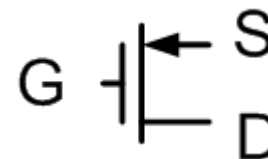
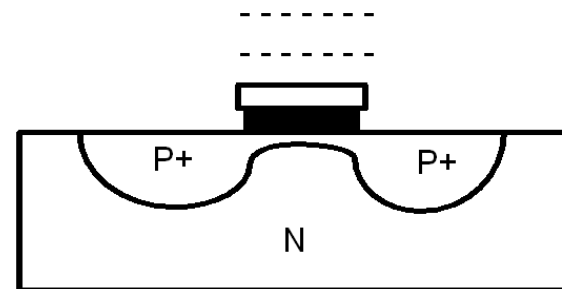
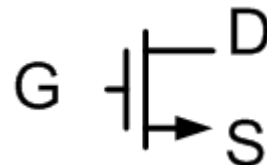
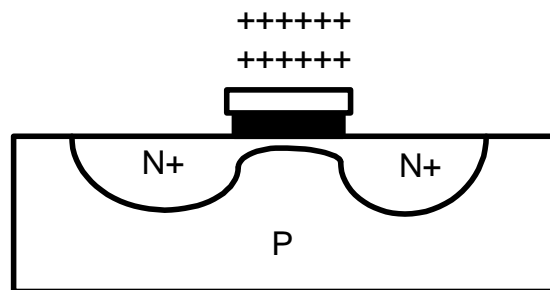


Electronique 1

Transistors CMOS

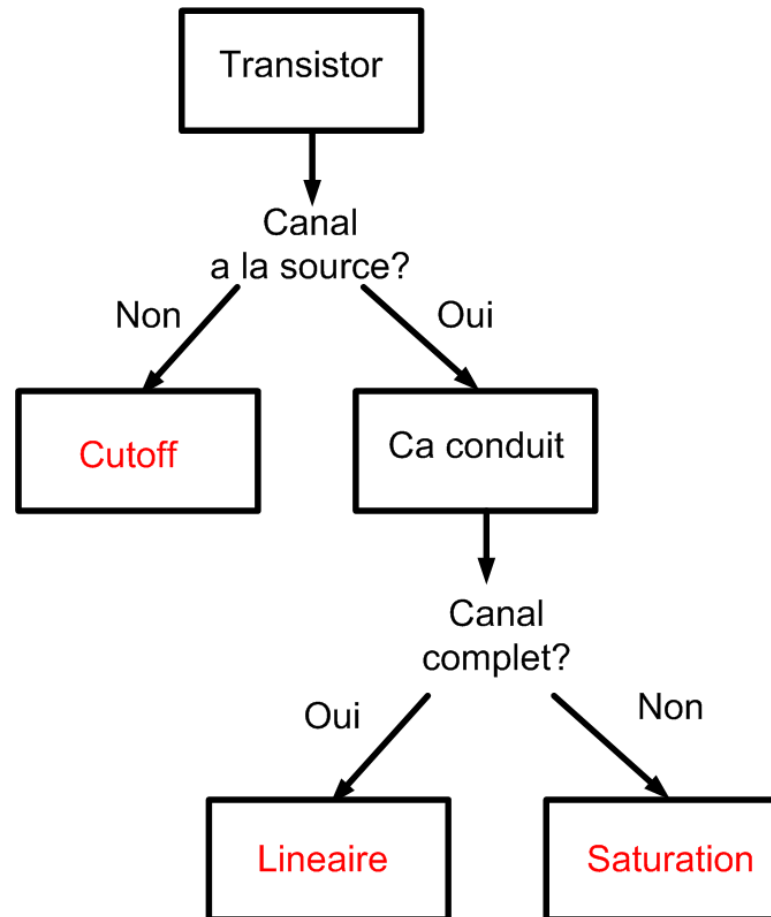
Transistors a effet de champ

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



Transistors a effet de champ

- Le transistor peut operer dans 3 modes...



Approche

- Approche semblable aux BJT et diodes
 - 1) Hypothese
 - 2) Ecrire equations et trouver tensions/courants
 - 3) Verifier l'hypothese
- Degre de difficulte additionnel (**parfois**):
 - Resolution d'equations quadratiques (2e ordre)
- Remettez-vous a l'aise avec ces equations

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

Parametres

- On avait derive ces equations de courant:

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

Saturation

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

Triode/lineaire

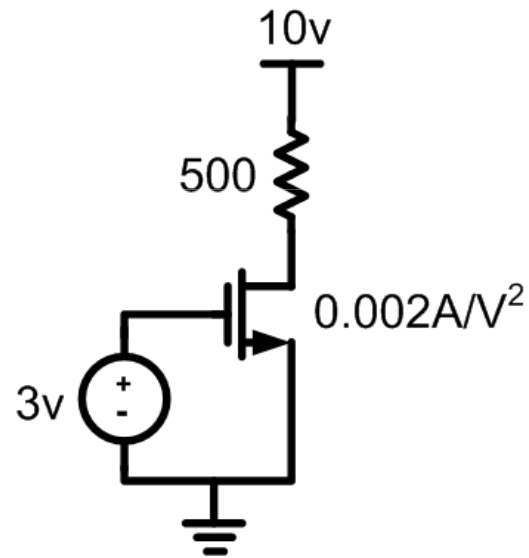
- μ : Mobilite des electrons/trous
 - C_{OX} : Capacite d'oxyde de grille
 - V_{TH} : Tension de seuil
- Nous avons aucun controle sur ces parametres

Parametres

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

Exemple

- Trouvez V_D et I_D :



Exemple

- On commence avec une hypothese:
 - Hypothese simple: saturation
- Ca implique que $V_{GS} > V_{TH}$ et que $V_{GD} < 0.7$
- Le courant serait donne par:

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

- Commencons par remplir l'equation:

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

Exemple

- L'équation devient:

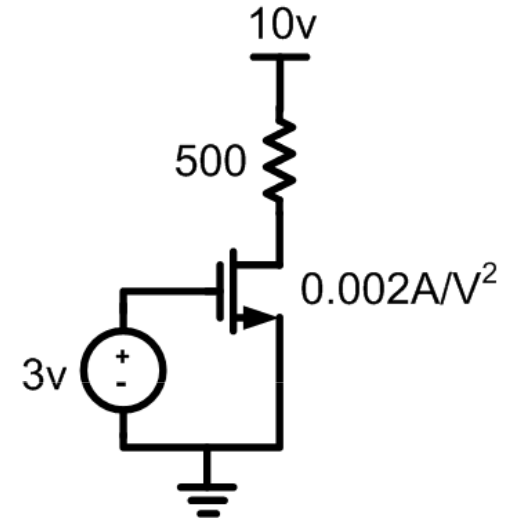
$$I_D = 0.001(2.3)^2 = 5.3mA$$

- Si c'était le cas, on aurait V_D :

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

- Commençons par remplir l'équation:

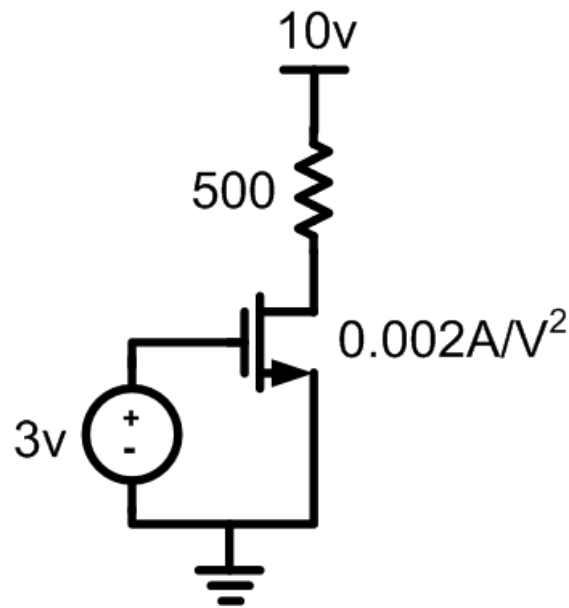
$$V_D = 10 - (5.3mA \cdot 500) = 7.35$$



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

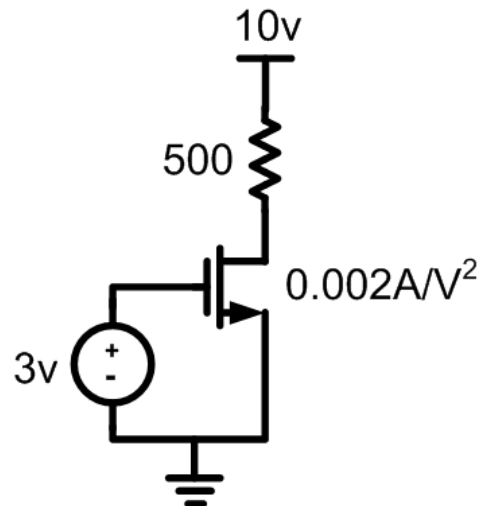
Exemple

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



Exemple

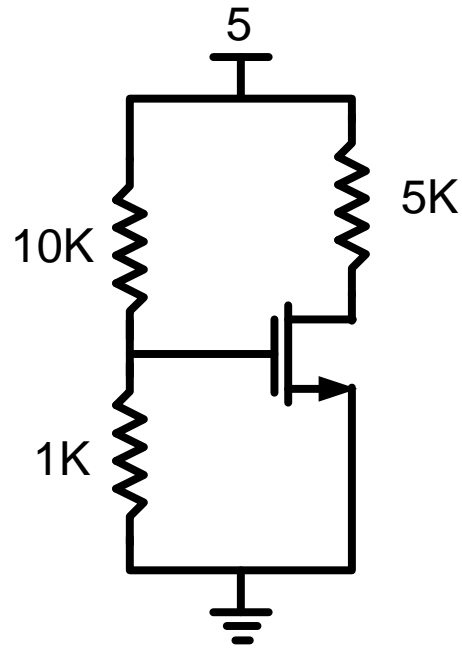
- **Si** nous voulions le mettre en region lineaire, que pouvons-nous faire?
 - Il faudrait que $V_{GD} > 0.7$
- Augmenter ou baisser V_{GS} ?
- Augmenter ou baisser R_D ?



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

Exemple (seul)

- Calculez V_G , V_D et V_S pour ce circuit:
 - Prenez $\mu_N C_{OX}(W/L)=0.001A/V^2$

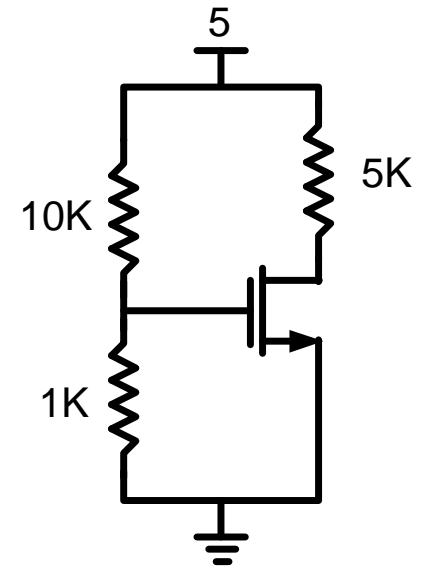


Exemple (seul)

- On calcule la tension a la grille V_G :

$$V_G = 5 \left(\frac{1K}{10K + 1K} \right) = 0.45$$

- La source est a 0 ($V_S=0$)
 - Donc, $V_{GS}=V_G=0.45$
 - On est en cutoff
 - $V_D=5v$

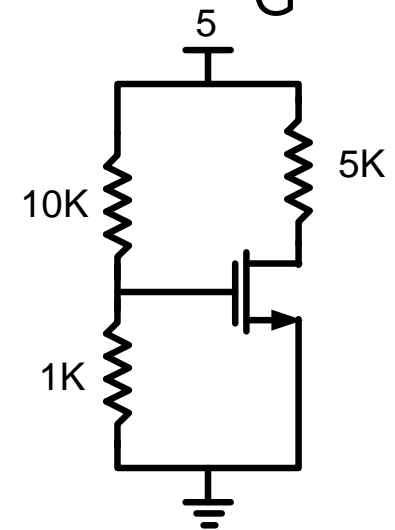


Pouvez-vous proposer 3 facons de mettre le transistor en conduction?

Exemple (seul)

- On regarde l'équation de la tension V_G :

$$V_G = VDD \left(\frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \right)$$

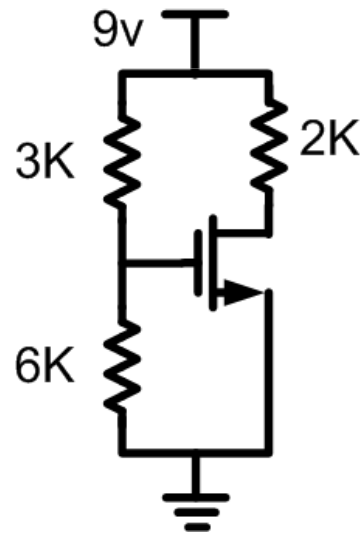


- 1) Augmenter R_{G2} (augmenter la chute de tension)
- 2) Baisser R_{G1} (augmenter le courant)
- 3) Augmenter VDD (augmenter le courant)

Parlons maintenant de la conduction...

Exemple

- Trouvez I_D et V_D
 - Prenez $\mu_N C_{OX}(W/L)=0.001 A/V^2$



Indice: Hypothese region lineaire

Exemple

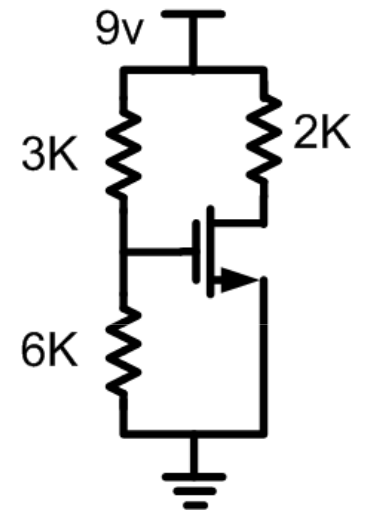
- Commençons par trouver V_G :
 - Aucun courant n'entre a la grille
 - Diviseur de tension

$$V_G = 9 \left(\frac{6K}{3K + 6K} \right) = 6$$

- Ecrivons l'equation pour V_D :

$$V_D = V_{DS} = 9 - I_D 2K$$

C'est quoi I_D ?



Exemple

- I_D depend de V_{DS}

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

$$I_D = 0.001(6 - 0.7)V_{DS}$$

- Deux equations a deux variables:

$$I_D = 0.001(6 - 0.7)V_{DS}$$

$$V_{DS} = 9 - I_D 2K$$

- On les combine ensemble:

$$I_D = 0.0053(9 - I_D 2K)$$

On peut maintenant isoler I_D

Exemple

- On entre le 0.0053 dans la parenthese:

$$I_D = 0.0053(9 - I_D 2K) \quad \Rightarrow \quad I_D = 0.0477 - I_D 10.6$$

- On isole I_D :

$$I_D = 4.11mA$$

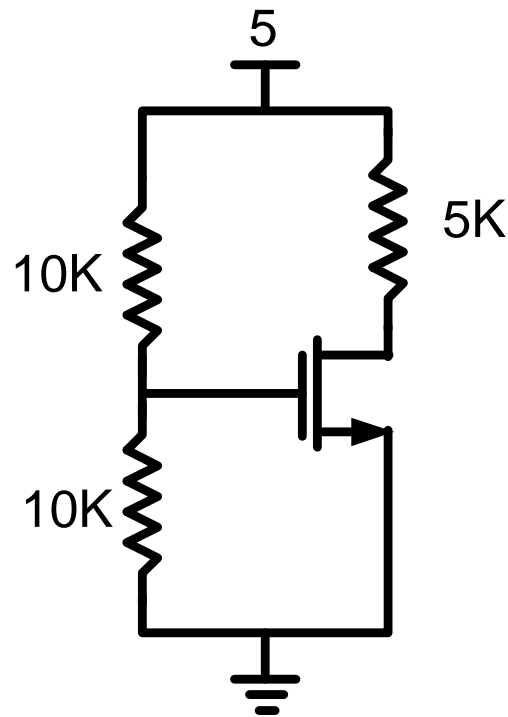
- On verifie la zone d'operation:

$$V_D = 9 - 4.11mA \cdot 2K = 0.776$$

$$\left. \begin{array}{l} V_{GD} = 5.224 \\ V_{GS} = 6 \end{array} \right\} \text{ On est en region lineaire...}$$

Exemple (seul)

- Calculez V_G , V_D et V_S pour ce circuit:
 - Prenez $\mu_N C_{OX}(W/L)=0.001 A/V^2$

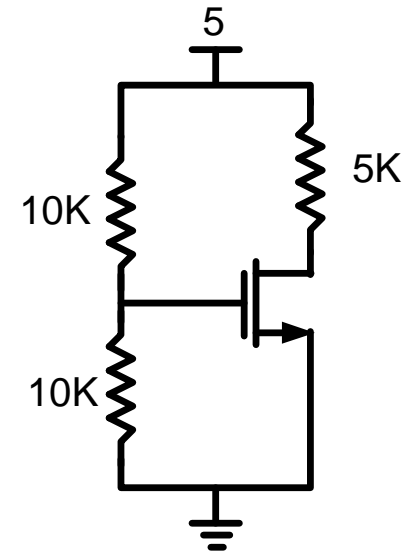


Exemple (seul)

- On commence avec V_{GS} :
 - Il n'y a aucun courant dans la grille
 - C'est un diviseur de tension

$$V_G = VDD \left(\frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \right) \Rightarrow V_G = 5 \left(\frac{10K}{10K + 10K} \right) = 2.5$$

- Notre transistor conduit



C'est un bon debut... allons voir V_S et V_D

Exemple (seul)

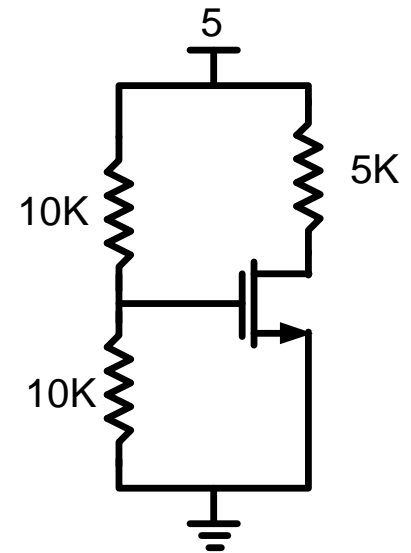
- La source est a la masse: $V_S=0$
- Pour V_D , il faut avoir I_D :

$$V_D = VDD - R_D I_D \quad \Rightarrow \quad V_D = 5 - 5K \cdot I_D$$

- Hypothese: lineaire

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

$$I_D = 0.001(2.5 - 0.7)V_{DS}$$



2 equations a 2 variables

Exemple (seul)

- On substitue V_D dans I_D :

$$V_D = 5 - 5K \cdot I_D \qquad I_D = 0.001(2.5 - 0.7)V_{DS}$$

- On obtient ceci:

$$I_D = 0.001(2.5 - 0.7)(5 - 5K \cdot I_D)$$

- On fait quelques operations:

$$I_D = 0.0018(5 - 5K \cdot I_D)$$

- Apres plus de manipulations, on obtient:

$$I_D = 0.9mA$$

Exemple (seul)

- On calcule V_D pour s'assurer d'être en linéaire:

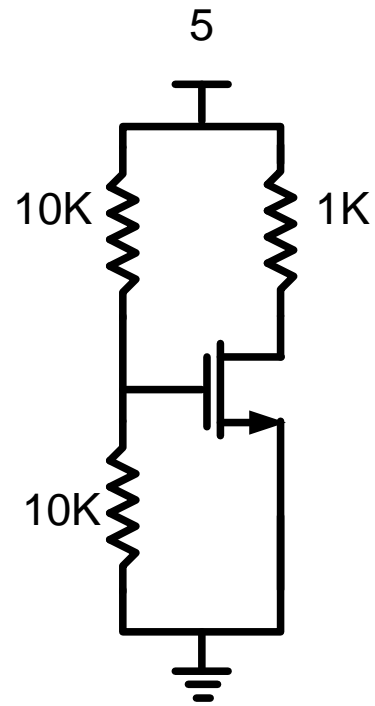
$$V_D = 5 - 5K \cdot 0.9mA = 0.5V$$

- Puisque $V_G=2.5$, on voit que le canal est présent partout:
 - $V_{GD}=2V$
 - $V_{GS}=2.5V$

Ca confirme l'opération en région linéaire

Exemple (seul)

- Trouvez V_D et I_D
 - Utilisez $\mu C_{OX}(W/L)=0.001 A/V^2$ et $V_{TH}=0.7$



Indice: Hypothese region saturation

Exemple (seul)

- On commence avec l'hypothese de saturation
- Par inspection on peut trouver V_{GS} : 2.5v
 - $V_{GS} > V_{TH}$: On voit que ca conduit
- On trouve I_D saturation:

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad I_D = \frac{0.001}{2} (2.5 - 0.7)^2 = 1.62mA$$

- Il faut aller verifier si c'est bon.

Exemple (seul)

- Condition pour saturation: $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$
- On trouve V_{DS} :

$$V_{DS} = VDD - I_D R_D = 5 - 1.62 = 3.38$$

- On verifie la condition pour saturation:

$$3.38 > 2.5 - 0.7$$

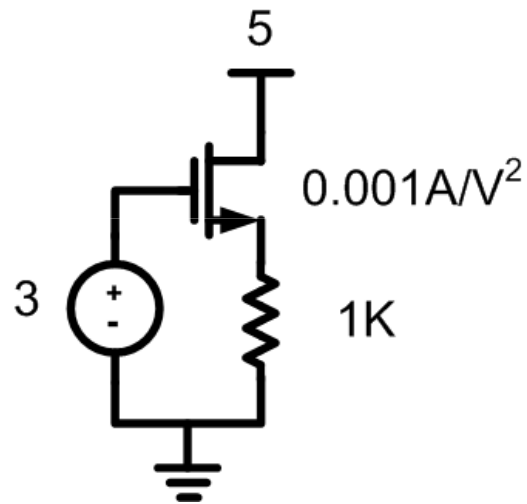
- On voit qu'on est effectivement en saturation

Conclusions de la discussion

- Selon le mode d'operation, on procede differemment
- En ordre de difficulte d'analyse:
 - Cut off (rien a faire)
 - Saturation (calculer V_{GS} seulement)
 - Lineaire (calculer V_{GS} et V_{DS})
- Bonne chose:
 - Aucun courant dans la grille
 - Diviseur de tension pour trouver V_G

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 a -2v, nous sommes en saturation SI ca conduisait
- Le courant serait donc donne par:

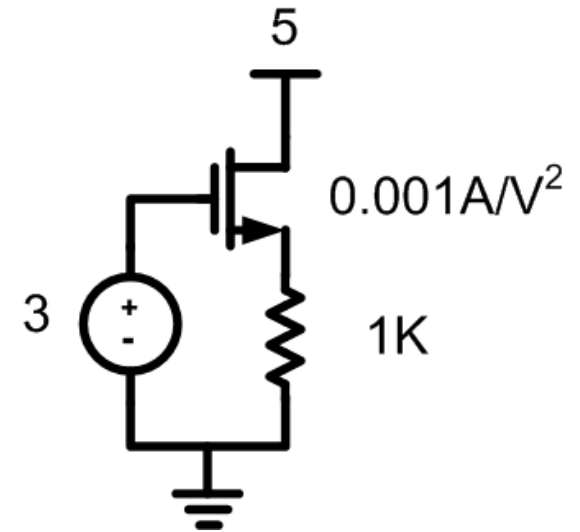
$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{TH})^2$$

0.5 0.001 3- V_S 0.7

- L'equation 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:

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

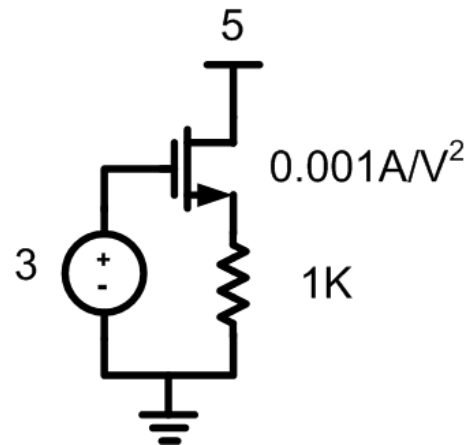
- On réarrange:

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

Equation 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?

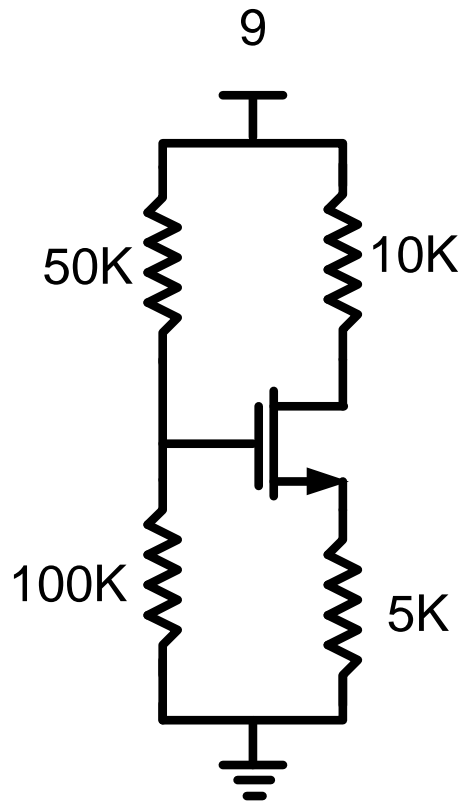


Exemple (seul)

- 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'hypothese "region lineaire" pour sauver du temps

Je ne vous ferai pas de suggestions a l'examen

Exemple (seul)

- On fait l'hypothese de la region active
- 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 a 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 a 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 rearrange pour avoir la forme connue

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

- Equation du 2e ordre a 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 ca en verifiant 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 etre 0.59mA
 - Sinon, ce sera en cutoff

Maintenant que ca conduit, verifions la region d'operation

Exemple (seul)

- On fait ca avec V_D :

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

- On verifie que $V_{GD} > V_{TH}$:

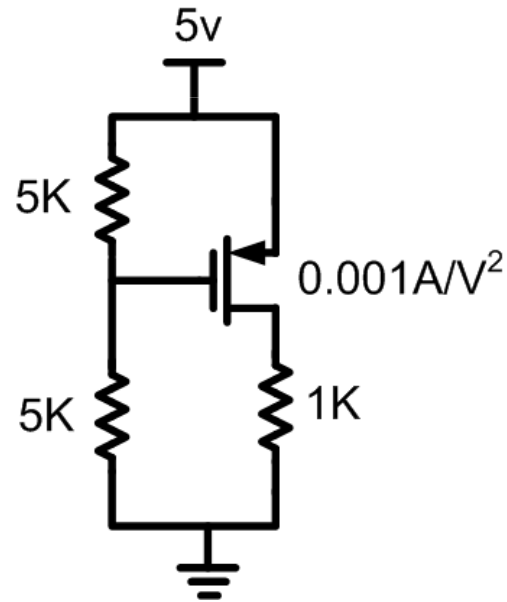
$$V_{GD} = 6 - 3.1 = 2.9$$

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

- On est en region lineaire

Exemple (seul)

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



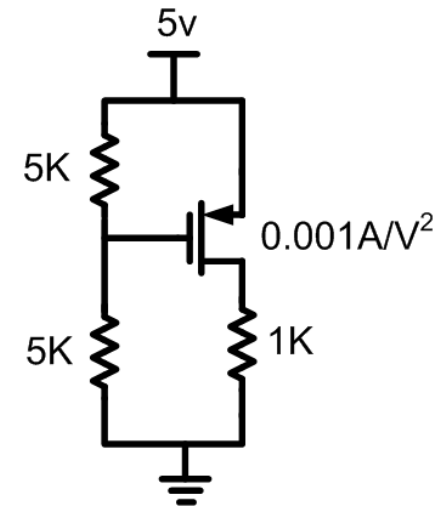
Exemple (seul)

- Hypothese: saturation
 - Ca implique que $V_{SG} > V_{TH}$ et $V_{DG} < V_{TH}$
 - (J'ai inverse 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} :

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



Ca conduit...

Exemple (seul)

- Le courant au drain est donne 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'equation:

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

- Ca donne un V_D de:

$$V_D = 1.62$$

Exemple (seul)

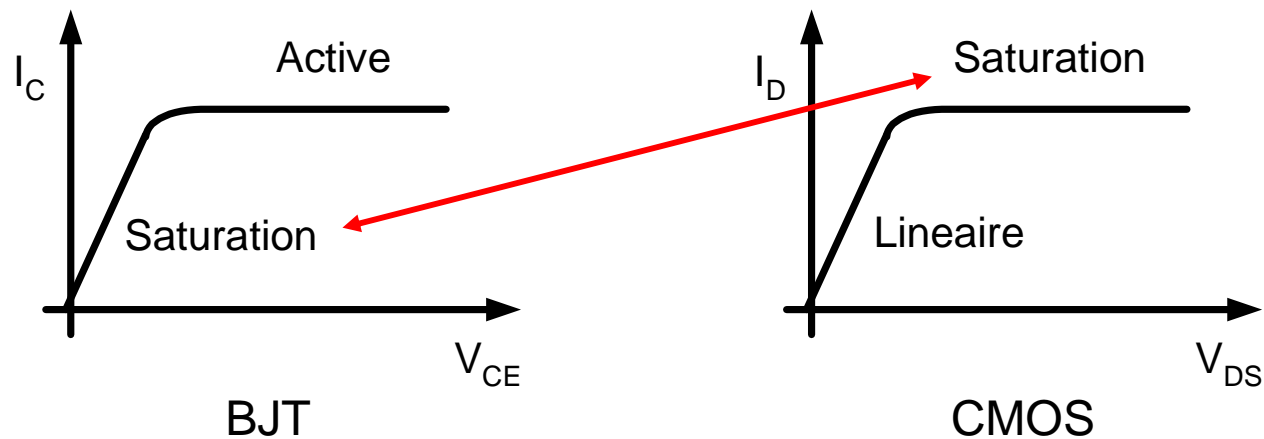
- Est-ce que le transistor est en saturation?

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

- Plus petit que V_{TH} : canal coupe...
 - Ca confirme l'hypothese de saturation

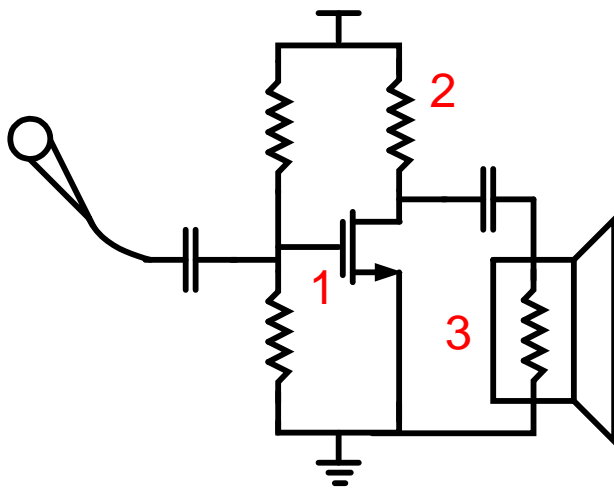
CMOS pour amplification

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



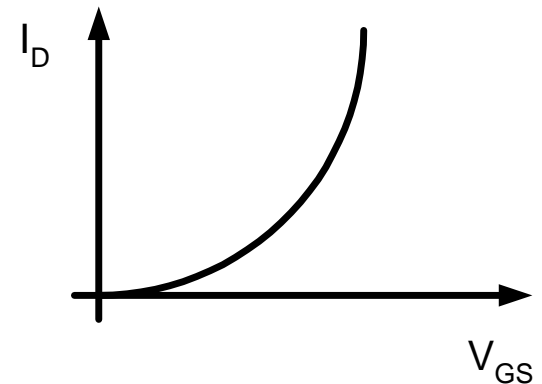
CMOS pour amplification

- Configuration est semblable



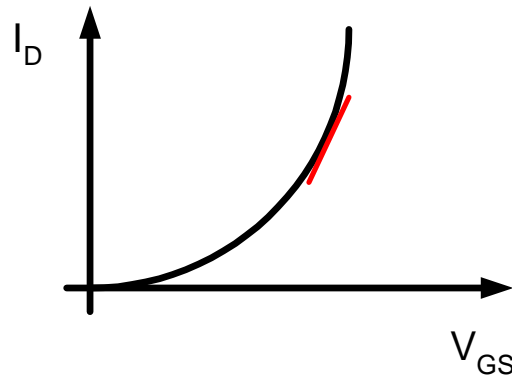
1. V_{GS} change I_D (au carre)
2. I_D est multiplie par R_D
3. Si $R_L \gg$, $V_D = I_D * R_D$

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



CMOS pour amplification

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



CMOS pour amplification

- En BJT, on utilisait la serie de Taylor
 - Ici, on procede differemment.
- Prenons l'equation 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 superposee 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 developpe la parenthese 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 carre sera negligeeable

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

CMOS pour amplification

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

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

- 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

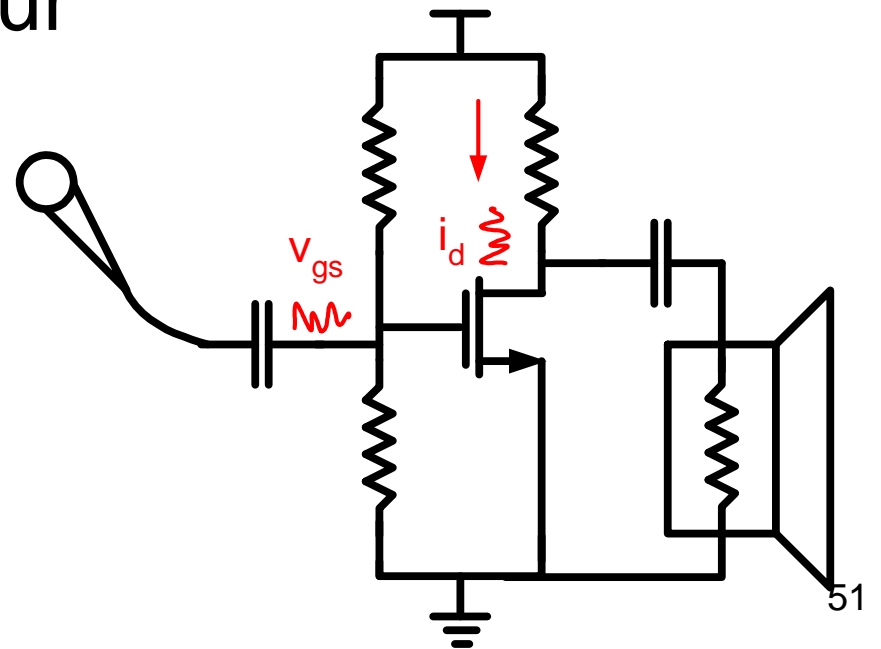
- Autour d'un point donne:
 - Si v_{gs} varie $\rightarrow i_d$ varie lineairement en reponse
- La constante de proportionalite:

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

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

CMOS pour amplification

- i_d change a cause de v_{gs}
- v_d change a 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:

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