

PHY 568 Microelectronique

Promotion X2003

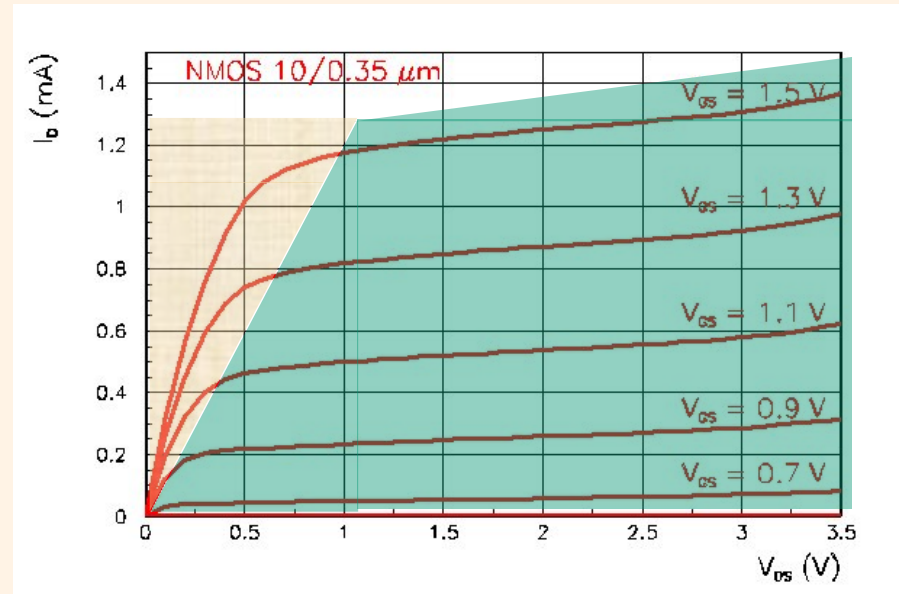
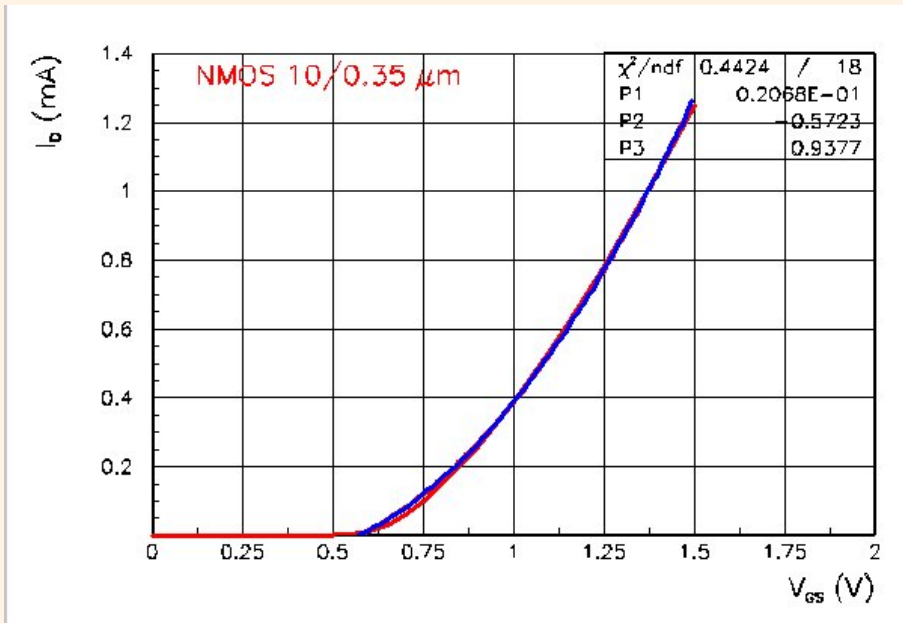
Introduction à l'électronique analogique

Sommaire

- ❑ **Modèle hybride π du transistor MOS**
- ❑ **Montage source commune (transconductance)**
- ❑ **Montage Drain Commun (suiveur en tension)**
- ❑ **Montage Grille Commune (Convoyeur de courant)**
- ❑ **Montages composites**
- ❑ **Montages Amplificateurs**
- ❑ **Plots d'Entrée/Sortie**

Modèle hybride π du transistor MOS

Equations d'états



2 zones de fonctionnement :

□ zone résistive ($V_{DS} < (V_{GS} - V_T)$)

□ zone "de pincement" (pinch-off région ou zone de saturation) $V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$

Equations d'états

- zone "de pincement" (pinch-off région ou zone de saturation)

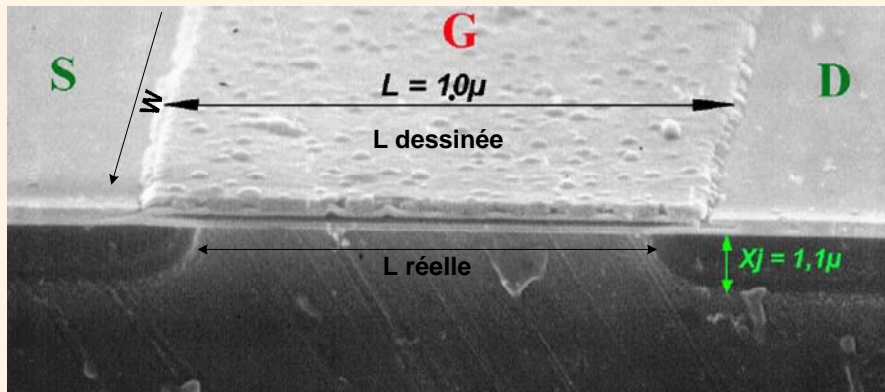
$$V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$$

- Pour la zone résistive

$$(V_{DS} < (V_{GS} - V_T))$$

$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$$

$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) V_{DS}$$



- I_D courant circulant dans le canal
- μ_n mobilité globale des électrons
- C_{ox} capacité par unité de surface de l'oxyde
- W et L largeur et longueur du canal
- V_{GS} la tension grille-source
- V_t la tension de seuil.

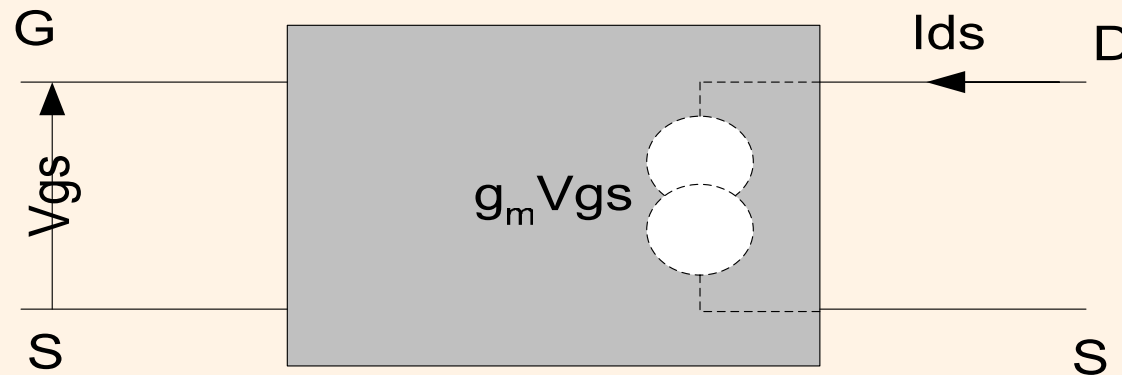
Représentation Quadripôle Simplifié

Dans la zone de fonctionnement saturée

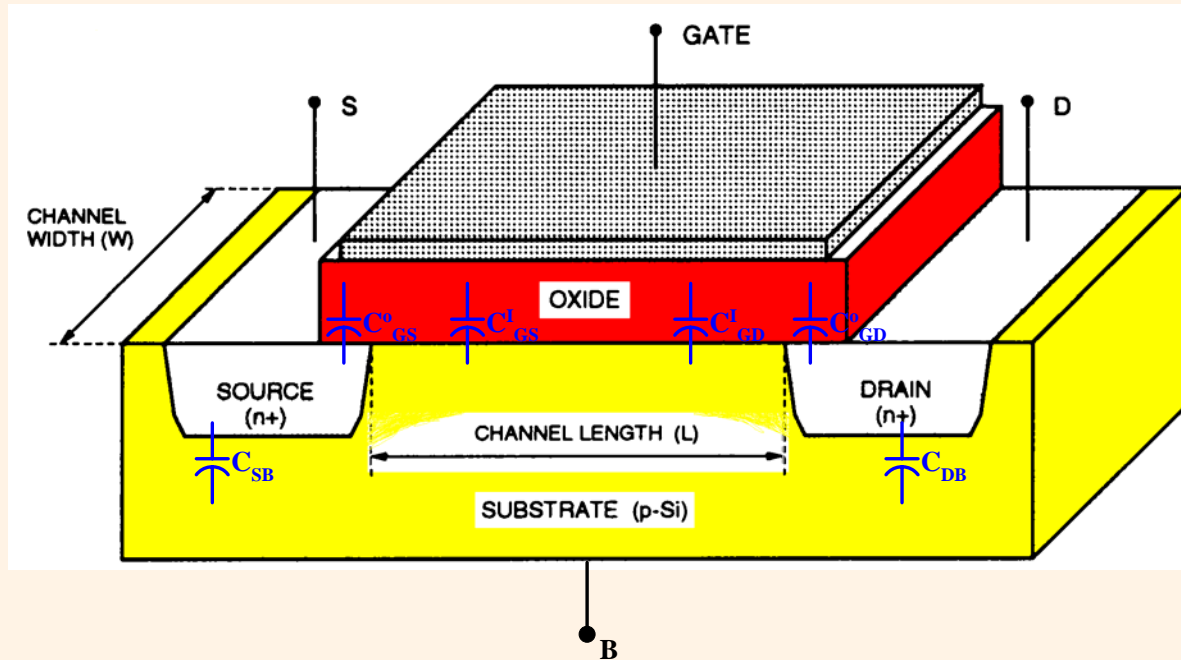
- ❑ **Tension grille-source**: grandeur d'entrée du quadripôle.
- ❑ **Courant drain-source** la grandeur de sortie.

Pas de courant de grille : impédance d'entrée infinie, commande en tension "pure".

Fonction "**transconducteur**" :
courant drain commandé par le carré de la *tension grille-source* VGS..



Capacités parasites du MOS



$$C_{GS} = C_{GS}^0 + C_{GS}^I$$

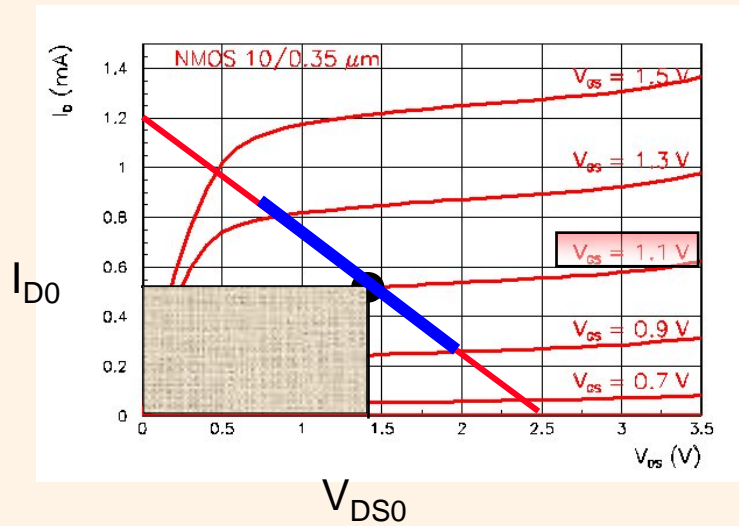
$$C_{GD} = C_{GD}^0 + C_{GD}^I$$

- C_{GS} capacité Grille-Source
- C_{GD} capacité Drain-Source
- C_{SB} capacité Source-Substrat
- C_{DB} capacité Drain-Substrat

Souvent négligeables

Modèle petits signaux

□ Point de fonctionnement : Polarisation statique



Déterminer : - Le gain de transduction
- La plage dynamique

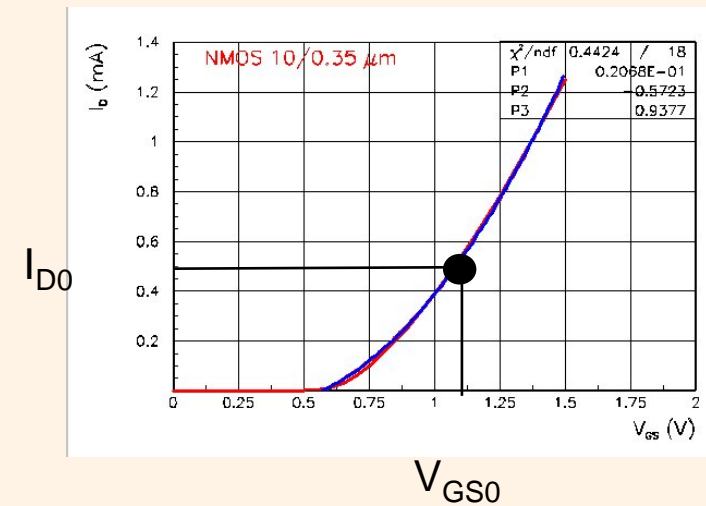
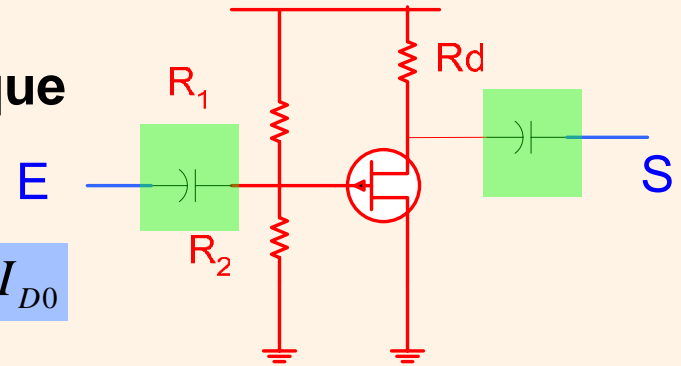
Attention aux pertes générées par la polarisation

□ Superposition de signaux dynamiques

Capacités de découplage

$$V_{DS0} = V_{DD} - R_d I_{D0}$$

$$V_{GS0} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD}$$



Modèle petits signaux

les modèles petits signaux étant variationnels:

- ⇒ Grandeurs électriques continues considérées comme nulles.
- ⇒ remplacées par des **masses virtuelles**

Paramètres incrémentaux

L'équation d'état permet de calculer par dérivation les paramètres incrémentaux "petits signaux"

Transconductance

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = \begin{cases} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} V_{DS} & \text{Zone Résistive} \\ \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) = \sqrt{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_D} & \text{Zone Saturée} \end{cases}$$

Conductance de sortie

$$g_{DS} = \frac{\partial V_{DS}}{\partial I_D} = \lambda I_D$$

Modèle petits signaux

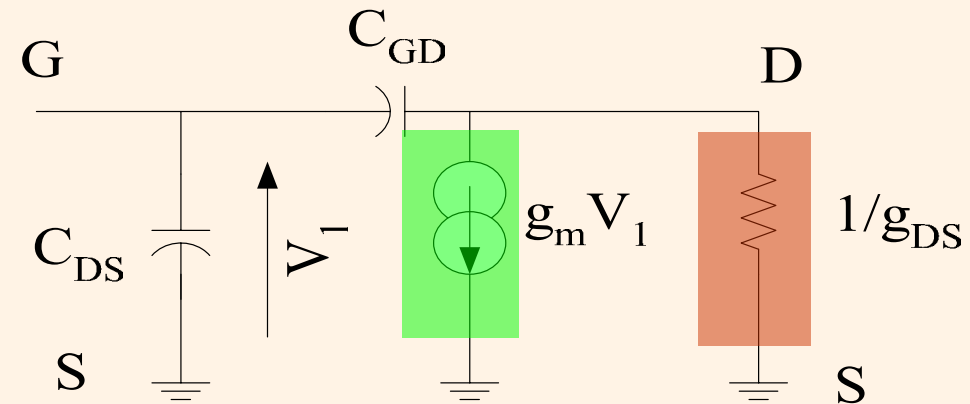
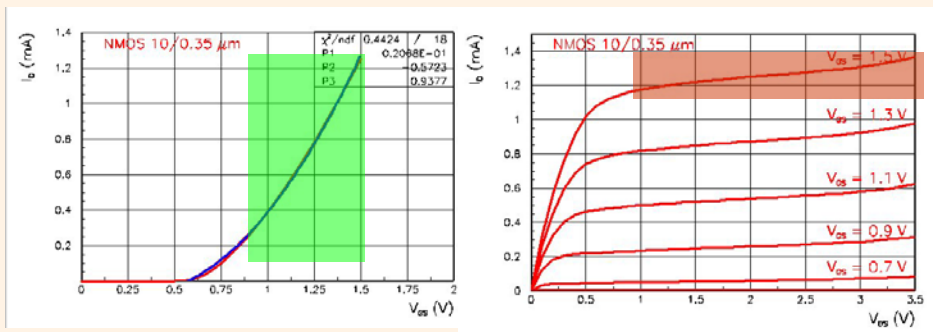
Paramètres Additionnels

Limitation de la bande passante \Rightarrow prise en compte des capacités C_{GS} & C_{GD}

Permettent de définir la fréquence de coupure :

$$f_c = \frac{g_m}{2\pi(C_{GS} + C_{GD})}$$

Schéma équivalent petits signaux



Montage source commune (transconductance)

Montage Source Commune

la source est prise comme référence commune à l'entrée et à la sortie

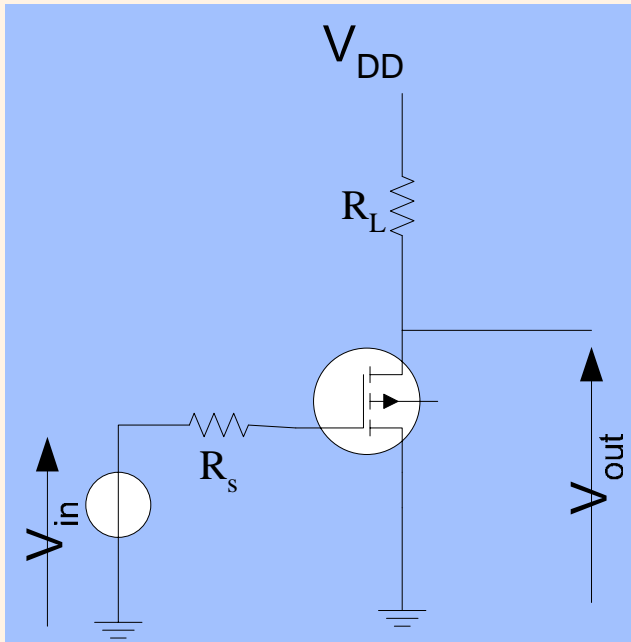
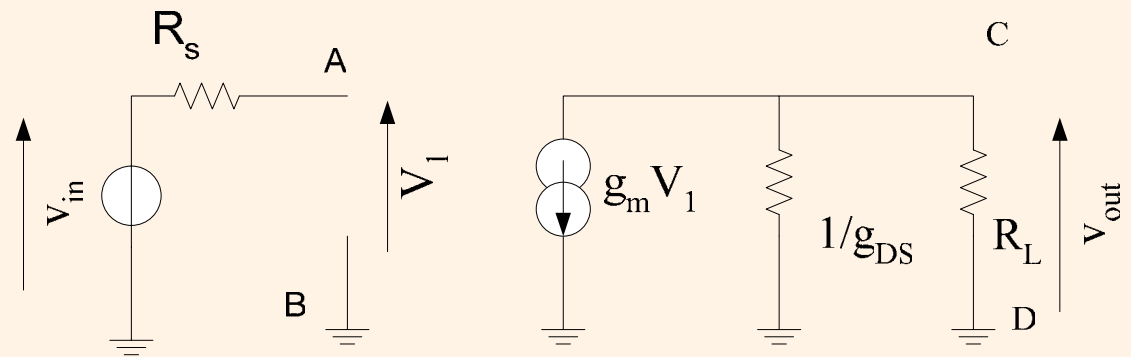


Schéma équivalent petits signaux
(on néglige les capacités – basses fréquences)



Montage Source Commune

❑ Caractéristique du quadripôle

▪ Impédance d'entrée

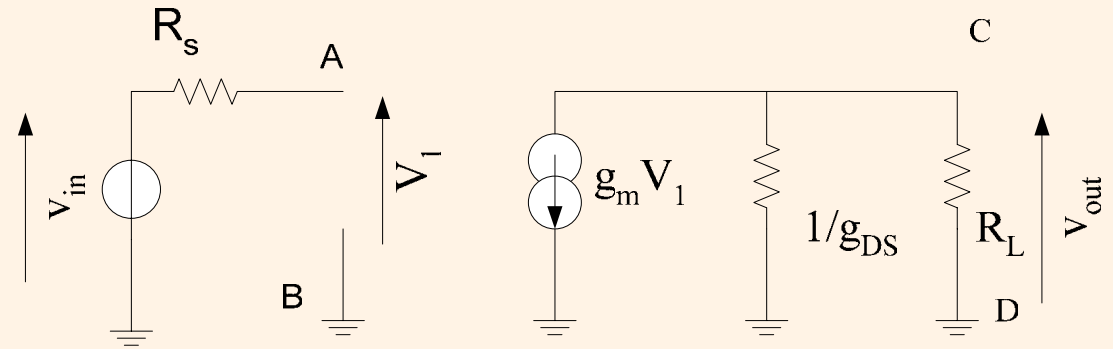
$$R_{in} = \infty$$

▪ Impédance de sortie

$$R_{out} = 1/g_{DS} \parallel R_L \approx R_L$$

▪ Gain en tension

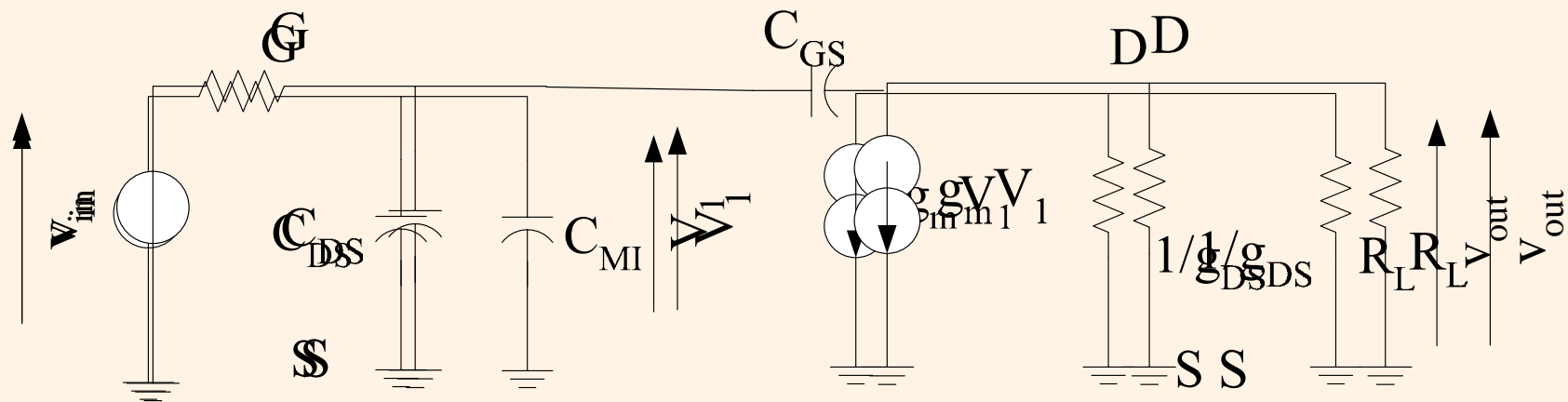
$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -g_m \left(1/g_{DS} \parallel R_L \right) \approx -g_m R_L$$



Montage Source Commune

□ Réponse en fréquence (effet MILLER)

Impossible de négliger les capacités grille-drain C_{GD} et grille-source C_{GS}



Prise en compte de C_{GD} via une capacité ramenée sur l'entrée : capacité Miller : C_{Mi}

$$C_{Mi} = (1 + g_m R_L) C_{GD}$$

Montage Source Commune

□ Réponse en fréquence (effet MILLER)

Impédance totale d'entrée :

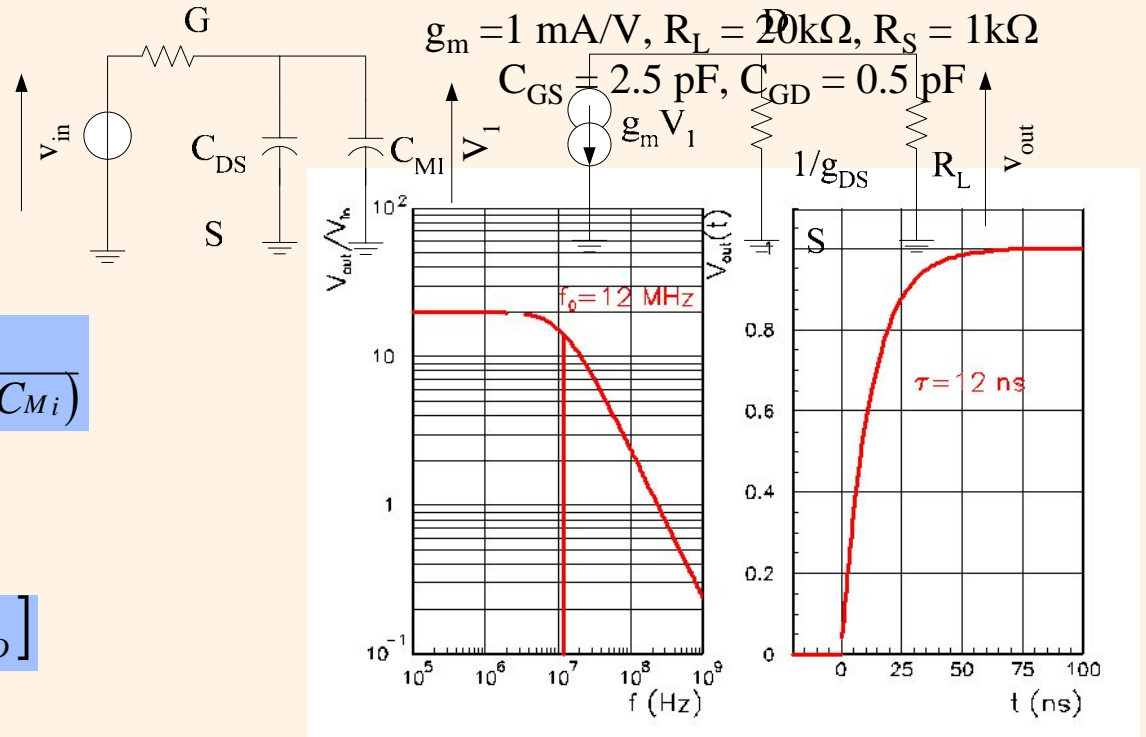
$$Z_{in} = 1/j\omega(C_{GS} + C_{MI})$$

Gain en tension :

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -g_m R_L \frac{Z_{in}}{R_S + Z_{in}} = \frac{-g_m R_L}{1 + j\omega R_S (C_{GS} + C_{MI})}$$

Pulsation de coupure ω_0

$$\omega_0 = 1/R_S [C_{GS} + (1 + g_m R_L)C_{GD}]$$



Montage Source Commune

□ Caractéristiques globales

"*Source Commune*" \Rightarrow configuration *Transconductrice*.

▪ Grande impédance d'entrée: *entrée en tension*

▪ Grande impédance de sortie: *sortie en courant*

▪ montage inverseur

Montage Drain Commun (suiveur en tension)

Montage Drain Commun

le drain qui est commun à l'entrée et à la sortie

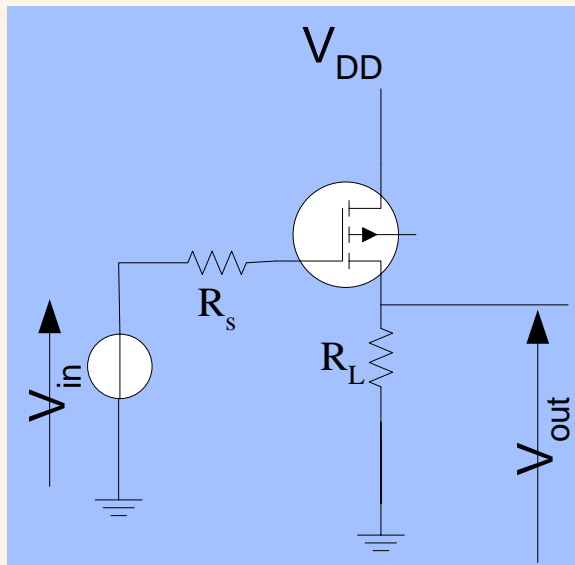
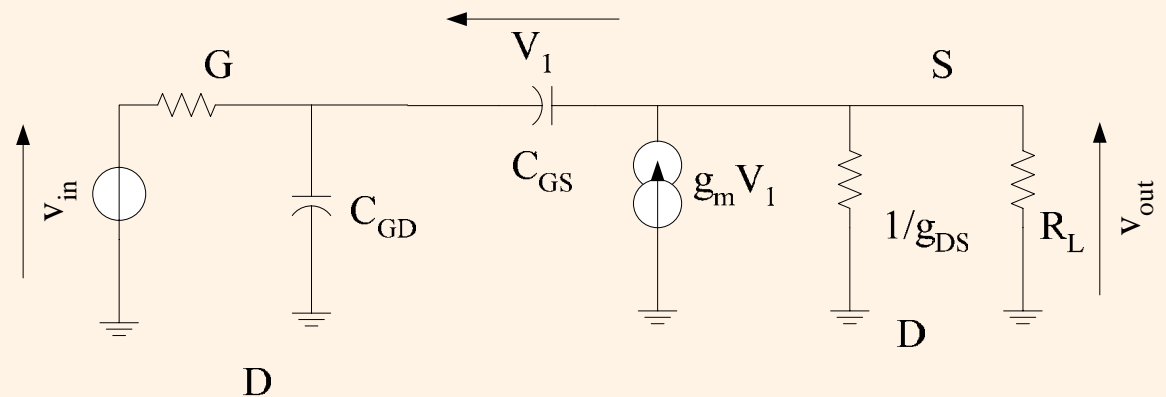
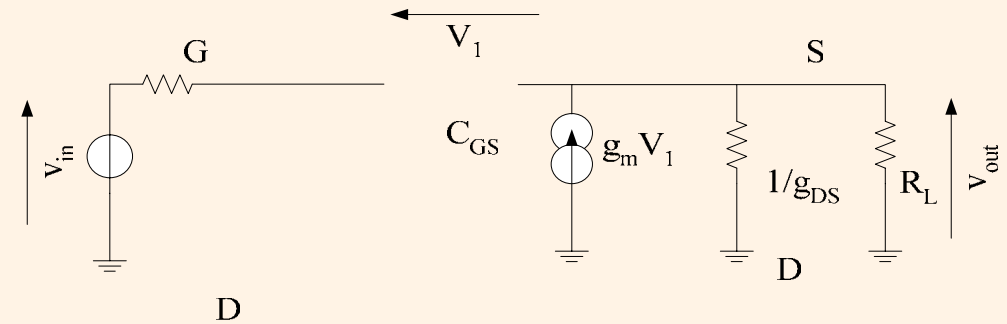


Schéma équivalent petits signaux



Montage Drain Commun

❑ Caractéristique du quadripôle (basse fréquence)



- Impédance d'entrée :

$$R_{in} = \infty$$

pas de courant dans la grille

- Impédance de sortie :

$R_{out} = 1/g_m // R_L \approx 1/g_m$ impédance basse \Rightarrow signal de sortie plutôt «en tension».

- Gain en tension :

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{g_m R_L}} \approx 1$$

Montage Drain Commun

□ Caractéristiques globales

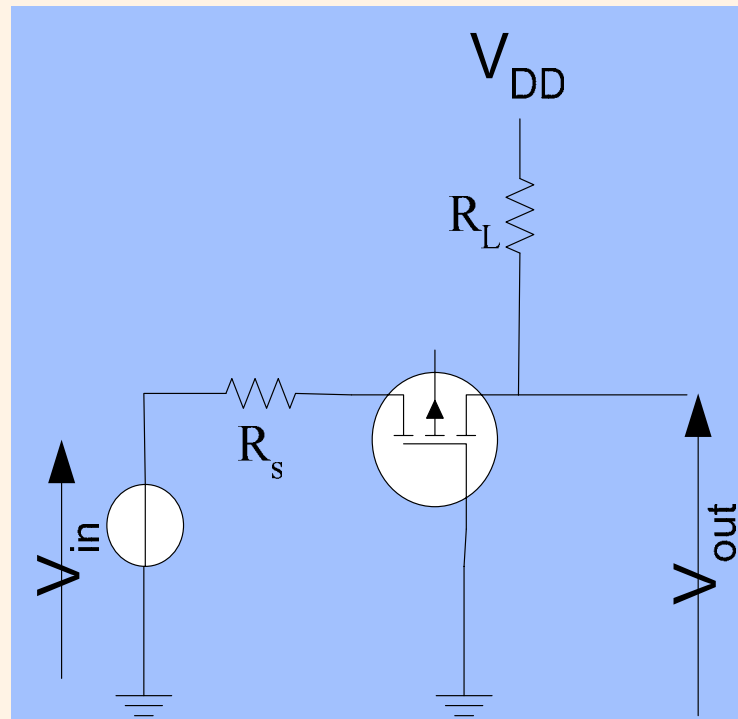
Le montage "*drain Commun*" est une configuration "*Suiveur de Tension*".

- "la source suit la grille" en tension
- gain en tension unité : $v_{\text{out}}/v_{\text{in}} \approx 1$
- grande impédance d'entrée
- faible impédance de sortie $\sim 1/g_m$

Montage Grille Commune (Convoyeur de courant)

Montage Source Commune

la grille est commune à l'entrée et à la sortie et reliée à la masse

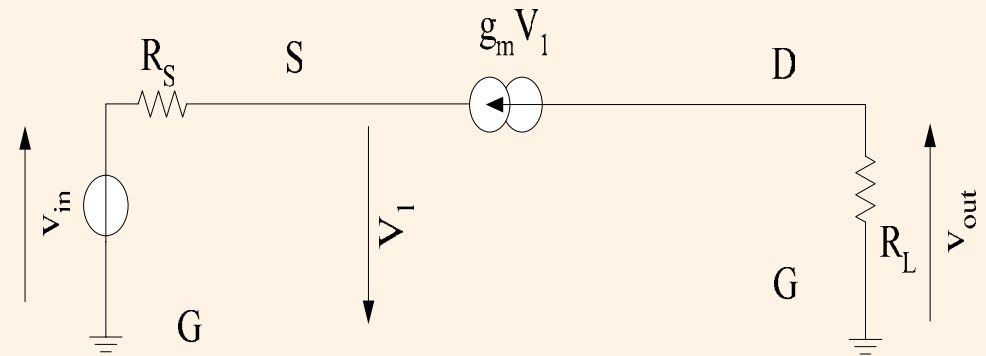


Montage Source Commune

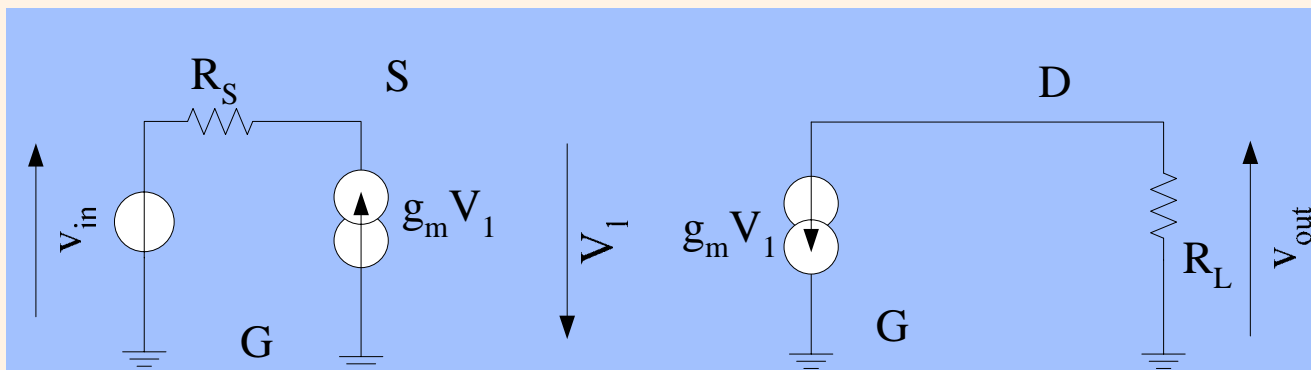
□ Schéma équivalent petits signaux

Approche basses fréquences (on négliges les capacités)

$1/G_{DS}$ supposée infinie



Qui peut être mis sous la forme



Montage Source Commune

□ Caractéristique du quadripôle (basse fréquence)

- Impédance d'entrée :

$$R_{in} = 1/g_m$$

- Impédance de sortie :

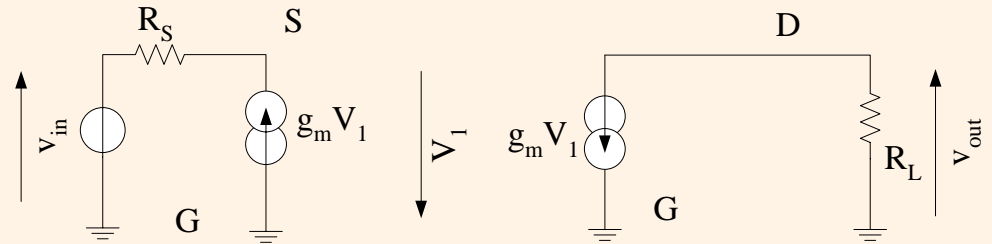
$$R_{out} = \frac{1 + g_m R_S}{g_{DS}}$$

- Gain en courant :

$$A_i = 1$$

- Gain en tension :

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



Montage Drain Commun

❑ Caractéristiques globales

Le montage '**Source Commune**' est une configuration '**Convoyeur de courant**'.

gain en courant unité: $i_{\text{out}}/i_{\text{in}} = 1$ non-inverseur

faible impédance d'entrée $\sim 1/g_m$

très grande impédance de sortie : $1/g_{DS}$

Montages composites

- Sources de courant.
- Etage amplificateur
- Offset de tension
- Etage de sortie

Miroirs de courant

Objectif \Rightarrow courant constant et indépendant des paramètres du circuit et des tensions.

.
plusieurs utilisations possibles :

- Sources de courants
- polarisation statique de transistors
- charge active (synthèse de résistances virtuelles de valeur élevée)
- changement de point d'attache d'un signal

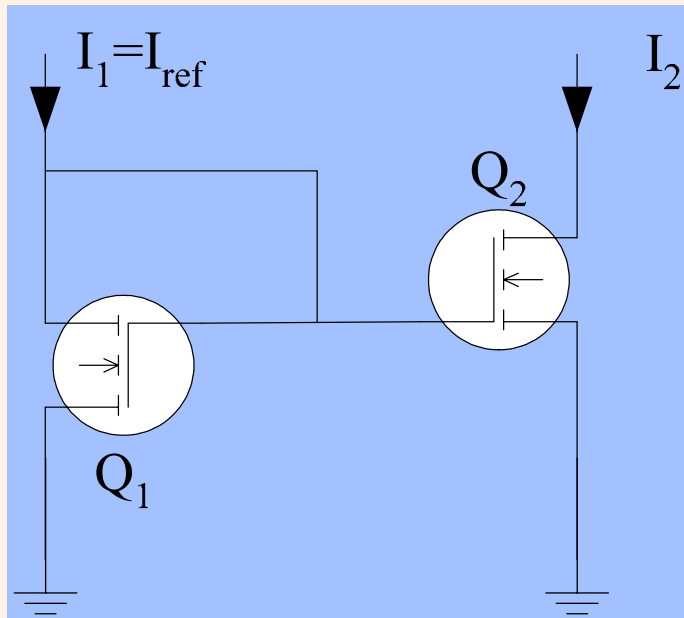
Miroirs de courant

Miroir de courant élémentaire

2 transistors MOS (Q_1 et Q_2) identiques.
même tension grille-source \Rightarrow même courant de drain.

Si $I_1 = I_{ref}$:

alors $I_2 = I_1 = I_{ref}$, \forall charge sur le drain de Q_2 .



▪ Impédance d'entrée :

Impédance de sortie:

$$R_{in} = \frac{1}{g_m}$$

▪ Impédance de sortie :

Gain en courant unité:

$$R_{out} = \frac{1}{g_{DS}}$$

▪ Gain en courant :

$$A_i \approx 1$$

Décaleur de tension

montages *décaleurs de tension*

⇒ adaptation de niveau de tension entre deux
2 transistors MOS Q_1 et Q_2 parfaitement appairés
et fonctionnent en régime saturé.

Equations d'états :

$$I_{D1} = I_{D2}$$

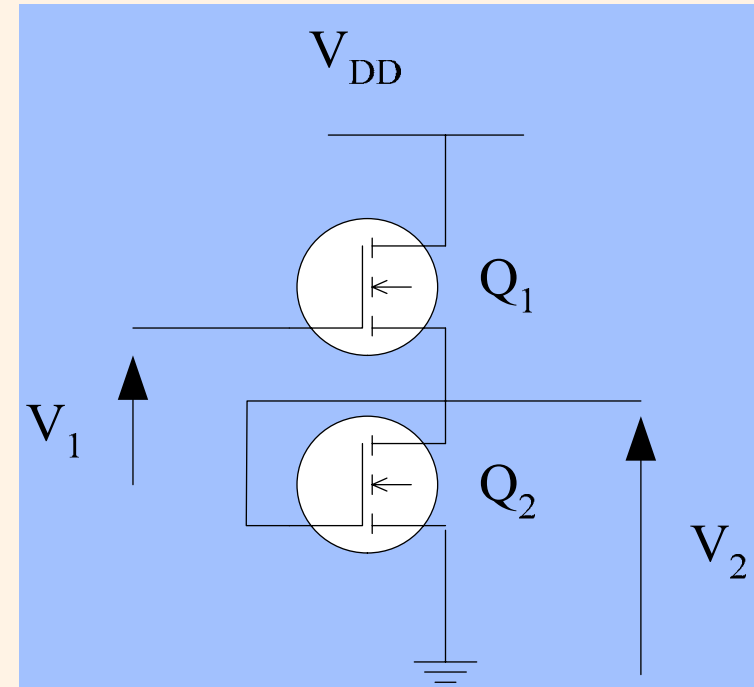
$$V_1 = V_{GS1} + V_2 \text{ et } V_2 = V_{GS2}$$

Ce qui donne en mode saturé

$$\frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W_1}{L_1} (V_1 - V_2 - V_t)^2 = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W_2}{L_2} (V_2 - V_t)^2$$

Dans le cas ou $(W_2/L_2) = (W_1/L_1)$ on obtient :

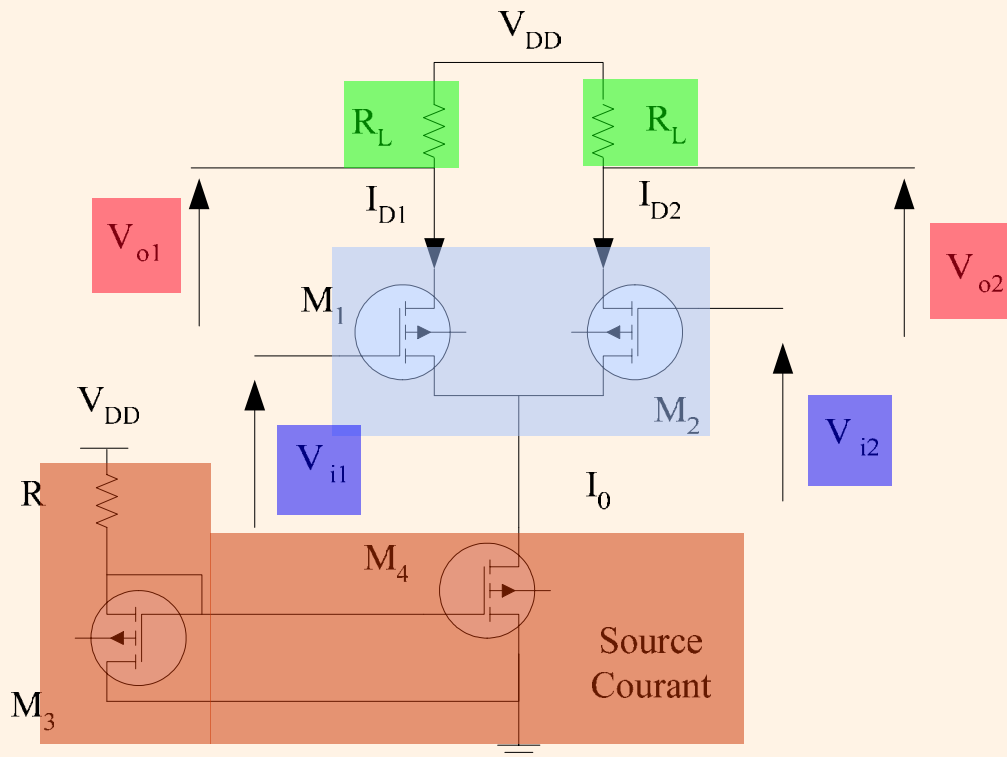
$$V_2 = \frac{1}{2} V_1$$



Paire différentielle

Objectifs

- ❑ Amplifier la différence entre 2 signaux
- ❑ Ne pas amplifier la valeur moyenne des 2 mêmes signaux



2 transistors à sources couplées (M_1, M_2)

1 source de courant I_0 (M_3, M_4, R)

2 résistances R_L de charge sur les drains

2 entrées (V_{i1}, V_{i2}) grilles de (M_1, M_2).

2 sorties (V_{o1}, V_{o2}) drains de (M_1, M_2).

Paire différentielle

Mode différentiel et Mode Commun

$$\begin{aligned} v_{id} &= v_{i1} - v_{i2} & \text{Différentiel} & & v_{od} &= v_{o1} - v_{o2} \\ v_{ic} &= \frac{v_{i1} + v_{i2}}{2} & \text{Commun} & & v_{oc} &= \frac{v_{o1} + v_{o2}}{2} \end{aligned}$$

Equation en gain de la paire différentielle

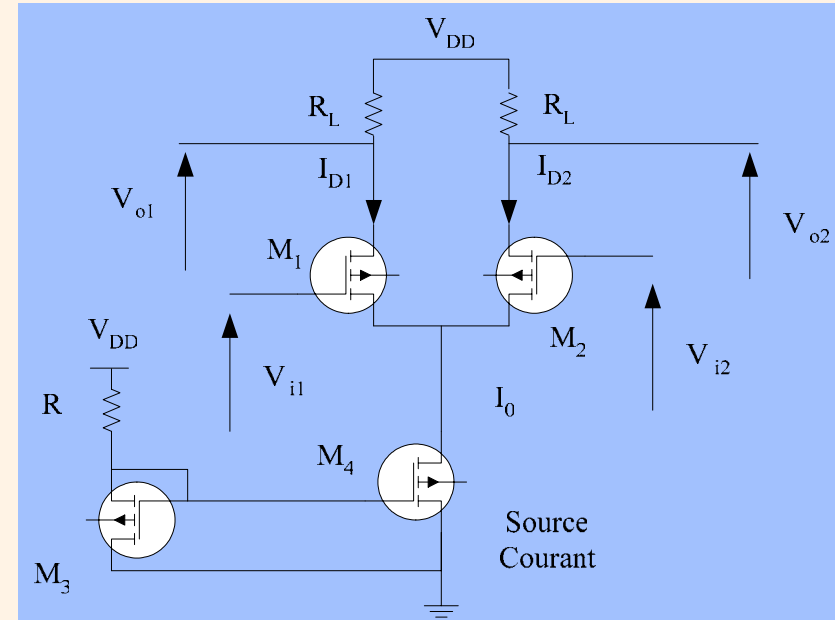
Objectif

$$v_{od} = A_{dd} v_{id} + A_{dc} v_{ic} \quad \text{Nuisible}$$

$$v_{oc} = A_{cd} v_{id} + A_{cc} v_{ic}$$

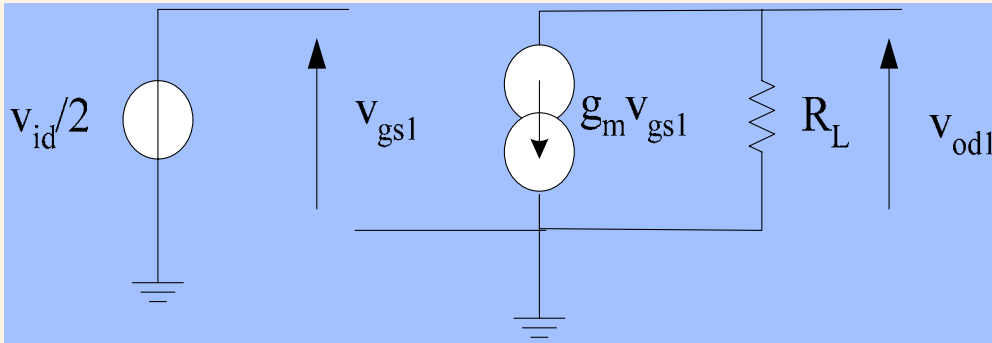
Taux de Réjection en Mode Commun (Common Mode Rejection Ratio)

$$TRMC = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{dd}}{A_{dc}} \right) \cong 60 \text{ dB}$$



Paire différentielle

Gain en Mode différentiel A_{DD}



M_1 et M_2 identique \Rightarrow Montage symétrique

I_0 constant \Rightarrow masse virtuelle

Néglige:

- résistance Drain-Source $1/g_{DS}$
- les capacités parasites.

On obtient

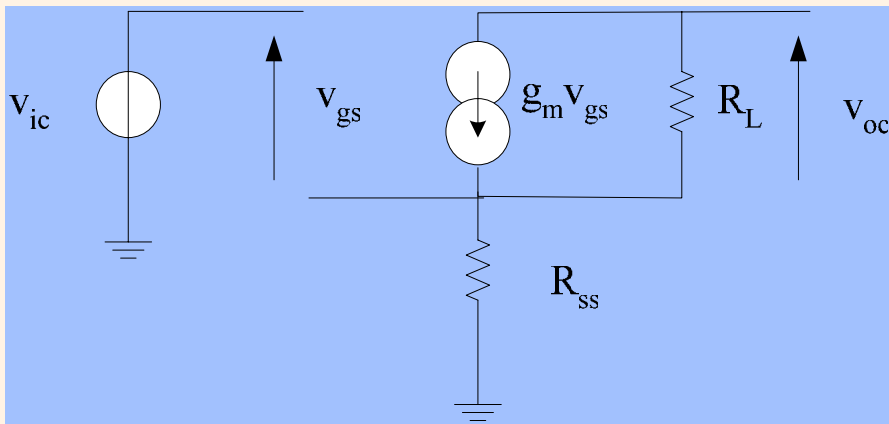
$$v_{od1} = -\frac{g_m R_L}{2} v_{id}$$

Soit globalement

$$A_{dd} = \frac{v_{od}}{v_{id}} = -g_m R_L$$

Paire différentielle

Gain en Mode Commun A_{DC}



Tension $v_{i2}=0$

⇒ Grille de M_2 est connectée à la masse

⇒ $v_{i1}=v_{ic}$.

Impossible de négliger la résistance parallèle de la source de courant R_{ss} .

gain en Mode Commun.

$$A_{cc} = \frac{v_{oc}}{v_{ic}} = -\frac{g_m R_L}{1 + 2g_m R_{ss}}$$

résistance R_{ss} grande, le gain en mode commun est faible.

Taux de réjection en mode commun :

$$TRMC = 20 \log_{10} (1 + 2g_m R_{ss})$$

Paire différentielle

Utilisation d'une charge active

gain d'une paire différentielle % résistance de drain
⇒ augmentation par un miroir de courant

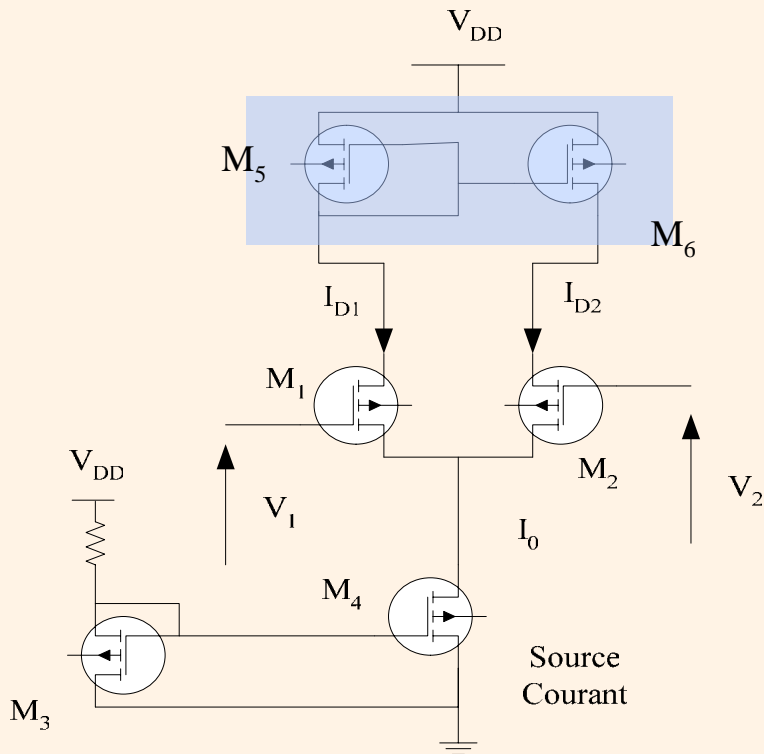
(transistors M5 et M6)

gain en mode différentiel :

$$A_{dd} = -\frac{g_{m5}}{g_{m1}} = -\sqrt{\frac{(W_5 / L_5)}{(W_1 / L_1)}}$$

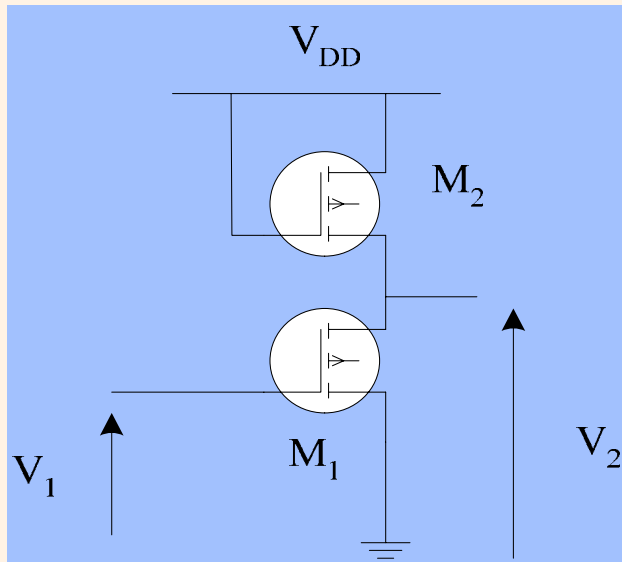
gain en commun :

$$A_{cc} = -\frac{g_{m1}}{g_{m1}(1 + 2g_{m1}R_{ss})}$$



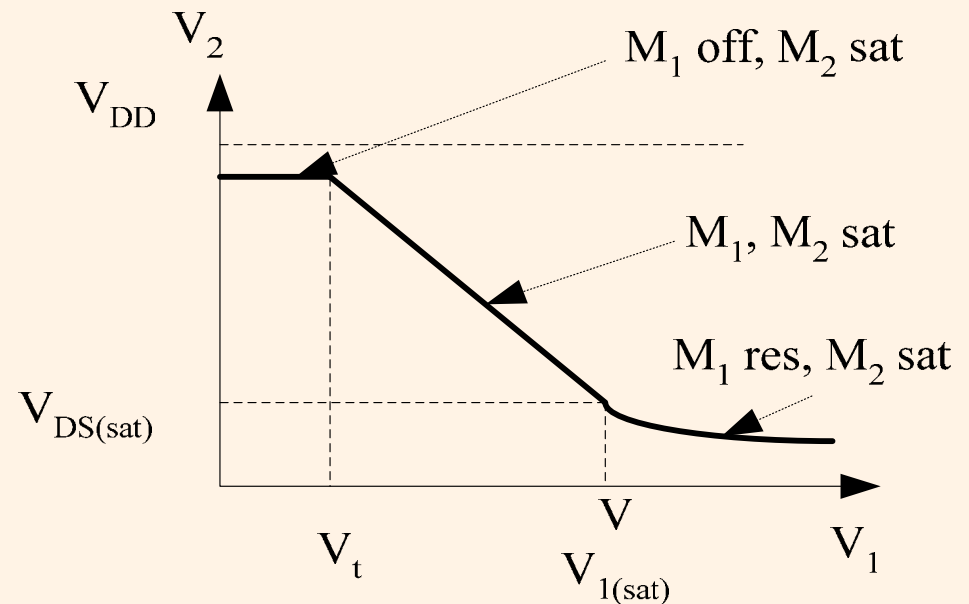
Montages Amplificateurs

Amplificateur Simple



montage « *source commune* »
remplacer la résistance de drain.
par un transistor NMOS.

caractéristique de transfert en tension



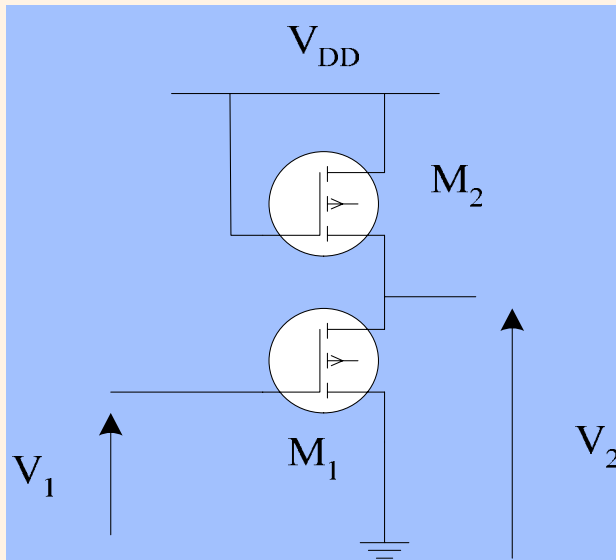
Amplificateur Simple

On se place dans le cadre des 2 Transistors en mode saturés

$$I_{D1} = \mu_n C_{ox} \frac{W_1}{2L_1} (V_1 - V_t)^2 = I_{D2} = \mu_n C_{ox} \frac{W_2}{2L_2} (V_{DD} - V_2 - V_t)^2$$

ce qui donne pour la tension de sortie :

$$V_2 = V_{DD} - V_t - \sqrt{\frac{W_1/L_1}{W_2/L_2}} (V_1 - V_t)$$

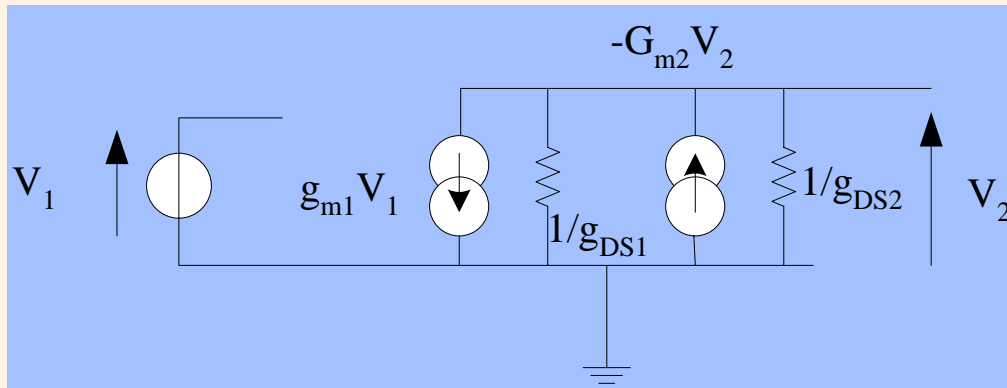


Soit un gain dynamique en tension :

$$A_v = \frac{dV_2}{dV_1} = -\sqrt{\frac{W_1/L_1}{W_2/L_2}}$$

Amplificateur Simple

□ Approche Petit signaux



La loi des nœuds en sortie :

$$g_{m1}V_1 + g_{m2}V_2 + \frac{V_2}{1/g_{ds1}} + \frac{V_2}{1/g_{ds2}} = 0$$

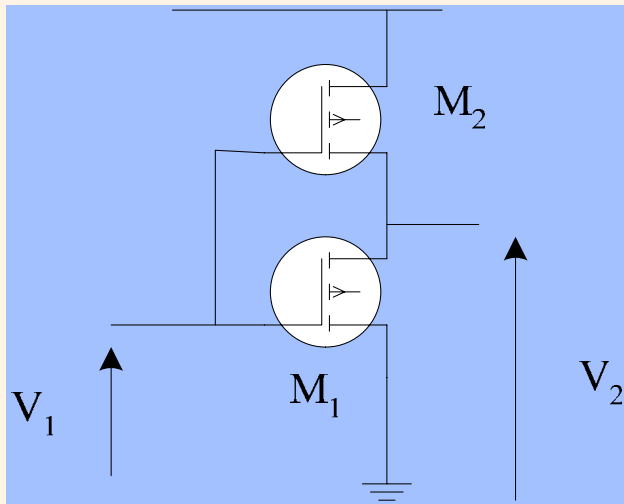
Soit le gain en tension

$$A_v = \frac{V_2}{V_1} = -\frac{g_{m1}}{g_{m2} + g_{sd1} + g_{sd2}}$$

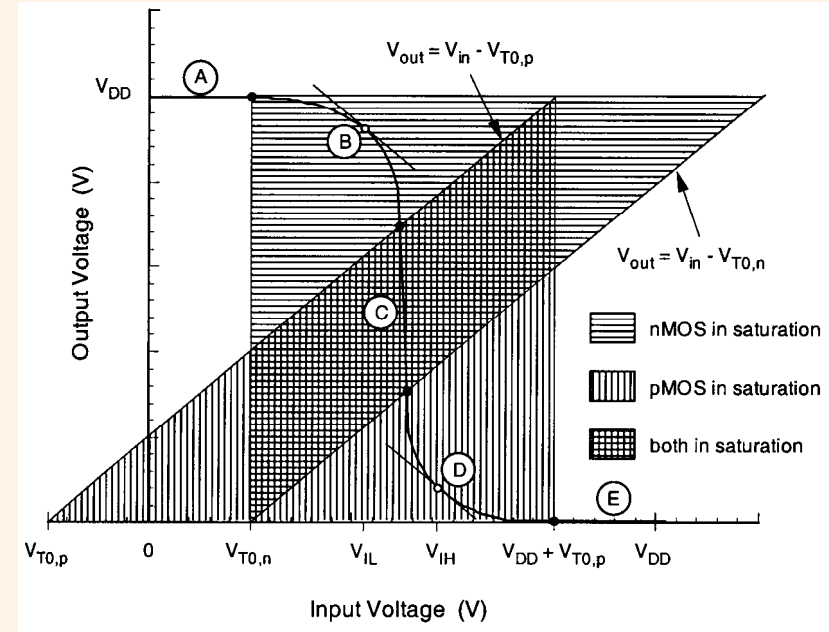
Résistance de sortie

$$R_s = \frac{1}{g_{m2} + g_{ds1} + g_{ds2}}$$

Inverseur CMOS



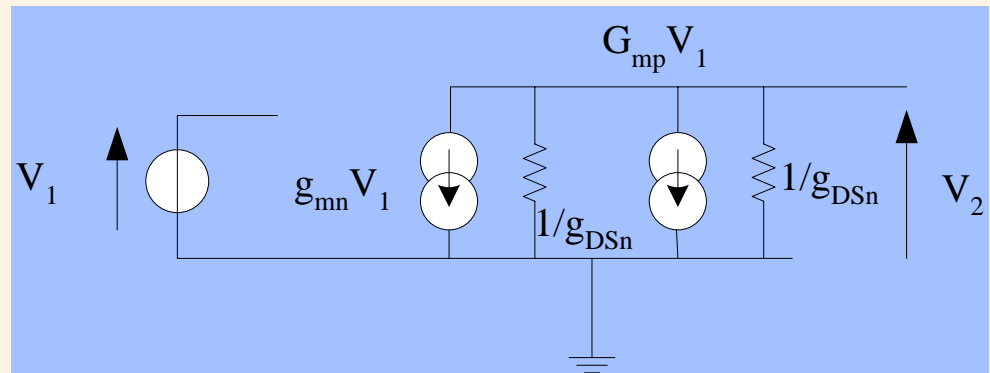
caractéristique
de transfert
en tension



Gain en tension

$$A_v = \frac{V_2}{V_1} = - \frac{g_{mn} + g_{mp}}{g_{DSn} + g_{DSp}}$$

Montage petits signaux

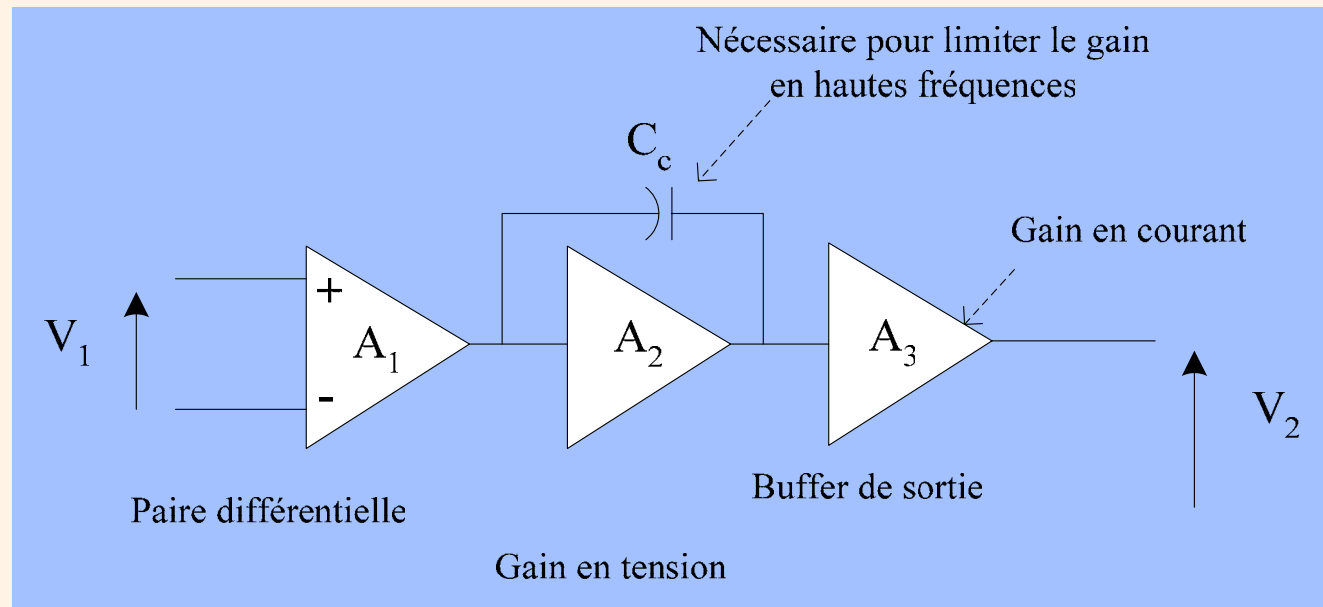


Amplificateur Opérationnel

Objectifs :

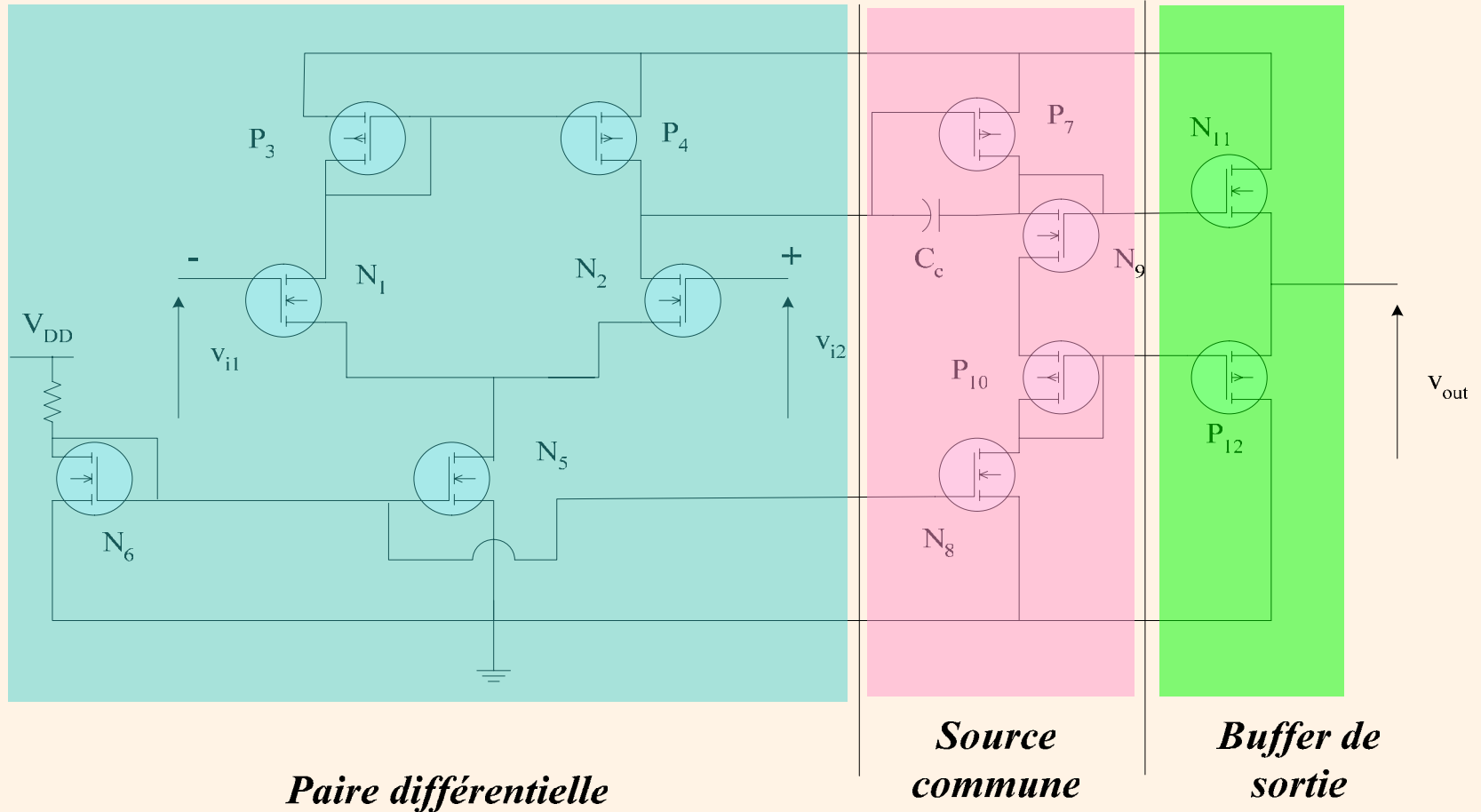
- Amplifier avec un gain important une différence de tension.
- Avoir une impédance de sortie la plus faible possible
- Avoir une impédance d'entrée la plus grande possible

Une structure en plusieurs étages



Amplificateur Opérationnel

Exemple simplifié de structure



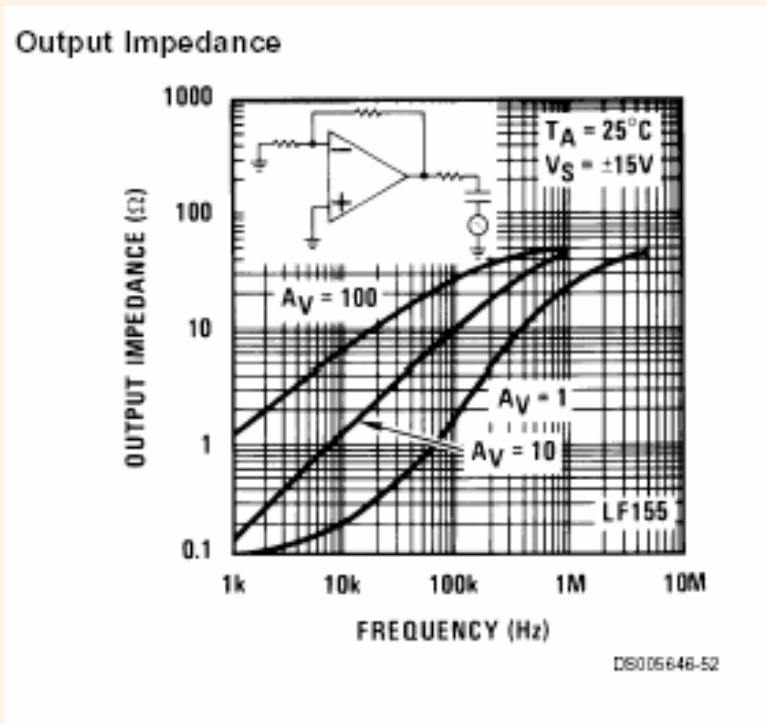
Amplificateur Opérationnel

Caractéristique d'un amplificateur opérationnel réel

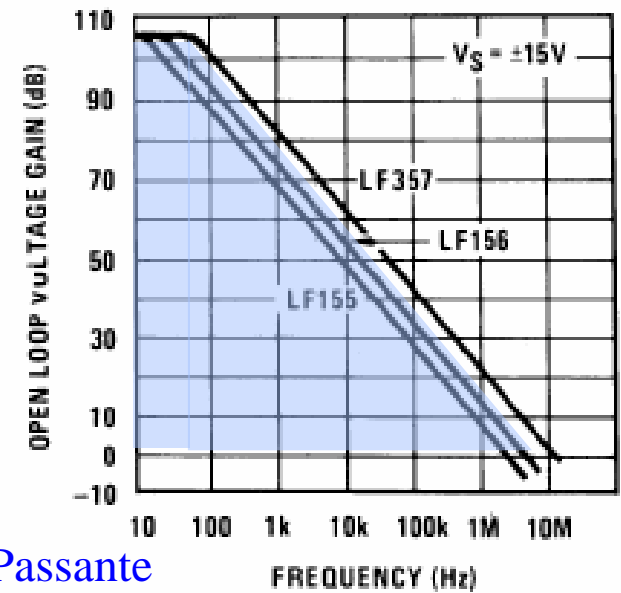
Par exemple pour le LF356 de National Semiconductor :

TRMC : 100 dB

Impédance d'entrée : $10^{12}\Omega$



Open Loop Frequency Response



Bande Passante

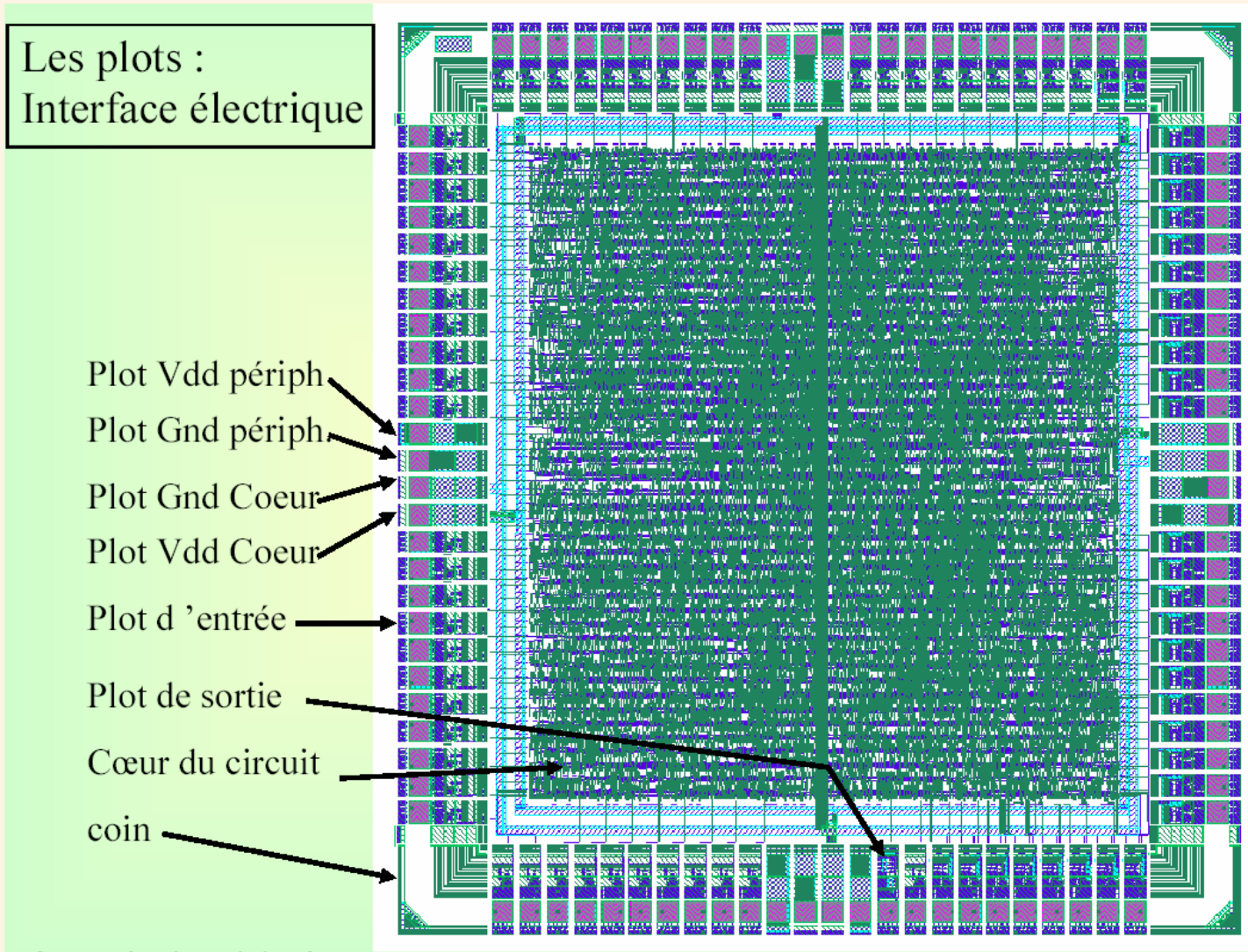
Plots d'Entrée/Sortie

Plots d'Entrée/Sortie

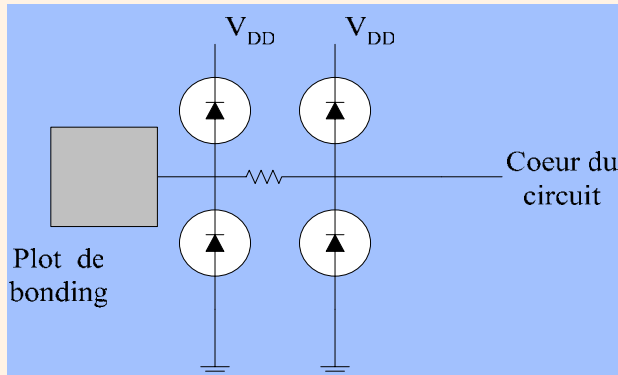
Rôles des plots d'Entrée/Sortie :

- Interfaçage entre l'extérieur et le cœur du circuit (interfaçage « mécanique » et électrique).
- Protéger le circuit contre les charges électrostatiques.
- Intégrer certaines fonctions de base : sortie bidirectionnelle, 3 états, test (JTAG), ...

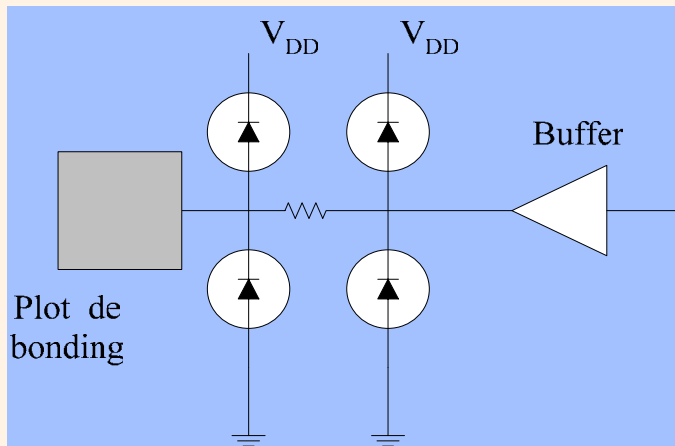
Plots d'Entrée/Sortie



Plots d'Entrée/Sortie

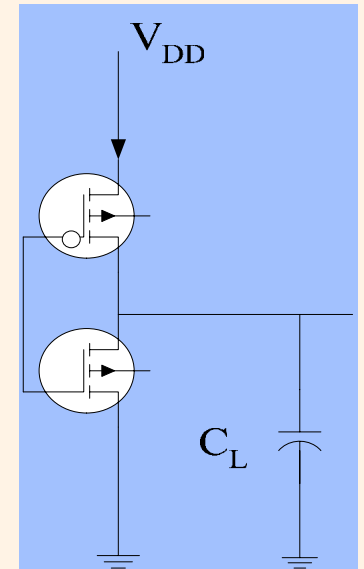


Protection électrique



Structure globale d'un plot de sortie

**Interface électrique
buffer**



Plots d'Entrée/Sortie

