

An aerial photograph of a residential neighborhood. In the center, there is a large, multi-story building with a red-tiled roof and a courtyard. To the left of this building is a long, low structure with a grey roof. Below the main building is a swimming pool with a blue cover. The area is surrounded by lush green trees and other houses with red-tiled roofs. The text is overlaid in yellow on the image.

**COMPOSANTS ELECTRONIQUES  
FONCTIONNEMENT  
MODELES**

**CIRCUITERIE DE BASE EN  
ANALOGIQUE**

**Richard HERMEL LAPP**

**Ecole d'électronique analogique IN2P3 Fréjus Juin 2014**

# Sommaire

- Introduction : un peu de physique...
  - Semiconducteurs, jonction PN
- Composants
  - Le transistor bipolaire
    - Fonctionnement
    - Montages de base
  - Le transistor MOS
  - Montages composites
- L'amplificateur opérationnel
  - Fonctionnement
  - Quelques montages usuels
  - CFOA, VFOA

# Conduction dans les solides : déplacement d'électrons

Niveaux d'énergie discrets des atomes

↓ (principe d'exclusion de Pauli)

Bandes d'énergies dans les solides

Niveaux d'énergie des électrons participant  
aux liaisons entre les atomes du solide :  Bande de valence

Niveaux d'énergie des électrons libres  
(pouvant participer à la conduction) :  Bande de conduction

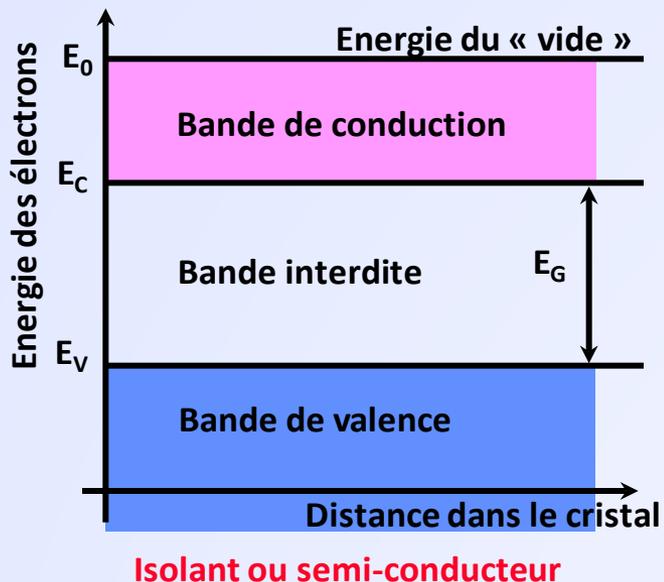
Il peut exister des niveaux « interdits »  
entre ces bandes :  Bande interdite (gap)

Conducteurs (métaux) : pas de bande interdite

Isolants (diélectriques) : bande interdite « large » ( $> 5$  eV)

Semi-conducteurs : bande interdite « moyenne » ( $\approx 0.5$  à  $5$  eV)

# Représentation simplifiée des bandes d'énergies dans un solide : Diagramme des bandes

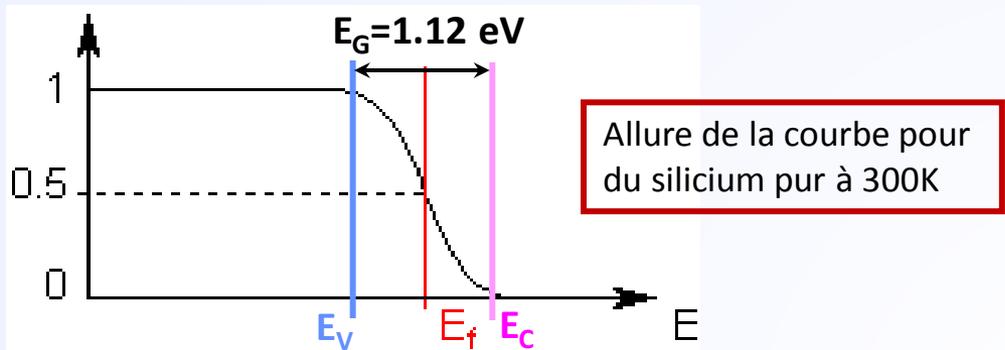
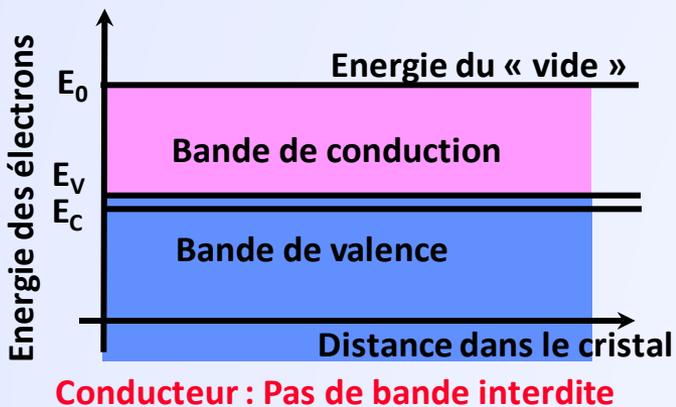


$E_0$  = énergie du vide : au-delà de cette énergie, l'électron sort du solide  
 $E_C$  = limite inférieure de la bande de conduction  
 $E_V$  = limite supérieure de la bande de valence  
 $E_G = E_C - E_V$  : largeur de bande interdite

Le peuplement des bandes d'énergies obéit à la statistique De Fermi-Dirac. Il dépend de la température :

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$

Probabilité de trouver un électron à l'énergie E.  
 $E_F$  est une constante pour un matériau donné

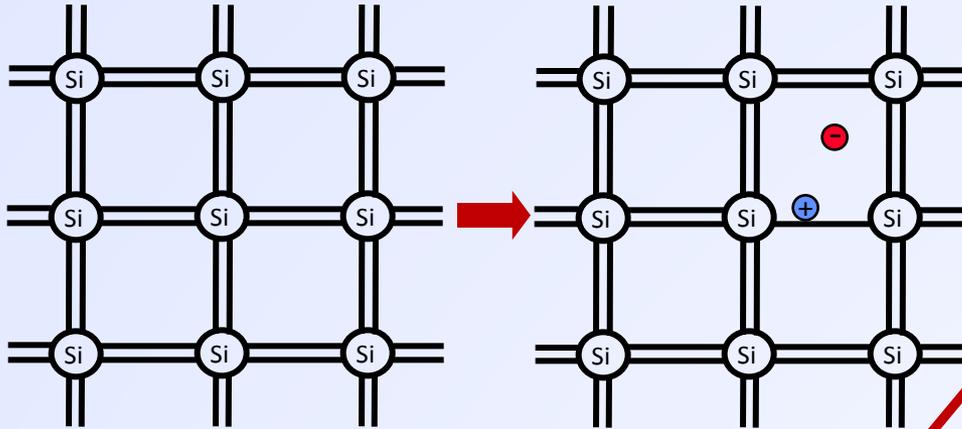


# Classification périodique

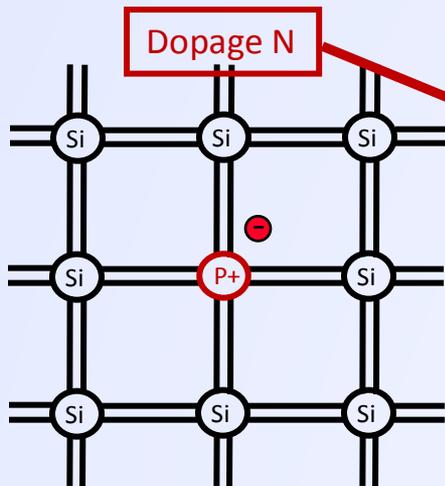
<b>Elément</b> Z=14 Silicium		<b>Découverte</b> Berzélius, 1824, Suède																																																																																																																															
<b>Rayon atomique (nm)</b> 0,118		<b>Masse molaire atomique(g/mol)</b> 28,1							<b>Electronégativité</b> 1,7																																																																																																																								
<b>1</b>	<b>Température fusion ébullition (°C)</b> 1410   2355											<b>Orbitales</b> 3p2			<b>18</b>																																																																																																																		
1	H 1	2	<b>Masse volumique (g/mL)</b> 2,33							<b>Isotopes</b> 8				13	14	15	16	17	He 2																																																																																																														
2	Li 3	Be 4	B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																																																																																															
3	Na 11	Mg 12	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																																																																																													
4	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54																																																																																													
5	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86																																																																															
6	Cs 55	Ba 56	La <sup>*</sup> 57	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118																																																																															
7	Fr 87	Ra 88	Ac <sup>#</sup> 89	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186																																											
* Lanthanides	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186
# Actinides	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186																																

Colonne 4 : semi-conducteurs  
 Colonne 3 : accepteurs (P)  
 Colonne 5 : donneurs (N)

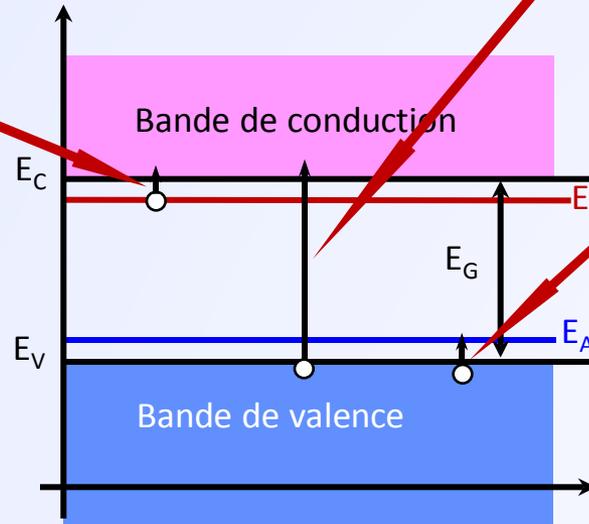
# Porteurs de charge dans les semi-conducteurs



Génération d'une paire **électron-trou** dans du silicium pur (intrinsèque) :  
 Agitation thermique, éclaircissement,  
 Passage d'une particule  
 Création de 2 porteurs libres

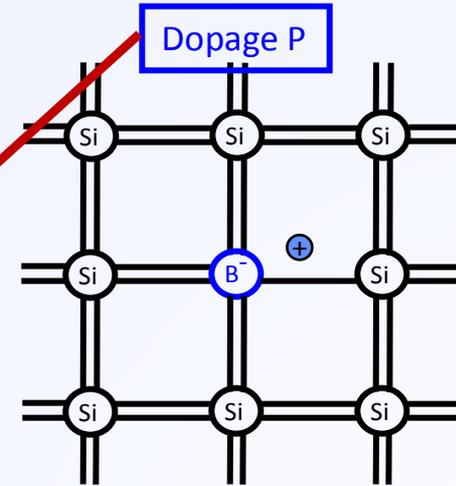


Un atome de la **colonne 5** est introduit dans le cristal. Il perd un **électron** qui devient **libre** et s'ionise positivement  
 Donneurs : **P, As, Sb**



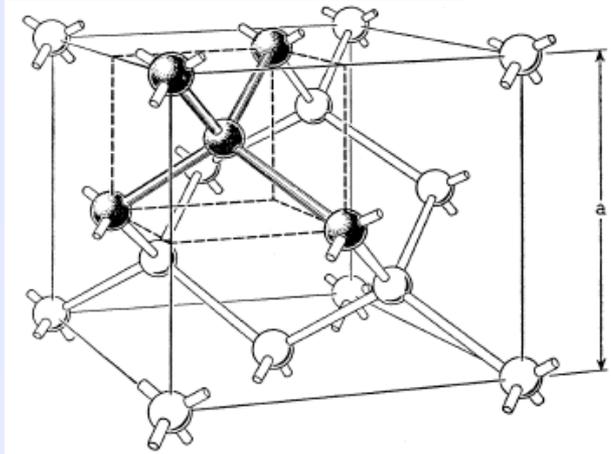
$$E_C - E_D \approx E_A - E_V \approx 0.045 \text{ eV}$$

à 300 K, tous les donneurs et les accepteurs sont ionisés



Un atome de la **colonne 3** est introduit dans le cristal. Il capture un électron de valence et s'ionise négativement, créant un « **trou** » dans la bande de valence  
 Accepteurs : **B, Ga, In**

# Le silicium



Cristal type diamant :  $a = 5.43 \text{ \AA}$

Densité atomique :  $5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$

Permittivité diélectrique relative :  $\epsilon_R = 11.7$

Bandgap :  $E_G = 1.124 \text{ eV @ } 300 \text{ K}$

Mobilité des électrons :  $\mu_e = 1350 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$

Mobilité des trous :  $\mu_p = 480 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$

Densité de porteurs libres :  $n_i = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

Résistivité intrinsèque :  $2.3 \cdot 10^5 \Omega \text{ cm}$

Contrôle de la résistivité par le dopage :

9 ordres de grandeur pour des concentrations en impuretés de  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$

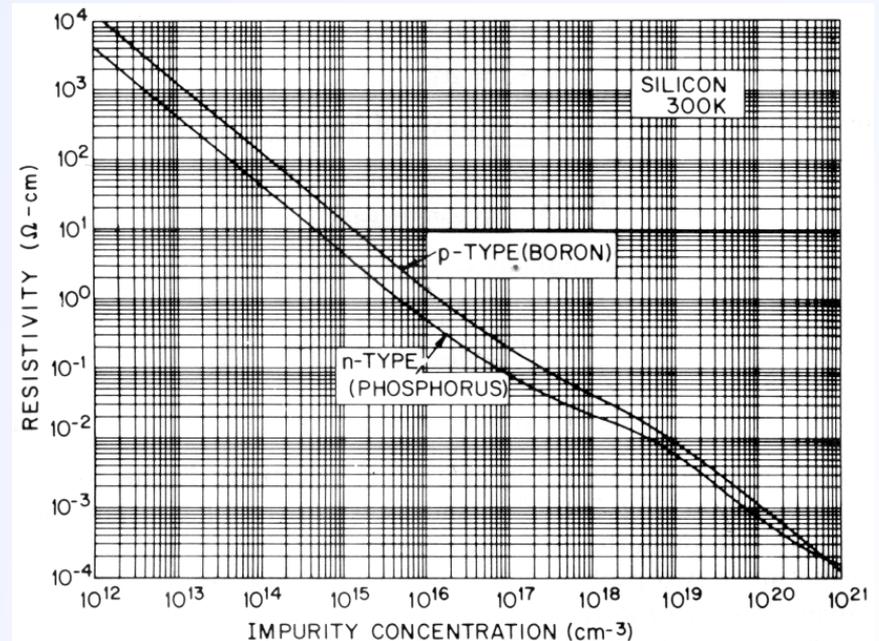
Les dopages représentent une proportion d'impuretés comprise entre  $10^{-10}$  et 10%

Le matériau de base doit être très pur !

*Pour mémoire,*

*Résistivité du cuivre :  $1.6 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm}$*

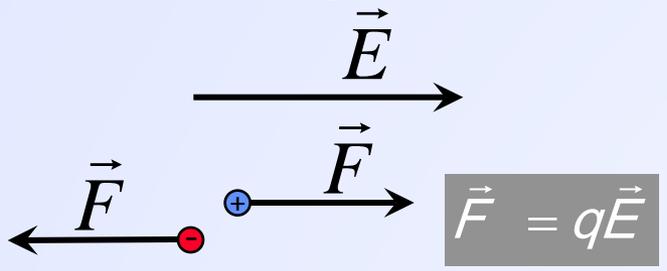
*Résistivité du  $\text{SiO}_2$  :  $> 10^{11} \Omega \text{ cm}$*



# La conduction dans les semi-conducteurs

2 causes possibles pour mettre en mouvement les porteurs de charges (créer un courant) :

## Un champ électrique



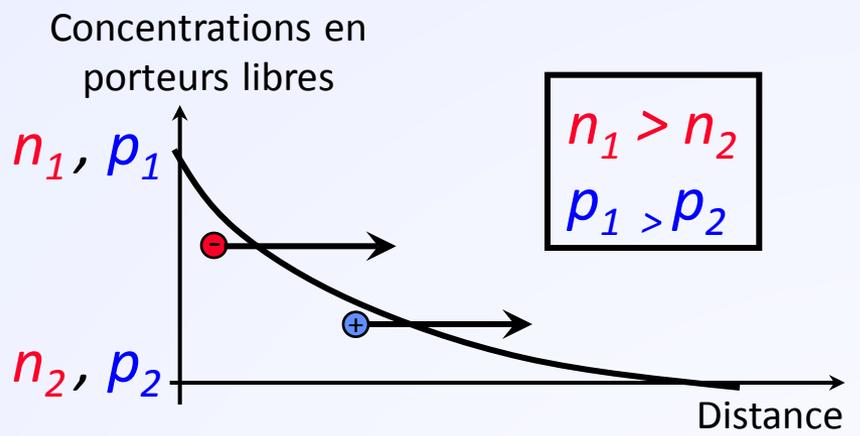
Vitesse des porteurs :

$$\vec{v} = \mu \vec{E}$$

$\mu$  : mobilité en  $cm^2 V^{-1} s^{-1}$

## La diffusion des porteurs

Gradient de concentration



Densités de courant :

$$\vec{J}_{pE} = pe\vec{v}_p = pe\mu_p\vec{E}$$

$$\vec{J}_{nE} = ne\vec{v}_n = ne\mu_n\vec{E}$$

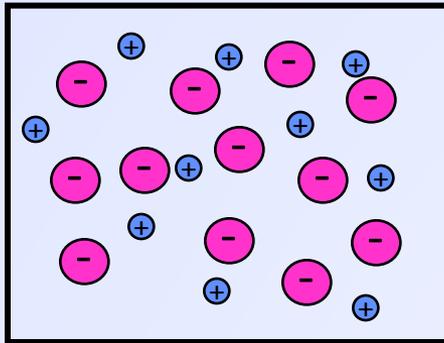
$$D = \frac{kT}{e} \mu$$

$$\vec{J}_{nD} = -eD_n \overrightarrow{\text{grad}} n$$

$$\vec{J}_{pD} = eD_p \overrightarrow{\text{grad}} p$$

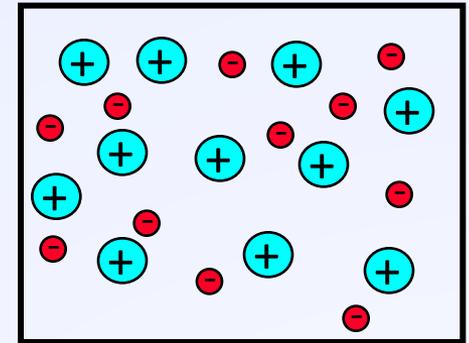
$D$  : coeff. de diffusion en  $cm^2 s^{-1}$

# La jonction PN



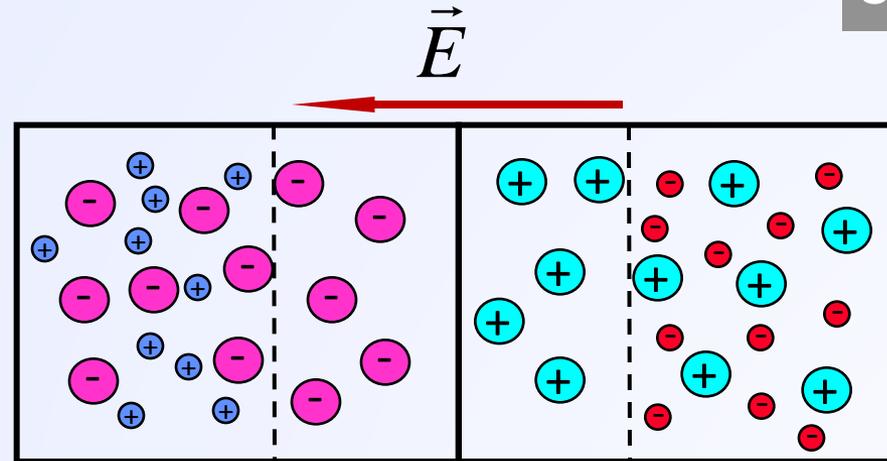
Silicium P

- Donneurs ionisés fixes ( $B^-$ ) : densité  $N_A$
- Accepteurs ionisés fixes ( $P^+$ ) : densité  $N_D$
- Trous libres (+) : densité  $p$
- Electrons libres (-) : densité  $n$



Silicium N

$\vec{E}$  : Champ interne  
 $\Rightarrow \Psi$  : potentiel interne  
 $\vec{E} = -\overrightarrow{grad} \Psi$



Jonction PN

Zone neutre

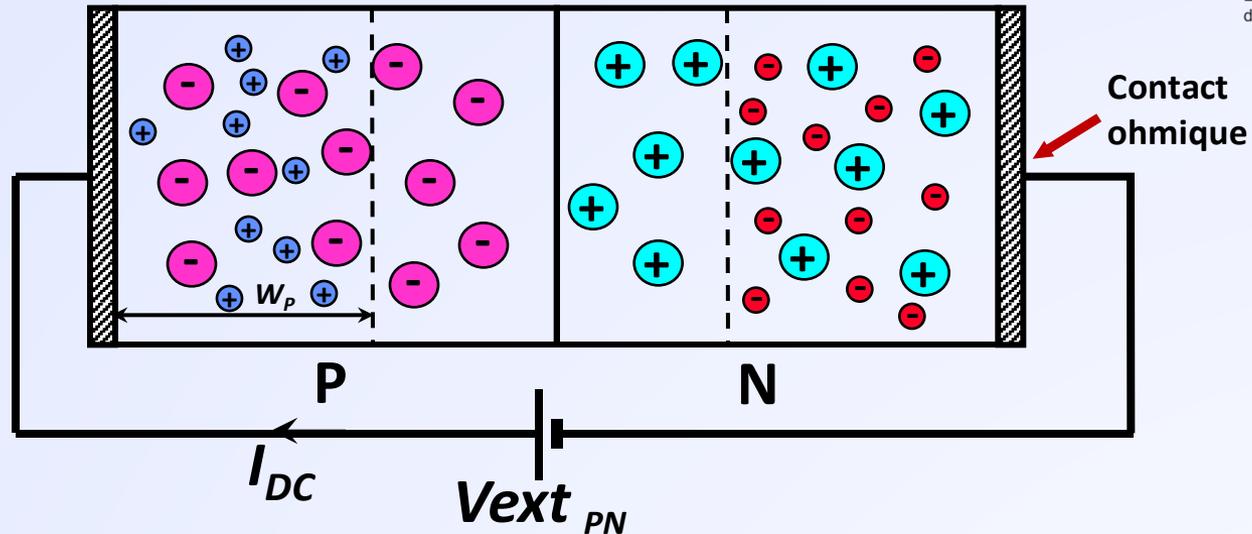
Zone de charge  
d'espace ou désertée

Zone neutre

$$\Psi_{NP} = U_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

$$U_T = \frac{kT}{e}$$

# La jonction PN polarisée



$V_{ext\ PN} = 0$  : Jonction à l'équilibre  $I_{DC} = 0$

les effets de la diffusion et du champ se compensent exactement, le courant est nul.

$V_{ext\ PN} > 0$  : Polarisation directe

Réduction du champ électrique, la diffusion permet le passage d'un courant direct élevé.

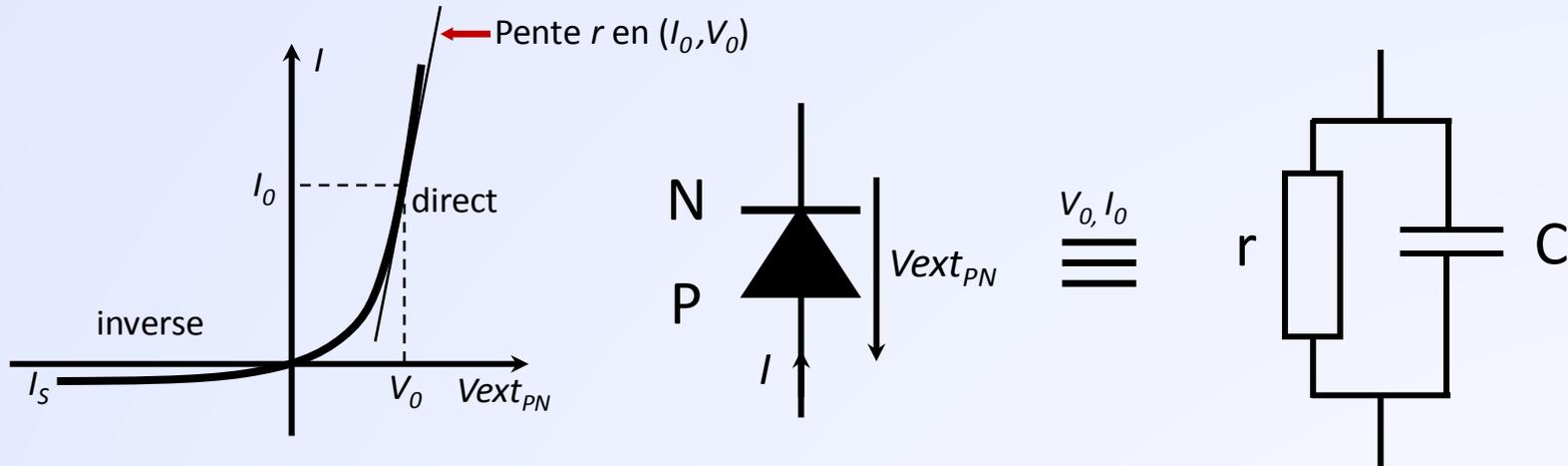
$V_{ext\ PN} < 0$  : Polarisation inverse

Augmentation du champ, seuls quelques porteurs arrivent à franchir la jonction, le courant inverse est faible.

$$I_{DC} = I_S \left( e^{\frac{V_{ext\ PN}}{U_T}} - 1 \right)$$

$$I_S \approx A \frac{e D_n n_i^2}{N_A W_P}$$

*Pour des dispositifs minces où l'on peut négliger les phénomènes de recombinaison et où  $N_D \gg N_A$  ( $N^+P$ )  
A : section transversale de la diode  
 $W_p$  : longueur de la zone neutre P*



La résistance dynamique  $r$  est la pente de la caractéristique au point de fonctionnement :  $r = U_T / I_0$

La capacité  $C$  rend compte des variations de charges stockées en fonction de la polarisation :

En inverse, la jonction est équivalente à un condensateur plan, la capacité correspond à la variation du nombre de charges fixes dans la zone de charge d'espace lorsque ses dimensions changent, c'est la

capacité de transition :

$$C_T = A \frac{\epsilon_{Si}}{W}$$

$\epsilon_{Si}$  : permittivité du silicium :  $\epsilon_{Si} = 11.7$

$W$  : largeur de la Zone de charge d'espace

En direct, de nombreux porteurs de charges se trouvent en excès dans les zones « neutres », leur quantité varie avec la polarisation, c'est la *capacité de diffusion* qui s'ajoute à la capacité de transition

$C_D$  est proportionnelle au courant direct :

$$C_D \propto A I_s \exp\left(\frac{V_{ext_{PN}}}{U_T}\right)$$

# Les transistors

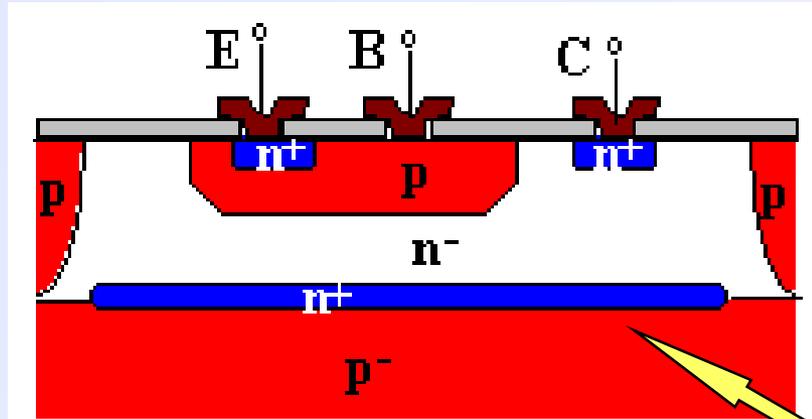
Les transistors sont des dispositifs dans lesquels le passage du courant entre 2 électrodes est contrôlé par une grandeur de commande appliquée sur une 3<sup>ème</sup> électrode

Commande en courant : transistors bipolaires (*NPN, PNP, HBT,...*)

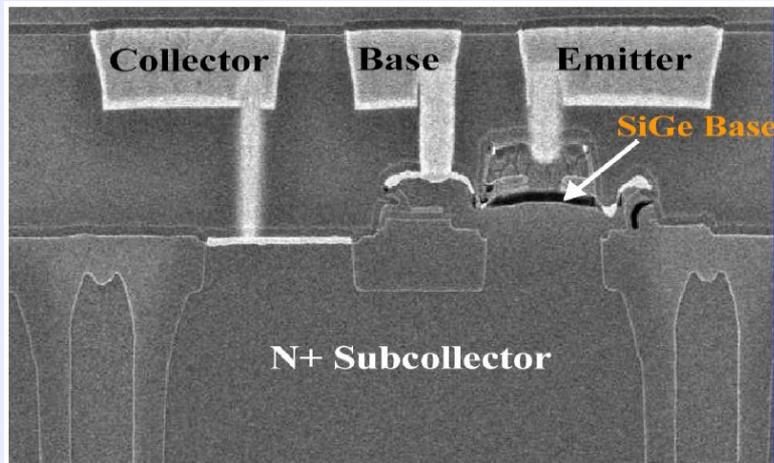
Commande en tension : transistors à effet de champ (*NMOS, PMOS, JFET, MESFET,...*)

# Le transistor bipolaire

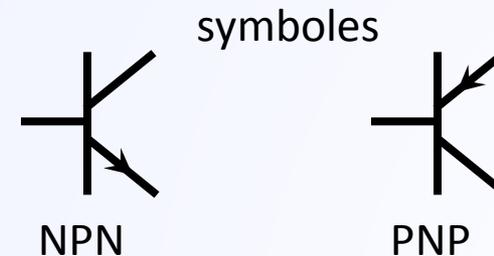
Bipolaire = les 2 types de porteurs participent au fonctionnement :  
électrons et trous



Le 1<sup>er</sup> transistor (1949)



Il en existe 2 types : NPN et PNP  
Sur l'image : NPN  
Base: dopage P  
Emetteur et collecteur : dopage N



# Le transistor bipolaire : fonctionnement

La jonction base-émetteur est polarisée en direct

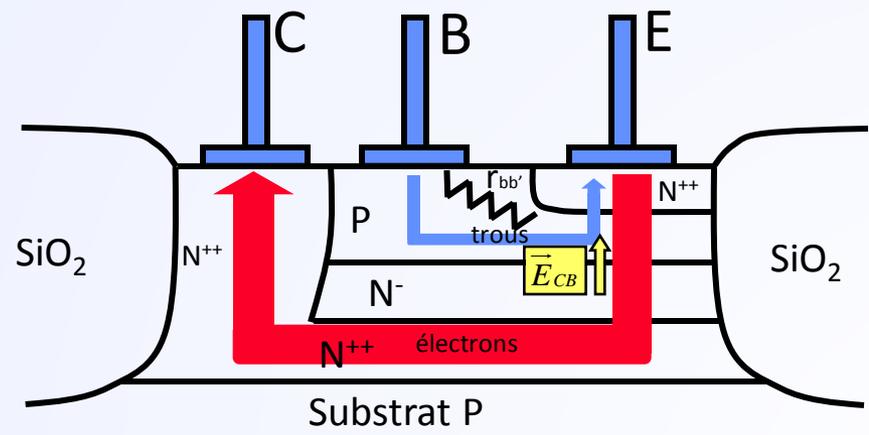
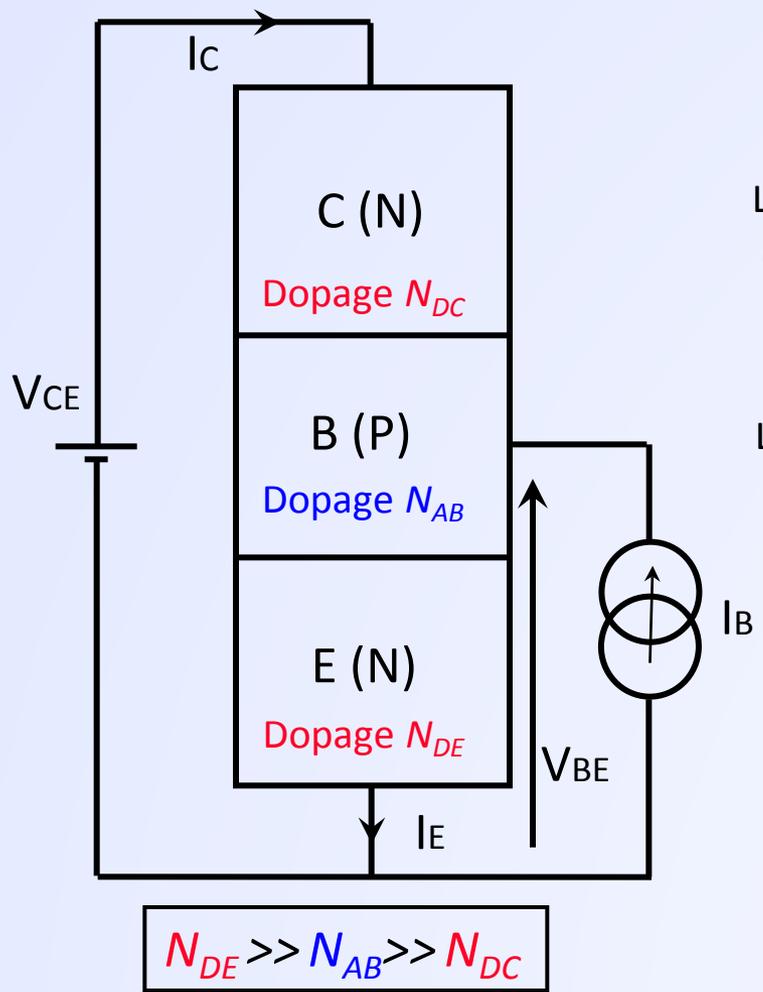


Des électrons sont injectés de l'émetteur vers la base et des trous de la base vers l'émetteur :  
Le rapport entre ces 2 composantes est proportionnel au rapport des dopages :  $I_p \propto N_{AB}$ ,  $I_n \propto N_{DE} \Rightarrow I_n \gg I_p$

La jonction base-collecteur est polarisée en inverse



Le champ électrique intense  $\vec{E}_{CB}$  dirigé du collecteur vers la base attire les électrons vers le collecteur et repousse les trous vers la base



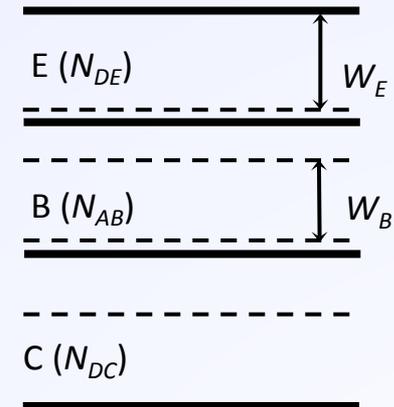
# Le transistor bipolaire : courants

Le **courant de base** est le courant de **trous** injectés par la jonction BE

Le **courant de collecteur** est le courant d'**électrons** injectés par la jonction BE et récupérés par la jonction BC

Le courant d'émetteur est la somme des courants de base et de collecteur

$$I_E = I_C + I_B$$

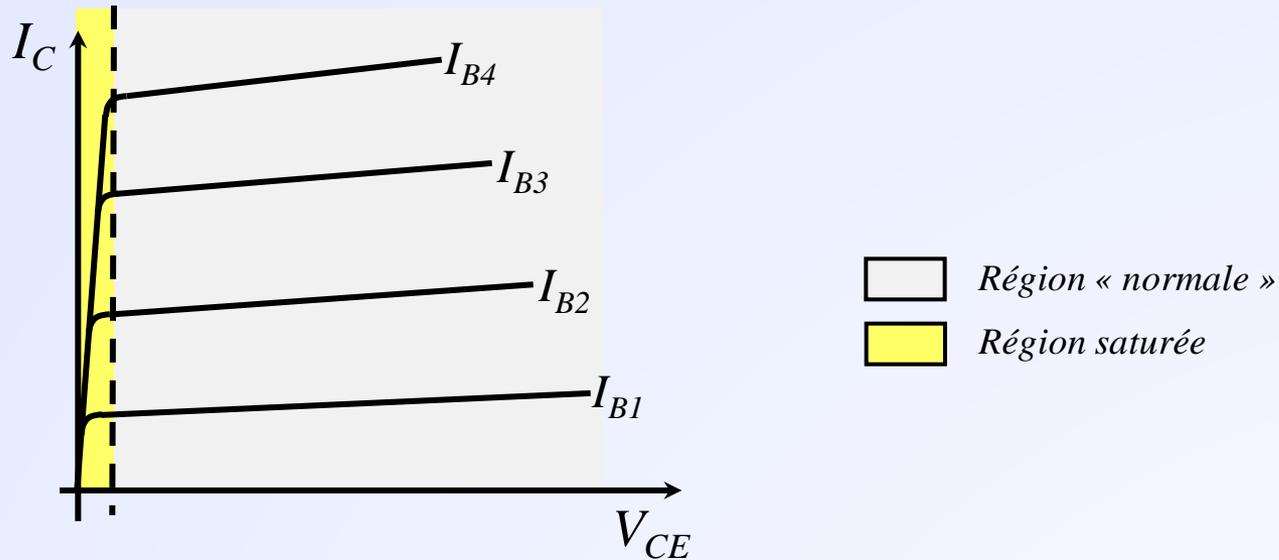


$W_E$  : largeur de la zone  
 neutre d'émetteur  
 $W_B$  : largeur de la zone  
 neutre de base

*Ces relations sont valables pour un composant pour lequel on peut négliger les recombinaisons et les effets de fortes injection, c'est à dire un transistor mince dans lequel circulent de petits courants.*

*En contrôlant le courant de base  $I_B$  (faible), on commande le courant de collecteur  $I_C$  (fort)*

# Le transistor bipolaire : caractéristiques



Régime « normal » : la jonction base-émetteur est polarisée en direct  
 la jonction base-collecteur est polarisée en inverse  
 le courant de base contrôle le courant collecteur,  $I_C = \beta I_B$

Régime saturé : les 2 jonctions sont polarisées en direct,  
 les courants  $I_C$  et  $I_B$  ne sont plus proportionnels

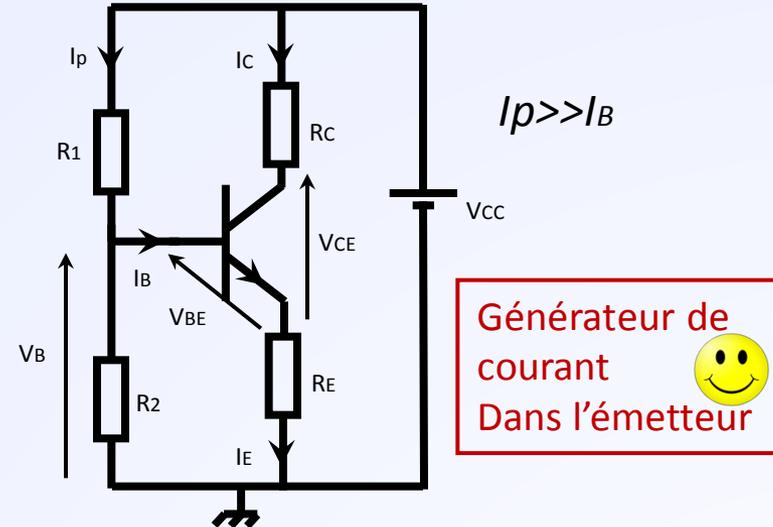
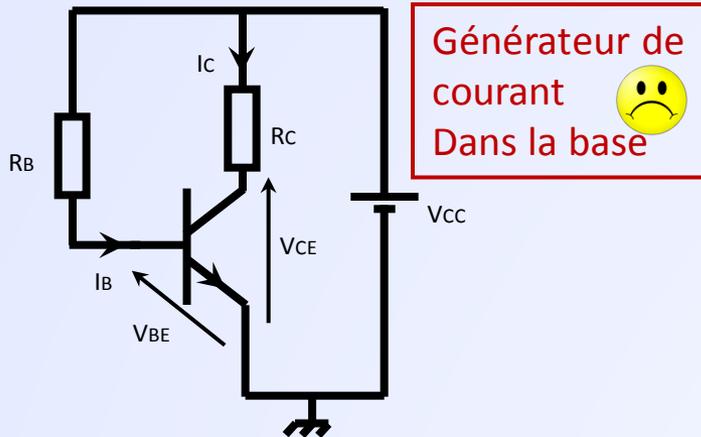
Régime bloqué : les 2 jonctions sont polarisées en inverse,  
 $I_B$  est nul ou négatif,  $I_C$  est nul.

utilisés en logique

Régime « inverse » : la jonction base-émetteur est polarisée en inverse  
 la jonction base-collecteur est polarisée en direct  
 cela revient à inverser émetteur et collecteur

# Le transistor bipolaire : polarisation

La polarisation consiste à choisir un point de fonctionnement :  $I_C$ ,  $V_{CE}$  et à assurer son maintien par un circuit externe.



$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}, \quad I_C = \beta I_B$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$$

Impossible d'afficher l'image.

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

Le gain en courant  $\beta$  n'est pas stable et varie en fonction de nombreux paramètres, en particulier la température.

**Il est préférable d'imposer le courant d'émetteur**

# Le transistor bipolaire : modèle pour signaux faibles

En analogique, on s'intéresse aux variations autour du point de fonctionnement ; on utilise un modèle « petits signaux » :

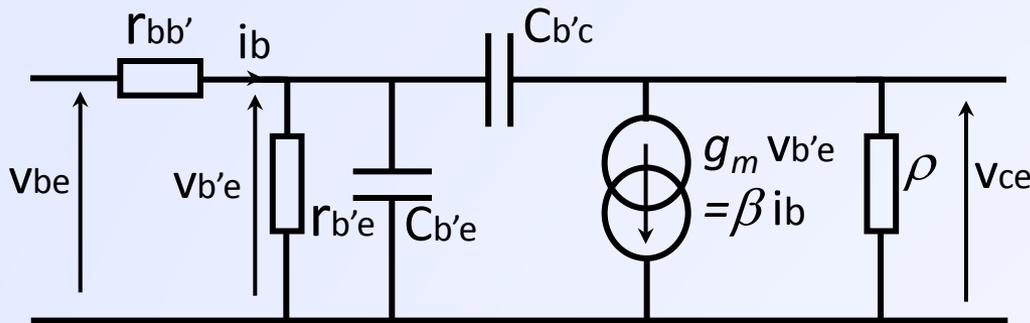


Schéma équivalent linéaire  
En émetteur commun

$r_{bb'}$  = Résistance d'accès à la base

$r_{b'e}$  = Résistance dynamique de la jonction base-émetteur :  $r_{b'e} = U_T / I_{B0}$

$C_{b'e}$  = Capacité de la jonction base-émetteur (en direct  $\Rightarrow$  capacité de diffusion)

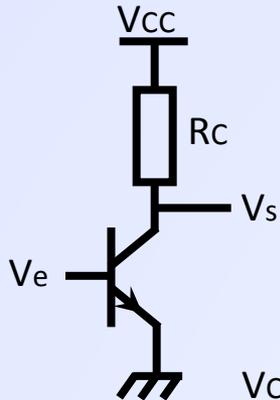
$C_{b'c}$  = Capacité de la jonction base-collecteur (en inverse  $\Rightarrow$  capacité de transition)

$g_m$  = Transconductance du transistor :  $g_m = I_{C0} / U_T$

$\rho$  = résistance de sortie du générateur de courant de collecteur :  $\rho = V_A / I_{C0}$

$\rho$  représente la pente de la caractéristique  $I_C = f(V_{CE})$  qui n'est pas parfaitement horizontale. C'est l'effet de la variation de l'épaisseur de la base avec la tension  $V_A$  est la tension d'Early, elle dépend de la technologie.

# Le transistor bipolaire : les montages de base



## Montage émetteur commun

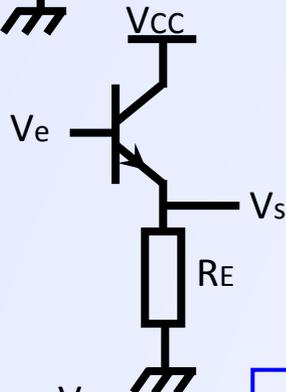
Gain en tension :  $A_v = V_s/V_e = -g_m R_c$

Gain en courant :  $A_i = I_s/I_e = \beta$

Résistance d'entrée :  $R_{in} = r_{be}$

Résistance de sortie :  $R_s = R_c // \rho$

Ampli de tension



## Montage collecteur commun

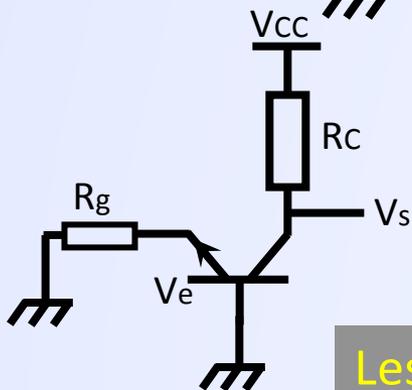
Gain en tension :  $A_v = V_s/V_e = g_m R_E / (1 + g_m R_E) \approx +1$

Gain en courant :  $A_i = I_s/I_e = \beta + 1$

Résistance d'entrée :  $R_{in} = r_{be} + (\beta + 1)R_E$

Résistance de sortie :  $R_s = R_E // (1/g_m)$

Suiveur



## Montage base commune

Gain en tension :  $A_v = V_s/V_e = +g_m R_c$

Gain en courant :  $A_i = I_s/I_e = +1$

Résistance d'entrée :  $R_{in} = 1 / g_m$

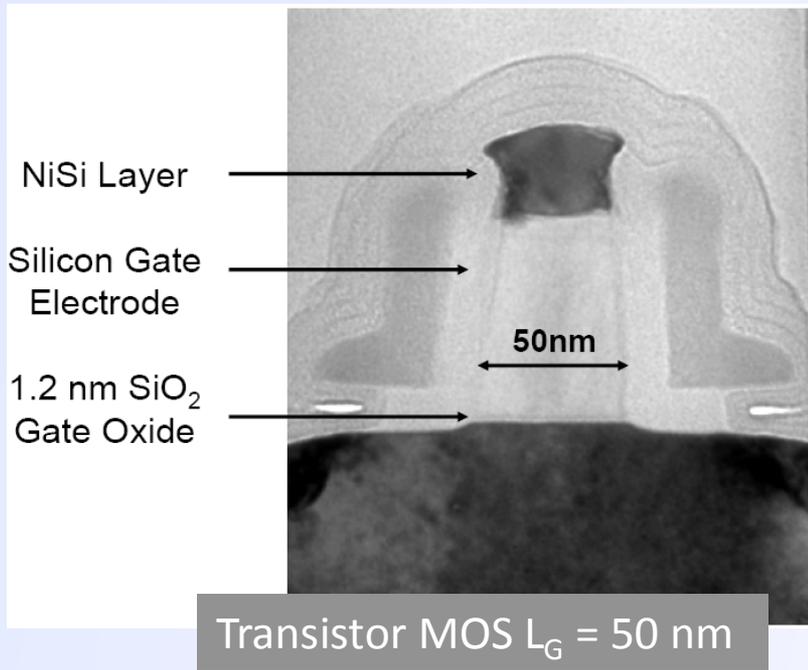
Résistance de sortie :  $R_s = R_c // [g_m \rho (R_g // r_{be})]$

Conversion  
courant-tension,  
Cascode

Les circuits de polarisation n'ont pas été représentés

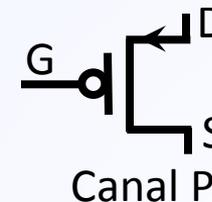
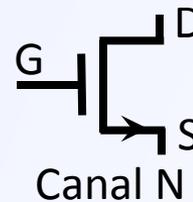
# Le transistor M.O.S.

M.O.S. = Métal Oxyde Silicium

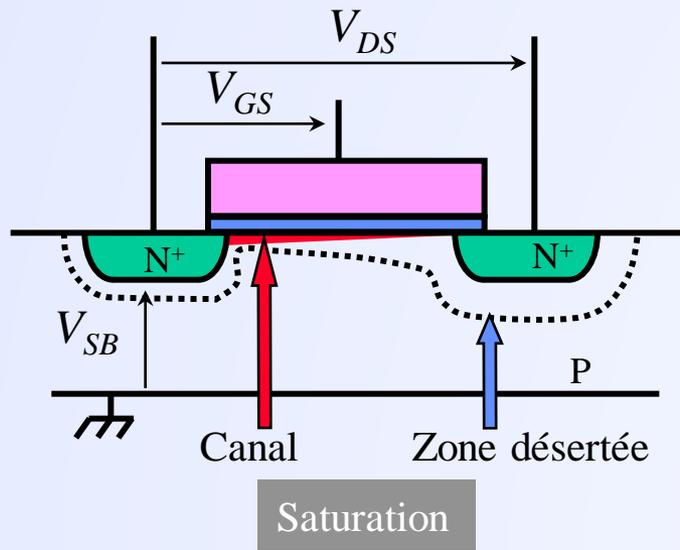
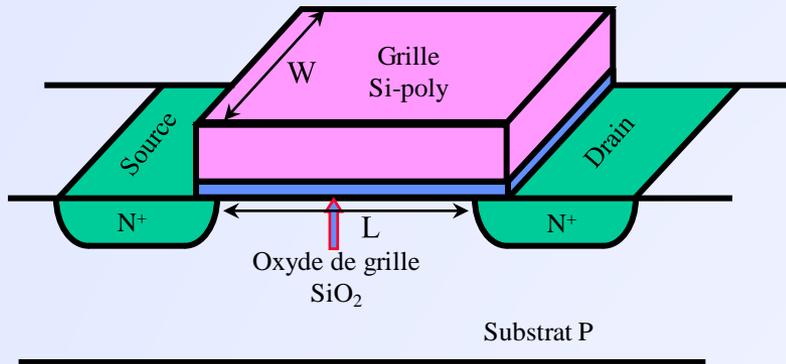


Le courant circule entre drain et source  
 Electrode de commande : grille  
 La grille est isolée : pas de courant de grille continu

symboles

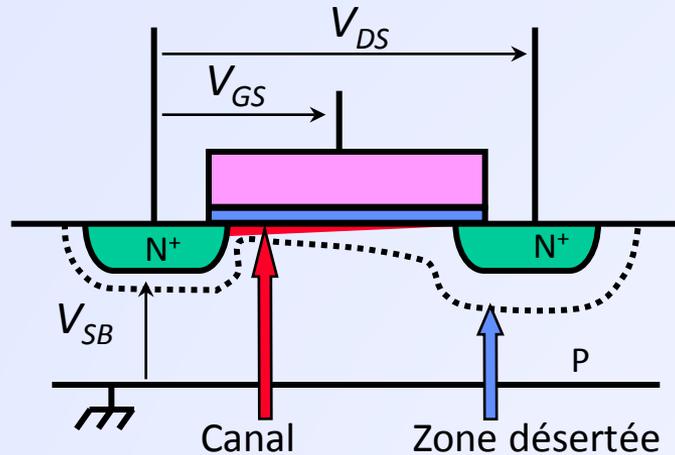


# Le transistor M.O.S. : principe de fonctionnement



- $W, L$  : largeur et longueur du canal
- Création du canal :  
injection d'électrons sous la grille par la mise en direct *localement* de la jonction source-substrat, contrôle de la quantité de porteurs par le *champ électrique vertical* créé par la tension  $V_{GS}$
- Mise en mouvement des porteurs :  
par le *champ électrique longitudinal* créé par la tension  $V_{DS}$
- $V_T$  : Tension de seuil  
↓  
limite de l'inversion :  
concentration des porteurs libres dans le canal = concentration de dopant du substrat

# Le transistor M.O.S. : courant



$\mu$  : mobilité des porteurs  
 $C_{OX}$  : Capacité d'oxyde par  
unité de surface

en inversion forte :

$$I_{DS} = \mu C_{OX} \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

$$\beta = \mu C_{OX} \frac{W}{L}$$

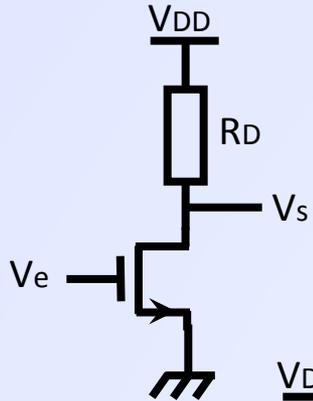
en saturation :

$$I_{DSAT} = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^n$$

$$1 < n < 2$$

➔ utilisation dans la circuiterie analogique

# Le transistor MOS : montages de base



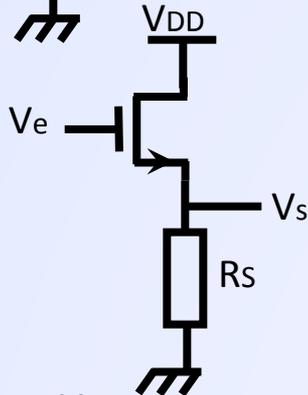
## Montage source commune

Gain en tension :  $A_v = V_s/V_e = -g_m R_D$

Résistance d'entrée :  $R_{in} = \infty$

Résistance de sortie :  $R_{out} = R_D // (1/g_{ds})$

Ampli de tension



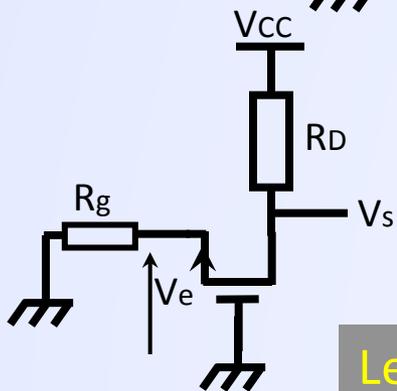
## Montage drain commun

Gain en tension :  $A_v = V_s/V_e = g_m R_S / (1 + g_m R_S) \approx +1$

Résistance d'entrée :  $R_{in} = \infty$

Résistance de sortie :  $R_{out} = R_S // (1/g_m)$

Suiveur



## Montage grille commune

Gain en tension :  $A_v = V_s/V_e = +g_m R_D$

Résistance d'entrée :  $R_{in} = 1 / g_m$

Résistance de sortie :  $R_{out} = R_D // [(g_m/g_{ds})R_g]$

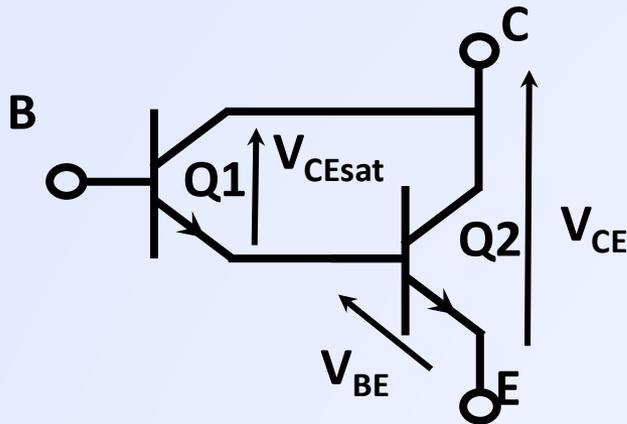
Conversion  
courant-tension,  
Cascode

Les circuits de polarisation n'ont pas été représentés

# Le transistor bipolaire : quelques montages « composites »

- Darlington
- Cascode : EC + BC
- Super base commune : BC + EC
- White follower : CC + EC
- ...

# Darlington



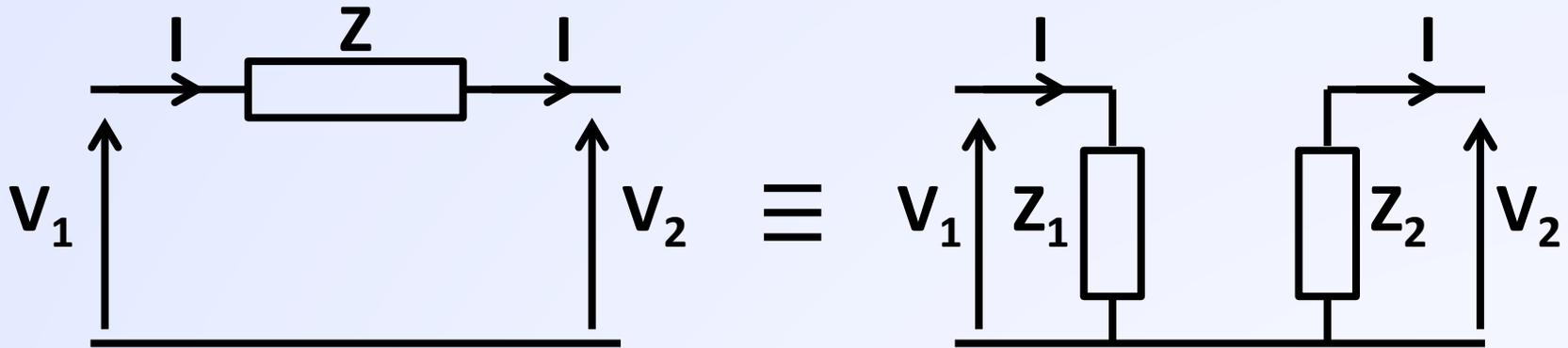
Le courant d'émetteur de Q1 est le courant de base de Q2  $\Rightarrow \beta = \beta_1 \times \beta_2$

**Avantage :** impédance d'entrée élevée

**Inconvénients :**  $V_{CEmin} = V_{BE} + V_{CEsat}$

*Application : Etages d'entrée d'amplificateurs opérationnels afin de diminuer les courants d'entrée*

# Effet Miller



$$Z = \frac{V_1 - V_2}{I}$$

$$Z_1 = \frac{V_1}{I} ; Z_2 = -\frac{V_2}{I}$$

$$Z_1 = Z \frac{1}{1 - \frac{V_2}{V_1}} ; Z_2 = Z \frac{\frac{V_2}{V_1}}{\frac{V_2}{V_1} - 1}$$

$$A_V = -\frac{V_2}{V_1} : \text{gain en tension } (>>1)$$

$$Z_1 \approx \frac{Z}{A_V} ; Z_2 \approx Z$$

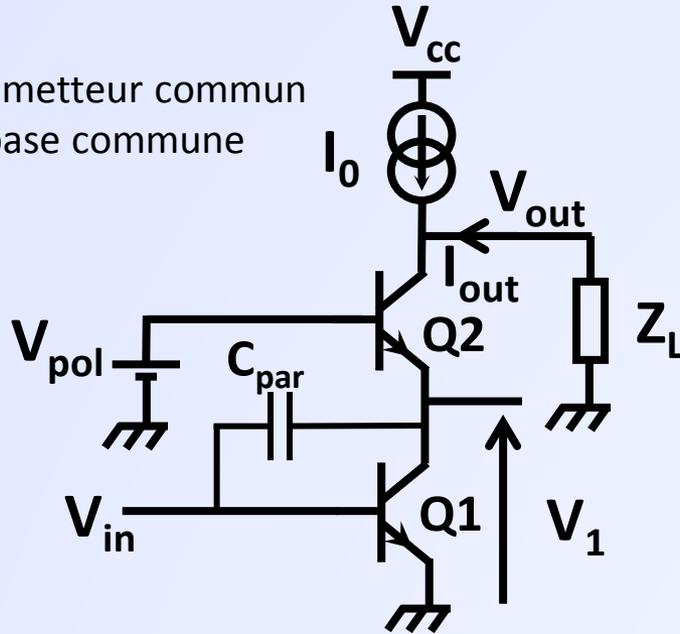
Si Z est une capacité,  
elle apparait vue de l'entrée  
multipliée par le gain de l'étage

$$C_1 \approx C * AV ; C_2 \approx C$$

# Cascode : EC + BC

élimination de l'effet Miller + impédance de sortie élevée

Q1 : émetteur commun  
Q2 : base commune



$$\frac{V_1}{V_{in}} = -\frac{g_{m1}}{g_{m2}} \approx -1$$

⇒ Pas d'effet Miller

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -g_{m1} (R_s // Z_L)$$

Gain idem EC

$R_s$  : Résistance de sortie  
 $Z_L$  : impédance de charge

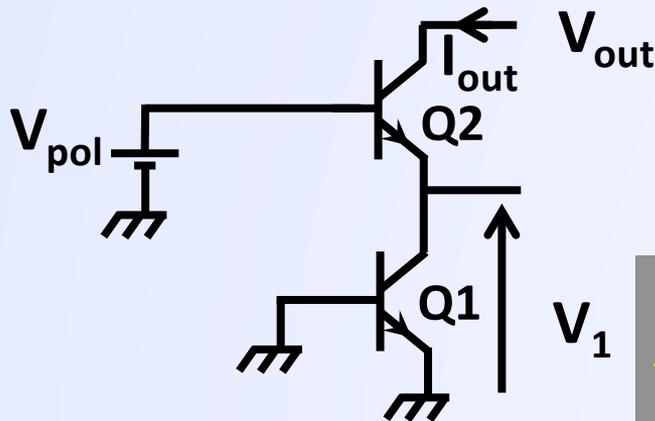


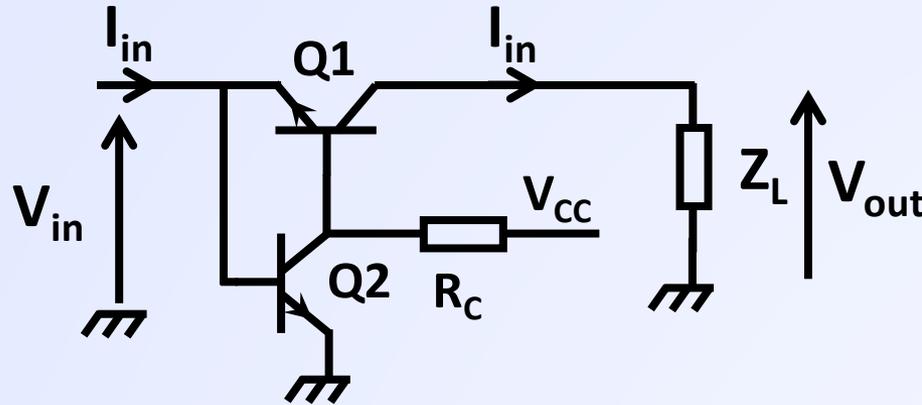
Schéma pour le calcul de la résistance de sortie

$$R_{out} = \frac{\delta V_{out}}{\delta I_{out}} = (g_{m2} \rho_2) \rho_1$$

La résistance de sortie est multipliée par le gain d'un étage  
Applications : isolation Entrée-Sortie  
grand gain en tension

# Super Base Commune : BC + EC

diminution de l'impédance d'entrée



Q1 : base commune  
Q2 : émetteur commun

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = +g_{m1} (R_s // Z_L)$$

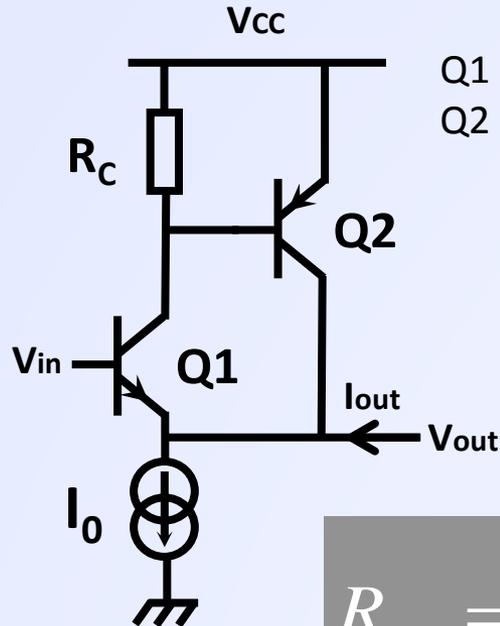
*Gain idem BC*

$$R_{in} = \frac{\delta V_{in}}{\delta I_{in}} = \frac{1}{g_{m1} (g_{m2} R_C)}$$

**La résistance d'entrée est divisée par le gain d'un étage**  
**Application : Convoyeur de courant**

# White follower : CC + EC

diminution de l'impédance de sortie



Q1 : collecteur commun (NPN)

Q2 : émetteur commun (PNP)

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} \approx +1$$

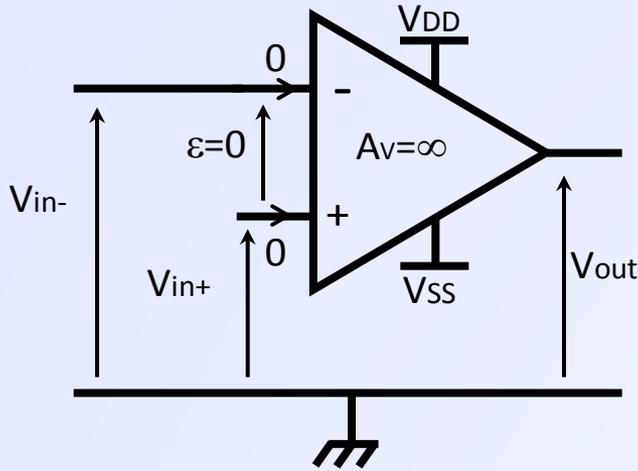
*Gain idem CC*

$$R_{out} = \frac{\delta V_{out}}{\delta I_{out}} = \frac{1}{g_{m1}} \frac{1}{g_{m2} R_C}$$

*La résistance de sortie est divisée par le gain d'un étage*  
*Application : suiveur, étage de sortie, driver de ligne*

# L'amplificateur opérationnel

- L'ampli idéal
- L'ampli réel
  - Principe, architecture
  - Contre-réaction
  - Limitations
  - Stabilité, compensation
- VFOA, CFOA
- Quelques montages usuels

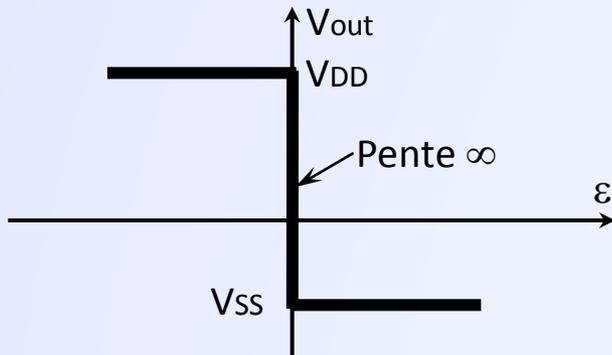


## L'amplificateur opérationnel idéal comprend :

- Une entrée inverseuse :  $V_{in-}$
- Une entrée non inverseuse :  $V_{in+}$
- Une sortie :  $V_{out}$

## Ses caractéristiques :

- Gain en tension infini  $\Rightarrow \epsilon = 0$
- Bande passante infinie
- Courants d'entrée nuls :  $i_{in+} = i_{in-} = 0$

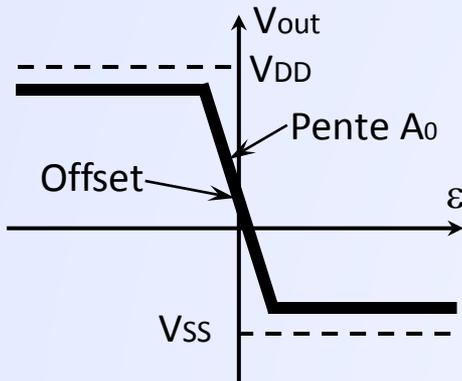
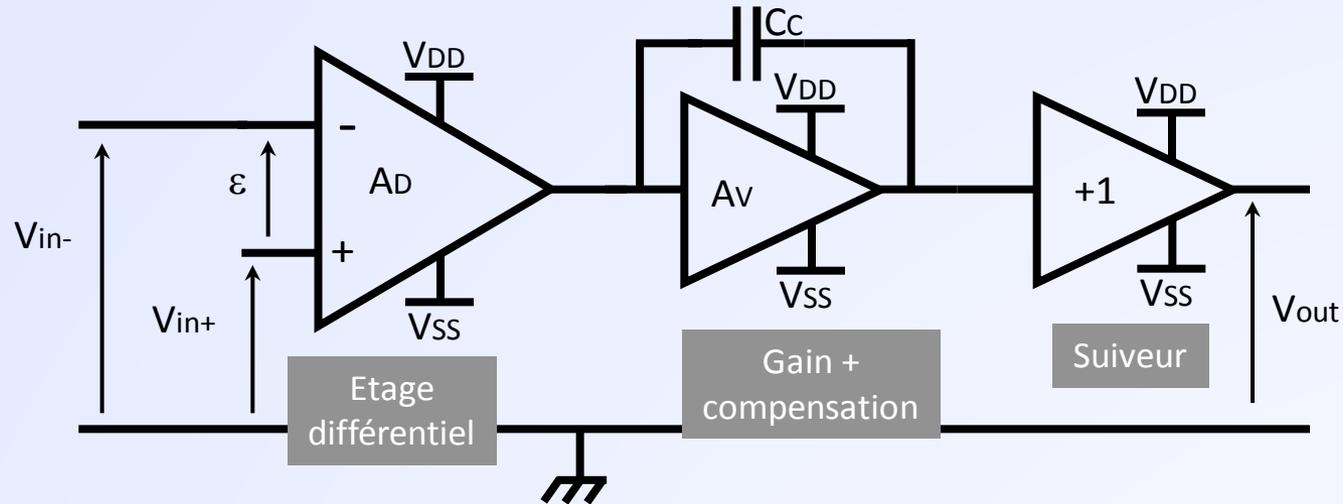


Caractéristique de transfert

Lorsque l'entrée de l'ampli est à 0, la sortie peut prendre n'importe quelle valeur entre  $V_{DD}$  et  $V_{SS}$ .

C'est le circuit extérieur qui permet à l'ampli de se « débrouiller » pour maintenir son entrée à 0

# L'amplificateur opérationnel réel



Caractéristique de transfert de l'ampli réel

## L'amplificateur opérationnel réel comprend :

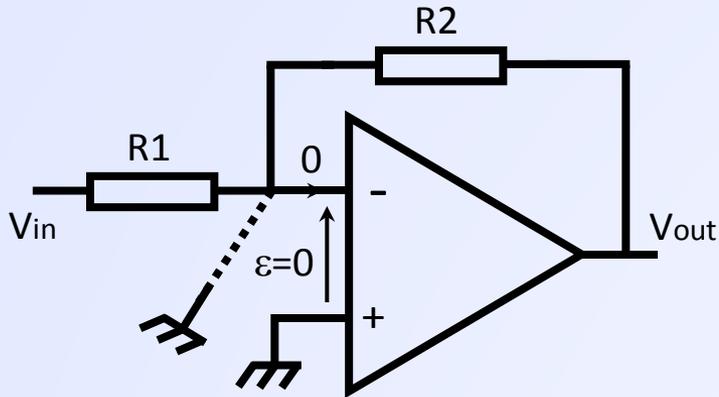
- un étage différentiel : réjection du mode commun
- un étage de gain avec la compensation en fréquence
- un suiveur pour assurer une impédance de sortie basse

## Ses caractéristiques :

- Gain en tension fini  $A_0$  ( $A_0 = A_D \cdot A_V$ )  $\Rightarrow \epsilon \neq 0$
- Offset :  $V_{out} \neq 0$  pour  $\epsilon = 0$
- Bande passante finie
- La tension de sortie n'atteint pas les alimentations
- Les courants d'entrée ne sont pas nécessairement nuls

# Contre-réaction

*L'AO ne peut fonctionner en régime linéaire que s'il est contre-réactionné*

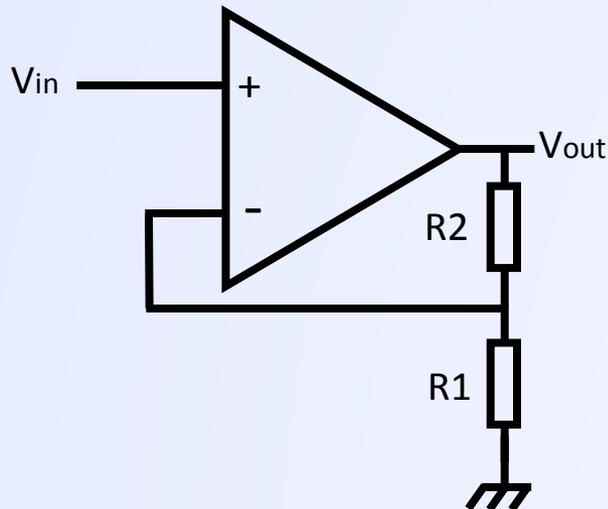


## Montage inverseur :

La sortie est rebouclée sur l'entrée par R2  
 Le courant dans R2 et R1 est le même  
 Le rôle de l'AO est d'imposer une masse virtuelle

## Ses caractéristiques :

$V_{OUT} / V_{IN} = - R2 / R1$   
 Résistance d'entrée = R1



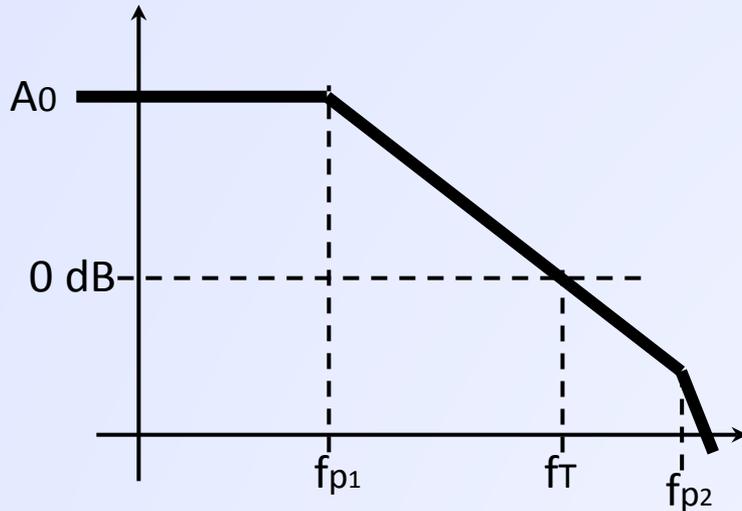
## Montage non-inverseur :

La contre-réaction est la même que pour  
 le montage inverseur

## Ses caractéristiques :

$V_{OUT} / V_{IN} = 1 + R2 / R1$   
 Résistance d'entrée =  $\infty$

# Limitations dynamiques

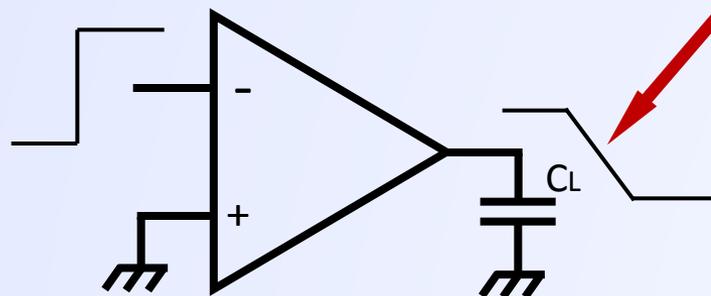


## Produit Gain-Bande :

C'est la fréquence maximale à laquelle l'AO pourra fonctionner.  
 Si  $f_T < f_{p2}$ , l'AO sera stable en gain unité

$$f_T = A_0 f_{p1} = \frac{g_{m_{in}}}{C}$$

C est la capacité de charge ou de compensation

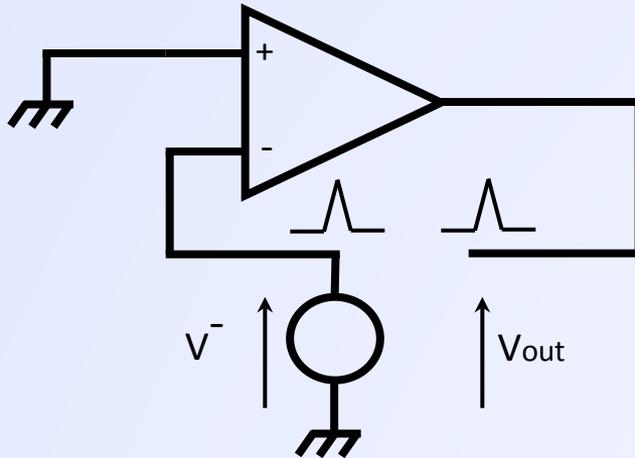


## Slew rate :

Lorsqu'on applique un échelon à l'entrée de l'AO, la sortie ne varie pas instantanément, La vitesse de variation maximale de la tension de sortie est le « slew rate »

$$SR = \left( \frac{dV_{OUT}}{dt} \right)_{\max} \sim \frac{I_0}{C}$$

# Stabilité, compensation (1)



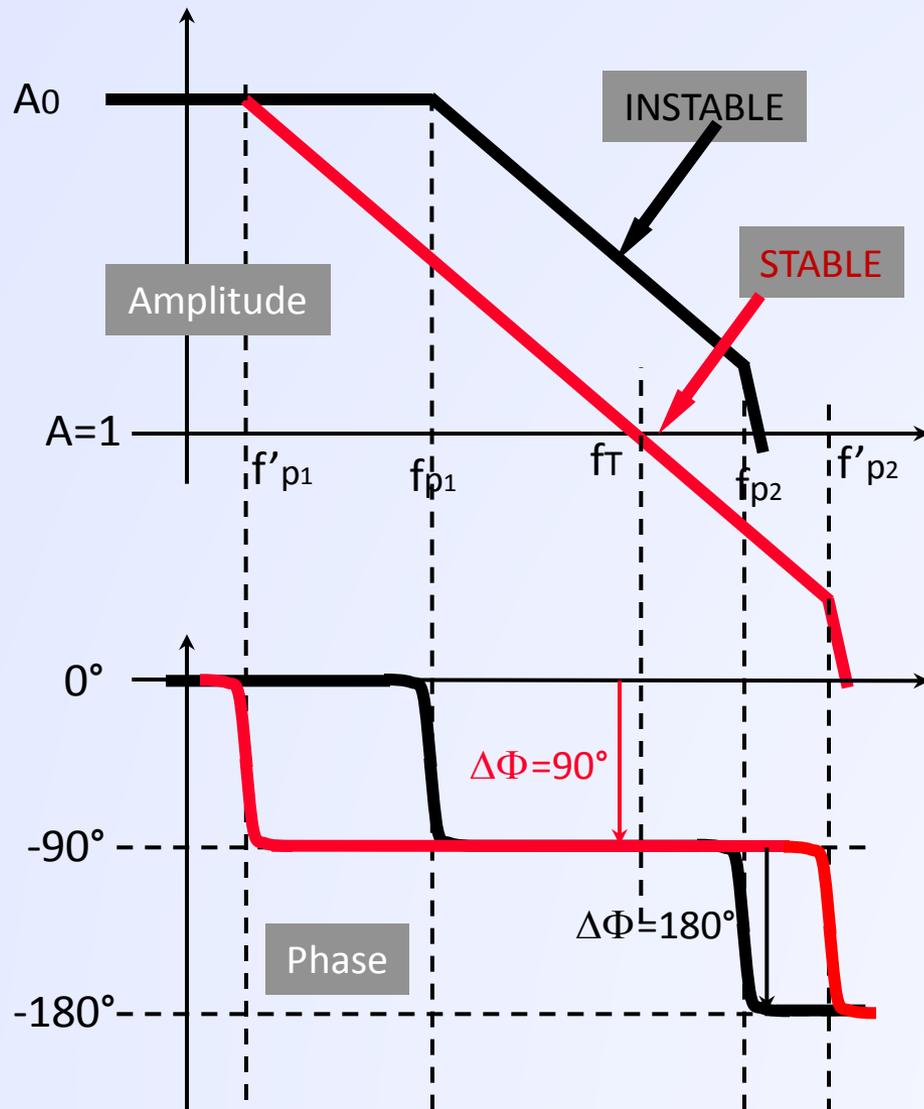
Montage suiveur :

- On ouvre la boucle
- On injecte une perturbation sur  $V^-$
- On mesure à la sortie
- Si la mesure est égale à la perturbation, on peut refermer la boucle et supprimer l'excitation, une oscillation apparaît.

**C'est la limite d'instabilité**

Pour obtenir  $V_{out} = V^-$ , l'AO doit déphaser de  $180^\circ$  et avoir un gain unité

# Stabilité, compensation (2)



## Sans compensation :

Le déphasage atteint  $180^\circ$  à la fréquence de gain unité

↓  
INSTABLE

## Compensation :

On diminue la 1<sup>ère</sup> fréquence de coupure et on augmente la 2<sup>ème</sup>

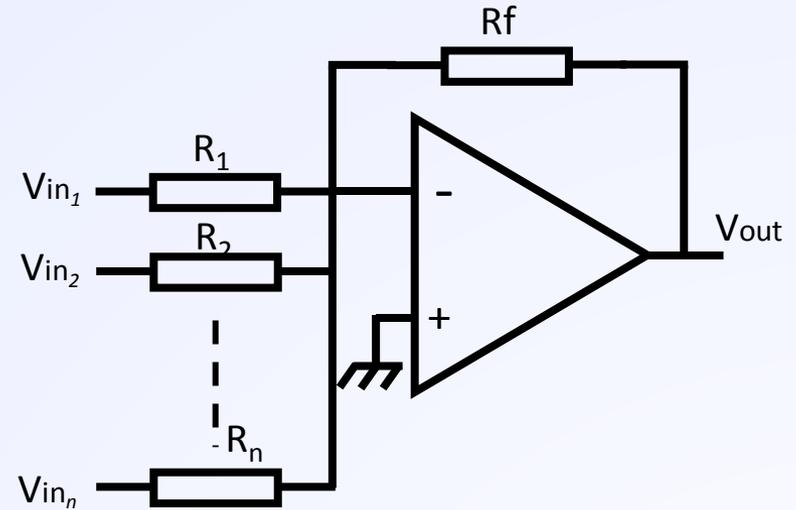
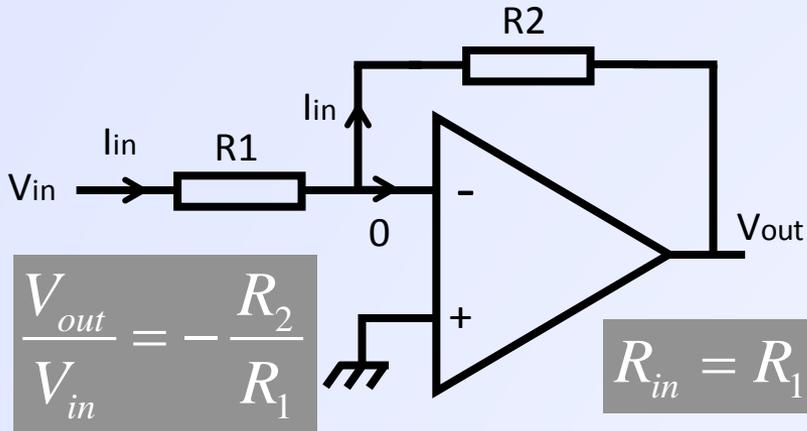
↓  
Le déphasage n'est que de  $90^\circ$  à la fréquence de gain unité :

le système est **STABLE**

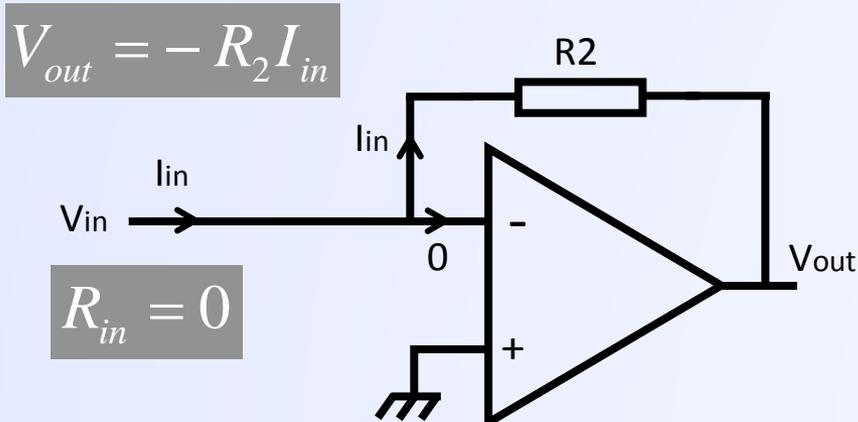
# Quelques montages usuels

- Ampli inverseur - Sommateur
- Suiveur – Ampli non inverseur
- Amplificateur d'instrumentation
- Différenciateur – Intégrateur
- Diode sans seuil
- Générateur de courant constant
- Déphaseur

# Inverseur - Sommateur

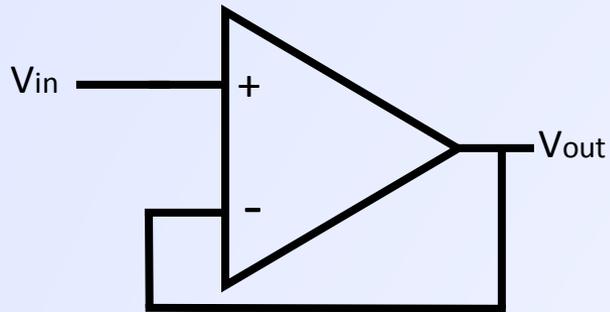


Avec  $R_1 = 0 \rightarrow$  Conversion courant-tension



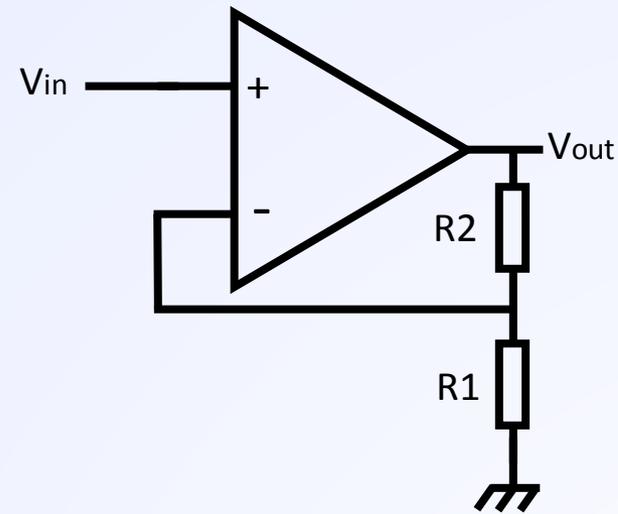
$$V_{out} = -R_f \sum_{i=1}^{i=n} \frac{V_{in_i}}{R_i}$$

# Suiveur – Ampli non inverseur



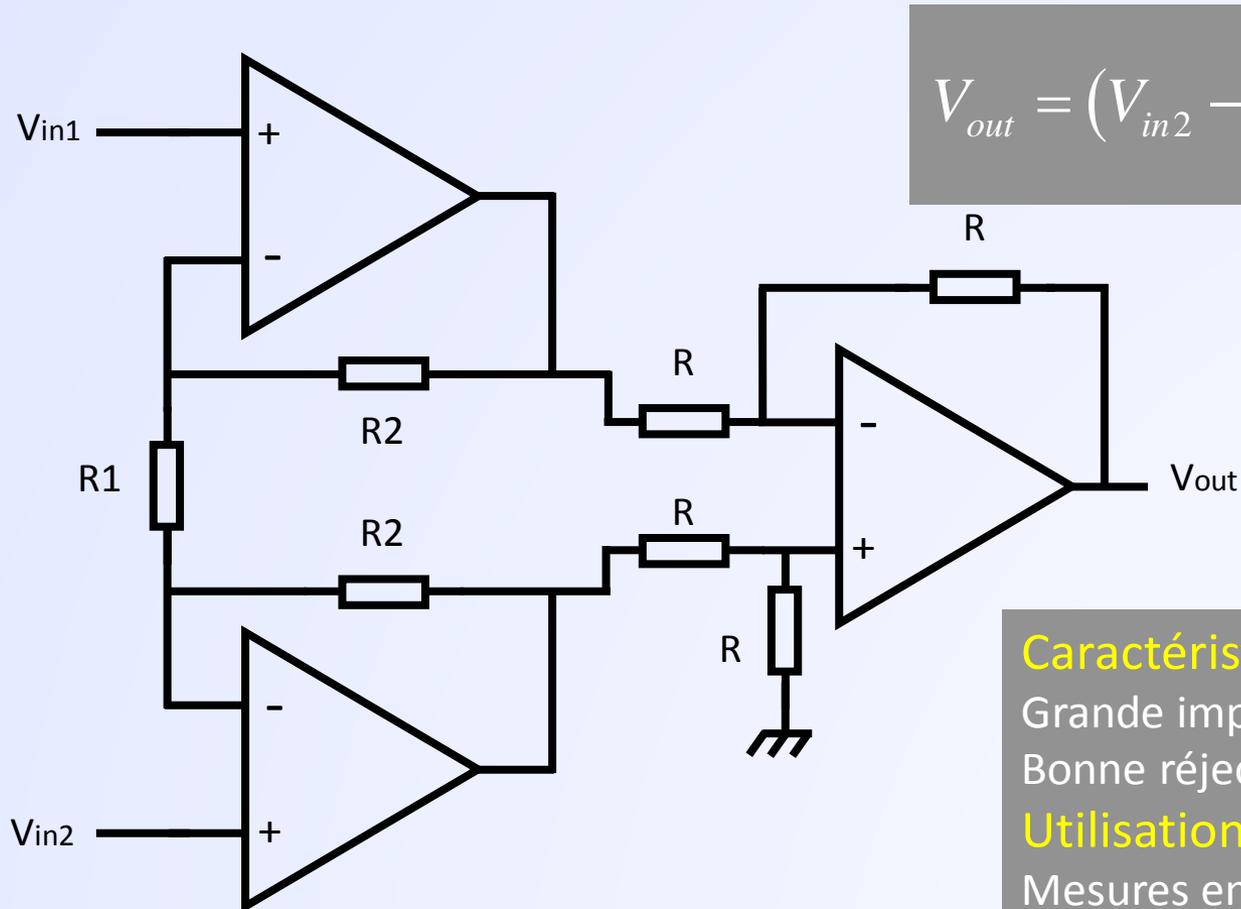
$$V_{out} = V_{in}$$

$$R_{in} = \infty$$



$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

# Ampli d'instrumentation



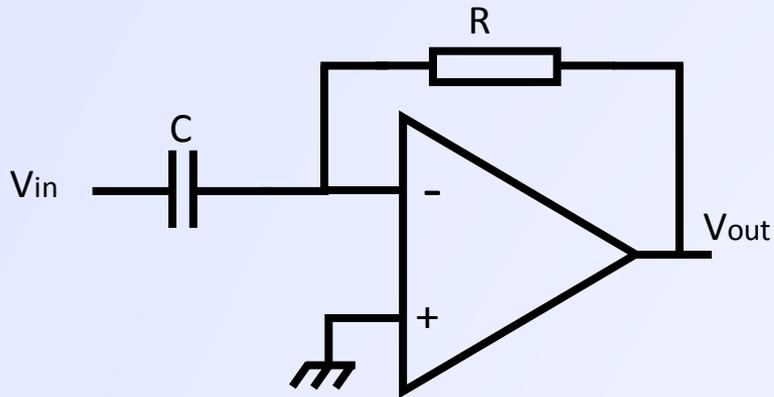
$$V_{out} = (V_{in2} - V_{in1}) \left( 1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \right)$$

**Caractéristiques :**  
Grande impédance d'entrée  
Bonne réjection du mode commun

**Utilisation :**  
Mesures en BF, conversion MD/MC

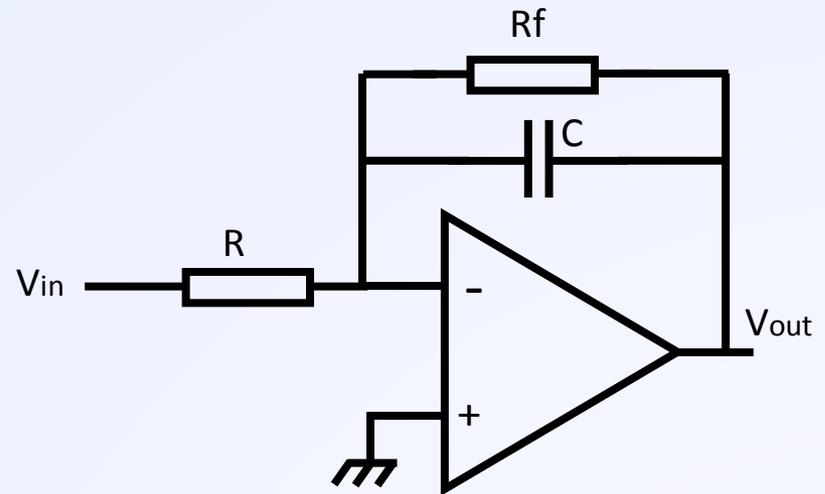
*Existe sous forme intégrée : par exemple : INAxxx chez Ti*

# Différenciateur - Intégrateur



$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -j\omega RC$$

$$V_{out} = -RC \frac{dV_{in}}{dt}$$

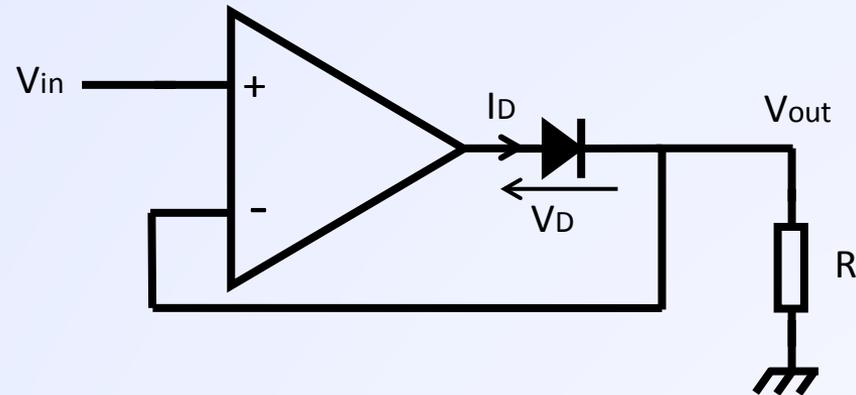


$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-1}{j\omega RC}$$

$$V_{out} = -RC \int V_{in} dt$$

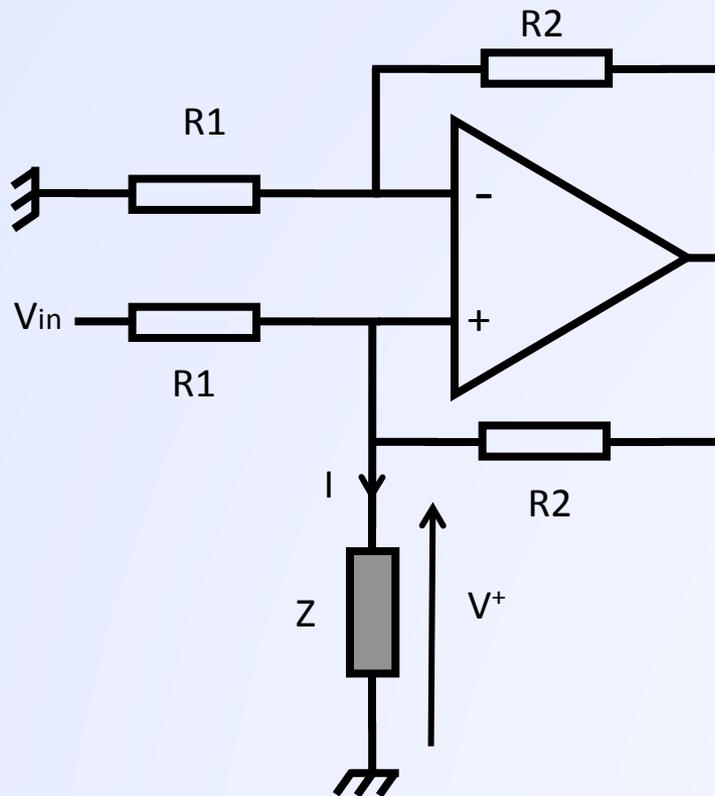
*Rf est obligatoire pour la stabilité Rf >> R*

# Diode sans seuil



*$V_{out} = V_{in}$  seulement si la diode est passante, donc si  $I_D > 0$   
 $I_D$  devient  $< 0$  seulement si  $V_{out}$  devient  $< 0$ ,  
 alors la diode se bloque et  $V_{out}$  reste à 0*

# Générateur de courant constant

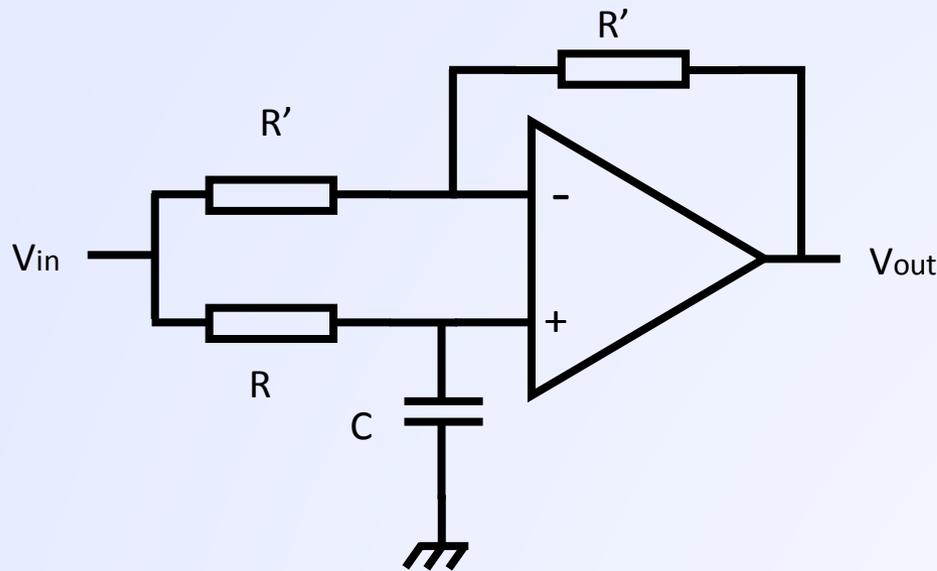


$$\frac{V_{in} - V^+}{R_1} = I - \frac{V^+}{R_1}$$

$$I = \frac{V_{in}}{R_1}$$

*I est indépendant de Z*

# Déphaseur

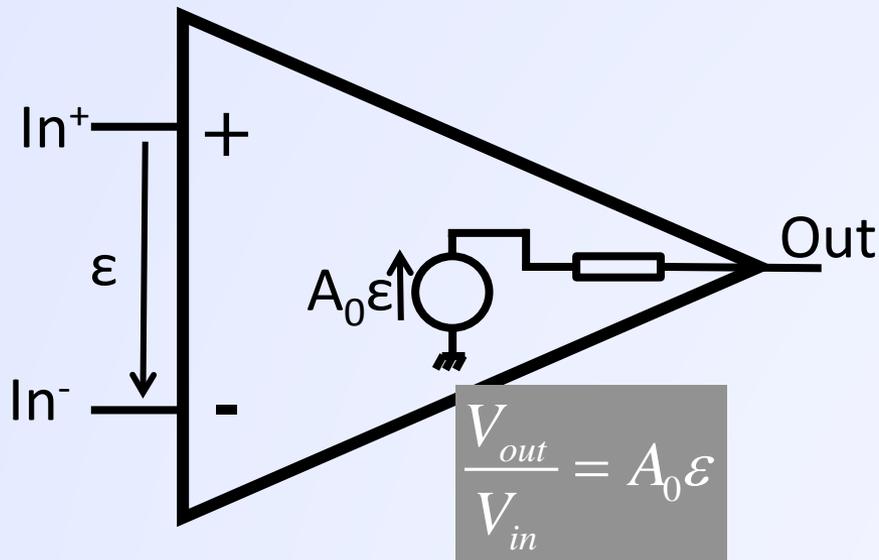


$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1 - jRC\omega}{1 + jRC\omega}$$

$$\left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right| = 1$$

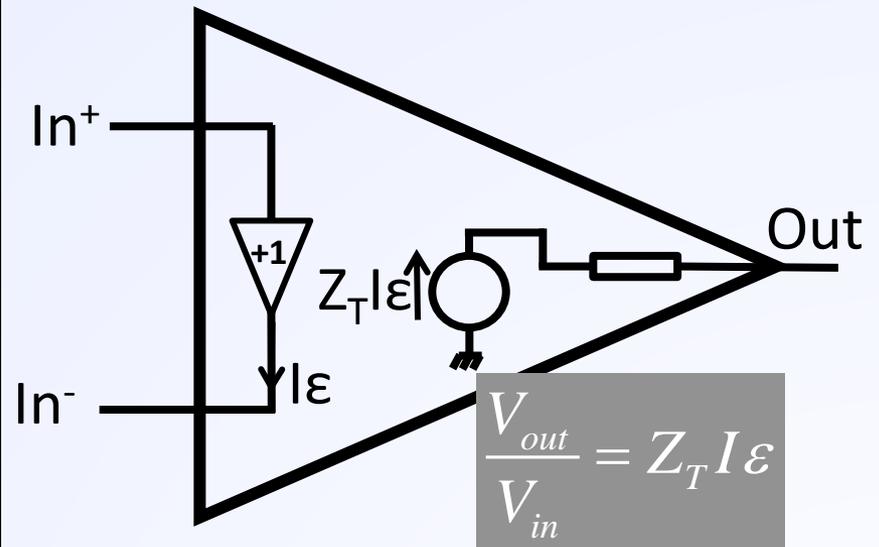
$$\text{Arg} \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) = -2 \tan^{-1} (RC\omega)$$

## Voltage Feedback Operational Amplifier



La contre réaction annule  
la **tension d'erreur**  $\varepsilon$

## Current Feedback Operational Amplifier



La contre réaction annule  
le **courant d'erreur**  $I \varepsilon$

## CFOA

- **Avantages**
  - Plus de liberté dans le choix de la contre réaction
  - Moins de problèmes de stabilité
- **Attention !**
  - La bande passante dépend du gain
  - Limitation en grands signaux due au Slew Rate

## VFOA

- **Avantages**
  - La bande passante ne dépend pas du gain
  - Pas de limitation de type Slew Rate
- **Attention !**
  - La résistance de contre réaction doit avoir une valeur particulière (c.f. data sheet)
  - Le bruit sur l'entrée inverseuse est plus grand
  - Stabilité délicate sur charge capacitive

# Synthèse de Filtres actifs

- Outils pour la synthèse de filtres à base d'AOP
- Exemple : Filter pro ©Texas Instruments

<http://www.ti.com/tool/FilterPro?keyMatch=filter%20pro%20v3.1%20download&tisearch=Search-EN>

- Plusieurs architectures possibles :
  - Sallen Kay
  - Multiple feedback single ended
  - Multiple feedback différentiel
- Démo (si ça marche... !)