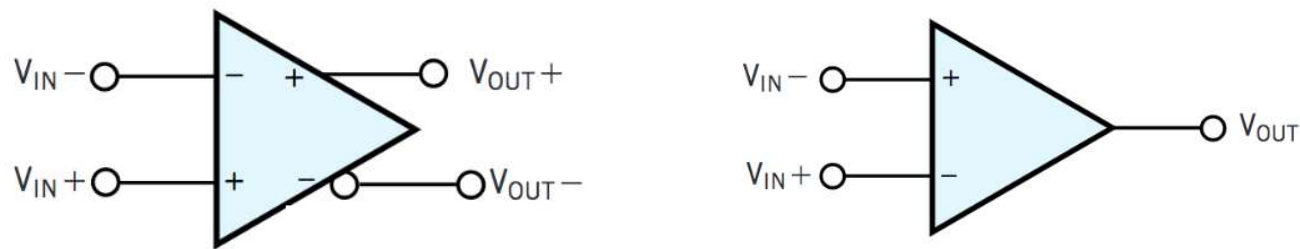

Amplificateur Différentiel en Circuits Intégrés CMOS



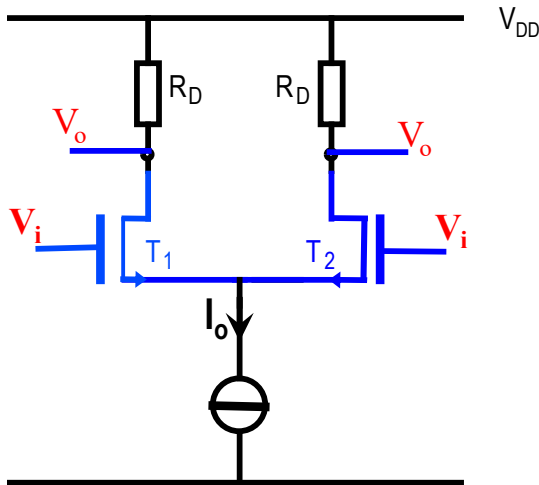
Electronique II
Adil Koukab

Table des matières

- Ampli diff: Fonctionnement et Polarisation DC
- Analyse petits signaux
 - Gain différentiel
 - Gain mode commun
 - Due à une source de courant non-idéale.
 - Due à un défaut de symétrie
- Ampli diff à charges actives et à sortie asymétrique

Ampli Diff: Polarisation et point de fonctionnement

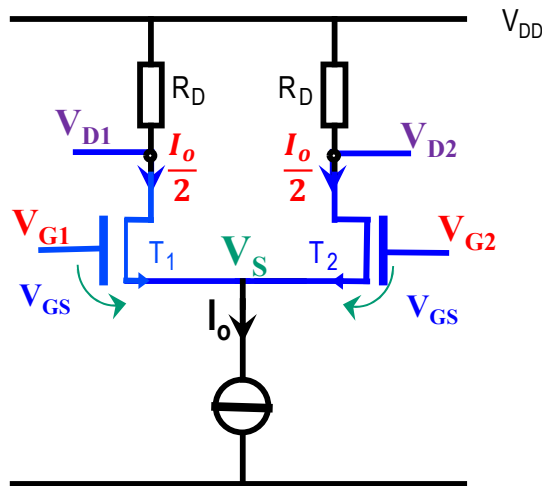
- L'Ampli diff est largement utilisé en circuits intégrés essentiellement pour sa capacité à rejeter les signaux parasites du mode commun.
- L'ampli différentiel est constitué de deux transistors identiques qui constituent la paire différentielle et d'une charge passive ou active.



- Il est polarisé par une source de courant.
- Ceci permet un couplage direct avec l'étage précédent (sans capacité de couplage) qui fixe aussi le potentiel DC des grilles.

Ampli diff: Polarisation et point de fonctionnement

- Régime statique



- Le potentiel DC à l'entrée ($V_{G1,2}$) est fixé par l'étage précédent.

- Symétrie de l'ampli donne

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{I_o}{2} \rightarrow V_{GS} = \sqrt{\frac{2I_D}{\beta}} + V_T$$

$$V_S \approx V_G - V_{GS}$$

$$V_{D1} = V_{D2} = V_{DD} - \frac{I_o}{2} R_D$$

$I_{D1,2} \rightarrow$ Paramètres ac

$$g_{m1,2} = \sqrt{2\beta I_{D1,2}} = \sqrt{\beta I_o} (= \beta V_{ov} = \frac{2I_D}{V_{ov}})$$

$$g_{DS1,2} = \frac{I_o}{2LU_a}$$

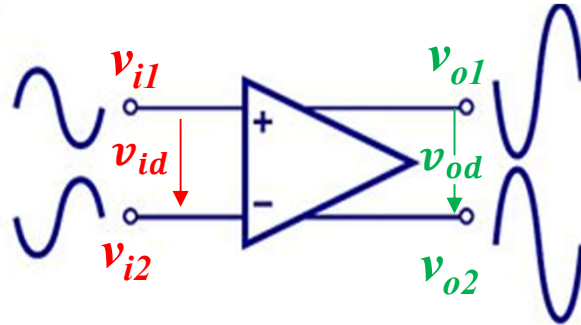
Table des matières

- Ampli diff: Fonctionnement et Polarisation DC
- Analyse petits signaux
 - Gain différentiel
 - Gain mode commun
 - Due à une source de courant non-idéale.
 - Due à un défaut de symétrie
- Ampli diff à charges actives et à sortie asymétrique

Analyse petit signaux: Gain différentiel

Signaux diff in

$$v_{id} = v_{i1} - v_{i2}$$
$$v_{i1} = -v_{i2} = \frac{v_{id}}{2}$$



Signaux diff out

$$v_{od} = v_{o1} - v_{o2}$$
$$v_{o1} = -v_{o2} = \frac{v_{od}}{2}$$

Gain différentiel

$$A_{v,d} = \frac{v_{od}}{v_{id}}$$

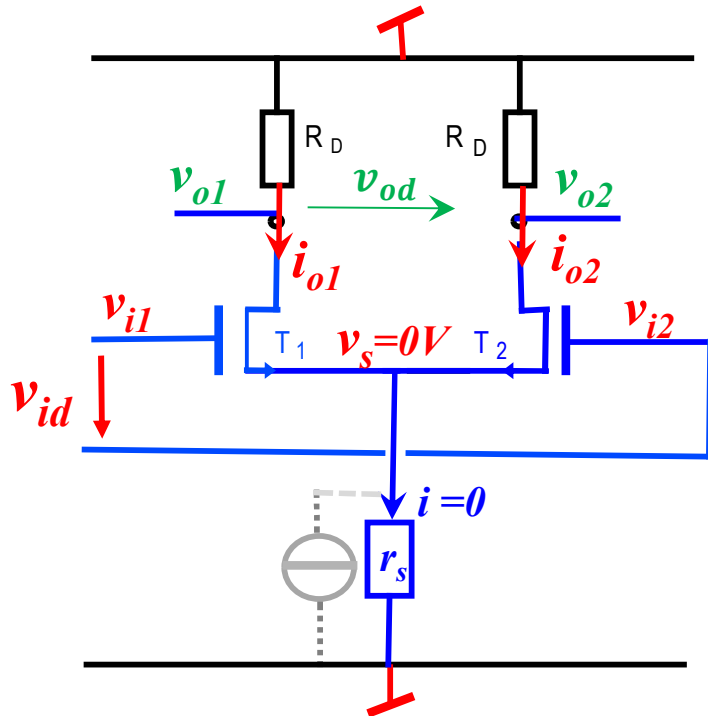
Gain différentiel

$$A_{v,d} = \frac{v_{od}}{v_{id}} = \frac{v_{o1} - v_{o2}}{v_{i1} - v_{i2}} = \frac{v_{o1}}{v_{i1}} = \frac{v_{o2}}{v_{i2}}$$

➤ Il suffit de connaître $\frac{v_{o1}}{v_{i1}}$ pour en déduire $\frac{v_{od}}{v_{id}}$

Analyse petit signaux: Gain différentiel

Schéma petit signaux



➤ Pour le schéma petits signaux:

- V_{DD} mise à la masse
- La source de courant remplacée par r_s .

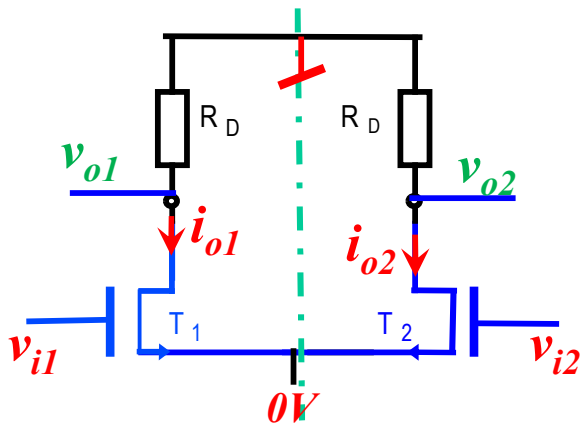
➤ Circuit symétrique + Mode différentiel

$$i_{o1} = -i_{o2} \Rightarrow i(r_s) = 0 \Rightarrow v_s = 0$$

➤ *Le nœud s est une masse virtuelle en ac*

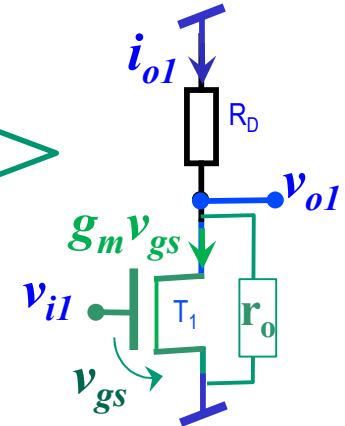
Analyse petit signaux: Gain différentiel: $A_{v,d} = \frac{v_{od}}{v_{id}}$

Schéma petit signaux final



- Schéma parfaitement symétrique
 \rightarrow on peut donc traiter qu'une branche et étendre le résultat à l'ensemble du circuit \rightarrow C'est la méthode du demi-circuit équivalent.

Méthode du demi-circuit équivalent \rightarrow SC



Résistance d'entrée différentielle $R_{in,d}$

$$R_{in,d} \rightarrow \infty$$

Résistance de sortie différentielle $R_{o,d}$

$$R_{o1} = \left. \frac{v_{o1}}{i_{o1}} \right|_{v_i=0} = r_o // R_D \approx R_D$$

$$\rightarrow R_{o,d} = \frac{v_{od}}{i_{o1}} = \frac{2v_{o1}}{i_{o1}} \approx 2R_D$$

Gain en tension $A_{m,d}$

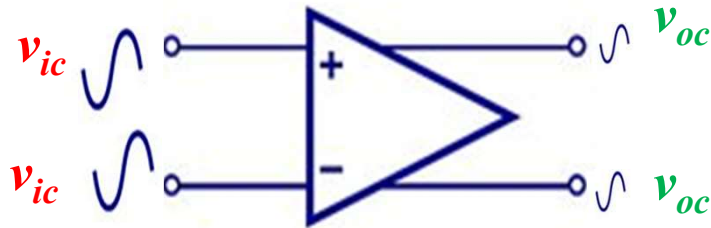
$$A_v = \frac{v_{o1}}{v_{i1}} = \frac{-g_m v_{gs} (r_o // R_D)}{v_{gs}} = -g_m r_o // R_D \approx -g_m R_D \rightarrow A_{v,d} = \frac{v_{od}}{v_{id}} = \frac{2v_{o1}}{2v_{i1}} \approx -g_m R_D$$

Table des matières

- Ampli diff: Fonctionnement et Polarisation DC
- Analyse petits signaux
 - Gain différentiel
 - Gain mode commun
 - Due à une source de courant non-idéale.
 - Due à un défaut de symétrie
- Ampli diff à charges actives et à sortie asymétrique

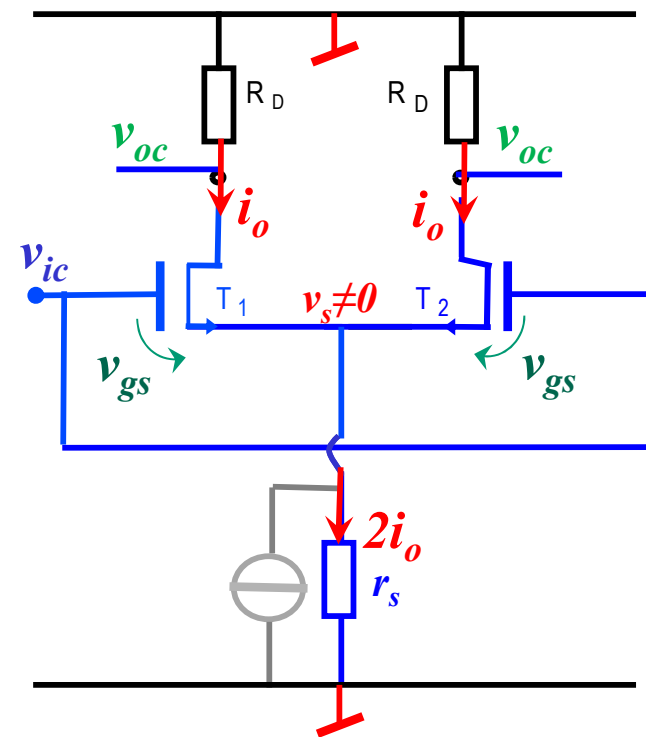
Gain mode commun due à r_s (une source de courant non-idéale)

Signal mode commun: $v_{ic1} = v_{ic2}$



$$A_{mc} = \frac{v_{oc}}{v_{ic}}$$

Schéma petit signaux en MC



➤ le schéma est parfaitement symétrique avec le même signal sur les deux transistors ➔

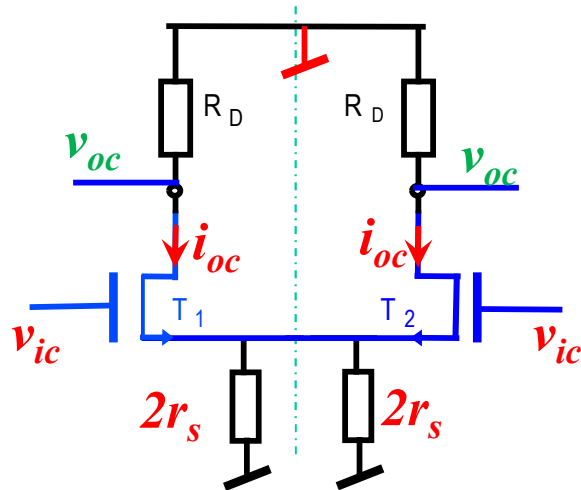
$$v_{gs1} = v_{gs2} \text{ et } i_{o1} = i_{o2} \rightarrow v_s = r_s \cdot 2i_o = r_s \cdot 2i_{o1} \neq 0$$

Rq: r_s peut être remplacée par $2r_s // 2r_s$ pour créer un circuit symétrique

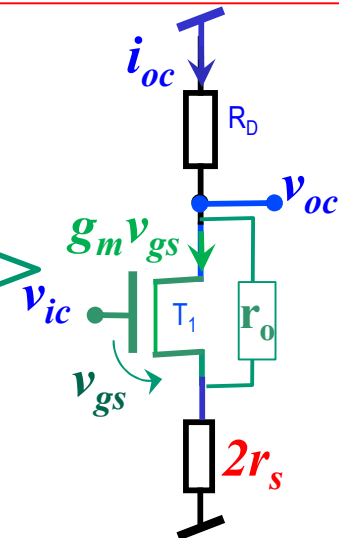
Analyse petit signaux: Gain mode commun

Schémas petit signaux final

Méthode du demi-circuit équivalent → SC dégénérée



- Schéma parfaitement symétrique
→ on peut donc traiter qu'une branche et étendre le résultat à l'ensemble du circuit → C'est la méthode du demi-circuit équivalent.



❖ Gain mode commun

$$A_{cm} = \frac{v_{oc}}{v_{ic}} = \frac{f(v_{gs})}{v_{gs} + i_{oc} 2r_s} \quad \text{with } i_{oc} = \frac{v_{oc}}{R_D} + \frac{v_s}{2r_s}$$

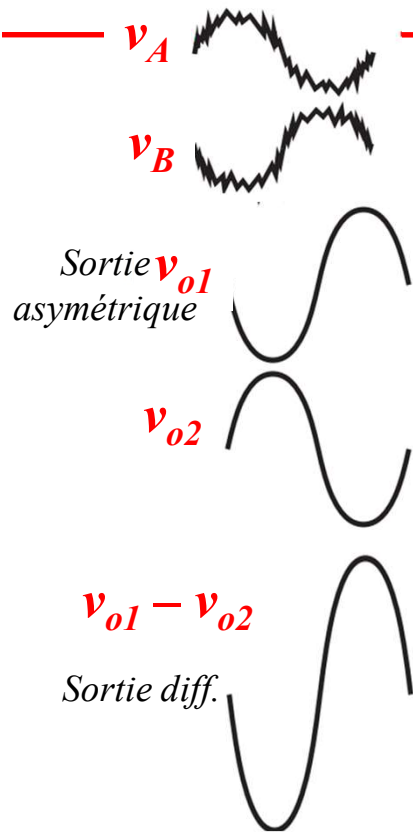
$$\begin{cases} i_{oc} = g_m v_{gs} + \frac{-i_{oc} R_D - i_{oc} 2r_s}{r_o} \\ = v_{gs} \underbrace{g_m \left(\frac{r_o}{r_o + R_D + 2r_s} \right)}_{g_m^*} \end{cases}$$

$$A_{mc} = \frac{-g_m^* v_{gs} R_D}{v_{gs} + g_m^* v_{gs} 2r_s}$$

$$A_{mc} = -\frac{g_m^* R_D}{(1 + g_m^* 2r_s)} \xrightarrow{2r_s \gg 1/g_m^*} A_{mc} \approx -\frac{R_D}{2r_s}$$

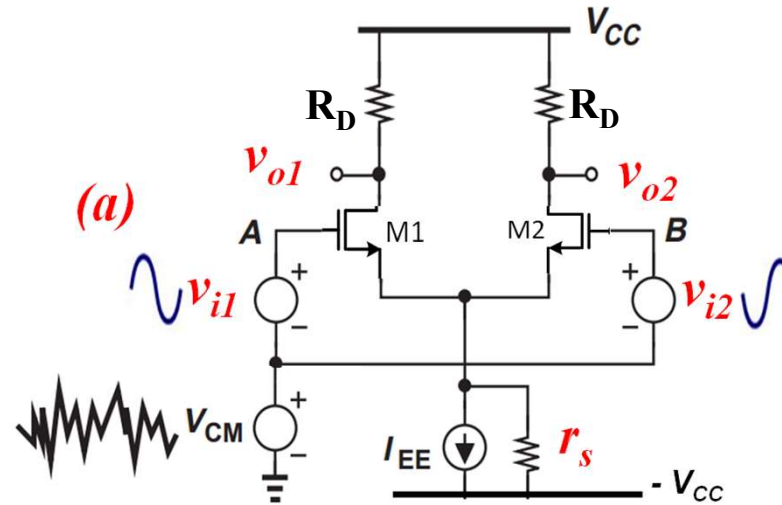
➤ Rq: $A_{mc} \xrightarrow{r_s \rightarrow \infty} 0$

Effet du bruit mode com. sur les signaux de sortie

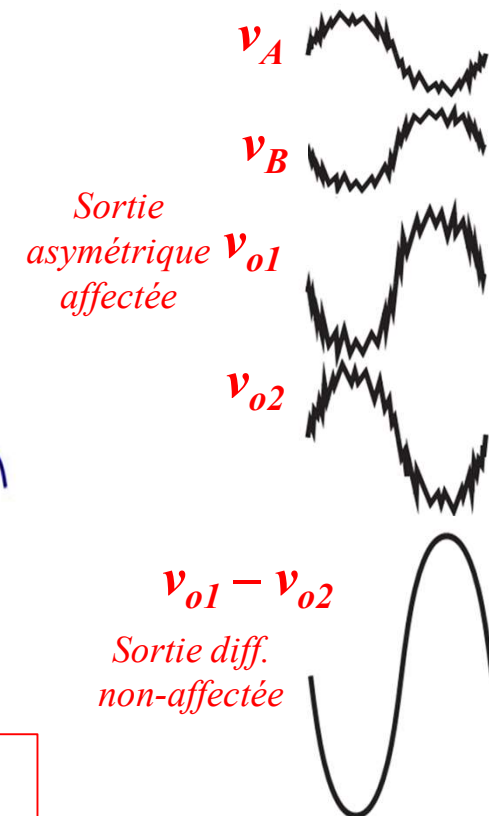


Effet du bruit V_{CM}
avec $r_s \rightarrow \infty$ ($A_{mc} \rightarrow 0$)

Pair-diff avec du bruit
mode-com V_{CM} à l'entrée.



$$A_{mc} = \left. \frac{v_{o1,2}}{v_A} \right|_{v_{i1,2}=0} \approx -\frac{R_D}{2r_s}$$

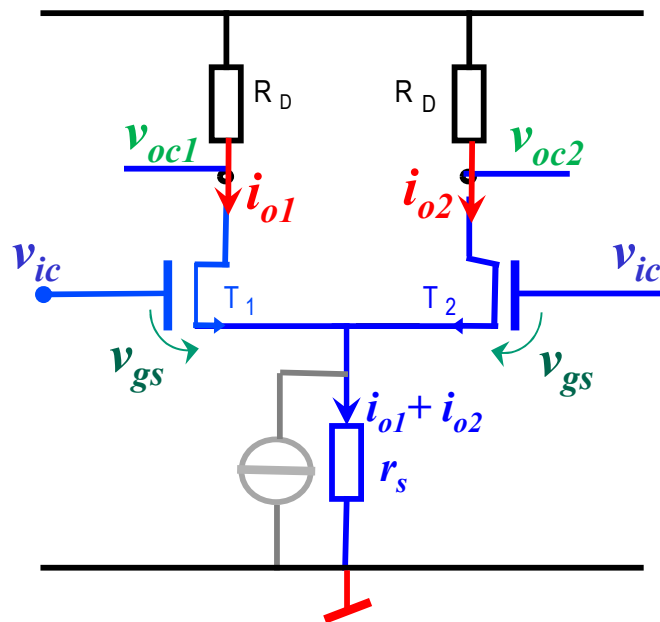


Effet du bruit V_{CM}
avec r_s finie ($A_{mc} \neq 0$)

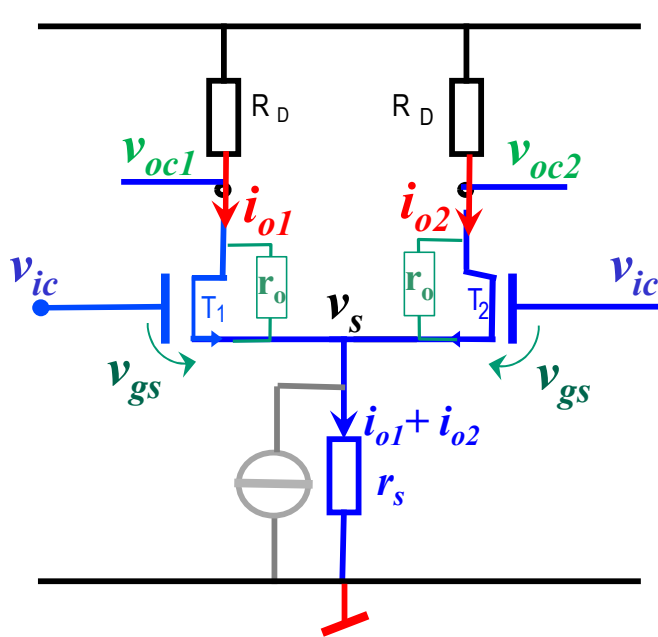
Conclusion: gain mode-com à mode-diff
 $\rightarrow A_{mc-md} = \frac{v_{o1}-v_{o2}}{v_{CM}} = 0$ si l'Ampli est parfaitement symétrique

Gain mode commun due à un défaut de symétrie

- ❖ Quiz: Considérer un ampli diff présentant un défaut de symétrie dans les g_m des transistors ($g_{m2} = g_{m1} + \varepsilon$). calculer le gain mode commun à mode diff ($A_{mc-md} = \frac{v_{oc2} - v_{oc1}}{v_{ic}}$). Supposez que $r_s = r_{o1,2}$ et $r_{o1,2} \gg R_D$



Ex: Gain mode commun-mode diff (A_{mc-md}) due à un **défaut de symétrie**. Ex. dans les g_m des transistors ($g_{m2} = g_{m1} + \varepsilon$)



$$A_{mc-md} = \frac{v_{oc2} - v_{oc1}}{v_{ic}} = \frac{-\overbrace{(i_{o2} - i_{o1})}^{f(v_{gs})?} R_D}{v_{gs} + \overbrace{(i_{o1} + i_{o2})}^{f'(v_{gs})?} r_s}$$

$$\begin{cases} i_{o2} - i_{o1} = g_{m2} v_{gs} + \frac{-i_{o2} R_D - v_s}{r_o} - g_{m1} v_{gs} - \frac{-i_{o1} R_D - v_s}{r_o} = v_{gs} \varepsilon \left(\frac{r_o}{r_o + R_D} \right) \approx v_{gs} \varepsilon \\ i_{o2} + i_{o1} = g_{m2} v_{gs} + \frac{-i_{o2} R_D - (i_{o2} + i_{o1}) r_s}{r_o} + g_{m1} v_{gs} + \frac{-i_{o1} R_D - (i_{o2} + i_{o1}) r_s}{r_o} \\ = (g_{m2} + g_{m1}) v_{gs} \left(\frac{r_o}{r_o + R_D + 2r_s} \right) \approx (g_{m2} + g_{m1}) v_{gs} \frac{1}{3} \end{cases}$$

$$A_{mc-md} = \frac{v_{oc2} - v_{oc1}}{v_{ic}} = \frac{-\varepsilon R_D}{1 + (g_{m1} + g_{m2}) r_s / 3}$$

Taux de rejection du mode commun TRMC $TRMC = \left| \frac{A_{vd}}{A_{mc-md}} \right|$

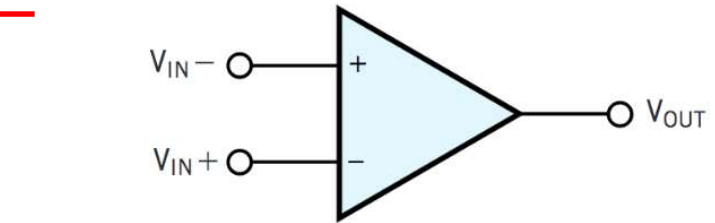
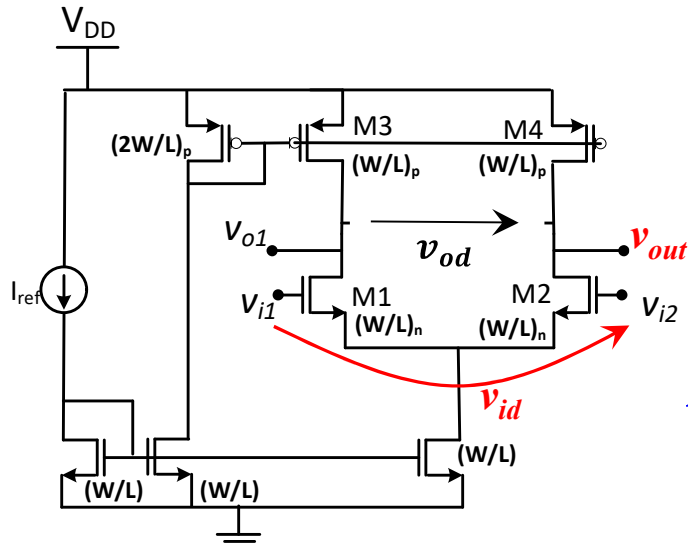
Rq: En général les défauts de symétrie n'ont que peu d'effet sur le gain différentiel qui est supposé être assez grand. Par conséquent, si $\varepsilon \ll g_{m1}$, on peut supposer que $A_{vd} \approx -g_{m1} R_D \approx -g_{m2} R_D$.

$$TRMC = \left| \frac{A_{vd}}{A_{mc-md}} \right| \approx \frac{g_{m1,2} (1 + (g_{m1} + g_{m2}) r_s / 3)}{\varepsilon} \approx \frac{2g_{m1,2}^2 r_s}{3\varepsilon}$$

Table des matières

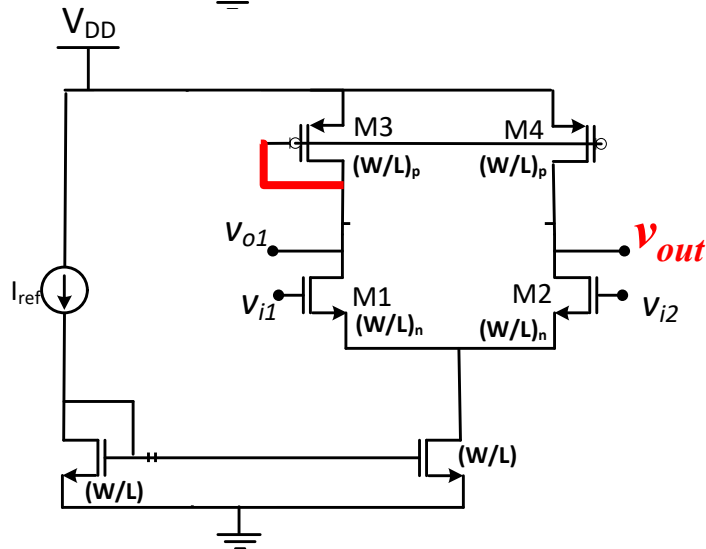
- Ampli diff: Fonctionnement et Polarisation DC
- Analyse petits signaux
 - Gain différentiel
 - Gain mode commun
 - Due à une source de courant non-idéale.
 - Due à un défaut de symétrie
- Ampli diff à charges actives et à sortie asymétrique

Amplificateur différentiel à sortie asymétrique: OTA



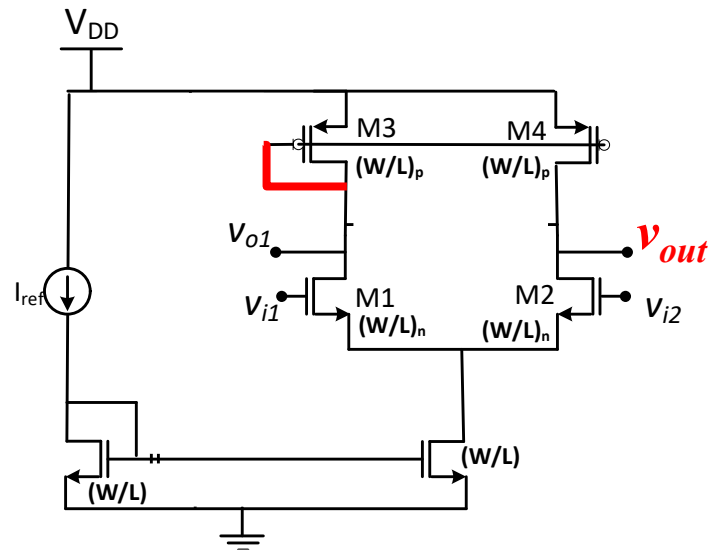
Gain en tension A_v

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{id}} = \frac{1}{2} \frac{v_{od}}{v_{id}} = \frac{1}{2} g_m \frac{1}{g_{DS2}} // \frac{1}{g_{DS4}} \approx \frac{1}{2} \frac{g_m}{g_{DS2} + g_{DS4}}$$

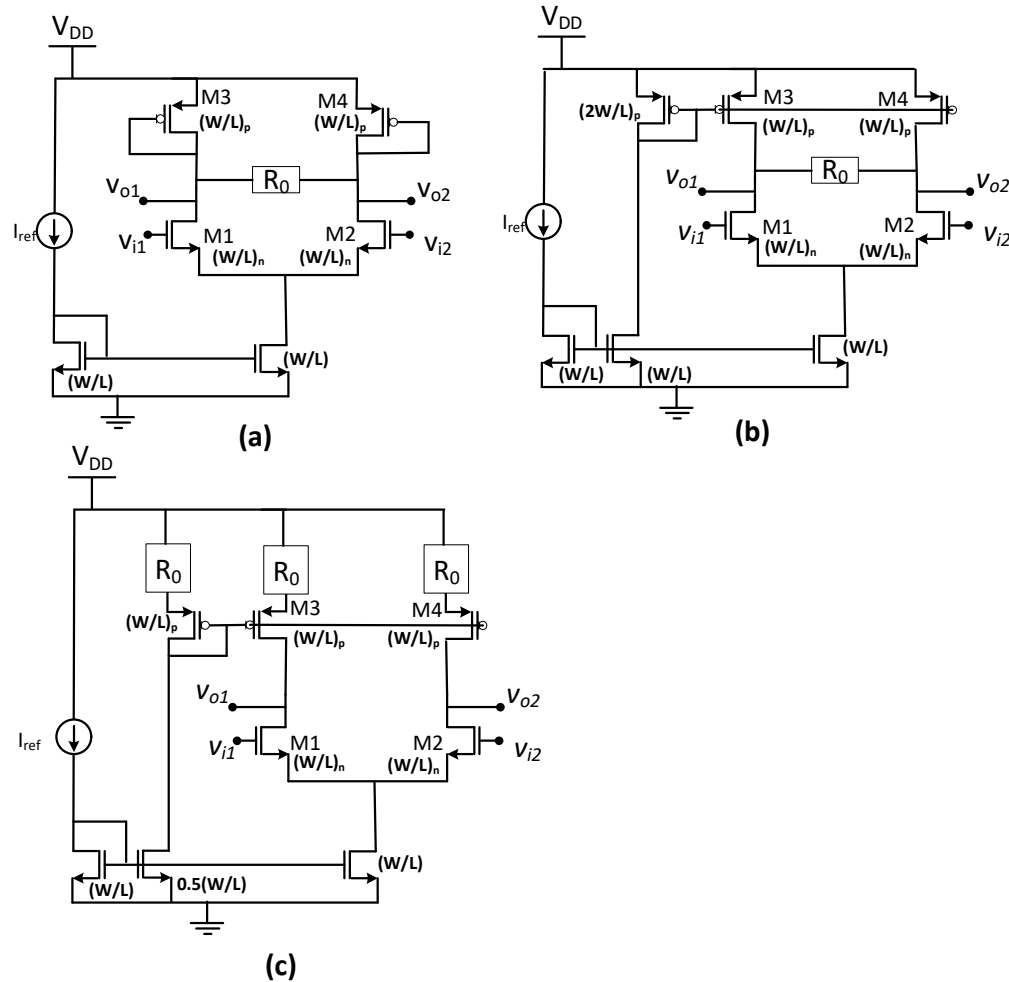


❖ Gain en tension A_v

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{id}} = \frac{1}{2} g_m \frac{1}{g_{DS2}} // \frac{1}{g_{DS4}} \approx \frac{g_m}{g_{DS2} + g_{DS4}}$$



Exercices



- Exprimer le gain différentiel des amplificateurs ci-dessous en fonction des éléments du circuit (c.à.d. I_{ref} , V_{DD} , R_0 , $(W/L)_n$ et $(W/L)_p$). On tiendra compte des résistances de sortie r_{on} et r_{op} des transistors nMOS et pMOS.
- Calculer $V_{o,max}$ et $V_{o,min}$ des circuits a, b et c. La tension DC à l'entrée des amplificateurs est $V_{DD}/2$.