tension $V_{gs(th)}$ soit inférieur à V_{CC1}
Faible consommation

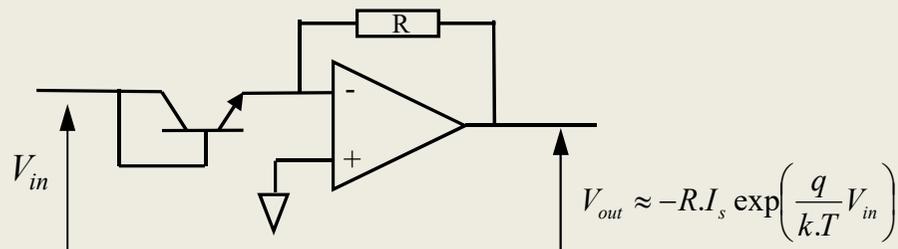
5. Les applications

5.8. Utilisation de la non linéarité tension/courant

Amplificateur logarithmique



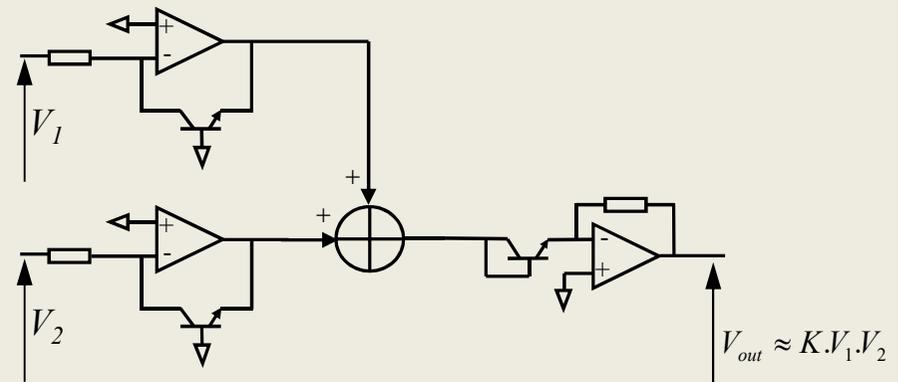
Amplificateur anti-logarithmique ou exponentiel



! Attention !

- ⇒ Très sensible à la température
Utiliser des circuits monolithiques compensés
- ⇒ Respecter les niveaux de tensions compatibles

Multiplieur (Mixeur)



Annexes

Bibliographie

Cours d'électronique analogique très complet : <http://philippe.roux.7.perso.neuf.fr/>

Cours sur les transistors à effet de champs : <http://www.montefiore.ulg.ac.be/~vdh/supports-elen0075-1/notes-chap6.pdf>

Cours de circuits électrique et électronique : <http://subaru2.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/cours2.html>

Article décrivant certains critères de choix entre bipolaire et MOSFET : http://www.diodes.com/zetex/_pdfs/5.0/pdf/ze0372.pdf

Cours sur les transistors à effet de champ : http://leom.ec-lyon.fr/leom_new/files/fichiers/MOS.pdf

Cours sur les transistors bipolaire : http://leom.ec-lyon.fr/leom_new/files/fichiers/BJT.pdf

Cours sur les blocs élémentaires à base de transistor : http://leom.ec-lyon.fr/leom_new/files/fichiers/Bloc_elem.pdf

Cours sur l'amplificateur différentiel : <http://claude.lahache.free.fr/mapage1/ampli-differentiel.pdf>

Cours d'introduction à l'électronique analogique : <http://www.famillezoom.com/cours/electronique/electronique-analogique.pdf>

Article présentant la modulation de Ron dans les MOS : http://www.analog.com/static/imported-files/application_notes/413221855AN251.pdf

Disponible à l'adresse suivante : <http://www.laas.fr/~fmathieu>