



## ELE6308

### Microélectronique analogique et mixte

#### --- Amplificateur opérationnel ---

Mohamad Sawan, Professor  
Kamal El-Sankary, Ph.D.  
Laboratoire de neurotechnologies Polystim

<http://www.cours.polymtl.ca/ele6308/>  
mohamad.sawan@polymtl.ca  
M5418

---

---

---

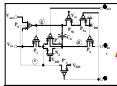
---

---

---

---

---



## Amplificateur opérationnel

### Plan

- I. Vue globale
- II. Conception DC (gain, polarisation, «offset»)
- III. Conception AC: faibles signaux (compensation)
- IV. Conception AC: forts signaux (Slew Rate)
- V. Critères de performance et guide de design (Paramètres DC & AC).

---

---

---

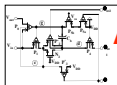
---

---

---

---

---

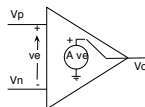


## Amplificateur opérationnel

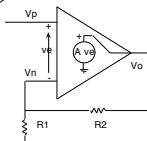
### Vue globale

#### • Catégories d'ampop idéal

- ◆ En boucle ouverte



- ◆ En boucle fermée



---

---

---

---

---

---

---

---

## Amplificateur opérationnel Vue globale (suite)

- Fonctions internes d'un ampop**
- Configuration de base d'un ampop en CMOS**

ÉCOLE POLYTECHNIQUE Page 4 ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Amplificateur opérationnel Conception DC (gain, polarisation, etc)

- Gain en boucle ouverte - faibles signaux**

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -g_m (r_o \parallel R) \cong -g_m R$$

$$G_{oA} = g_m r_o = g_{m1} (r_{o2} \parallel r_{o4}) g_{m5} (r_{o5} \parallel r_{o8})$$
- Polarisation DC**
  - ◆ Valeurs de courant

⇒ Dissipation de puissance, «Slew rate» et gain en boucle ouverte

ÉCOLE POLYTECHNIQUE Page 5 ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Amplificateur opérationnel Conception DC (suite)

- Tension de décalage (Offset)**
  - ◆ Systématique

Résulte de la tension de sortie du premier étage. Il ne fournit donc pas la valeur désirée à l'entrée du second étage pour forcer la tension de sortie à zéro. Les valeurs appropriées pour obtenir  $V_{out} = 0$  sont:

$$V_{DS3} = V_{DS4} = V_{GS4} = V_{GS5}$$

$$V_{GS4} = V_{TH} + \sqrt{\frac{2I_{D4}}{\mu C(W/L)_4}}$$

$$V_{GS5} = V_{TH} + \sqrt{\frac{2I_{D5}}{\mu C(W/L)_5}}$$

$$\frac{I_{D4}}{(W/L)_4} = \frac{I_{D5}}{(W/L)_5} = \frac{I_{D8}}{(W/L)_8}$$

$$I_{D4} = \frac{I_{D7}}{2}$$

$$\frac{(W/L)_5}{(W/L)_4} = 2 \frac{(W/L)_8}{(W/L)_7}$$

ÉCOLE POLYTECHNIQUE Page 6 ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Amplificateur opérationnel Conception DC (suite)

- Tension de décalage (suite)
  - ◆ «Offset» aléatoire

Étage différentielle:  $V_{os} = \frac{V_{os} - V_{os}}{2} \left( \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta(W/L)}{W/L} \right) + \Delta V_{th}$

$$V_{OS} = \Delta V_{T(1-2)} + \Delta V_{T(3-4)} \frac{g_{m3}}{g_{m1}} + \frac{(V_{GS} - V_{T})(1-2)}{2} \left[ \frac{(\frac{\Delta W}{L})}{(1-2)} - \frac{(\frac{\Delta W}{L})}{(3-4)} \right]$$

↓

Dû à la différence entre transistors d'entrée.

↓

Dû à la différence entre les différentes charges après un facteur de réduction par les transconductances.

↓

Dû à la différence de W/L des entrées et des charges lors de l'opération à faible polarisation.

Page 7
ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Amplificateur opérationnel Conception AC: faibles signaux

- À quoi sert la compensation ?

Open-loop gain =  $L(s) = -A(s)F(s)$

Closed-loop gain =  $V_{out}(s) = \frac{A(s)}{1+A(s)F(s)} V_{in}(s)$

Phase margin =  $\Phi_M = \text{Arg}[-A(j\omega_{0dB})F(j\omega_{0dB})] = \text{Arg}[L(j\omega_{0dB})]$

Pour un gain unitaire, la sortie est déphasée de 180° (interne) + un déphasage de 180° causé par l'entrée négative. Ceci consiste en un «feedback» positif qu'il faut éviter.

Page 8
ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Amplificateur opérationnel Conception AC: faibles signaux

Marge de phase  $\geq 45^\circ$

Page 9
ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Amplificateur opérationnel

### Conception AC: faibles signaux

$i = V_e \times g_m$

Gain et phase vs fréquence

$A = a_1 a_2$        $C_1 = C_2$

C1 et C2 sont des capacités parasites

ÉCOLE POLYTECHNIQUE      Page 10      ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Amplificateur opérationnel

### Conception AC: faibles signaux (suite)

- Compensation par déplacement de pôle
  - ◆ Description qualitative

Cc déplace le pôle #1 vers la basse fréquence et le pôle #2 vers la haute fréquence.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE      Page 11      ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Amplificateur opérationnel

### III. Conception AC: faibles signaux (suite)

- Compensation par déplacement de pôle
  - ◆ Description qualitative

À  $|A| = 1$ ,  $\phi = -135^\circ$ , et la marge est de  $45^\circ$ .

ÉCOLE POLYTECHNIQUE      Page 12      ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---

---

---

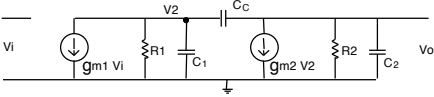
---

---

---

**Amplificateur opérationnel**  
**Conception AC: faibles signaux (suite)**

- **Compensation par déplacement de pôle (suite)**
  - ◆ **Description quantitative**
    - Modèle AC simplifié de l'ampop



$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{g_{m1}g_{m2}R_1R_2(1-C_c\frac{s}{g_{m2}})}{1+s[(C_2+C_c)R_2+(C_1+C_c)R_1+g_{m2}R_1R_2C_c]+s^2R_1R_2(C_1C_2+C_cC_1+C_cC_2)}$$

Si  $P_1 \ll P_2$ ,  $D(s) = 1 - s(\frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2}) + \frac{s^2}{P_1P_2} = 1 - \frac{s}{P_1} + \frac{s^2}{P_1P_2}$

ÉCOLE POLYTECHNIQUE Page 13 ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**Amplificateur opérationnel**  
**Conception AC: faibles signaux (suite)**

- **Compensation par déplacement de pôle (suite)**
  - ◆ **Description quantitative (suite)**
    - Les pôles

$$P_1 = \frac{-1}{(C_1 + C_c)R_1 + (C_2 + C_c)R_2 + g_{m2}R_1R_2C_c} = \frac{-1}{g_{m2}R_2C_cR_1}$$

$$P_1P_2 = \frac{1}{R_1R_2(C_1C_2 + C_cC_1 + C_cC_2)}$$

$$P_2 = \frac{-(g_{m2}R_2)C_cR_1}{R_1R_2(C_2C_1 + C_cC_1 + C_cC_2)} = \frac{-g_{m2}C_c}{C_2C_1 + C_cC_1 + C_cC_2}$$

- Pôle P1 a été poussé vers les basses fréquences par Cc (multiplicateur Miller).
- Pôle P2 a été déplacé vers les hautes fréquences en raison de la boucle ( $R_2 \parallel 1/g_{m2}$ ).

$$P_2 = \frac{-g_{m2}}{C_1 + C_2}$$

ÉCOLE POLYTECHNIQUE Page 14 ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---

---

---

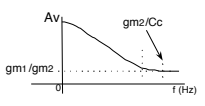
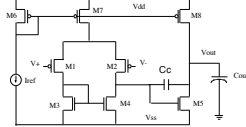
---

---

---

**Amplificateur opérationnel**  
**Conception AC: faibles signaux (suite)**

- **Compensation par déplacement de pôle (suite)**
  - ◆ **Description quantitative (suite)**
    - Le zéro ( $z = gm2/Cc$ )
      - À haute fréquence Cc se comporte comme un court-circuit;
      - M5 se comporte comme une résistance de valeur  $1/g_{m2}$  (une diode);
      - Le gain av devient  $= -gm1(R_1 \parallel 1/g_{m2}) \approx -gm1/g_{m2}$ .

- Annulation du zéro
  - Pour le MOS, le zéro est proche de la fréquence donnant un gain unitaire.

$$\text{Gain DC} \times P_1 \approx \frac{gm_1 R_1 gm_2 R_2}{gm_2 R_2 R_1 C_c} \approx gm_1 / C_c$$

ÉCOLE POLYTECHNIQUE Page 15 ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---

---

---

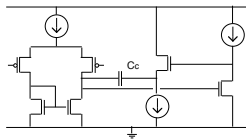
---

---

---

**Amplificateur opérationnel**  
**Conception AC: faibles signaux (suite)**

- **Compensation par déplacement de pôle (suite)**
  - ◆ **Description quantitative (suite)**
    - Annulation du zéro (suite)  
 Le rapport:  $\frac{\text{Gain unitaire}}{\text{zéro}}$  donne  $gm1/gm2$   
 Si  $gm2 \gg gm1 \Rightarrow$  zéro est peu important
    - Annulation à l'aide d'un suiveur



Le suiveur prévient le «feedforward», mais surface et puissance sont dégradées.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE Page 16 ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---

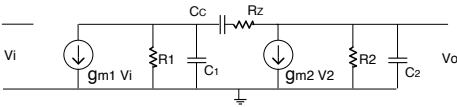
---

---

---

**Amplificateur opérationnel**  
**Conception AC: faibles signaux (suite)**

- **Compensation par déplacement de pôle (suite)**
  - ◆ **Description quantitative (suite)**
    - Annulation du zéro à l'aide d'une résistance (Rz)



$$z = \frac{1}{C_c \left( \frac{1}{g_{m2}} - R_z \right)}$$

Si  $R_z = 1/g_{m2} \Rightarrow$  le zéro est annulé.  
 Si  $R_z > 1/g_{m2} \Rightarrow$  le zéro se déplace vers la partie gauche et par le fait même la marge de phase est améliorée.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE Page 17 ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---

---

---

---

**Amplificateur opérationnel**  
**Conception AC: faibles signaux (suite)**

- **Compensation par déplacement de pôle (suite)**
  - ◆ **Description quantitative (suite)**
    - Effets de la charge capacitive (C2)

$$P_2 = -\frac{g_{m2} C_c}{C_1 C_2 + C_c C_1 + C_c C_2} \approx -\frac{g_{m2} C_c}{C_c C_2} = \frac{g_{m2}}{C_2} \quad C_c, C_2 \gg C_1$$

- Le gain unitaire est  $gm1/Cc$ . On veut placer  $P_2$  au point du gain unitaire avec une marge de phase  $\geq 45^\circ$ .
- $gm1/Cc \leq gm2/C2$ ;  
 $gm2$  est de même ordre de grandeur que  $gm1 \Rightarrow C2 \leq Cc$ .  
 La charge maximale qu'on peut alimenter est donc  $C2 = Cc$ .

ÉCOLE POLYTECHNIQUE Page 18 ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---

---

---

---

## Amplificateur opérationnel Conception AC: forts signaux

- Réaction de la sortie «Slew Rate»
  - ◆ Les causes

Si  $V_{IN} > V'$   $\Rightarrow$  le courant maximum de sortie est  $I_{SS}$ :

$$V_o = \frac{1}{C_c} \int I_{SS} dt ; \quad \frac{dV_o}{dt} = \frac{I_{SS}}{C_c}$$

Le changement (augmentation) du voltage de sortie  $V_o$  en fonction du temps est linéaire.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE Page 19 ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Amplificateur opérationnel Conception AC: forts signaux (suite)

- Réaction de la sortie «Slew Rate» (suite)
  - ◆ Effets du «Slew rate» sur les signaux de forte amplitude

$V_i = A \sin \omega t \Rightarrow dV_i/dt|_{MAX} = \omega A \Rightarrow \text{Slew rate} < \omega A$

- ◆ Evaluation du «slew rate» → Limites du «Slew rate»

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{I_{SM}}{C_c} \quad \frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = g_{m1}$$

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = \frac{1}{sC} = \frac{1}{j\omega C} \quad \frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = \frac{g_{m1}}{j\omega C}$$

ÉCOLE POLYTECHNIQUE Page 20 ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Amplificateur opérationnel Conception AC: forts signaux (suite)

- Réaction de la sortie «Slew rate» (suite)
  - ◆ Evaluation du «Slew rate» (suite)

De la théorie de compensation, nous savons que le gain unitaire doit se produire au pôle #2 le plus dominant .

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = \left| \frac{g_{m1}}{\omega_2 C} \right| \quad \therefore \frac{1}{C} = \frac{\omega_2}{g_{m1}}$$

$$\text{Slew Rate} = \frac{dV_o}{dt} = \frac{I_{SM} \omega_2}{g_{m1}}$$

$$SR = \frac{2I_{D1} \omega_2}{g_{m1}}$$

$$SR = (V_{GS} - V_{th}) \omega_2$$

Pour améliorer le SR, augmenter  $V_{GS} - V_{th}$

ÉCOLE POLYTECHNIQUE Page 21 ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---

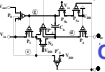
---

---

---

---


---



## Amplificateur opérationnel

### Critères de performance et guide de design

- **Paramètres DC**
  - ◆ **Gain intrinsèque**
    - Composants longs pour obtenir impédance de sortie élevée
    - Composants larges pour obtenir transconductance élevée
    - Circuits cascodes.
    - Courant de polarisation faible
  - ◆ **Gamme de variation de sortie**
    - Pas de circuits cascodes
  - ◆ **Voltage d'«offset» (CMR)**
    - Gros composants
    - Courant de polarisation faible
  - ◆ **Dissipation d'énergie**
    - Courant de polarisation faible


Page 22 ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---

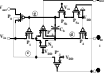
---

---

---

---


---



## Amplificateur opérationnel

### Critères de performance (suite)

- **Paramètres AC**
  - ◆ **Fréquence de gain unitaire gm1/Cc**
    - Courant de polarisation élevé
    - Composants à canaux courts
  - ◆ **«Slew rate»**
    - Courant de polarisation élevé
- **Autres paramètres de design**
  - ◆ **Bruit d'entrée équivalent**
  - ◆ **Réjection de l'alimentation**
- **Contraintes de design des circuits intégrés**
  - ◆ **Tension d'alimentation**
  - ◆ **Surface**


Page 23 ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---


---

---

---

---


---



## Projet du ELE6308

### (Équipe de 2 personnes)

#	Date	Travail
1.	16 octobre	Remise du résumé de projet (une demi-page)
2.	16 octobre	Présentation du sujet proposé (5 minutes);
3.	6 novembre	Remise du rapport de progrès (2 pages)
4.	27 novembre	Remise de l'article (4 pages format IEEE) + les circuits du logiciel Cadence;
5.	4 décembre	Présentation orale du projet (20 + 5 min);
6.	11 décembre	Examen final basé sur les informations données en classe (documents autorisés).


ELE6308- Microélectronique analogique et mixte

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---