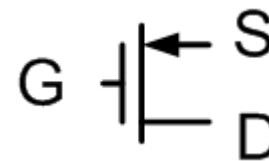
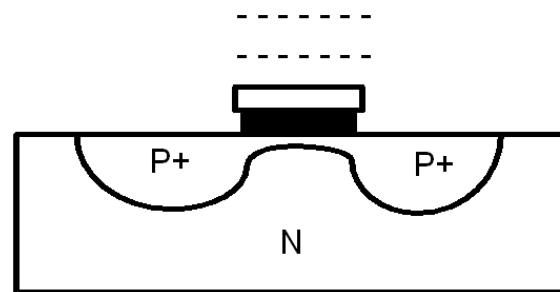
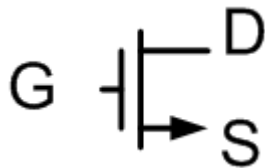
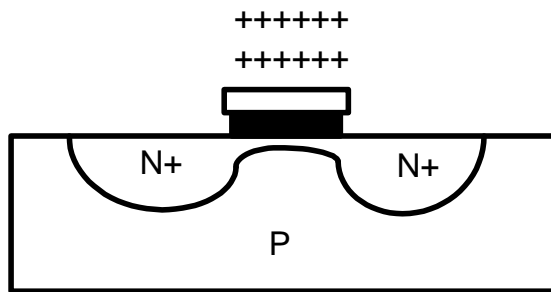


Électronique

Transistors CMOS

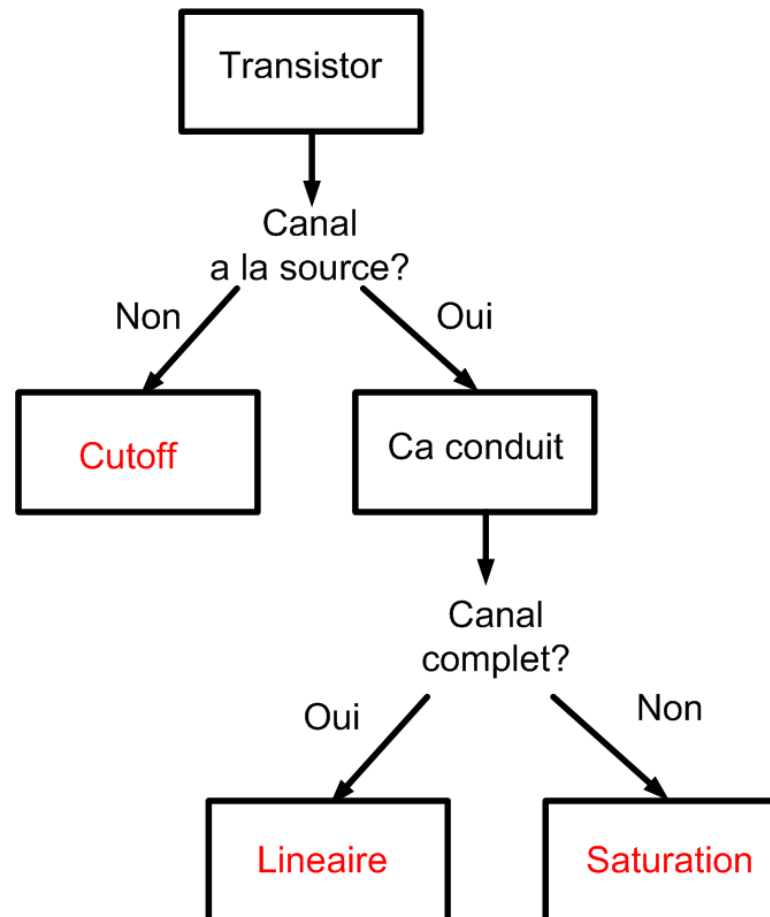
Transistors à effet de champ

- Un transistor MOS fonctionne avec un champ électrique:
 - On applique une tension à la grille pour former un canal entre source et drain
 - Avec un canal, le courant peut circuler



Transistors à effet de champ

- Le transistor peut opérer dans 3 modes...



Approche

- Approche semblable aux BJT et diodes
 - 1) Hypothèse
 - 2) Écrire équations et trouver tensions/courants
 - 3) Vérifier l'hypothèse
- Degré de difficulté additionnel (**parfois**):
 - Résolution d'équations quadratiques (2e ordre)
- Remettez-vous à l'aise avec ces équations

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad \Rightarrow \quad x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Paramètres

- Les équations de courant sont les suivants

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{TH})^2$$

Saturation

$$I_D = \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS}$$

Triode/linéaire

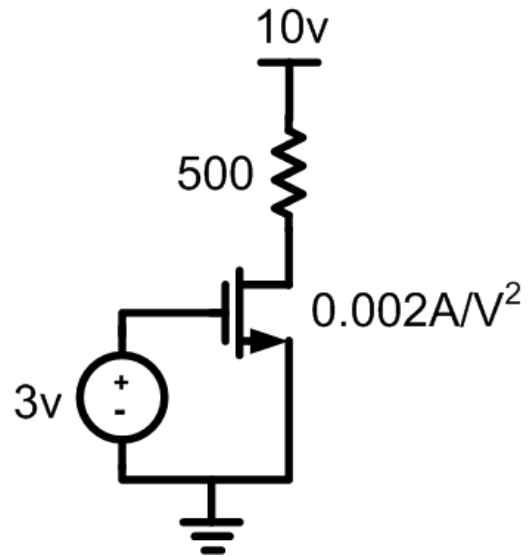
- μ : Mobilité des électrons/trous
 - C_{OX} : Capacité d'oxyde de grille
 - V_{TH} : Tension de seuil
- Nous avons aucun contrôle sur ces paramètres

Paramètres

- Il y a 2 situations:
 - Avec transistors déjà faits, on contrôle 2 choses:
 V_{GS} et V_{DS} .
 - Si on conçoit les puces, on a aussi le contrôle sur
 W et L (dimensions)
- De façon explicite:
 - Je vous donnerai μ , C_{OX} et V_{TH} .
 - Je vous donnerai PARFOIS W et L
 - Vous aurez à trouver V_{GS} et V_{DS}
- Allons voir un exemple d'analyse...

Exemple

- Trouvez V_D et I_D :



Exemple

- On commence avec une hypothèse:
 - Hypothèse simple: saturation
- Ça implique que $V_{GS} > V_{TH}$ et que $V_{GD} < 0.7$
- Le courant serait donné par:

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{TH})^2$$

- Commençons par remplir l'équation:

$$I_D = \underbrace{\frac{1}{2}}_{0.5} \underbrace{\mu C_{OX}}_{0.002} \underbrace{\left(\frac{W}{L} \right)}_3 \underbrace{(V_{GS} - V_{TH})^2}_{0.7}$$

Exemple

- L'équation devient:

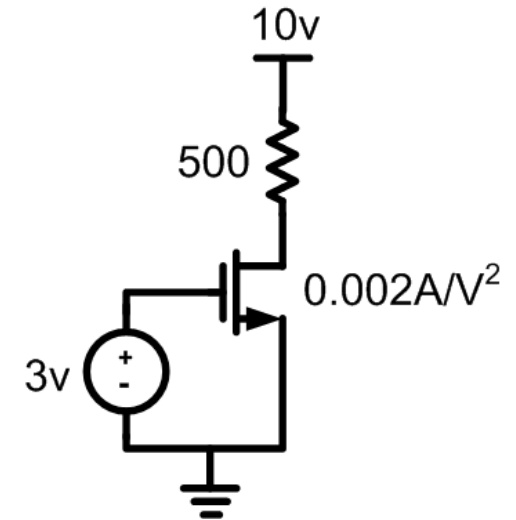
$$I_D = 0.001(2.3)^2 = 5.3mA$$

- Si c'était le cas, on aurait V_D :

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D$$

- Commençons par remplir l'équation:

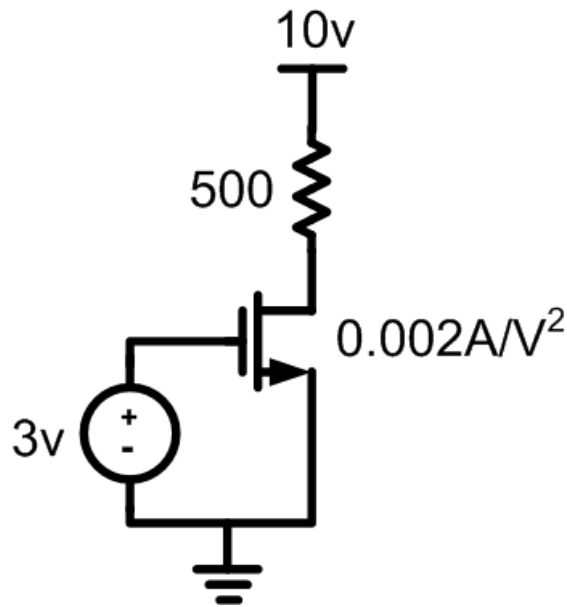
$$V_D = 10 - (5.3mA \cdot 500) = 7.35$$



Est-ce que le canal est réellement coupé (hypothèse) ?

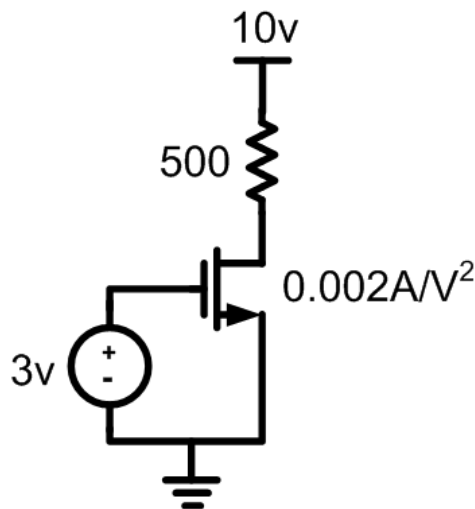
Exemple

- **Si** nous voulions le mettre en cutoff, que pouvons-nous faire?
 - Il faudrait que $V_{GS} < 0.7$



Exemple

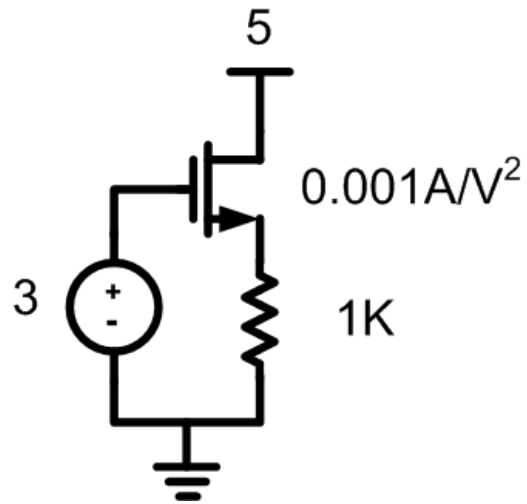
- **Si** nous voulions le mettre en région linéaire, que pouvons-nous faire?
 - Il faudrait que $V_{GD} > 0.7$
- Augmenter ou baisser V_{GS} ?
- Augmenter ou baisser R_D ?



Est-ce que diminuer/augmenter V_{GS} de 2 fois aura le même effet que diminuer/augmenter R_D de 2 fois?

Exemple (seul)

- Trouvez I_D et V_D :



NOTE: V_{GD} est constant et est plus petit que 0.7

Exemple (seul)

- Avec V_{GD} toujours à -2v, nous sommes en saturation SI ça conduisait
- Le courant serait donc donné par:

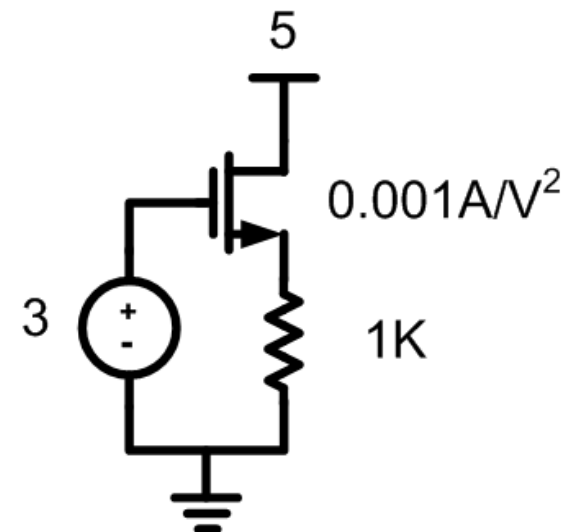
$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{TH})^2$$

$\underbrace{\quad\quad\quad}_{0.5} \underbrace{\quad\quad\quad}_{0.001} \underbrace{\quad\quad\quad}_{3-V_S} \underbrace{\quad\quad\quad}_{0.7}$

- L'équation devient:

$$I_D = 0.0005(2.3 - V_S)^2$$

C'est quoi V_S ?



Exemple (seul)

- La tension V_S est donnée par I_S et R_S :
 - Or $I_S = I_D$

$$V_S = I_D R_S$$

- On substitue:

$$I_D = 0.0005(2.3 - I_D 1000)^2$$

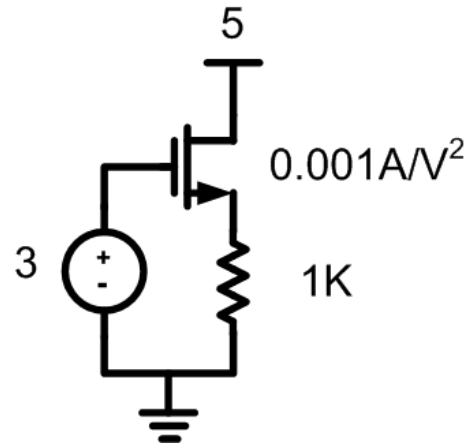
- On réarrange:

$$500I_D^2 - 3.3I_D + 0.0027 = 0$$

Équation du 2e ordre...

Exemple (seul)

- Il existe 2 solutions:
 - $I_D = 1\text{mA}$
 - $I_D = 5.6\text{mA}$
 - Lequel est bon?
- Est-ce que les deux confirment l'hypothèse de la saturation?

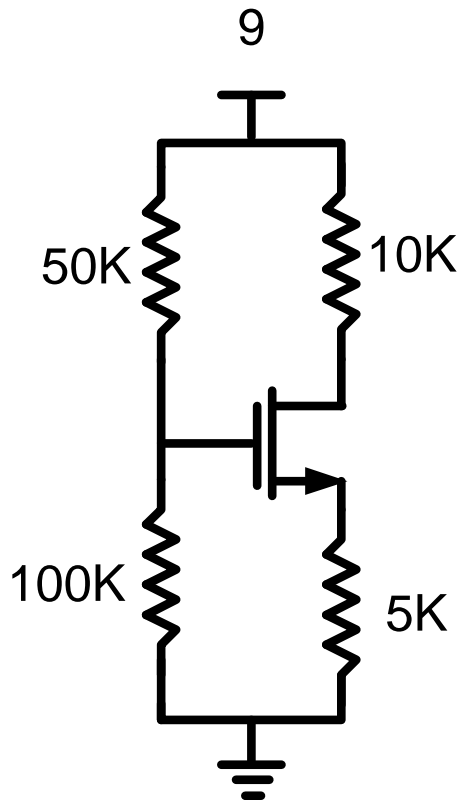


Exemple (seul)

- Le 5.6mA donne V_S de 5.6v
 - Dans ce cas, on serait en cutoff ($V_{GS} = -2.6$)
- Le 1mA, lui, donne V_S de 1v
 - On serait en conduction
 - V_{GD} est constant et plus petit que 0.7v: saturation

Exemple (seul)

- Trouvez I_D du transistor
 - Utilisez $\mu C_{OX}(W/L)=0.005A/V^2$ et $V_{TH}=0.7$



Suggestion: faites l'hypothèse "région linéaire" pour sauver du temps

Exemple (seul)

- On fait l'hypothèse de la région linéaire
- Le courant est donc:

$$I_D = \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS}$$

- Pour l'obtenir, il faut trouver V_{GS}
- On commence avec la tension à la grille

$$V_G = VDD \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}$$

$$V_G = 9 \frac{100K}{150K} = 6$$

Exemple (seul)

- Puis on calcule la tension à la source:

$$V_S = I_D R_S = I_D 5K$$

- On substitue V_{GS} dans I_D :

$$I_D = \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (6 - I_D 5K - V_{TH}) V_{DS}$$

- Il manque V_{DS} .
 - Calculons V_D

$$V_D = 9 - I_D \cdot 10K \quad \Rightarrow \quad V_{DS} = 9 - I_D \cdot 10K - I_D \cdot 5K$$

Exemple (seul)

- On écrit l'équation au complet:

$$I_D = \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (6 - I_D 5K - V_{TH}) (9 - I_D 10K - I_D 5K)$$

- On substitue par les valeurs et on simplifie

$$I_D = \frac{(5.3 - I_D 5K)(9 - I_D 15K)}{200}$$

- On développe la parenthèse:

$$I_D = \frac{5.3 \cdot 9 - 5.3 \cdot 15KI_D - 9 \cdot 5KI_D + I_D^2 75M}{200}$$

Exemple (seul)

- On simplifie :

$$200I_D = 47.7 - 124.5KI_D + I_D^2 75M$$

- On réarrange pour avoir la forme connue

$$I_D^2 75M - 124.7KI_D + 47.7 = 0$$

- Équation du 2e ordre à 1 variable: solution

$$I_D = \frac{124.7K \pm \sqrt{124.7K^2 - 4 \cdot 75M \cdot 47.7}}{150M}$$

Exemple (seul)

Les solutions sont:

$$I_D = \frac{124.7K \pm 35215}{150M} = \begin{matrix} 1.07mA \\ 0.59mA \end{matrix}$$

- Il faut choisir lequel on garde.
- On peut faire ça en vérifiant V_{GS}

$$V_{S1} = 1.07mA \cdot 5K = 5.35 \quad V_{S2} = 0.6mA \cdot 5K = 2.95$$

- Avec $V_G=6$, le courant doit être 0.59mA
 - Sinon, ce sera en cutoff

Maintenant que ça conduit, vérifions la région d'opération

Exemple (seul)

- On fait ça avec V_D :

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D \quad \Rightarrow \quad V_D = 9 - 0.6mA \cdot 10K = 3.1$$

- On vérifie que $V_{GD} > V_{TH}$:

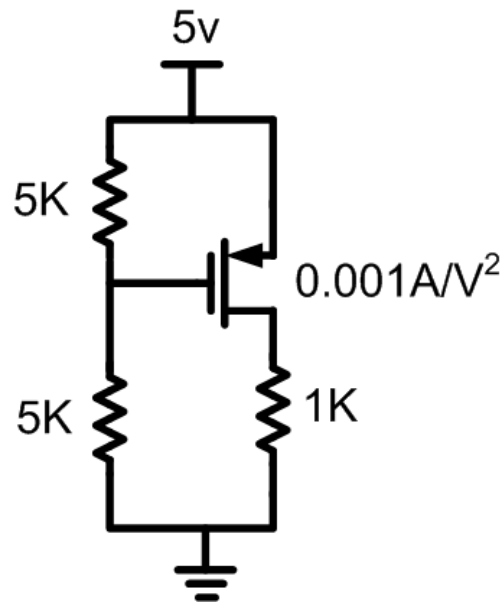
$$V_{GD} = 6 - 3.1 = 2.9$$

$$V_{GD} > V_{TH}$$

- On est en région linéaire

Exemple (seul)

- Trouvez I_D du transistor
 - Utilisez $\mu C_{OX}(W/L)=0.005A/V^2$ et $V_{TH}=0.7$



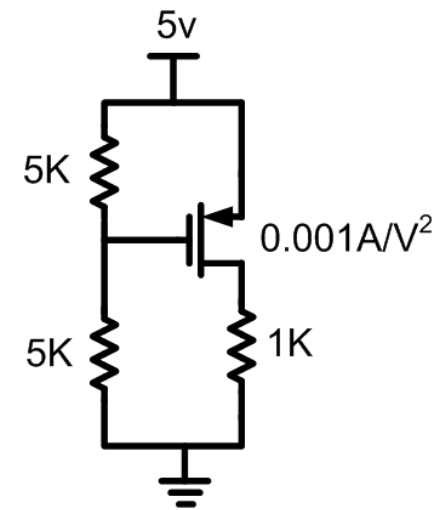
Exemple (seul)

- Hypothèse: saturation
 - Ça implique que $V_{SG} > V_{TH}$ et $V_{DG} < V_{TH}$
 - (J'ai inversé les lettres et V_{TH} est 0.7)
- On commence par calculer V_G :

$$V_G = 5 \frac{5K}{5K + 5K} = 2.5$$

- On peut trouver V_{SG} :

$$V_{SG} = 5 - 2.5 = 2.5$$



Ça conduit...

Exemple (seul)

- Le courant au drain est donné par:

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{SG} - V_{TH})^2$$

- On substitue les valeurs dans l'équation:

$$I_D = 0.0005(2.5 - 0.7)^2 = 1.62mA$$

- Ça donne un V_D de:

$$V_D = 1.62$$

Exemple (seul)

- Est-ce que le transistor est en saturation?

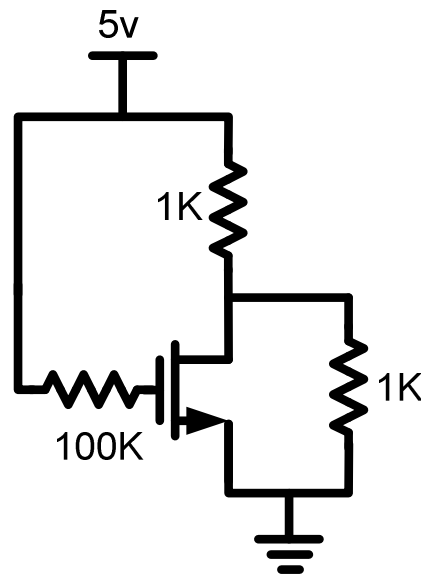
$$V_{DG} = 1.62 - 2.5 = -0.88$$

- Plus petit que V_{TH} : canal coupé...
 - Ça confirme l'hypothèse de saturation

Exemple (seul)

- Trouvez les tensions V_G , V_S et V_D du transistor ainsi que le courant I_D

$$\mu C_{OX}(W/L)=0.001$$



Exemple (seul)

- Hypothèse: Région linéaire

$$I_D = \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS}$$

- On substitue par les valeurs connues:

$$I_D = 0.001(5 - 0.7)V_D$$

- On remplace par les chiffres

$$I_D = 0.0043V_D$$

Exemple (seul)

- Il faut une autre équation

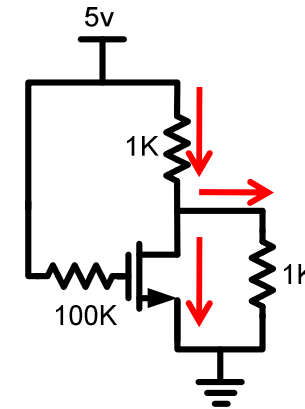
$$\frac{5 - V_D}{1K} = I_D + \frac{V_D}{1K}$$

- Même dénominateur:

$$5 - V_D = 1KI_D + V_D$$

- On isole V_D :

$$V_D = \frac{5 - 1KI_D}{2}$$



2 équations à 2 variables

Exemple (seul)

- On substitue V_D dans l'équation de I_D :

$$I_D = 0.0043 \left(\frac{5 - 1KI_D}{2} \right)$$

- On regroupe les I_D à gauche:

$$\frac{2I_D}{0.0043} + 1000I_D = 5$$

- On isole I_D :

$$I_D = 3.4mA$$

Exemple (seul)

- On vérifie l'hypothèse en calculant V_D :

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D$$

- On remplace par des chiffres:

$$V_D = 5 - 3.4mA \cdot 1K = 1.6$$

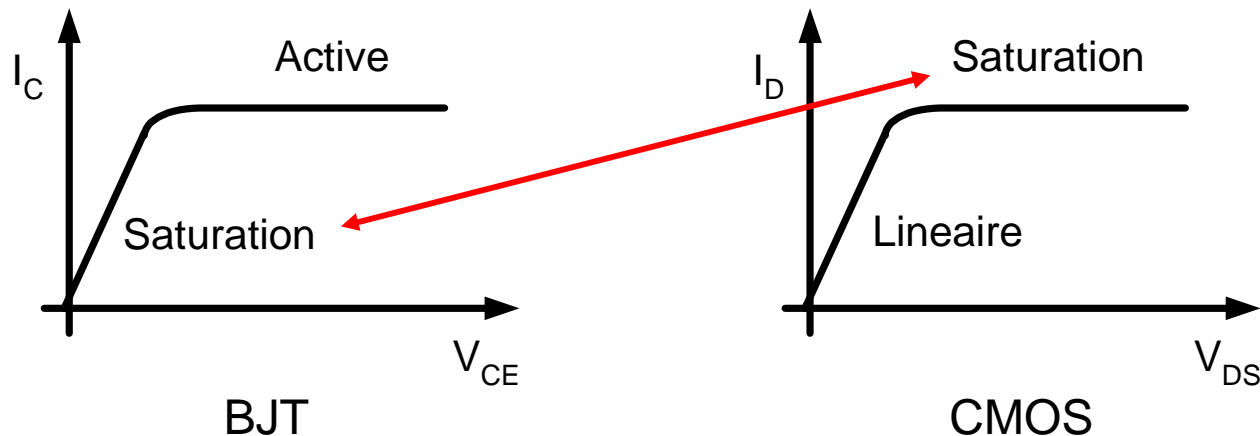
- On vérifie le canal

$$V_{GD} = 5 - 1.6 = 3.4 \geq 0.7$$

Région linéaire

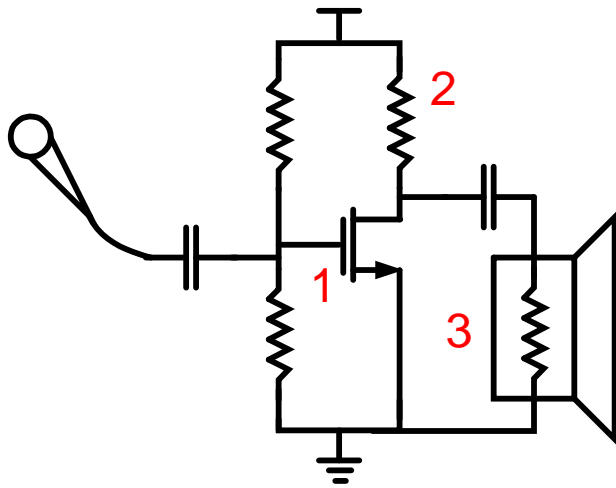
CMOS pour amplification

- Comme les BJT, on peut utiliser les transistors CMOS pour l'amplification
- L'amplification se fait en **SATURATION**
 - NOTE: Saturation CMOS différente de la saturation BJT



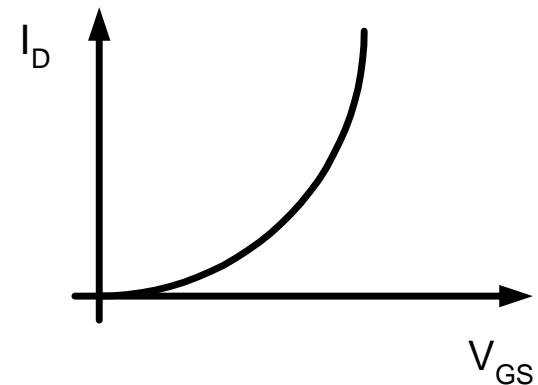
CMOS pour amplification

- Configuration est semblable



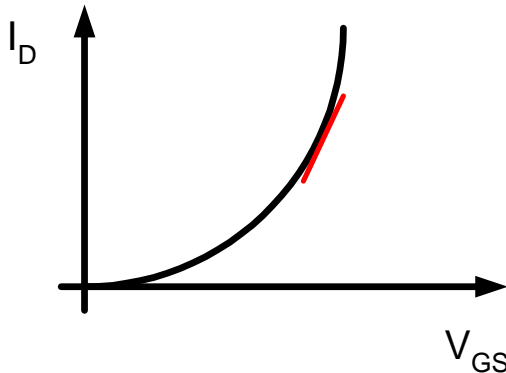
1. V_{GS} change I_D (au carré)
2. I_D est multiplié par R_D
3. Si $R_L \gg$, $V_D = I_D * R_D$

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{TH})^2$$



CMOS pour amplification

- La relation $V_{GS}-I_D$ n'est pas linéaire:
 - Il y a une dépendance "au carré" (quadratique)
- Situation semblable aux BJT
 - Si j'entre un signal, la sortie sera déformée
- MAIS! Si mon signal est assez petit, la relation VI serait "linéaire"



CMOS pour amplification

- En BJT, on utilisait la série de Taylor
 - Ici, on procède différemment.
- Prenons l'équation du courant:

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{TH})^2$$

- V_{GS} me donne I_D
 - Si je superpose un signal v_{gs} sur V_{GS} j'aurai une variation i_d superposée sur I_D

$$\underline{I_D + i_d} = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (\underline{V_{GS} + v_{gs}} - V_{TH})^2$$

CMOS pour amplification

- Regroupons certains termes:

$$I_D + i_d = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) \left(\underline{(V_{GS} - V_{TH})} + v_{gs} \right)^2$$

- On développe la parenthèse externe:

$$I_D + i_d = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) \left(\underline{(V_{GS} - V_{TH})^2 + 2v_{gs} (V_{GS} - V_{TH}) + v_{gs}^2} \right)$$

- Si v_{gs} est petit, son carré sera négligeable

$$I_D + i_d = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) \left((V_{GS} - V_{TH})^2 + 2v_{gs} (V_{GS} - V_{TH}) \right)$$

CMOS pour amplification

- On entre $\frac{1}{2}\mu C_{OX}(W/L)$ dans la parenthèse:

$$I_D + i_d = \underbrace{\frac{1}{2}\mu C_{OX}\left(\frac{W}{L}\right)(V_{GS} - V_{TH})^2}_{I_D} + \frac{1}{2}\mu C_{OX}\left(\frac{W}{L}\right)2v_{gs}(V_{GS} - V_{TH})$$

- Les I_D se simplifient des 2 bords:

$$i_d = v_{gs} \left[\underbrace{\mu C_{OX}\left(\frac{W}{L}\right)(V_{GS} - V_{TH})}_{\text{"Constant"}} \right]$$

CMOS pour amplification

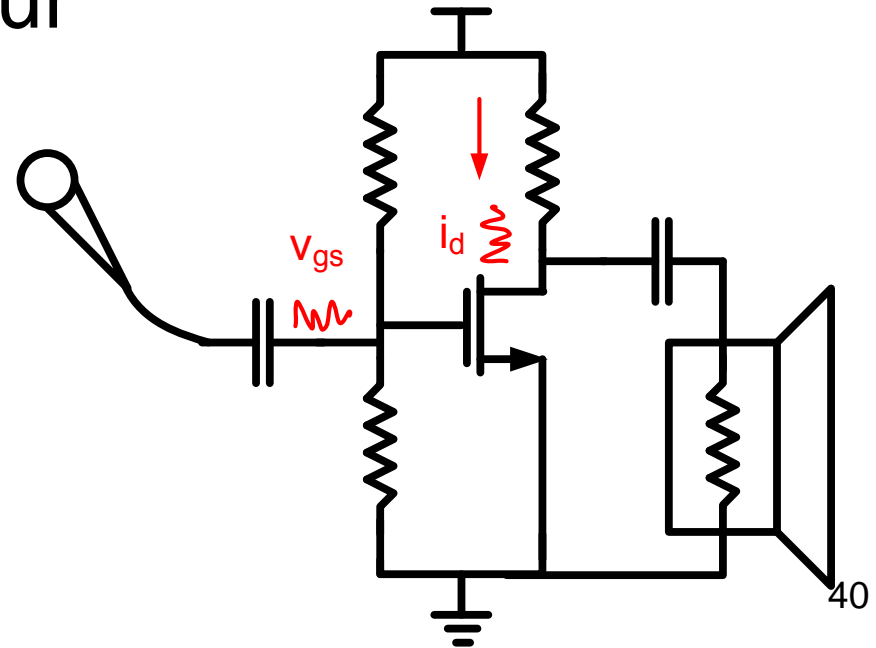
- Autour d'un point donné:
 - Si v_{gs} varie $\rightarrow i_d$ varie linéairement en réponse
- La constante de proportionnalité:

$$i_d = v_{gs} \left[\mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{TH}) \right] \quad g_m = \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{TH})$$

- Donc, si v_{gs} augmente de 1mV, i_d augmentera de $1\text{mV} * g_m$

CMOS pour amplification

- i_d change à cause de v_{gs}
- v_d change à cause de i_d
- Le changement de v_d vs v_{gs} , c'est le gain de notre amplificateur



CMOS pour amplification

- Alors, v_{gs} et i_d sont liés par g_m :

$$i_d = g_m v_{gs}$$

- Et i_d et v_d sont liés par R_D :

$$v_d = -R_D i_d \quad \text{Si } i_d \text{ monte, } v_d \text{ baisse et vice versa}$$

- On substitue:

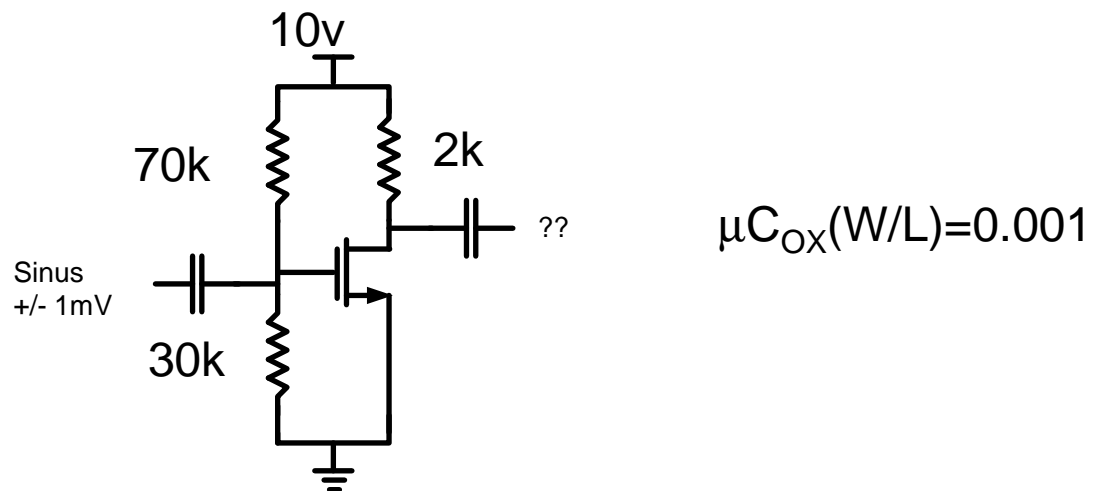
$$v_d = -R_D g_m v_{gs}$$

- Donc le gain est:

$$\frac{v_d}{v_{gs}} = -g_m R_D$$

Exemple

- Calculez l'amplitude du signal de sortie
 - En utilisant la formule
 - En mettant $V_{GS}=3.001$ et $V_{GS}=2.999$ et voir le signal à la sortie
 - Assurez-vous que c'est en saturation sans le sinus
 - C'est une démonstration plutôt qu'un vrai problème à résoudre



Exemple

- Saturation:

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{TH})^2$$

- On substitue le plus possible:

$$I_D = \frac{1}{2} 0.001 (3 - 0.7)^2 = 2.645 \text{mA}$$

- On calcule V_D pour s'assurer de la région:

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D \quad V_D = 10 - 2.645 \text{mA} \cdot 2 \text{K} = 4.71$$

Saturation!

Exemple

- Avec l'équation, on sait que le gain c'est

$$\frac{v_d}{v_{gs}} = -g_m R_D$$

- Et que g_m c'est:

$$g_m = \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{TH})$$

- Donc

$$g_m = 0.001(3 - 0.7) = 0.0023$$

Exemple

- Le gain est égal à $-g_m R_D$: 4.6
- Le signal de sortie est donc 4.6 fois plus que le signal en entrée:
 - Un signal de 2mV crête à crête (+/-1mV) donnera un signal de 9.2mV crête à crête

Exemple

- L'autre façon c'est de mettre l'entrée à 3.001 et ensuite le mettre à 2.999:
 - La différence des deux donne l'amplitude du signal de sortie
- Alors pour 3.001, le courant est:

$$I_D = \frac{1}{2} 0.001 (3.001 - 0.7)^2 = 2.6473 \text{mA}$$

- Et le V_D serait:

$$V_D = 10 - 2.6473 \text{mA} \cdot 2 \text{K} = 4.7054$$

Exemple

- Et pour 2.999, le courant est:

$$I_D = \frac{1}{2} 0.001 (2.999 - 0.7)^2 = 2.6427 \text{mA}$$

- Et le V_D serait:

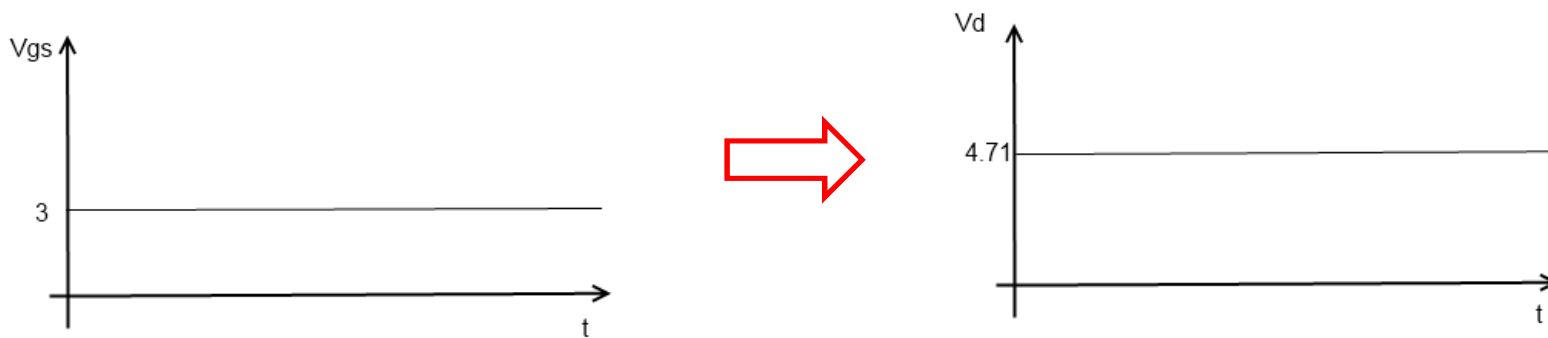
$$V_D = 10 - 2.6427 \text{mA} \cdot 2K = 4.7146$$

- La différence est:

$$4.7146 - 4.7054 = 0.0092$$

Interprétation

- Sans sinus en entrée, on a ceci:



- Avec un sinus de +/-1mV:

