

COMPARATEUR

Rappel

Equations fondamentales pour un MOSFET

- Cutoff region :

$$I_d = 0 \quad V_{gs} - V_T < 0$$

- Triode (region ohmique)

$$V_{gs} - V_T > 0 \quad \text{et} \quad V_{ds} < V_{gs} - V_T$$

$$I_d = K \cdot \left(\frac{W}{L}\right) \cdot \left[(V_{gs} - V_T) \cdot V_{ds} - \frac{V_{ds}^2}{2} \right] = \beta \cdot \left[(V_{gs} - V_T) \cdot V_{ds} - \frac{V_{ds}^2}{2} \right]$$

- Linéaire (region de saturation)

$$V_{gs} - V_T > 0 \quad \text{et} \quad V_{ds} \geq V_{gs} - V_T$$

$$I_d = \frac{1}{2} \cdot K \cdot \left(\frac{W}{L}\right) \cdot (V_{gs} - V_T)^2 = \beta \cdot \frac{1}{2} \cdot (V_{gs} - V_T)^2$$

si on prend en compte l'effet lié à la modulation du canal

$$I_d = \frac{1}{2} \cdot K \cdot \left(\frac{W}{L}\right) \cdot (V_{gs} - V_T)^2 \cdot (1 + \lambda \cdot V_{ds})$$

$$I_D = \frac{K}{2} \cdot \left(\frac{W}{L}\right) \cdot (V_{GS} - V_T)^2 \quad \text{ou bien} \quad V_{GS} = \sqrt{\frac{2 \cdot I_D}{K \cdot \left(\frac{W}{L}\right)}} + V_T$$

$$V_{DS}(sat) = V_{GS} - V_T = \left[\sqrt{\frac{2 \cdot I_D}{K \cdot \left(\frac{W}{L}\right)}} + V_T \right] - V_T = \sqrt{\frac{2 \cdot I_D}{K \cdot \left(\frac{W}{L}\right)}}$$

$$I_D(sat) = K \cdot \left(\frac{W}{L}\right) \cdot V_{DS}^2(sat)$$

$$g_m = K \cdot \left(\frac{W}{L}\right) \cdot (V_{GS} - V_T) \quad \text{ou encore} \quad g_m = \sqrt{2 \cdot I_D \cdot K \cdot \left(\frac{W}{L}\right)}$$

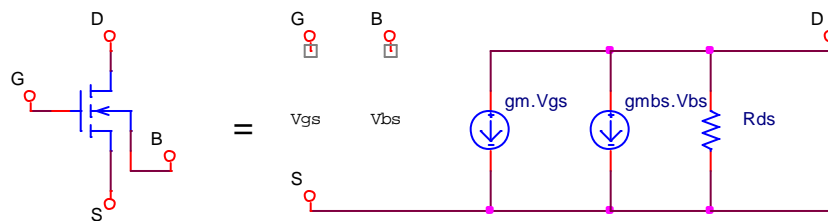
$$\text{On écrit aussi} \quad g_m = \sqrt{2 \cdot \beta \cdot I_D}$$

Avec $\beta = K \cdot \left(\frac{W}{L}\right)$ sachant que $K = \mu \cdot Cox = \mu \cdot \frac{\epsilon ox}{tox}$

$$g_{mbs} = \frac{gm \cdot \gamma}{2 \cdot \sqrt{2 \cdot \phi F + |V_{bs}|}}$$

$$r_{ds} \approx \frac{1}{g_{ds}} = \frac{1}{\lambda \cdot Id}$$

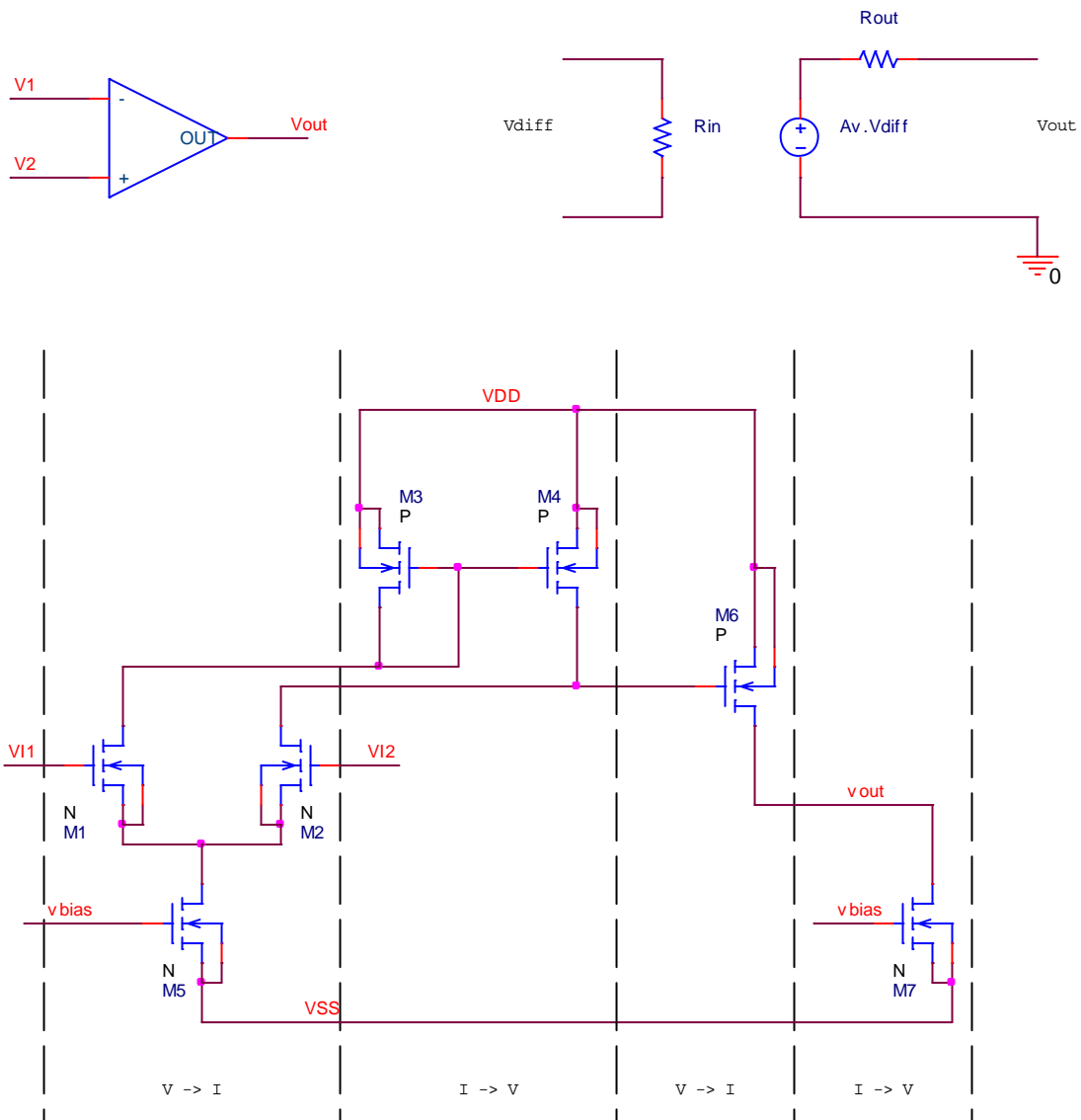
avec λ qui correspond au coefficient de modulation de la largeur de grille (canal)



Pour un technologie Cmos de 0.8 μ m :

Paramètres	Description	Valeur Nmos	Valeur Pmos	Unités
VT0	Seuil pour Vbs=0V	0.75	-0.85	V
K	Transconductance pour Vbs=0V	110	50	$\mu a/V^2$
γ	Seuil du bulk	0.4	0.57	\sqrt{V}
λ	Modulation de la largeur du canal	0.04(L=1 μ m) 0.01(L=2 μ m)	0.05(L=1 μ m) 0.01(L=2 μ m)	V^{-1}
$\phi = 2 \cdot \phi F$	Potentiel de surface en forte inversion	0.7	0.8	V

Montage à 2 étages :



Le premier étage est un amplificateur différentiel de tension qui converti la différence de tension d'entrée en une différence de courant. Cette différence de courants est appliquée à un miroir de courant chargé de récupérer une différence de tension.

Le second étage est constitué par un montage à source commune qui converti la tension en courant. Ce transistor est connecté à un nouveau transistor qui constitue une charge qui tire un courant (current sink). Ainsi on convertit le courant en une tension de sortie.

Relations :

CMR positif : $V_{IN}(\max) = V_{DD} - |V_{DS3(sat)}| - |V_{TP3}| + |V_{TN1}|$

Autre écriture : $V_{IN}(\max) = V_{DD} - \sqrt{\frac{I_5}{\beta_3}} - |V_{TP3}| + |V_{TN1}|$

CMR négatif : $V_{IN}(\min) = V_{SS} + V_{TN1} + V_{DS5(sat)} + V_{DS1(sat)}$

Ou bien $V_{IN}(\min) = V_{SS} + \sqrt{\frac{I_5}{\beta_1}} + V_{TN1} + V_{DS5(sat)}$

La plage de la tension d'entrée en mode commun s'exprime :

$$V_{SS} + V_{TN1} + V_{DS5(sat)} + V_{DS1(sat)} < V_{IC} < V_{DD} - |V_{DS3(sat)}| - |V_{TP3}| + |V_{TN1}|$$

Tension max en sortie :

$$V_{OH} = V_{DD} - (V_{DD} - V_{G6(\min)} - |V_{TP}|) \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot I_{D7}}{\beta_6 \cdot (V_{DD} - V_{G6(\min)} - |V_{TP}|)^2}} \right]$$

Tension min en sortie :

$$V_{OL} = V_{SS}$$

Gain :

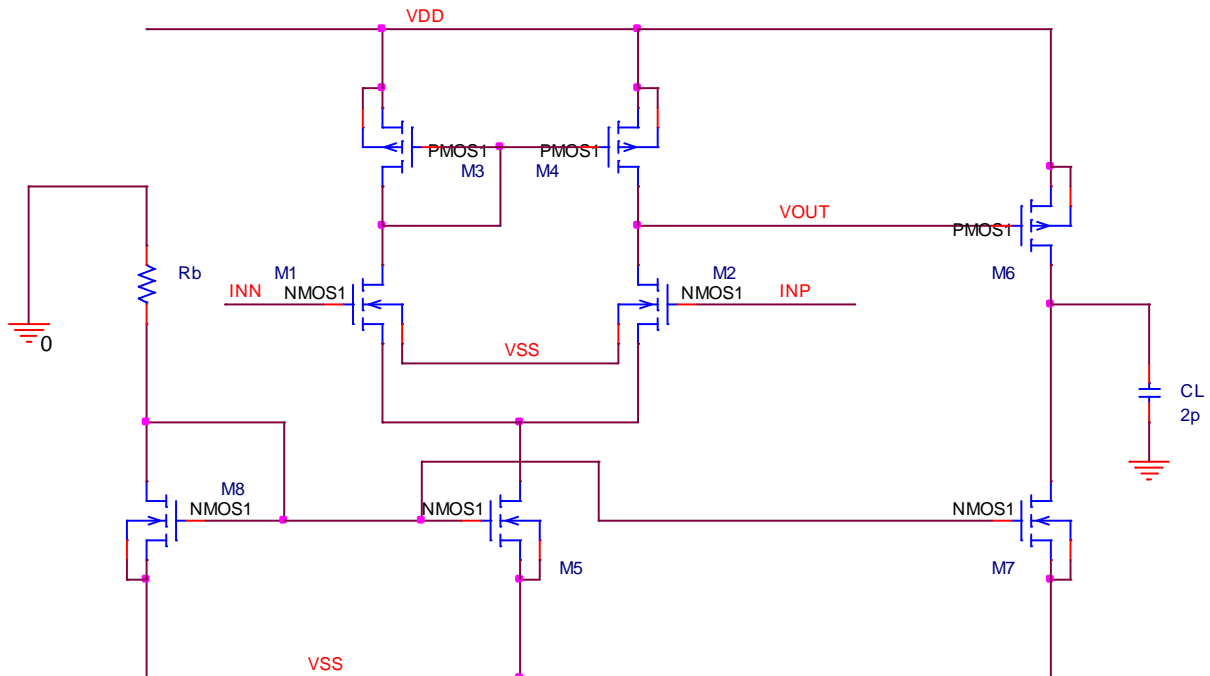
$$A_v = \frac{2 \cdot g_{m2} \cdot g_{m6}}{I_5 \cdot (\lambda_2 + \lambda_3) \cdot I_6 (\lambda_6 + \lambda_7)}$$

$$A_v = \frac{g_{m2}}{(g_{ds2} + g_{ds4})} \cdot \frac{g_{m6}}{(g_{ds6} + g_{ds7})}$$

Puissance dissipée :

$$P = (I_5 + I_6) \cdot (V_{DD} + |V_{SS}|)$$

Conception d'un comparateur à entrées NMOS



Sachant que :

$$VDD = 5V \text{ \& } VSS = -5V \quad Av > 10000 \quad CMR(max) = 3V \quad CMR(min) = 3V$$

$$SR = 10V/\mu s \quad VOUT(min) = -4.5V \quad VOUT(max) = 4.5V \quad CL = 2pF$$

$$Kn = 40\mu A/V^2 \quad Kp = 15\mu A/V^2 \quad \lambda_n = \lambda_p = 0.02V^{-1} \quad V_{THN} = 1V \quad V_{THP} = -1V$$

1. Déterminer le courant nécessaire à M7 pour satisfaire la contrainte liée au slew rate (SR).

$$ID7 = CL \cdot \left(\frac{dV}{dt} \right) = 2E-12 \times 10E6 = 20\mu A$$

2. Déterminer la taille de M6 et M7 qui permettent de satisfaire la dynamique de la tension de sortie exigée par la spécification.

$$VDS7(sat) = VOUT(min) - VSS = -4.5 - (-5) = 0.5V = VGS7 - VN0 = \Delta V$$

$$VDS7(sat) = \sqrt{\frac{2 \cdot ID7}{Kn \cdot \left(\frac{W7}{L7} \right)}} \quad \text{donc} \quad \left(\frac{W7}{L7} \right) = \frac{2 \cdot ID7}{Kn \cdot (VDS7(sat))^2} = \frac{2 \times 20E-6}{40E-6 \times 0.5^2} = 4$$

De même,

$$VSD6(sat) = VDD - VOUT(max) = 5 - 4.5 = 0.5V$$

Comme $VSD6(sat) = \sqrt{\frac{2.ID6}{Kp \cdot \left(\frac{W6}{L6}\right)}}$ donc

$$\left(\frac{W6}{L6}\right) = \frac{2.ID6}{Kp \cdot (VSD6(sat))^2} = \frac{2 \times 20E-6}{15E-6 \times 0.5^2} = 10.666$$

3. Calculer le gain du second étage

$$Av2 = -\left(\frac{gm6}{gds6 + gds7}\right) = -\frac{\sqrt{2 \cdot Kp \cdot ID6 \cdot \left(\frac{W6}{L6}\right)}}{ID6 \cdot (\lambda n + \lambda p)} = -\frac{\sqrt{2 \times 15E-6 \times 20E-6 \times 10.66}}{20E-6 \times (0.02 + 0.02)} = 100$$

4. Calculer le gain du premier étage

Sachant que $Av = Av1 \times Av2 \geq 10000$ alors $Av1 \geq \frac{10000}{Av2} = 100$

5. Déterminer le courant de polarisation du premier étage.

On pose $S4 = 1$

$$ID4 = \frac{\left(\frac{W4}{L4}\right)}{\left(\frac{W6}{L6}\right)} \cdot ID6 = \frac{1}{10.66} \cdot 20E-6 = 1.875\mu A$$

De même, on pose $S5 = 1$

$$ID5 = \frac{\left(\frac{W5}{L5}\right)}{\left(\frac{W7}{L7}\right)} \cdot ID7 = \frac{1}{4} \cdot 20E-6 = 5\mu A$$

$$ID4 = \frac{ID5}{2} = 2.5\mu A = ID3$$

$$ID2 = ID1 = \frac{ID5}{2} = 2.5\mu A$$

Sélectionnez le plus grand des deux $ID4$ et ajuster la taille de $M4$

$$\left(\frac{W4}{L4}\right) = \frac{ID4}{ID6} \cdot \left(\frac{W6}{L6}\right) = \frac{2.5E-6}{20E-6} \times 10.66 = 1.333$$

6. Déterminer la taille de M1 qui permet d'obtenir le gain exigé.

$$A_{v1} = \left(\frac{g_{m1}}{g_{ds2} + g_{ds4}} \right) = \frac{\sqrt{2 \cdot K_n \cdot I_{D1} \cdot \left(\frac{W1}{L1} \right)}}{I_{D1} \cdot (\lambda_n + \lambda_p)}$$

$$\text{il vient : } \left(\frac{W1}{L1} \right) = \frac{[A_{v1} \times I_{D1} \cdot (\lambda_n + \lambda_p)]^2}{2 \cdot K_n \cdot I_{D1}} = \frac{[100 \times 2.5E-6 \cdot (0.02 + 0.02)]^2}{2 \times 40E-6 \cdot 2.5E-6} = 0.5$$

Prendre la taille minimale $\left(\frac{W1}{L1} \right) = 1$. Puis recalculer le gain du premier étage.

$$A_{v1} = \left(\frac{g_{m1}}{g_{ds2} + g_{ds4}} \right) = \frac{\sqrt{2 \cdot K_n \cdot I_{D1} \cdot \left(\frac{W1}{L1} \right)}}{I_{D1} \cdot (\lambda_n + \lambda_p)} = \frac{\sqrt{2 \times 40E-6 \cdot 2.5E-6 \cdot \left(\frac{1}{1} \right)}}{2.5E-6 \cdot (0.02 + 0.02)} = 141.42$$

$$A_v = A_{v1} \cdot A_{v2} = 141.42 \times 100 = 14142 > 10000$$

7. Calculer la taille de M5 qui satisfait la condition $CMR(\min) = -3V$.

$$V_{G1}(\min) = V_{SS} + V_{DS5}(\text{sat}) + \sqrt{\frac{2 \cdot I_{D1}}{K_n \cdot \left(\frac{W1}{L1} \right)}} + V_{TH1}$$

$$V_{DS5}(\text{sat}) = V_{G1}(\min) - V_{SS} - \sqrt{\frac{2 \cdot I_{D1}}{K_n \cdot \left(\frac{W1}{L1} \right)}} - V_{TH1}$$

$$V_{DS5}(\text{sat}) = -3 - (-5) - \sqrt{\frac{2 \times 2.5E-6}{40E-6 \cdot \left(\frac{1}{1} \right)}} - 1 = 0.65V$$

$$V_{DS5}(\text{sat}) = \sqrt{\frac{2 \cdot I_{D5}}{K_n \cdot \left(\frac{W5}{L5} \right)}} \rightarrow \left(\frac{W5}{L5} \right) = \frac{2 \cdot I_{D5}}{K_n \cdot (V_{DS5}(\text{sat}))^2} = \frac{2 \times 2.5E-6}{40E-6 \times 0.65^2} = 0.59$$

Sélectionnez la plus grande des deux valeurs. Ici, aucun ajustement nécessaire, puisque c'est la valeur utilisée plutôt dans le calcul.

8. Calculer M3 qui permet d'obtenir $CMR(\max) = 3V$.

$$VG1(\max) = VDD - \sqrt{\frac{2.ID3}{Kp \cdot \left(\frac{W3}{L3}\right)}} - VTH3 + VTH1$$

$$\left(\frac{W3}{L3}\right) = \frac{2.ID3}{Kp \cdot (VDD - VG1(\max) - |VTH3| + VTH1)^2} = \frac{2 \times 2.5E-6}{15E-6 \cdot (5 - 3 - |-1| + 1)^2} = \frac{1}{12}$$

Précédemment, nous avons déterminé S4. Or, nous avons une structure qui permet d'annoncer que S3 = S4 = 1.

Sélectionnez la plus grande des deux valeurs. $1 > 1/12$

Ici, aucun ajustement nécessaire, puisque c'est la valeur utilisée plus tôt dans le calcul.

9. Déterminer la taille de M8 qui fournit le courant principal pour le comparateur.

Pour VDS5 = 0.5V et VDS7 = 0.5V, le tension VGS8 = -3.5V ou VGS8 = 1.5V

Prenons, ID8 = 20μA.

$$\left(\frac{W8}{L8}\right) = \frac{2.ID8}{Kn \cdot (VGS8 - VTH)^2} = \frac{2 \times 20E-6}{40E-6 \cdot (1.5 - 1)^2} = 4$$

La résistance externe Rb permet de fixer le courant nécessaire pour M8.

$$Rb = \frac{0 - VG8}{ID8} = \frac{0 - (-3.5)}{20E-6} = 175K\Omega$$

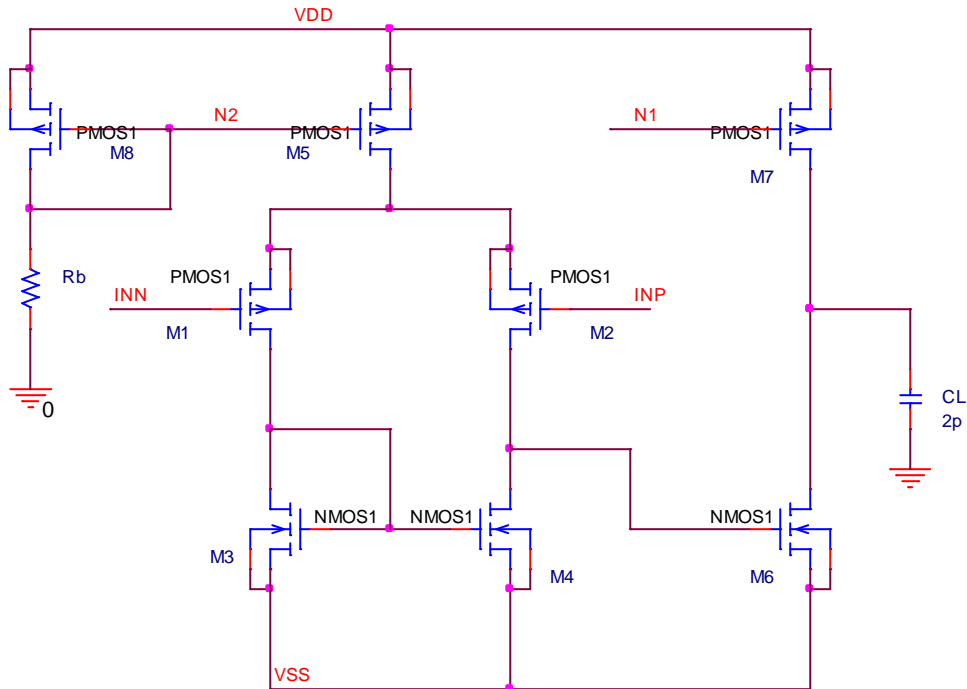
On prendra un L supérieur au moins 10 fois plus grand que Lmin = 0.6μm

Paramètres	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
I(μA)	2.5	2.5	2.5	2.5	5	20	20	20
Type	N	N	P	P	N	P	N	N
W/L	1	1	1.33	1.33	1	10.666	4	4
W(u)	6.6	6.6	7.46	7.46	6.6	59.73	22.4	22.4
L(u)	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6

Pour réduire l'offset Vos en entrée, nous allons appliquer la relation suivante :

$$\left(\frac{W6}{L6} \cdot \frac{L4}{W4}\right) = 2 \cdot \left(\frac{W7}{L7} \cdot \frac{L5}{W5}\right) \Leftrightarrow \frac{59.4}{7.2} \approx 2 \cdot \frac{22.2}{5.4} \quad (8.25 \approx 8.22)$$

Conception d'un comparateur à entrées PMOS



Sachant que :

$$VDD = 5V \text{ \& } VSS = -5V \quad Av > 10000 \quad CMR(max) = 3V \quad CMR(min) = 3V$$

$$SR = 10V/\mu s \quad VOUT(min) = -4.5V \quad VOUT(max) = 4.5V$$

$$Kn = 40\mu A/V^2 \quad Kp = 15\mu A/V^2 \quad \lambda n = \lambda p = 0.02V^{-1}$$

$$CL = 2pF$$

1. Déterminer le courant nécessaire à M7 pour satisfaire la contrainte liée au slew rate (SR).

$$ID7 = CL \cdot \left(\frac{dV}{dt} \right) = 2E-12 \times 10E6 = 20\mu A$$

2. Déterminer la taille de M6 et M7 qui permettent de satisfaire la dynamique de la tension de sortie exigée par la spec

$$VSD7(sat) = VDD - VOUT(max) = 5 - 4.5 = 0.5V$$

$$VSD7(sat) = \sqrt{\frac{2.ID7}{Kp.\left(\frac{W7}{L7}\right)}} \quad \text{donc}$$

$$\left(\frac{W7}{L7}\right) = \frac{2.ID7}{Kp.(VSD7(sat))^2} = \frac{2 \times 20E-6}{15E-6 \times 0.5^2} = 10.66$$

De même,

$$VDS67(sat) = VOUT(\min) - VSS = -4.5 - (-5) = 0.5V$$

$$VDS6(sat) = \sqrt{\frac{2.ID6}{Kn.\left(\frac{W6}{L6}\right)}} \quad \text{donc} \quad \left(\frac{W6}{L6}\right) = \frac{2.ID6}{Kn.(VSD6(sat))^2} = \frac{2 \times 20E-6}{40E-6 \times 0.5^2} = 4$$

3. Calculer le gain du second étage

$$Av2 = -\left(\frac{gm6}{gds6 + gds7}\right) = -\frac{\sqrt{2.Kn.ID6.\left(\frac{W6}{L6}\right)}}{ID6.(\lambda n + \lambda p)} = -\frac{\sqrt{2 \times 40E-6 \times 20E-6 \times 4}}{20E-6 \times (0.02 + 0.02)} = 100$$

4. Calculer le gain du premier étage

$$\text{Sachant que } Av = Av1 \times Av2 \geq 10000 \text{ alors } Av1 \geq \frac{10000}{Av2} = 100$$

5. Déterminer le courant de polarisation en fixant pour la géométrie de M4 la taille minimum à savoir $(W/L) = 1$.

$$ID4 = \frac{\left(\frac{W4}{L4}\right)}{\left(\frac{W6}{L6}\right)}.ID6 = \frac{1}{4} \times 20E-6 = 5\mu A$$

$$ID5 = 2.ID4 = 2 \times 5E-6 = 10\mu A$$

Utilisation de la taille minimale pour M5, déterminer le courant ID5 de ce miroir avec M7.

$$ID5 = \frac{\left(\frac{W5}{L5}\right)}{\left(\frac{W7}{L7}\right)}.ID7 = \frac{1}{10.66} \times 20E-6 = 1.875\mu A$$

$$ID4 = \frac{ID5}{2} = \frac{1.875\mu A}{2} = 0.937\mu A = ID3$$

$$ID2 = ID1 = \frac{ID5}{2} = \frac{1.875\mu A}{2} = 0.937\mu A$$

Sélectionnez le plus grand des deux ID4 et ajuster la taille de M4

Nous prendrons $ID4 = 5\mu A$.

6. Déterminer la taille de M1 qui permet d'obtenir le gain exigé.

$$Av1 = \left(\frac{gm1}{gds2 + gds4} \right) = \frac{\sqrt{2.Kp.ID1 \cdot \left(\frac{W1}{L1} \right)}}{ID1 \cdot (\lambda n + \lambda p)}$$

$$\text{il vient : } \left(\frac{W1}{L1} \right) = \frac{[Av1 \times ID1 \cdot (\lambda n + \lambda p)]^2}{2.Kp.ID1} = \frac{[100 \times 5E-6 \cdot (0.02 + 0.02)]^2}{2 \times 15E-6 - 6 \times 5E-6} = 2.66$$

7. La taille minimum de M5 (ratio = 1) à l'étape 5 doit être ajustée pour satisfaire le CMR négatif de -3V.

$$VG1(\max) = VDD - VSD5(\text{sat}) - VSG1$$

$$VG1(\max) = VDD - VSD5(\text{sat}) - \sqrt{\frac{2.ID1}{Kp \cdot \left(\frac{W1}{L1} \right)}} - |VTH1|$$

$$VSD5(\text{sat}) = VDD - VG1(\max) - \sqrt{\frac{2.ID1}{Kp \cdot \left(\frac{W1}{L1} \right)}} - |VTH1|$$

$$VSD5(\text{sat}) = 5 - 3 - \sqrt{\frac{2 \times 5E-6}{15E-6 \cdot (2.66)}} - 1 = 0.5V$$

$$VSD5(\text{sat}) = \sqrt{\frac{2.ID5}{Kp \cdot \left(\frac{W5}{L5} \right)}} \rightarrow \left(\frac{W5}{L5} \right) = \frac{2.ID5}{Kp \cdot (VSD5(\text{sat}))^2} = \frac{2 \times 10E-6}{15E-6 \times 0.65^2} = 5.33$$

Sélectionnez la valeur la plus grande des deux, puis ajuster M7.

$$\left(\frac{W7}{L7} \right) = \frac{17}{15} \cdot \left(\frac{W5}{L5} \right) = \frac{20}{10} \times 5.33 = 10.66$$

8. La taille minimum de M3 ou M4 (= 1) doit être ajusté pour répondre au $CMR(\min) = -3V$.

$$VG1(\min) = VSS + \sqrt{\frac{2.ID3}{Kn.\left(\frac{W3}{L3}\right)}} + VTH3 - |VTH1|$$

$$\left(\frac{W3}{L3}\right) = \frac{2.ID3}{Kp.(VG1(\min) - VSS - VTH3 + VTH1)^2} = \frac{2 \times 2.5E-6}{40E-6.(-3 - (-5) - 1 + |-1|)^2} = \frac{1}{16}$$

Parmi les deux valeurs on prendra la plus grande soit $\left(\frac{W3}{L3}\right) = 1$

9. Déterminer la taille de M8 qui fournit le courant principal du comparateur.

Pour VSD5 = 0.5V et VSD7 = 0.5V, le tension VGS8 = 3.5V ou VGS8 = 1.5V

Prenons, ID8 = 20μA.

$$\left(\frac{W8}{L8}\right) = \frac{2.ID8}{Kp.(VGS8 - VTP)^2} = \frac{2 \times 20E-6}{15E-6.(5 - 3.5 - 1)^2} = 10.66$$

La résistance externe Rb permet de fixer le courant nécessaire pour M8.

$$Rb = \frac{VG8 - 0}{ID8} = \frac{3.50 - 0}{20E-6} = 175K\Omega$$

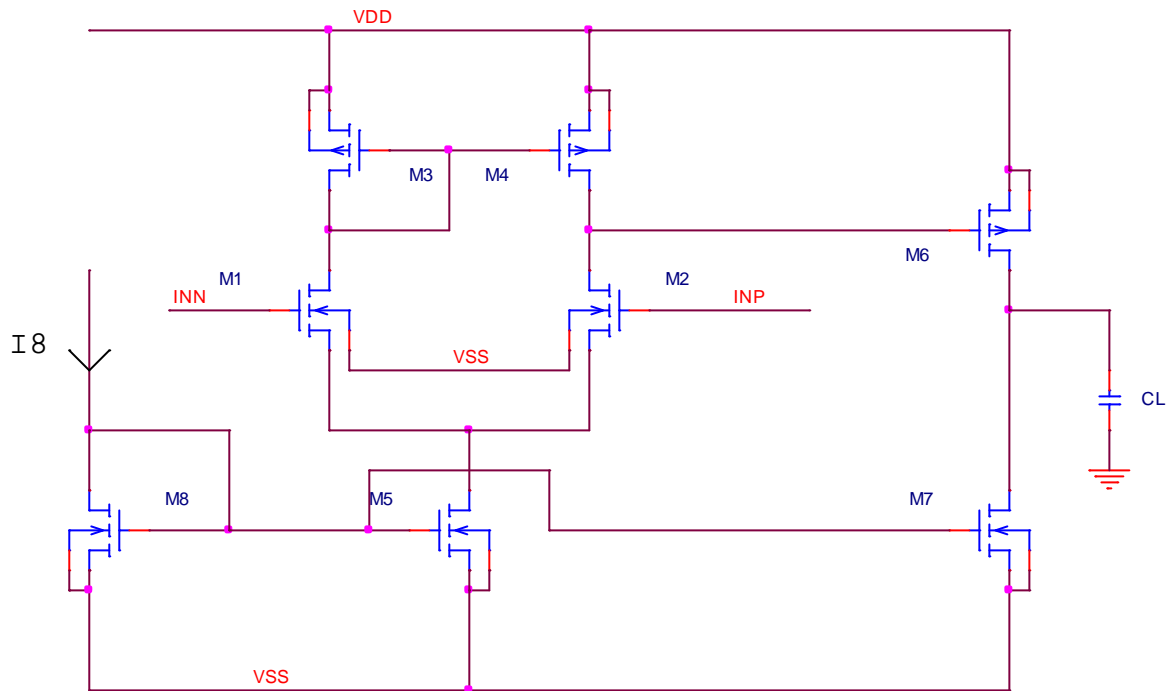
Bilan :

Paramètres	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
I(μA)	5	5	5	5	10	20	20	20
Type	P	P	N	N	P	N	P	P
W/L	2.66	2.66	1	1	5.33	4	10.66	10.66
W(u)	15	15	5.4	5.4	30	21.6	60	60
L(u)	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6

Pour réduire l'offset Vos en entrée, nous allons appliquer la relation suivante :

$$\left(\frac{W6}{L6}\right) = 2. \left(\frac{W7}{L7}\right) \Leftrightarrow \frac{21.6}{5.4} = 2. \frac{60}{30} \quad (4=4)$$

Méthode 1 :



Techno AMI 1.5u :

$$K_n = 75.5 \mu\text{A}/\text{V}^2 \quad \lambda_n = 0.07 \text{V}^{-1} \quad V_{TN} = 0.68 \text{V}$$

$$K_p = 21.5 \mu\text{A}/\text{V}^2 \quad \lambda_p = 0.12 \text{V}^{-1} \quad V_{TN} = 0.75 \text{V}$$

Calcul du temps de propagation :

$$t_p = RC \cdot \ln\left(\frac{2k}{2k-1}\right) \quad \text{avec} \quad k = \frac{V_{in}}{V_{in(\min)}}$$

Sachant que R est la résistance totale équivalente et que C correspond à la capacité totale équivalente de l'étage de sortie du comparateur.

$$\text{Prenons } k = 1 \text{ donc } t_p = RC \ln 2 = 0.693RC$$

Notre circuit possède une charge $CL = 5 \text{pF}$.

$$\text{Pour un } t_p \text{ de } 0.60 \mu\text{s} \text{ on aura : } 0.60 \mu\text{s} = 0.693 \times R \times 5 \times 10^{-12} \Leftrightarrow R = 174.3 \text{K}\Omega$$

Sachant que la résistance R correspond à la résistance de sortie ($r_{ds6} // r_{ds7}$).

$$\text{On peut écrire : } (r_{ds6} // r_{ds7}) = R \Leftrightarrow R = \left(\frac{1}{\lambda_n \cdot ID_7} // \frac{1}{\lambda_p \cdot ID_6} \right)$$

Comme $ID_6 = ID_7 = ID$ il vient $\lambda_n.ID + \lambda_p.ID = \frac{1}{R}$

Au final : $ID_6 = ID_7 = ID = 43\mu A$

Bien évidemment, nous prendrons une marge de tolérance soit $ID = 50\mu A$

Supposons que ID_5 vaut un cinquième de ID_7 donc $ID_5 = \left(\frac{ID_7}{5}\right)$

Si les transistors M1,M2 et M3,M4 sont appariés :

$$ID_1 = ID_2 = ID_3 = ID_4 = \frac{ID_5}{2} = 5\mu A$$

Concernant la taille de M6 :

$$V_{DS(sat)} = \sqrt{\frac{2.ID}{K.\left(\frac{W}{L}\right)}} \quad \text{si on prend } V_{DS(sat)} = 0.5V$$

$$\text{Donc } \left(\frac{W_6}{L_6}\right) = \frac{2.ID_6}{K_p.(V_{DS6(sat)})^2} = \frac{2 \times 50E-6}{21.5E-6 \times 0.5^2} = 18.60$$

$$g_{m6} = \sqrt{2.ID_6.K_p.\left(\frac{W_6}{L_6}\right)} = \sqrt{2 \times 50E-6 \times 21.5E-6 \times 20} = 207.36\mu A/V$$

$$g_{m6} = \sqrt{2.ID_6.K_p.\left(\frac{W_6}{L_6}\right)} \Leftrightarrow (g_{m6})^2 = 2.ID_6.K_p.\left(\frac{W_6}{L_6}\right)$$

$$\left(\frac{W_6}{L_6}\right) = \frac{(g_{m6})^2}{2.ID_6.K_p} = \frac{(207.2E-6)^2}{2 \times 50E-6 \times 21.5E-6} = 19.968 \approx 20$$

Le gain est un des paramètres importants pour un comparateur.

On sait que : $A_v = A_{v1} \times A_{v2}$

Pour $A_v(\min) = 2500$, on fixe $A_{v1}=100$ et $A_{v2} = 25$

$$A_{v1} = g_{m2}.(r_{ds2} // r_{ds4}) = 100$$

$$rds2 = \left(\frac{1}{\lambda n \cdot ID2} \right) = 2.85 M\Omega$$

$$rds4 = \left(\frac{1}{\lambda p \cdot ID4} \right) = 1.66 M\Omega$$

$$gm2 = \frac{100}{(rds2 // rds4)} = 95.2 \mu A/V \quad \text{avec } (rds2 // rds4) = 1.05 M\Omega$$

Nous allons pouvoir calculer la taille de M2.

$$gm2 = \sqrt{2 \cdot ID2 \cdot Kn \cdot \left(\frac{W2}{L2} \right)} \Leftrightarrow \left(\frac{W2}{L2} \right) = 12.02 \approx 12$$

$$\text{Comme M1 et m2 sont identiques : } \left(\frac{W1}{L2} \right) = 12$$

On sait que $VDS3 = VGS6$

$$VGS6 = \sqrt{\frac{2 \cdot ID6}{Kp \cdot \left(\frac{W6}{L6} \right)}} + |VT| = \sqrt{\frac{2 \times 50E-6}{21.5E-6 \times 20}} + 0.75 = 1.237V$$

Comme $VDS4 = VDS3$ et que $VDS3 = VGS3 = VGS4$

Alors $VGS4 = 1.237V$

$$VGS4 = \sqrt{\frac{2 \cdot ID4}{Kp \cdot \left(\frac{W4}{L4} \right)}} + |VT| \Leftrightarrow (VGS4 - |VT|)^2 = \frac{2 \cdot ID4}{Kp \cdot \left(\frac{W4}{L4} \right)} \Leftrightarrow \left(\frac{W4}{L4} \right) = \frac{2 \cdot ID4}{Kp \cdot (VGS4 - |VT|)^2}$$

$$\left(\frac{W4}{L4} \right) = \frac{2 \cdot ID4}{Kp \cdot (VGS4 - |VT|)^2} = \frac{2 \times 5E-6}{21.5E-6 \times (1.237 - 0.75)^2} = \frac{10E-6}{5.099E-6} \cdot 1.96 \approx 2$$

$$\left(\frac{W3}{L3} \right) = \left(\frac{W4}{L4} \right) = 2$$

Maintenant, la taille de la M5 est obtenue en prenant en compte les besoins CMR. Le transistor M5 doit rester de la saturation.

Il faut que : $VDS5 = VGS5 - VT5$

$$CMR(\min) - VGS1 - (-VSS) = VGS5 - VT5$$

Avec $CMR(\min) = -3V$

Méthode 2 :

Equation de base pour dimensionner un comparateur.

$$PI = PII = \frac{1}{tp \cdot \sqrt{m \cdot k}} \quad \text{on prends } m = 1$$

$$I6 = I7 = \frac{PII \cdot CL}{\lambda_n + \lambda_p} \quad k = \frac{Vin}{Vin(\min)}$$

$$\left(\frac{W6}{L6}\right) = \frac{2 \cdot ID6}{Kp \cdot (VSD6(\text{sat}))^2} \quad \text{avec } VSD6(\text{sat}) = VDD - VOH$$

$$\left(\frac{W7}{L7}\right) = \frac{2 \cdot ID7}{Kn \cdot (VSD7(\text{sat}))^2} \quad \text{avec } VSD7(\text{sat}) = VOL - VSS$$

$$I5 = I7 \cdot \frac{CI}{CL}$$

$$\left(\frac{W3}{L3}\right) = \left(\frac{W4}{L4}\right) = \frac{ID3}{Kp \cdot (VSG3 - |VTP|)^2} \quad \text{et } VSG3 = VDD - VP(\text{icm}) + VTN$$

$$gm1 = \frac{Av(0) \cdot (gds2 + gds4) \cdot (gds6 + gds7)}{gm6}$$

$$\text{avec } gm6 = \sqrt{2 \cdot ID6 \cdot Kp \cdot \left(\frac{W6}{L6}\right)} \quad \text{et } Av(0) = \frac{VOH - VOL}{VIN(\min)}$$

$$\left(\frac{W1}{L1}\right) = \left(\frac{W2}{L2}\right) = \frac{(gm1)^2}{Kn \cdot I5}$$

$$VDS5(\text{sat}) = VM(\text{icm}) - VGS1 - VSS$$

$$\left(\frac{W5}{L5}\right) = \frac{2 \cdot I5}{Kn \cdot (VDS5(\text{sat}))^2}$$

Exemple :

$$Tp = 50\text{ns} \quad VOH = 2\text{V} \quad VOL = -2\text{V}$$

$$VDD = 2.5\text{V} \quad VSS = -2.5\text{V} \quad VIN(\min) = 1\text{mV} \quad CL = 5\text{pF}$$

$$CRM(\max) = 2\text{V} \quad CRM(\min) = -1.25\text{V}$$

$$PI = PII = \frac{10E-9}{50 \cdot \sqrt{10}} = 6.32E6 \text{ rad/s}$$

$$I6 = I7 = \frac{PII \times CL}{\lambda n + \lambda p} = \frac{6.32E6 \times 5E-12}{0.04 + 0.5} = 351\mu A \quad \rightarrow I6 = I7 = 400\mu A$$

$$\left(\frac{W6}{L6}\right) = \frac{2 \cdot ID6}{Kp \cdot (VSD6(sat))^2} = \frac{2 \times 400E-6}{50E-6 \times (0.5)^2} = 64$$

$$\left(\frac{W7}{L7}\right) = \frac{2 \cdot ID7}{Kn \cdot (VDS7(sat))^2} = \frac{2 \times 400E-6}{110E-6 \times (0.5)^2} = 29$$

En général : $0.1pF < CI < 0.5pF$

$$\text{En prenant : } CI = 0.2pF \quad \text{donc } I5 = I7 \cdot \frac{2 \cdot CI}{CL} = 400E-6 \cdot \frac{2 \times 0.2E-12}{5E-12} = 32\mu A$$

Nous prendrons un marge, ainsi $I5 = 40\mu A$.

$$VSG3 = VDD - CMR(\max) + VTN = 2.5 - 2 + 0.7 = 1.2V$$

$$\left(\frac{W3}{L3}\right) = \left(\frac{W4}{L4}\right) = \frac{ID3}{Kp \cdot (VSG3 - |VTP|)^2} = \frac{40E-6}{50 \cdot (1.2 - 0.7)^2} = 3.2 \quad 4$$

Gain du comparateur en boucle ouverte

Sachant que $VIN(\min)$ représente la résolution du comparateur, on fixe $VIN(\min) = 1mV$

$$Av(0) = \frac{VOH - VOL}{VIN(\min)} = \frac{2 - (-2)}{1E-6} = 4000$$

$$gm6 = \sqrt{2 \cdot ID6 \cdot Kp \cdot \left(\frac{W6}{L6}\right)} = \sqrt{2 \times 400E-6 \times 50E-6 \times 64}$$

$$gm1 = \frac{Av(0) \cdot (gds2 + gds4) \cdot (gds6 + gds7)}{gm6}$$

$$\left(\frac{W1}{L1}\right) = \left(\frac{W2}{L2}\right) = \frac{(gm1)^2}{Kn \cdot I5} = \frac{(162E-6)^2}{110E-6 \times 40E-6} = 5.96 \quad 6$$

$$VGS1 = \sqrt{\frac{2 \cdot ID1}{Kn \cdot \left(\frac{W1}{L1}\right)}} + VT = \sqrt{\frac{2 \times 40E-6}{110E-6 \times 4}} + 0.70 = 0.946V$$

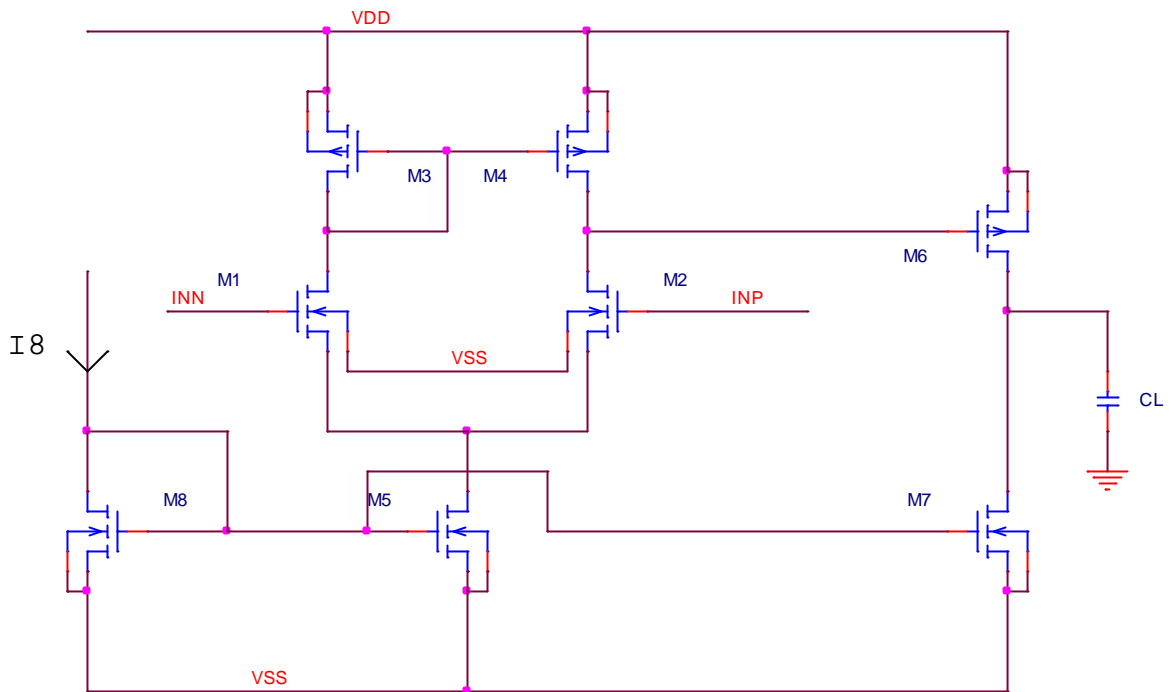
$$V_{DS5(sat)} = V_{CRM}(\min) - V_{GS1} - V_{SS} = -1.25 - 0.946 - (-2.5) = 0.304V$$

$$\left(\frac{W5}{L5}\right) = \frac{2.15}{K_n \cdot (V_{DS5(sat)})^2} = \frac{2 \times 40E-6}{110E-6 \times (0.304)^2} = 7.87 \approx 8$$

Bilan : en prenant $W = 1\mu$

Paramètres	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Type	N	N	P	P	N	P	N
W/L	6	6	4	4	8	64	29
W(u)	6	6	4	4	8	64	29
L(u)	1	1	1	1	1	1	1

Méthode 3 :



$$A_{v0} > 66\text{db} \quad V_{DD} = 10\text{V} \quad V_{SS} = 0\text{V}$$

$$C_L = 2\text{pF} \quad t_p < 1\mu\text{s} \quad \lambda = 0.05$$

$$4\text{V} < \text{CMR} < 6\text{V} \quad V_{SS} + 2\text{V} < V_{OUT} < V_{DD} + 2\text{V}$$

Pour les paramètres technologiques :

$$V_{TN} = 1\text{V} \quad V_{TP} = -1\text{V} \quad K_n = 17\mu\text{A}/\text{V}^2 \quad K_p = 8\mu\text{A}/\text{V}^2 \quad \lambda = 0.05\text{V}^{-1}$$

1. Pour un temps de propagation $t_p < 1\mu\text{s}$, on peut se fixer $\text{SR} = 100\text{V}/\mu\text{s}$.

$$I_{D7} = C_L \cdot \frac{dV_{OUT}}{dt} = 2\text{E}-12 \times 100\text{E}-6 = 200\mu\text{A}$$

2. Pour calculer M6 et M7 on doit tenir compte de la plage de tension en sortie

Pour $V_{DS7_sat} > 2\text{V}$, il faut que :

$$V_{DS7} = \sqrt{\frac{2 \cdot I_{D7}}{K_n \cdot \left(\frac{W7}{L7}\right)}} \Leftrightarrow \left(\frac{W7}{L7}\right) = \frac{2 \cdot I_{D7}}{K_n \cdot (V_{DS7})^2} = \frac{2 \times 200\text{E}-6}{17\text{E}-6 \times 4} = 5.88$$

$$\text{donc} \left(\frac{W7}{L7}\right) > 5.88$$

De même : $V_{DS6_sat} > 2V$

$$V_{DS6} = \sqrt{\frac{2 \cdot ID6}{Kp \cdot \left(\frac{W6}{L6}\right)}} \Leftrightarrow \left(\frac{W6}{L6}\right) = \frac{2 \cdot ID6}{Kp \cdot (V_{DS6})^2} = \frac{2 \times 200E-6}{8E-6 \times 4} = 12.5$$

Il faut que $\left(\frac{W6}{L6}\right) > 12.5$

3. On sait que :

$$A2 = \frac{gm6}{gds6 + gds7} = \frac{1}{\lambda_n + \lambda_p} \cdot \sqrt{2 \cdot ID \cdot Kp \cdot \left(\frac{W6}{L6}\right)} = \frac{1}{0.05 + 0.05} \cdot \sqrt{\frac{2 \times 8E-6 \times 12.5}{200E-6}} = 10$$

4. Puis : $A_{v0} = A1 \cdot A2 = 66dB$

Grâce à la relation : $A = 10^{\left(\frac{Gdb}{20}\right)} \rightarrow A_{v0} = 10^{\left(\frac{66}{20}\right)} = 10^{3.3} \approx 2000$

$$A_{v0} = A1 \cdot A2 \approx 2000 \rightarrow A1 = \frac{2000}{10} = 200$$

5. On considère que $V_{GS4} = V_{GS6}$ donc $\frac{I4}{I6} = \frac{S4}{S6}$

si on choisit $S4 = 1$ donc $I4 = \frac{200\mu A}{12.5} = 16\mu A$

avec $S5 = 1$ alors $I4 = \frac{200\mu A}{5.88} = 34\mu A$

Comme $ID4 = \frac{ID5}{2} = 17\mu A$ on prendra $I4 = 17\mu A$ pour conserver un ratio plus grand que 1.

Puisque $I5 = 34\mu A$, il vient $\left(\frac{W4}{L4}\right) = \left(\frac{W6}{L6}\right) \cdot \left(\frac{17}{200}\right) = 1.06 \approx 1$

6. Puissance dissipée :

$$P_{diss} = 10 \cdot (ID7 + ID5) = 2.34mW$$

7. $A1 = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot Kp \cdot \left(\frac{W1}{L1}\right)}{ID4}} \Leftrightarrow \left(\frac{W1}{L1}\right) = [(\lambda_1 + \lambda_4) \cdot A1]^2 \cdot \frac{ID4}{2 \cdot Kp} = 200$

Le ratio est suffisamment grand pour limiter l'effet du bruit sur la paire différentielle.

8.

$$V_{DS5} = V_{G1(\min)} - V_{SS} - \sqrt{\frac{I_{D5}}{2 \cdot I_{D1} \cdot \left(\frac{W1}{L1}\right)}} - V_T$$

$$V_{DS5} = 4 - 0 - \sqrt{\frac{34E-6}{2 \times 17E-6 \times 200E-6}} - 1 = 2.90V$$

$$V_{DS5} = \sqrt{\frac{2 \cdot I_{D5}}{K_n \times \left(\frac{W5}{L5}\right)}} = \sqrt{\frac{2 \times 34E-6}{17E-6 \times \left(\frac{W5}{L5}\right)}} \Leftrightarrow \left(\frac{W5}{L5}\right) > 0.48$$

$$9. \quad S5 = \frac{I_{D5}}{I_{D7}} \cdot S7 = \frac{34E-6}{200E-6} \cdot 5.88 = 1 \rightarrow \left(\frac{W5}{L5}\right) = 1$$

Augmenter L pour réduire l'offset

$$V_{G1(\max)} = V_{DD} - \sqrt{\frac{I_{D5}}{\beta_3}} - |V_{TP}| + V_{TN}$$

$$\beta_3 = \frac{I_{D5}}{\left[V_{DD} - V_{G1(\max)} - |V_{TP}| + V_{TN}\right]^2} = \frac{34E-6}{(10-6-1+0.5)^2} = 2.76E-6$$

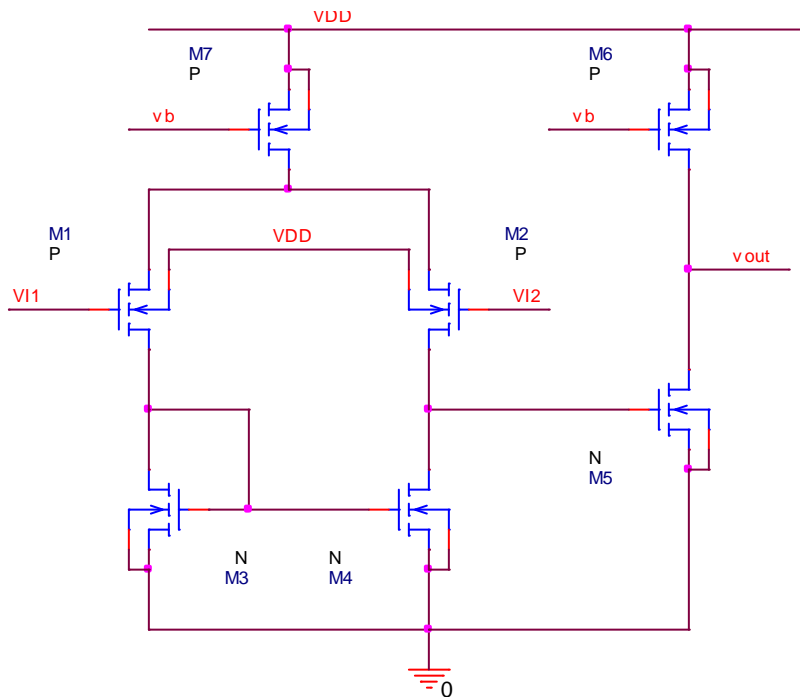
$$\left(\frac{W3}{L3}\right) = \frac{2.76E-6 \times 2}{8E-6} = 0.69 \quad \text{donc} \quad \left(\frac{W3}{L3}\right) = \left(\frac{W4}{L4}\right) > 0.69$$

Ratio	Taille
$\frac{W1}{L1} = 200$	$\frac{W1}{L1} = \frac{1000}{5}$
$\frac{W3}{L3} = \frac{W4}{L4} = 1$	$\frac{W3}{L3} = \frac{W4}{L4} = \frac{5}{5}$
$\frac{W5}{L5} = 1$	$\frac{W5}{L5} = \frac{5}{5}$
$\frac{W6}{L6} = 12.5$	$\frac{W6}{L6} = \frac{62.5}{5}$
$\frac{W1}{L1} = 5.88$	$\frac{W7}{L7} = \frac{30}{5}$

Afin d'obtenir une bonne recopie en courant du miroir, on réalise l'ajustement suivant :

$$\frac{S6}{S4} = 2 \cdot \frac{S7}{S5} \quad \text{par conséquent} \quad \frac{W6}{L6} = \frac{60}{5}$$

En cours



Output swing = 2.5V

$$\text{On suppose que } V_{OD5} \approx V_{OD6} = \frac{V_{DD} - \text{swing}}{2} = \frac{3 - 2.5}{2} = 0.25V$$

$$\left(\frac{W5}{L5}\right) = \frac{2 \times 1mA}{134.22E - 6 \cdot (0.25)^2 \cdot (1 + 0.1 \times 0.25)} = 233$$

$$\left(\frac{W6}{L6}\right) = \frac{2 \times 1mA}{38.36E - 6 \cdot (0.25)^2 \cdot (1 + 0.2 \times 0.25)} = 795 ..$$

Comme $I_{D7} = 1mA$ alors $I_{D3} = I_{D4} = 0.5mA$

$$V_{GS5} - V_{TH} = 0.25V \Rightarrow V_{GS5} = 0.25 + V_{TH} = 0.95V$$

De même

$$V_{GS3} - V_{TH} = 0.25V$$

$$\left(\frac{W3}{L3}\right) = \left(\frac{W4}{L4}\right) = \frac{2 \times 0.5 \text{mA}}{134.22 \text{E} - 6 \cdot (0.25)^2 \cdot (1 + 0.1 \times 0.25)} = 116$$

$$A_v = g_{m1} \cdot (r_{o2} // r_{o4}) \cdot g_{m5} \cdot (r_{o5} // r_{o6})$$

$$r_{o2} = \frac{1}{\lambda \cdot I_D} = \frac{1}{0.2 \times 0.5 \text{mA}} = 10 \text{K}\Omega$$

$$r_{o4} = \frac{1}{\lambda \cdot I_D} = \frac{1}{0.1 \times 0.5 \text{mA}} = 20 \text{K}\Omega$$

$$r_{o2} // r_{o4} = 6.67 \text{K}\Omega$$

$$g_{m5} = \frac{2 \cdot I_D}{V_{GS} - V_{TH}} = \frac{2 \times 1 \text{mA}}{0.25} = 8 \text{mS}$$

$$r_{o5} = \frac{1}{\lambda \cdot I_D} = \frac{1}{0.1 \times 0.1 \text{mA}} = 10 \text{K}\Omega$$

$$r_{o6} = \frac{1}{\lambda \cdot I_D} = \frac{1}{0.2 \times 1 \text{mA}} = 5 \text{K}\Omega$$

$$g_{m5} \cdot (r_{o5} // r_{o6}) = 8 \text{mS} \times (10 \text{K} // 5 \text{K}) = 26.7$$

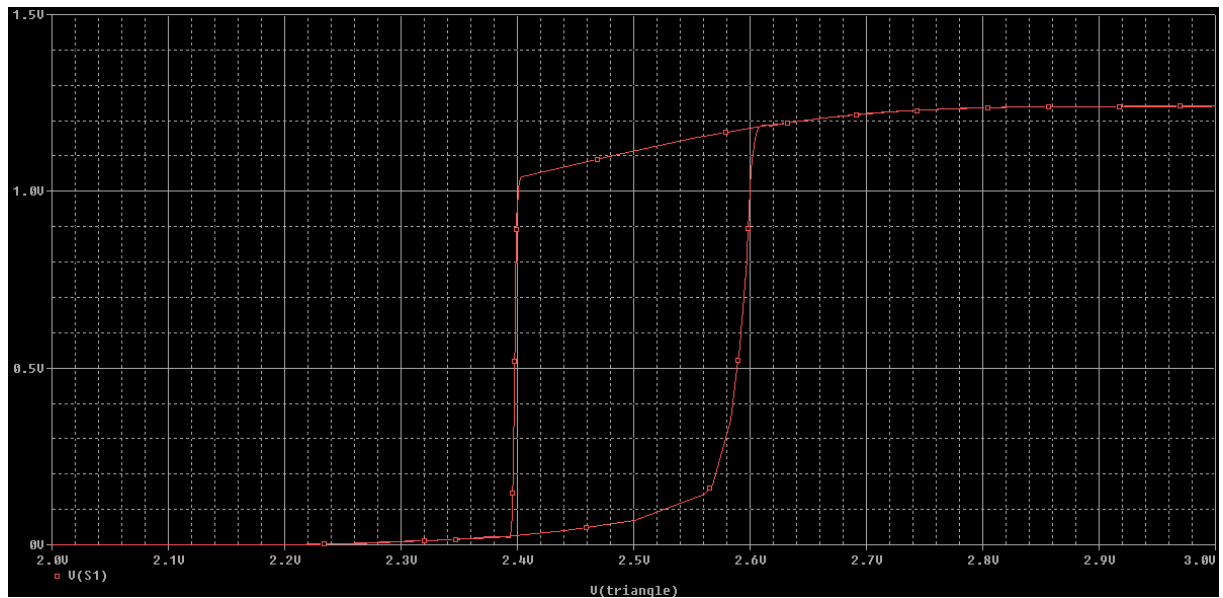
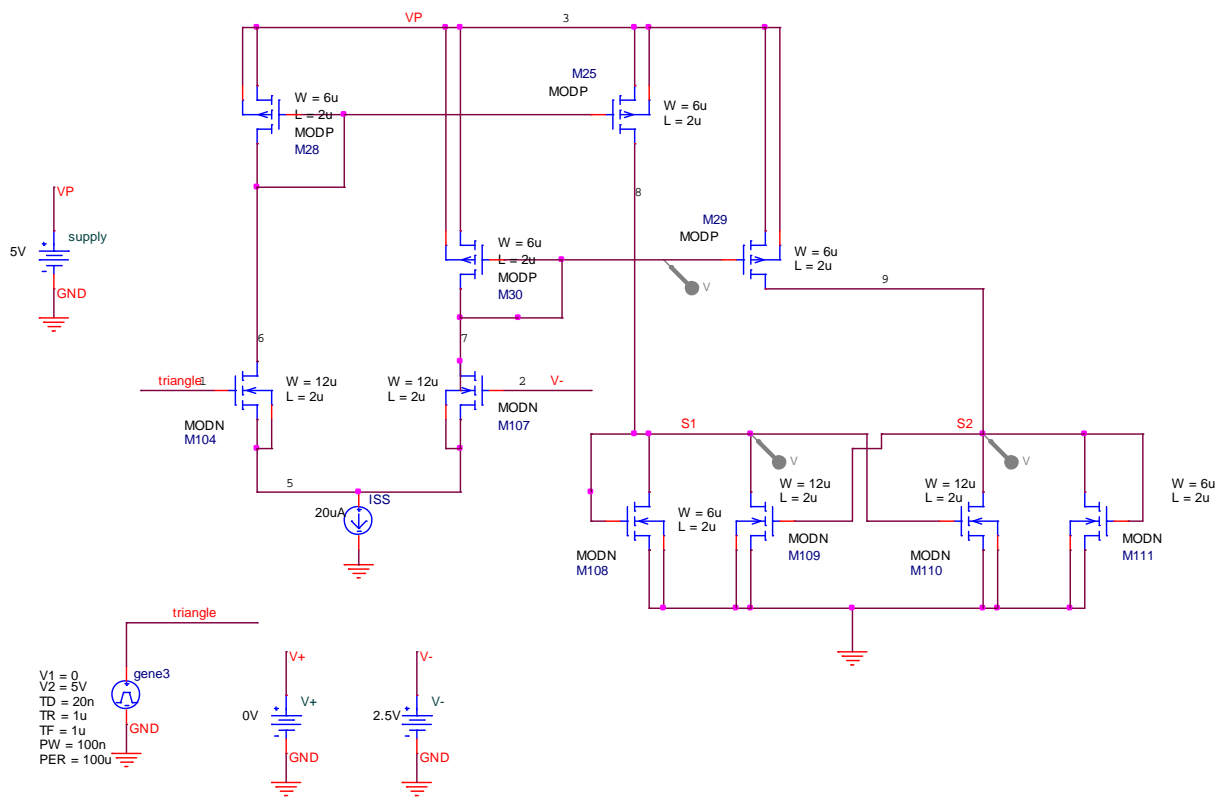
Au final,

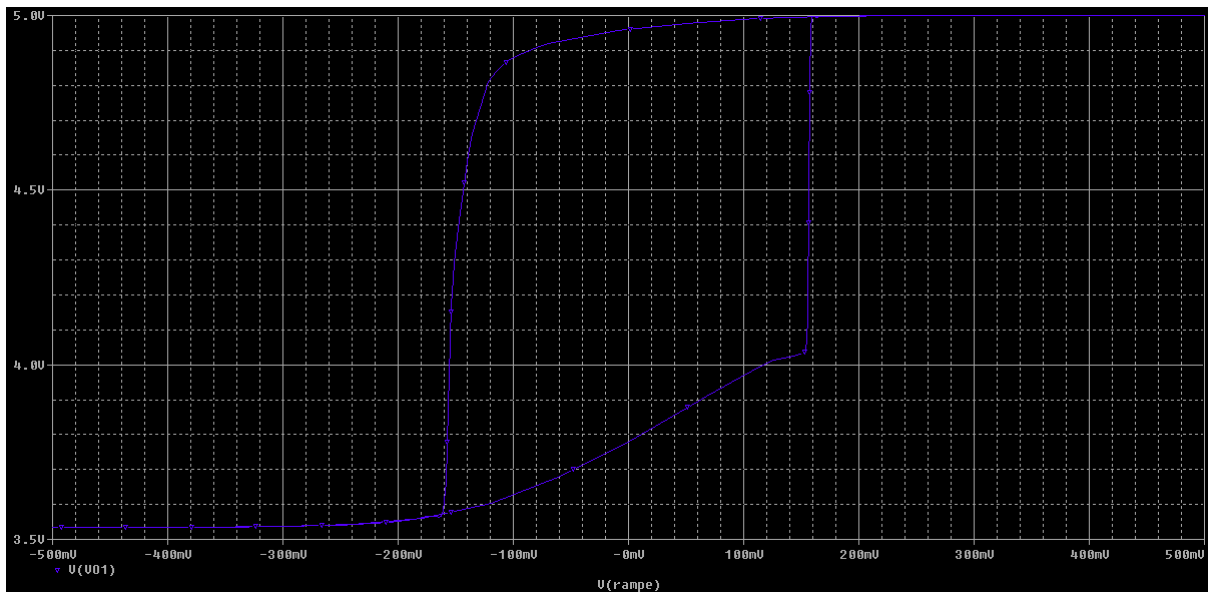
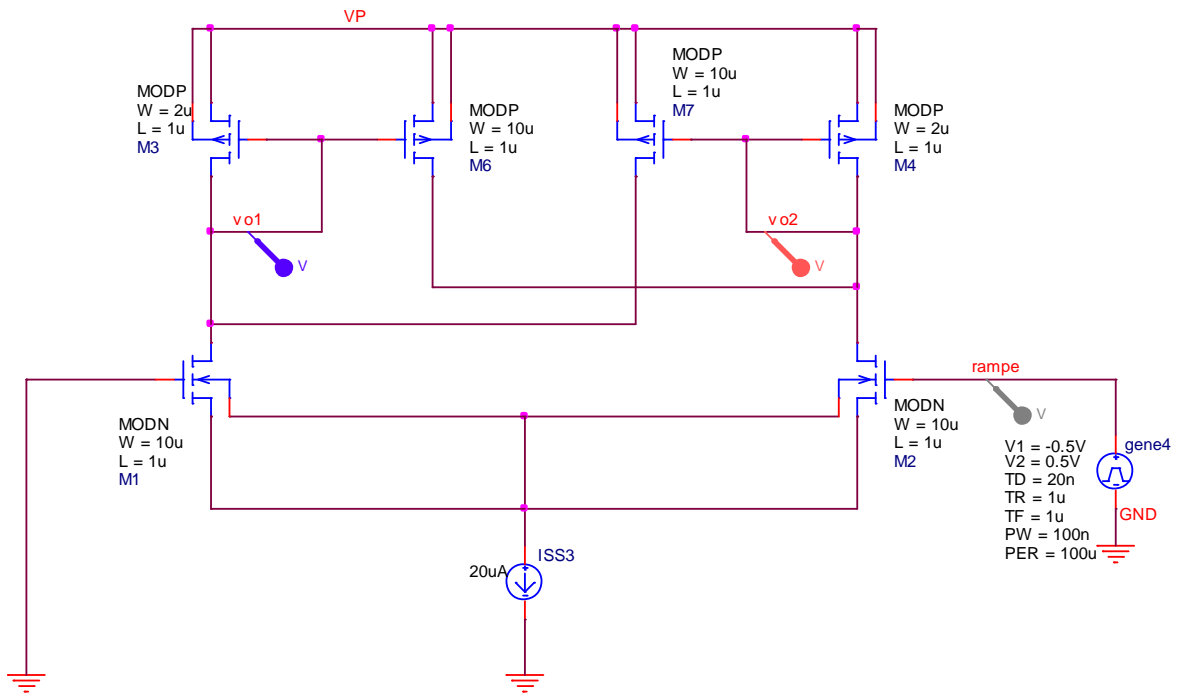
$$A_v = g_{m1} \times (6.67 \text{K}) \times 26.7 = 500 \rightarrow g_{m1} = 2.81 \text{mS}$$

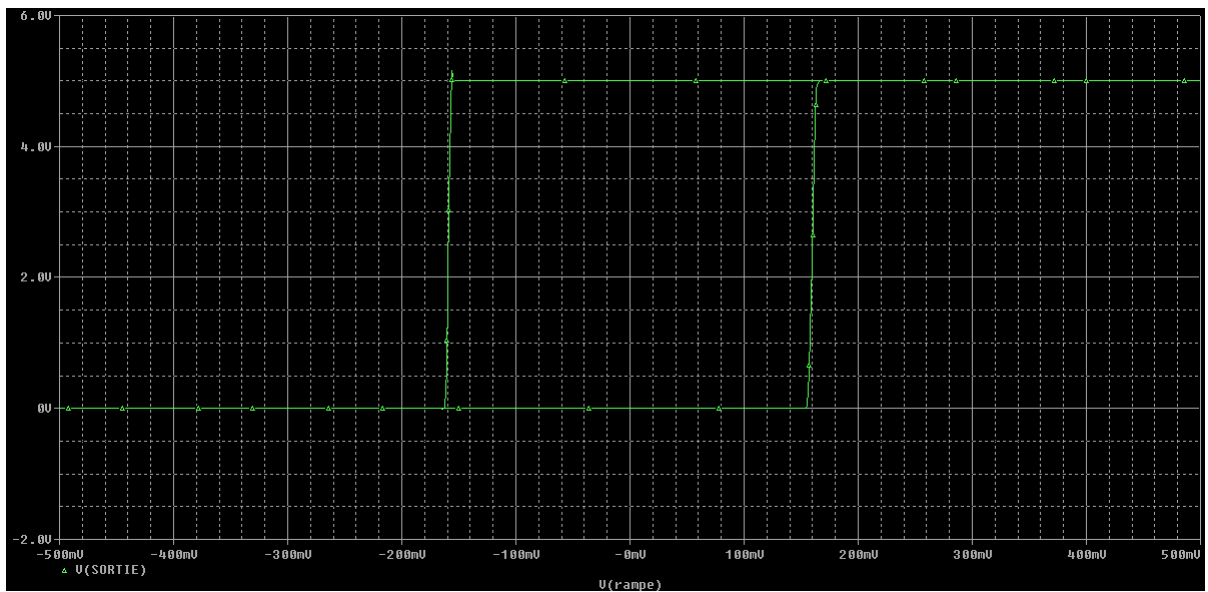
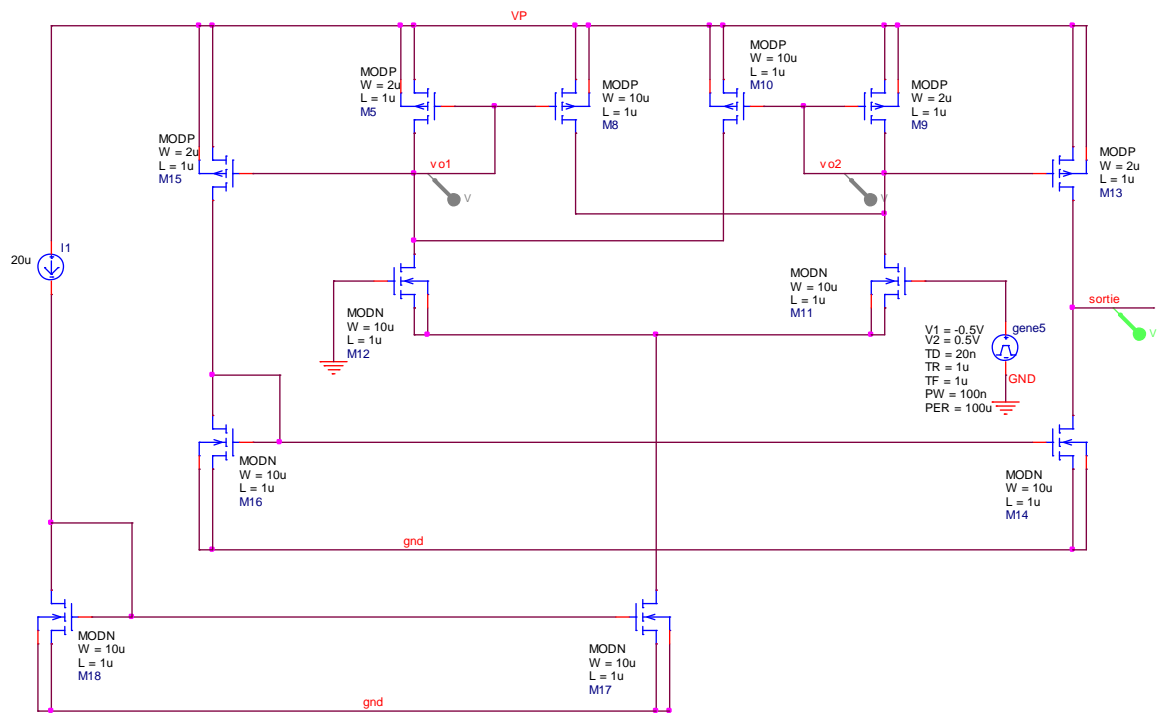
$$\text{Comme } g_m = \sqrt{2 I_D \times C_{ox} \times \mu \times \left(\frac{W}{L}\right)}$$

$$\text{Il vient : } \left(\frac{W1}{L1}\right) = \frac{(g_{m1})^2}{2 I_D \times C_{ox} \times \mu} = \frac{2.81 \text{mS}}{2 \times 0.5 \text{mA} \times 38.36 \text{E} - 6} = 206$$

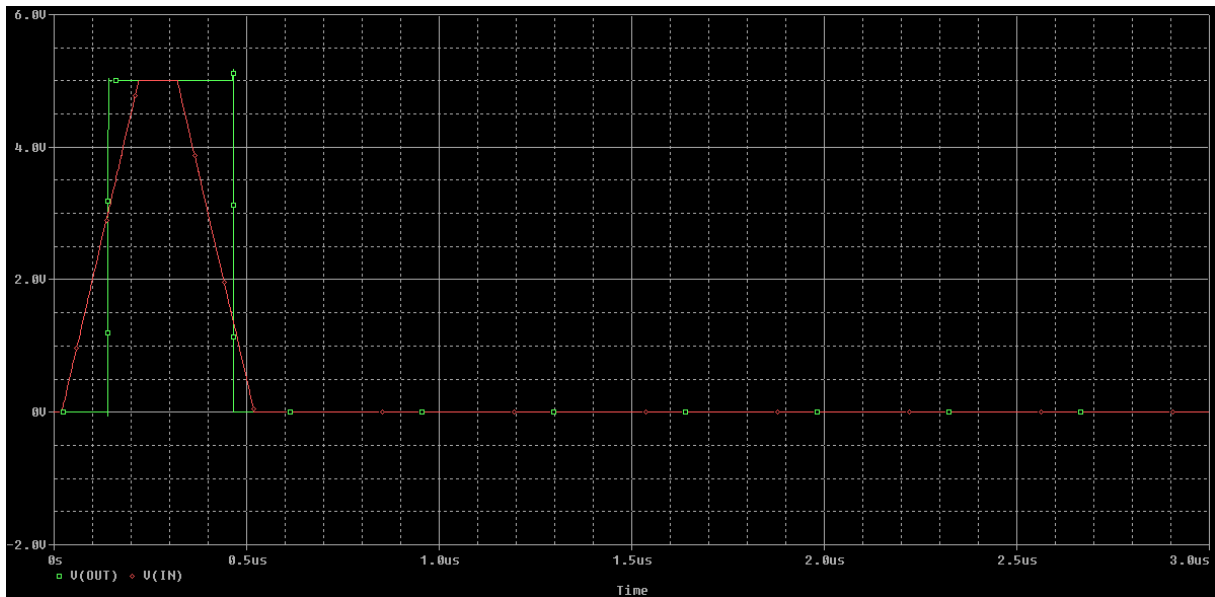
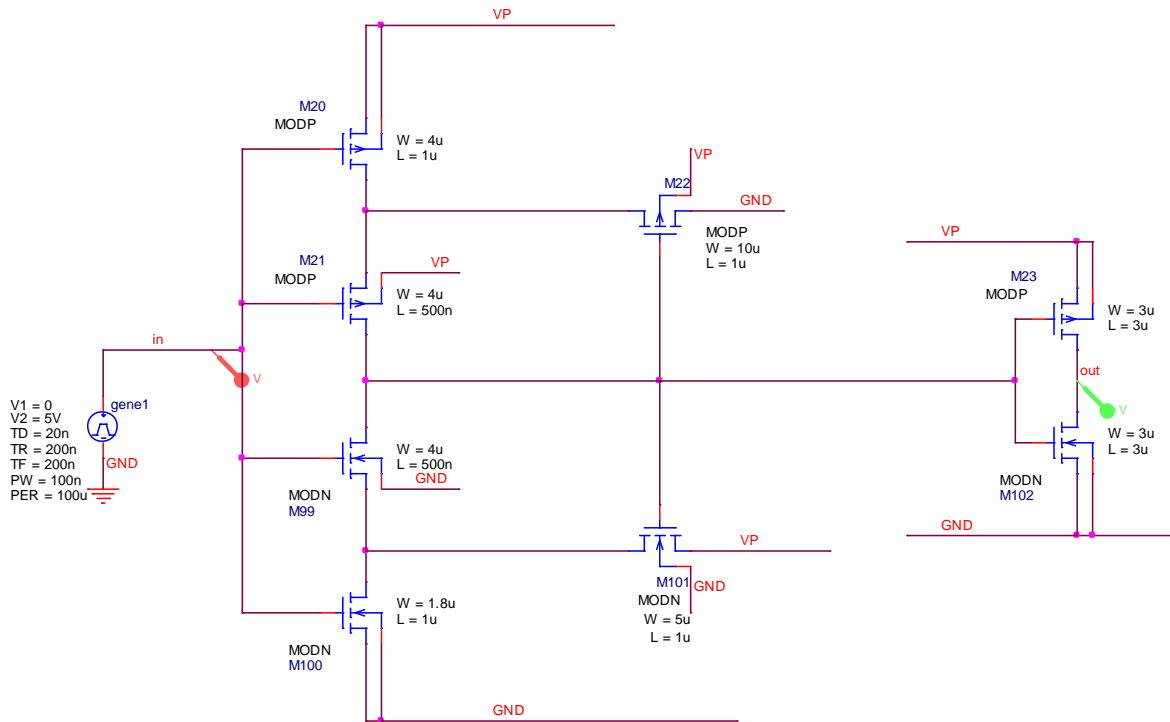
Comparateur à Hystérésis :







Trigger de schmitt :



Oscillateur :

