


**Polytech'Montpellier - ERII 4**  
**M2 EEA - Systèmes Microélectroniques**

---

Circuits Intégrés Analogiques  
Chapitre III  
Amplificateur Opérationnel CMOS élémentaire  
Pascal Nouet - Janvier 2010  
nouet@lirmm.fr



**um**  
Polytech'Montpellier 2

### Introduction

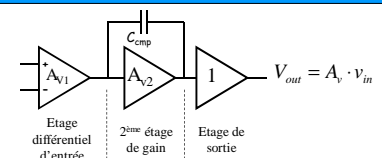
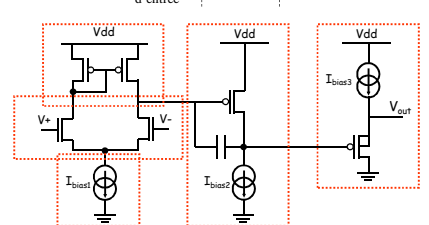
- Amplification de tensions différentielles
  - Caractéristiques de la tension d'entrée :
    - tension et plage de mode commun,
    - offset,
  - Gain différentiel, gain de mode commun
  - Réjection du bruit d'alimentation
- Fonctionnement en boucle fermée
  - Système rebouclé : Stabilité, Gain élevé
- Fonctionnement en boucle ouverte ( $\neq$  OPAMP)
  - Gain fini, Gain de mode commun, offset

**um**  
Polytech'Montpellier 3

### Introduction

$$V_+ = V_{mc} + \frac{v_{in}}{2}$$

$$V_- = V_{mc} - \frac{v_{in}}{2}$$

$$v_{in} = V_+ - V_-$$



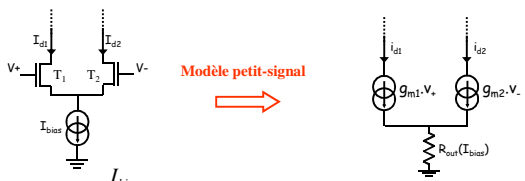
**um**  
Polytech'Montpellier 4

### Plan

- Introduction
- Etage différentiel d'entrée
  - Paire différentielle CMOS
  - Charge active
  - Gain en tension
  - Polarisation et mode commun
  - Choix de la source de courant
  - Dimensionnement
- Amplificateur à deux étages
- Etage de sortie

**um**  
Polytech'Montpellier 5

### Paire différentielle CMOS



Modèle petit-signal

$$I_{d1} = I_{d2} = \frac{I_{bias}}{2}$$

$$V_+ = V_{mc} + \frac{v_{in}}{2}$$

$$V_- = V_{mc} - \frac{v_{in}}{2}$$

$$v_{in} = V_+ - V_-$$

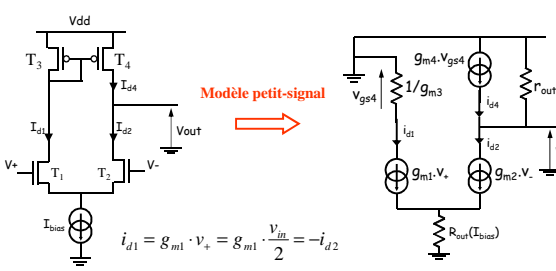
$$i_{d1} = g_{m1} \cdot v_+ = g_{m1} \cdot \frac{v_{in}}{2}$$

$$i_{d2} = g_{m2} \cdot v_- = -g_{m2} \cdot \frac{v_{in}}{2}$$

$$g_{m1} = g_{m2}$$

**um**  
Polytech'Montpellier 6

### Charge active par miroir de courant



Modèle petit-signal

$$i_{d1} = g_{m1} \cdot v_+ = g_{m1} \cdot \frac{v_{in}}{2} = -i_{d2}$$

$$v_{gs4} = \frac{i_{d1}}{g_{m3}} \Rightarrow i_{d4} = g_{m4} \cdot v_{gs4} = \frac{g_{m4}}{g_{m3}} \cdot i_{d1} \cong -i_{d2}$$

$$v_{out} = r_{out} \cdot (i_{d4} - i_{d2}) = g_{m1} \cdot r_{out} \cdot v_{in}$$

### Gain en tension : calcul de $r_{out}$

$r_{out} = r_{ds2} // r_{ds4}$

$$i_x = i_{x1} + i_{x2} + i_{x3} = \frac{v_x}{r_{ds4}} + \frac{v_x}{r_{ds1} + r_{ds2} + 1/g_{m3}} - g_{m4} \cdot v_{gs4}$$

$$v_{gs4} = -\frac{i_{x2}}{g_{m3}} \text{ avec } g_{m3} = g_{m4} \Rightarrow i_{x3} = -g_{m4} \cdot v_{gs4} = i_{x2}$$

$$i_x = i_{x1} + i_{x2} + i_{x3} = \frac{v_x}{r_{ds4}} + 2 \cdot \frac{v_x}{r_{ds1} + r_{ds2} + 1/g_{m3}} \cong \frac{v_x}{r_{ds4}} + \frac{v_x}{r_{ds2}}$$

### Gain en tension : influence des dimensions

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = g_{m1} \cdot r_{out} = \frac{g_{m1}}{g_{ds2} + g_{ds4}}$$

$$g_{ds2} = \frac{1}{r_{ds2}} \cong \lambda_n I_{ds2} = \lambda_n \frac{I_{bias}}{2} \quad g_{ds4} = \frac{1}{r_{ds4}} \cong \lambda_p I_{ds4} = \lambda_p \frac{I_{bias}}{2}$$

$$g_{m1,2} = 2 \cdot \frac{I_{ds1,2}}{V_{eff1,2}} = \frac{I_{bias}}{V_{eff2}}$$

$$\Rightarrow \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{g_{m1}}{g_{ds2} + g_{ds4}} = \frac{2}{(\lambda_n + \lambda_p) \cdot V_{eff2}}$$

$$V_{eff2} = \sqrt{\frac{2I_{ds2}}{\mu_n C_{ox} W_2}} \Rightarrow \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{\sqrt{2\mu_n C_{ox}}}{(\lambda_n + \lambda_p) \cdot \sqrt{I_{ds2}}} \sqrt{\frac{W_2}{L_2}}$$

**Effet sur le S.R. !!!**

### Gain en tension : prise en compte du 2<sup>nd</sup> étage de gain

$$r_{out} = \frac{1}{g_{ds2} + g_{ds4}}$$

$$Z_c = \frac{1}{C_{in} p} \quad Z_{out} = r_{out} // Z_c = \frac{r_{out}}{1 + r_{out} C_{in} p} \leq r_{out}$$

$$A_{v1} = \frac{v_{out}}{v_{in}} = g_{m1} \cdot Z_{out} = \frac{g_{m1}}{g_{ds2} + g_{ds4}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{C_{in}}{g_{ds2} + g_{ds4}} p}$$

$$\Rightarrow A_{v1}(dc) = \frac{2}{(\lambda_n + \lambda_p) \cdot V_{eff2}} \Rightarrow f_c = \frac{g_{ds2} + g_{ds4}}{2\pi \cdot C_{in}}$$

### Polarisation et Mode commun

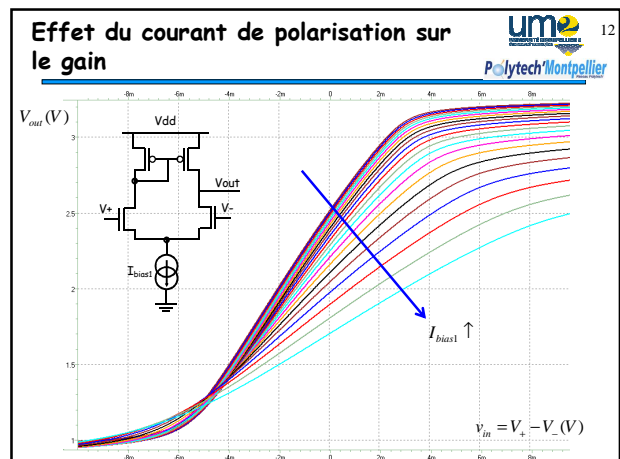
- Tous les transistors sont saturés  
 $V_B = V_{dd} - |V_{eff3,4}| - |V_{tp}|$   
 $V_B - V_A > V_{eff1,2}$   
 $V_A > V_{A,min}$
- Absence de signal  
 $V_+ = V_- = V_{mc} \Rightarrow v_{in} = V_+ - V_- = 0$   
 $V_A = V_{mc} - V_m - V_{eff1,2} > V_{A,min}$   
 $\Rightarrow V_{mc} > V_{A,min} + V_m + V_{eff1,2}$   
 $V_B - V_A > V_{eff1,2} \Rightarrow V_B > V_{mc} - V_m$   
 $\Rightarrow V_{mc} < V_{dd} - |V_{eff3,4}| - |V_{tp}| + V_m$

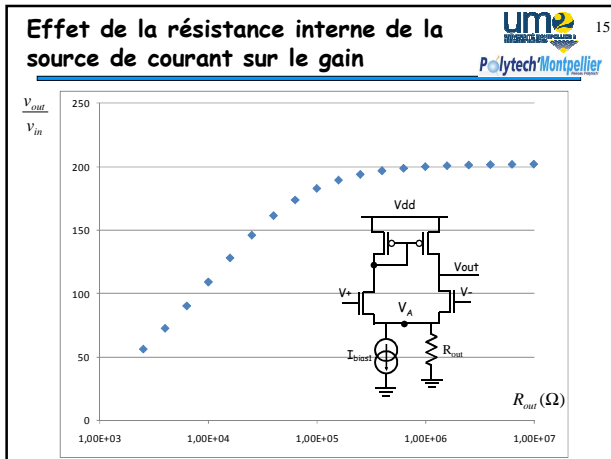
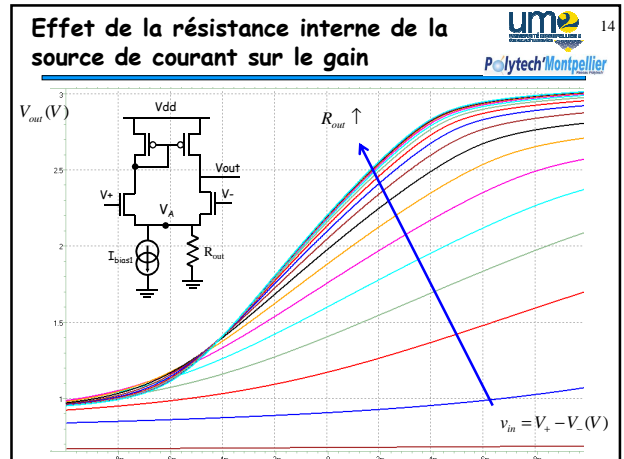
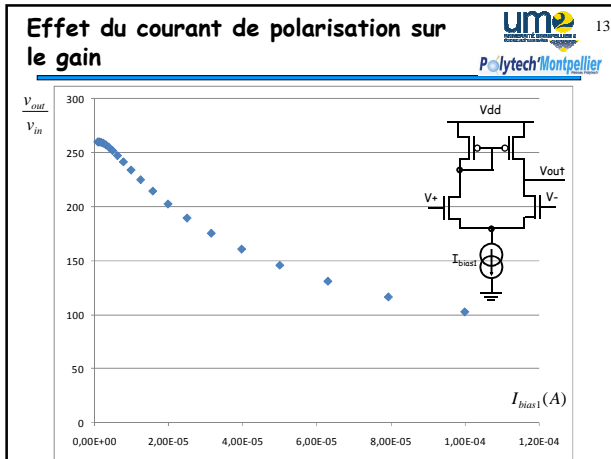
### Choix de la source de courant

- La qualité de l'amplificateur dépend de la qualité de la source de courant
  - Courant indépendant de  $V_{dd}$  (influence sur le gain en tension)
  - Le courant doit être constant sur toute la plage de MC  
 → Grande résistance de sortie
  - Source de courant saturée pour une faible tension de sortie (valeur minimale du Mode Commun)

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{\sqrt{2\mu_n C_{ox}}}{(\lambda_n + \lambda_p) \cdot \sqrt{I_{ds2}}} \sqrt{\frac{W_2}{L_2}}$$

$$V_A = V_{mc} - V_m - V_{eff1,2}$$

$$V_{mc} > V_{A,min} + V_m + V_{eff1,2}$$


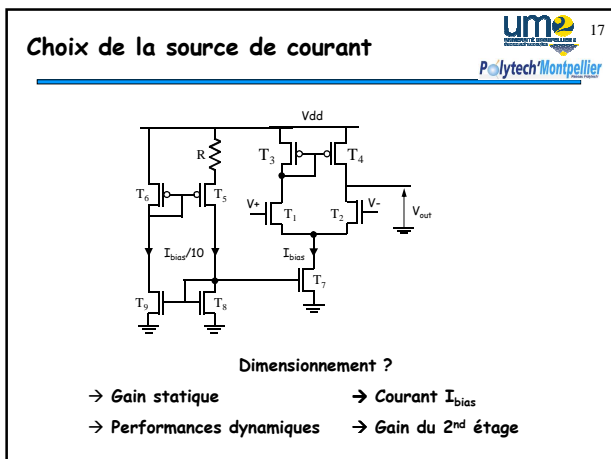


### Choix de la source de courant

• Rappel

	Sensibilité à Vdd	Résistance de sortie	Plage de fonctionnement
Miroir simple	±12%	673kΩ	> 0,5V
indépendante de V <sub>dd</sub>	±1,5%	533kΩ	> 0,35V
indépendante de V <sub>dd</sub> + Cascode	±0,4%	250MΩ	> 0,8V
indépendante de V <sub>dd</sub> + Cascode large excursion	±2,9%	16,5MΩ	> 0,35V

16



### Dimensionnement

• Exemple avec I<sub>bias7</sub> et A<sub>v1</sub>(dc)

$$A_{v1}(dc) = -\frac{g_{m1}}{g_{ds2} + g_{ds4}} = -\frac{2}{(\lambda_n + \lambda_p) \cdot V_{eff2}}$$

$$\lambda_n \Rightarrow V_{eff1,2} \Rightarrow \frac{W_{1,2}}{L_{1,2}} = \frac{2I_{ds}}{\mu_n \cdot C_{ox} \cdot V_{eff1,2}^2}$$

• Dimensionnement de T<sub>3</sub> et T<sub>4</sub>

- Influence sur le niveau haut du mode commun et sur le gain du second étage → compromis avec surface

$$\Rightarrow V_{eff3,4} \Rightarrow \frac{W_{3,4}}{L_{3,4}} = \frac{2I_{ds}}{\mu_p \cdot C_{ox} \cdot V_{eff3,4}^2}$$

18

**Plan**

- Introduction
- Etage différentiel d'entrée
- Amplificateur à deux étages
  - Principe
  - Dimensionnement
  - Gain en basse fréquence
  - Calcul du premier pôle
  - Simulations
  - Analyse de la réponse en fréquence
- Etage de sortie

**Amplificateur à deux étages : principe**

**Amplificateur à deux étages : principe**

$$A_{v1} = - \frac{g_{m1}}{g_{ds2} + g_{ds4}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{C_{m2}}{g_{ds2} + g_{ds4}} p}$$

$$A_{v2} = - \frac{g_{m12}}{g_{ds12} + g_{ds13} + g_{out2}}$$

Dimensionnement & polarisation statique  
Simulation (op, dc) et étude petit signal → Gain BF  
Simulation (ac) → stabilité

**Plan**

- Introduction
- Etage différentiel d'entrée
- Amplificateur à deux étages
  - Principe
  - Dimensionnement
  - Gain en basse fréquence
  - Calcul du premier pôle
  - Simulations
  - Pôle dominant et slew-rate
  - Analyse de la réponse en fréquence
- Etage de sortie

**Amplificateur à deux étages : dimensionnement**

- Dimensionnement de  $T_{12}$  et  $T_{13}$ 
  - $T_{13}$  → réglage du courant de polarisation  
→ identique  $T_7$  (Slew-Rate)
 
$$\frac{W_{13}}{L_{13}} = \frac{W_7}{L_7}$$
  - $T_{12}$  →  $V_{eff}$  et  $I_{ds}$  imposés
 
$$\left. \begin{aligned} V_{eff12} = V_{eff3} = V_{eff4} \\ I_{ds12} = \frac{I_{ds4}}{2} \cdot \frac{(W/L)_{13}}{(W/L)_7} \end{aligned} \right\} \frac{W_{12}}{L_{12}} = 2 \cdot \frac{(W/L)_{13}}{(W/L)_7} \cdot (W/L)_4$$
- $g_{m12}$  est imposé par le dimensionnement du 1<sup>er</sup> étage

**Plan**

- Introduction
- Etage différentiel d'entrée
- Amplificateur à deux étages
  - Principe
  - Dimensionnement
  - Gain en basse fréquence
  - Calcul du premier pôle
  - Simulations
  - Pôle dominant et slew-rate
  - Analyse de la réponse en fréquence
- Etage de sortie

**Amplificateur à deux étages : gain basse fréquence**

25

- Calcul du gain basse fréquence de l'amplificateur à deux étages

$$g_{m2} = \sqrt{2\mu_n C_{ox} \cdot \frac{W}{L} \cdot \frac{I_{bias}}{2}} \quad g_{m12} = \sqrt{2\mu_p C_{ox} \cdot \frac{W}{L} \cdot I_{bias}}$$

$$g_{ds2} \cong \lambda_n \frac{I_{bias}}{2} \quad g_{ds12} \cong \lambda_p I_{bias}$$

$$g_{ds4} \cong \lambda_p \frac{I_{bias}}{2} \quad g_{ds13} \cong \lambda_n I_{bias}$$

$$A_{v1} = -\frac{g_{m2}}{g_{ds2} + g_{ds4}} \quad A_{v2} = -\frac{g_{m12}}{g_{ds12} + g_{ds13}}$$

**Plan**

26

- Introduction
- Etage différentiel d'entrée
- Amplificateur à deux étages
  - Principe
  - Dimensionnement
  - Gain en basse fréquence
  - Calcul du premier pôle
  - Simulations
  - Pôle dominant et slew-rate
  - Analyse de la réponse en fréquence
- Etage de sortie

**Amplificateur à deux étages : calcul du 1<sup>er</sup> pôle**

27

→ prise en compte des capacités...

$$C_{d4}, C_{d2}$$

$$C_{gd12} = 10\% \cdot C_{in12}$$

$$C_{gs12} = \frac{2}{3} \cdot C_{in12}$$

$$C_{in12} = C_{oxp} \cdot W_{12} \cdot L_{12}$$

**Amplificateur à deux étages : calcul du 1<sup>er</sup> pôle**

28

- Calcul du pôle lié au premier étage
  - Calcul de la capacité qui charge le 1<sup>er</sup> étage → prise en compte de l'effet Miller

$$\Rightarrow g_{out1} \cong |A_{v2}| \frac{C_{in12}}{10} p$$

$$A_{v1} = -\frac{g_{m2}}{g_{ds2} + g_{ds4} + g_{out1}} = -\frac{g_{m2}}{g_{ds2} + g_{ds4}} \cdot \frac{1}{1 + \tau p}$$

$$\tau \cong \frac{|A_{v2}|}{10} \frac{C_{in12}}{g_{ds2} + g_{ds4}} \Rightarrow f_{c1} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

**Plan**

29

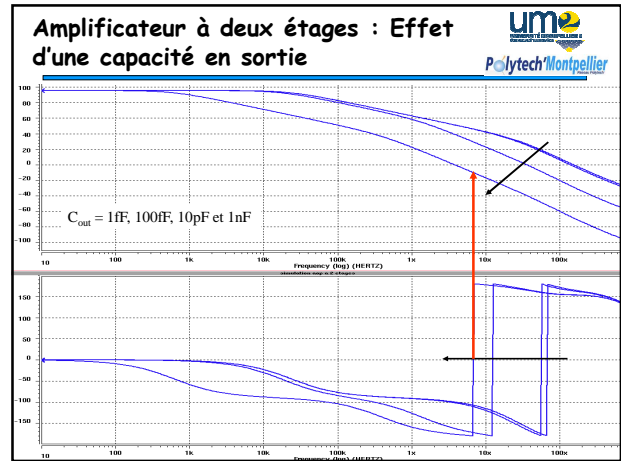
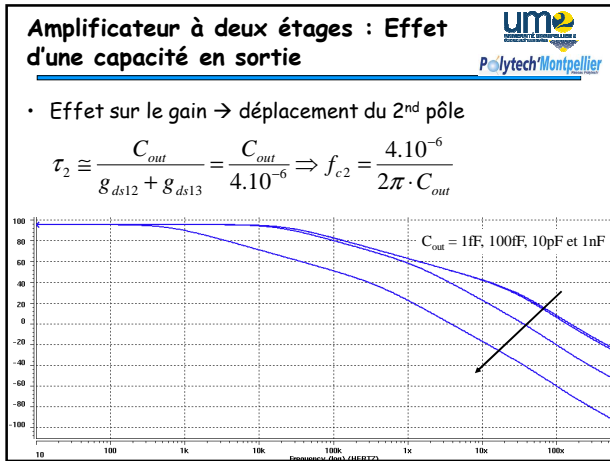
- Introduction
- Etage différentiel d'entrée
- Amplificateur à deux étages
  - Principe
  - Dimensionnement
  - Gain en basse fréquence
  - Calcul du premier pôle
  - Simulations
  - Pôle dominant et slew-rate
  - Analyse de la réponse en fréquence
- Etage de sortie

**Montage étudié**

30

$$A_{v1} \cong -\frac{g_{m1}}{g_{ds2} + g_{ds4}} \quad A_{v2} \cong -\frac{g_{m12}}{g_{ds12} + g_{ds13}}$$





- ### Plan
- Introduction
  - Etage différentiel d'entrée
  - Amplificateur à deux étages
    - Principe
    - Dimensionnement
    - Gain en basse fréquence
    - Calcul du premier pôle
    - Simulations
    - Pôle dominant et slew-rate
    - Analyse de la réponse en fréquence
  - Etage de sortie

### Amplificateur à deux étages : réponse en fréquence

• Introduction d'un pôle dominant par ajout d'une capacité

•  $C_f$  en parallèle sur  $C_{gd12}$

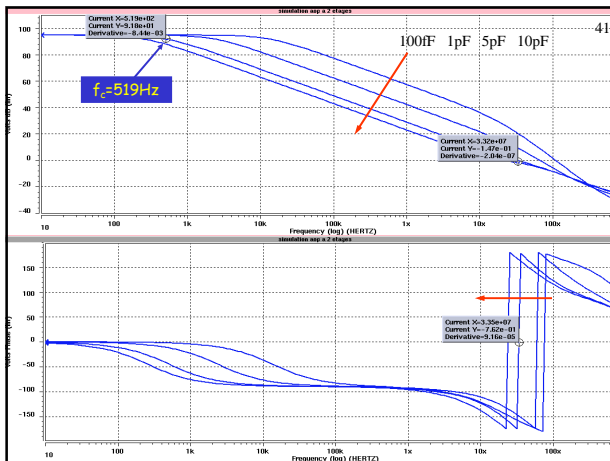
$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

$$\Rightarrow \tau = \frac{1}{2\pi f_{c1}} = \frac{C_{total}}{g_{ds2} + g_{ds4}}$$

$$C_f \gg C_{gd12} \Rightarrow C_{total} = |A_{v2}| \cdot C_f$$

$$C_f = \frac{g_{ds2} + g_{ds4}}{|A_{v2}| \cdot 2\pi \cdot f_{c1}}$$

a.n.  $f_{c1} = 500\text{Hz} \Rightarrow C_f = \frac{3.6 \cdot 10^{-6}}{227.2\pi \cdot 500} = 5\text{pF}$



### Amplificateur à deux étages : réponse en fréquence

• Autres caractéristiques dynamiques

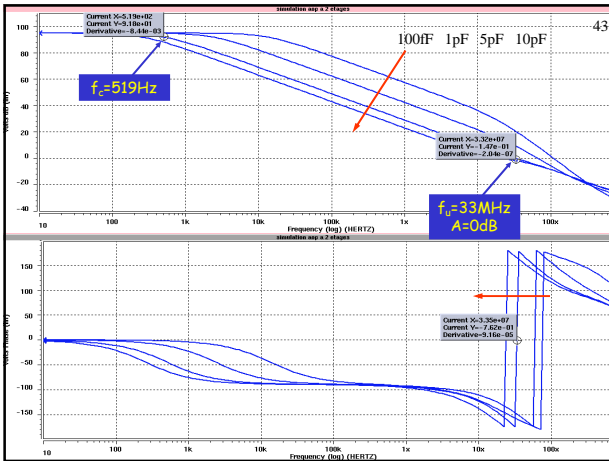
- Produit gain-bande

$$GBW = A_{v1} A_{v2} f_{c1} = \frac{g_{m2}}{g_{ds2} + g_{ds4}} |A_{v2}| \frac{g_{ds2} + g_{ds4}}{|A_{v2}| \cdot 2\pi \cdot C_f} \Rightarrow GBW = \frac{g_{m2}}{2\pi \cdot C_f}$$

a.n.  $g_{m2} = 1\text{mA/V} \Rightarrow GBW = \frac{1\text{mA/V}}{2\pi \cdot 5\text{pF}} = 31.8\text{MHz}$

- fréquence de gain unitaire
- Hypothèse 1<sup>er</sup> ordre  $\rightarrow f_u = GBW = \frac{g_{m2}}{2\pi \cdot C_f}$
- Slew-rate
- $\rightarrow$  Rythme de variation maximum de tension en sortie

$$S.R. = \left. \frac{dV(C_f)}{dt} \right|_{max} = \frac{I_{bias}}{C_f}$$



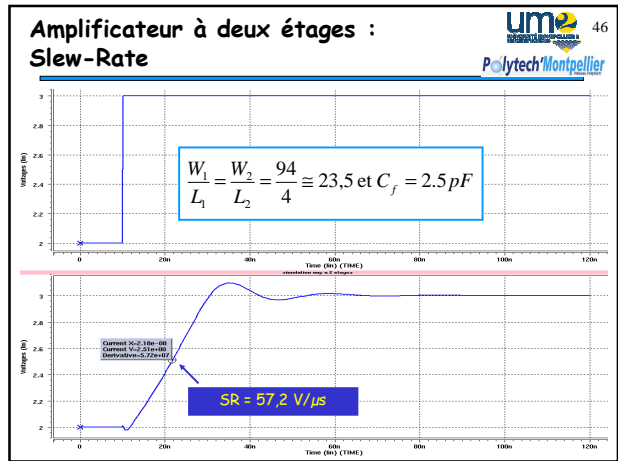
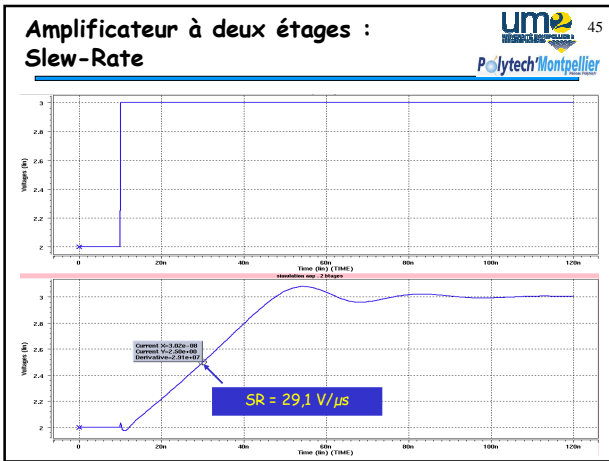
### Amplificateur à deux étages : Slew-Rate

44

• Calculer le SR de cet amplificateur avec  $C_f = 5pF$

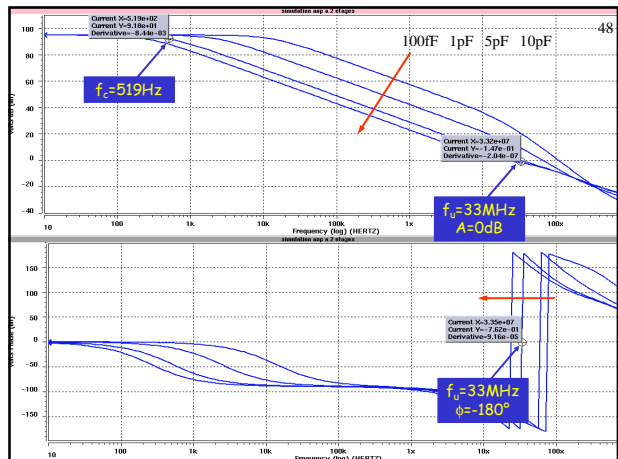
$$S.R. = \left. \frac{dV(C_f)}{dt} \right|_{max} = \frac{I_{bias}}{C_f}$$

• Calculer de W/L de  $T_1$  et  $T_2$  de façon à doubler le SR sans changer  $f_u$  et  $I_{bias}$



### Plan

- Introduction
- Etage différentiel d'entrée
- Amplificateur à deux étages
  - Principe
  - Dimensionnement
  - Gain en basse fréquence
  - Calcul du premier pôle
  - Simulations
  - Pôle dominant et slew-rate
  - Analyse de la réponse en fréquence
- Etage de sortie



**Amplificateur à deux étages : réponse en fréquence**

$r_1 \Rightarrow g_{ds2} // g_{ds4}$   
 $C_1 \Rightarrow C_{d2} + C_{d4} + C_{gs12}$   
 $r_2 \Rightarrow g_{ds12} // g_{ds13} // g_{load}$   
 $C_2 \Rightarrow C_{d12} + C_{d13} + C_{load}$   
 $C_c \Rightarrow C_f + C_{gd12}$

**Amplificateur à deux étages : réponse en fréquence**

$-g_{m2} \cdot v_{in} = \frac{v_{out1}}{r_1} + C_1 p \cdot v_{out1} + C_c p \cdot (v_{out1} - v_{out}) \Rightarrow v_{out1} = f(v_{in}, v_{out})$

**Amplificateur à deux étages : réponse en fréquence**

$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{g_{m2} r_1 \cdot g_{m12} r_2 \cdot \left(1 - \frac{C_c p}{g_{m12}}\right)}{1 + ap + bp^2}$

$f_{p1} = \frac{1}{2\pi \cdot r_1 g_{m12} r_2 C_c}$   
 $f_{p2} = \frac{g_{m12}}{2\pi \cdot (C_1 + C_2)}$   
 $f_z = \frac{-g_{m12}}{2\pi \cdot C_c}$

- Augmentation de  $C_c$ 
  - Le zéro se déplace comme le pôle dominant
- Augmentation de  $g_{m12} \rightarrow$  coût en silicium

**Amplificateur à deux étages : réponse en fréquence**

- Solution : introduction d'une résistance série
  - Pôles 1 et 2 sensiblement identiques
  - 3<sup>ème</sup> pôle à haute fréquence
  - Modification du zéro :  $f_z = \frac{-1}{2\pi \cdot C_c (1/g_{m12} - R_s)}$
  - $\rightarrow$  Le zéro peut-être placé
    - Compensation du 2<sup>ème</sup> pôle :  $C_1 + C_2 = ?$
    - Juste après la fréquence de gain unitaire

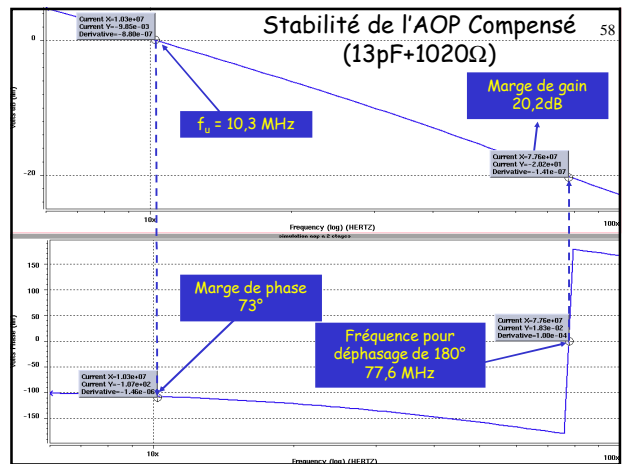
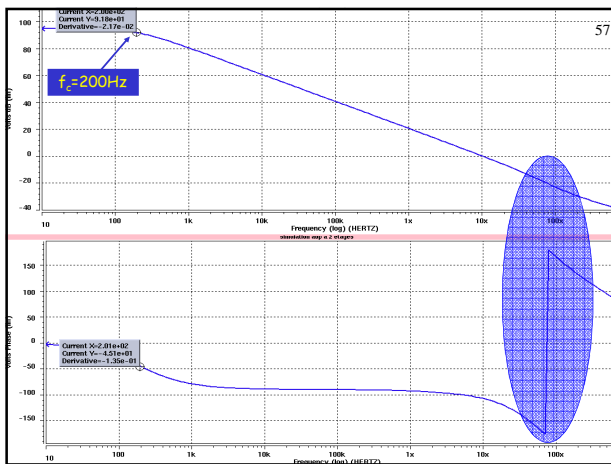
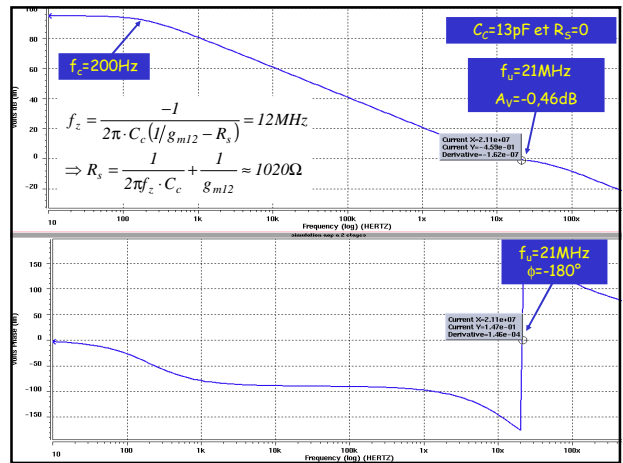
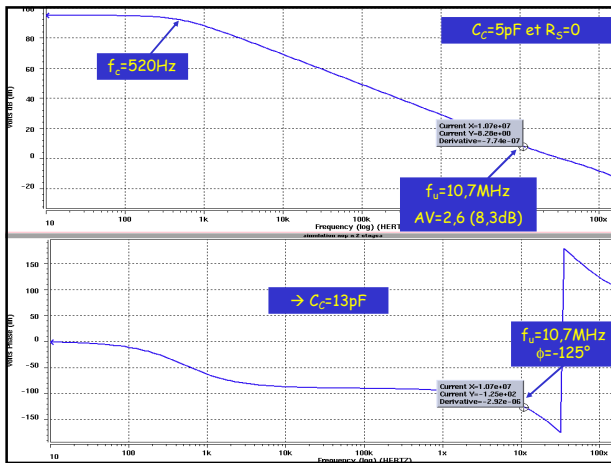
**Amplificateur à deux étages : réponse en fréquence**

- Amélioration de la stabilité par ajout d'un zéro

- Comment placer le zéro introduit par  $R_s + C_f$  pour qu'il compense l'effet du 2<sup>nd</sup> pôle ?

**Amplificateur à deux étages : Placement du zéro**

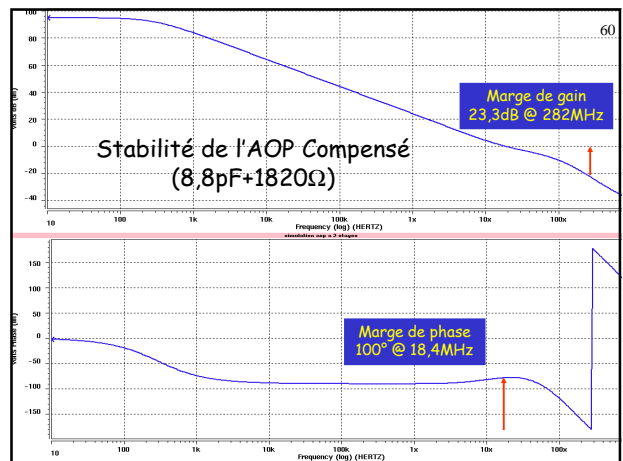
- Solution 1
- 1<sup>ère</sup> étape :
  - simulation ac avec  $C_{f0}$  arbitraire (5pF) et  $R_s = 0$
  - choix d'une marge de phase
    - $\rightarrow$  fréquence de gain unitaire  $f_u$
    - $\rightarrow$  mesure du gain  $A_v(f_u)$
- 2<sup>ème</sup> étape :
  - calcul de  $C_f = C_{f0} \cdot A_v(f_u)$
  - positionnement du zéro à  $f_u + 20\%$ 
    - $\rightarrow$  calcul de  $R_s$



**Amplificateur à deux étages :  
Placement du zéro**

• Autre solution :

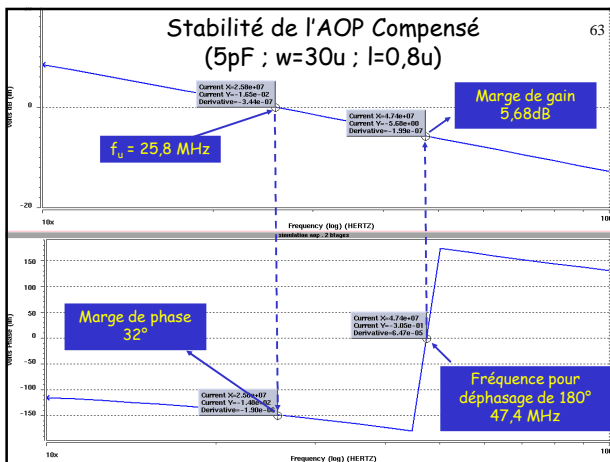
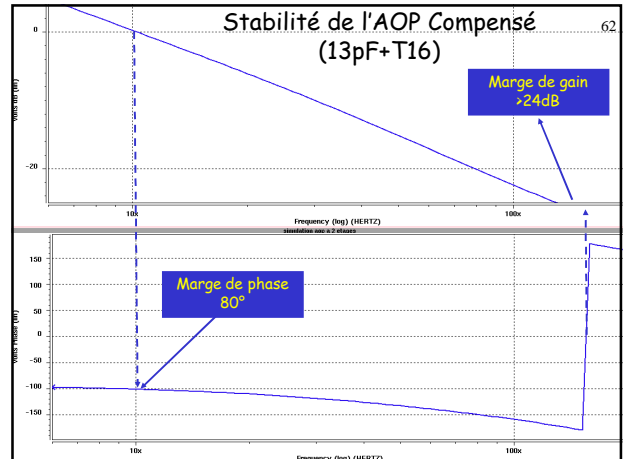
- Choix de la position de la fréquence de gain unitaire :  
Ex :  $GBW=18\text{MHz} \rightarrow f_u = 18\text{MHz}$
- Calcul de la capacité de compensation :  
$$C_f = \frac{g_{m2}}{2\pi f_u} \approx 8,8\text{pF}$$
- Positionnement du zéro  
•  $f_u + 20\%$  :  $22\text{MHz} \rightarrow$   
$$f_z = \frac{-1}{2\pi \cdot C_c \cdot (1/g_{m12} - R_s)} = 22\text{MHz} \Rightarrow R_s = \frac{1}{2\pi f_z \cdot C_c} + \frac{1}{g_{m12}} \approx 1820\Omega$$



### Amplificateur à deux étages : Placement du zéro

• Amélioration de la stabilité par ajout d'un zéro

• Le zéro introduit par  $T_{16} + C_f$  compense le 2<sup>nd</sup> pôle



### Plan

- Introduction
- Etage différentiel d'entrée
- Amplificateur à deux étages
- Etage de sortie

### Amplificateur à deux étages: ajout d'un étage de sortie

$$A_{v1} \cong -\frac{g_{m1}}{g_{ds2} + g_{ds4} + C_f A_{v2} p}$$

$$A_{v2} \cong -\frac{g_{m12}}{g_{ds12} + g_{ds13}}$$

$$A_{v3} \cong \frac{g_{m15}}{g_{ds14} + g_{ds15} + g_{m15} + G_L}$$

### Plan

- Introduction
- Etage différentiel d'entrée
- Amplificateur à deux étages
- Etage de sortie
- Autres montages amplificateurs

