

# Cours 7

Transistors CMOS

# Mise en contexte

- Jusqu'à présent, on a parlé de:
  - La structure atomique du silicium
  - Le dopage et l'effet sur la conduction
  - La combinaison de P et N: diode
  - La "combinaison" de 2 diodes: BJT
- Nous allons maintenant briser le lien logique:
  - On change complètement de structure physique...

Lien logique

# MOSFET

- MOSFET vs BJT pour circuits integres

- Avantages:

- Prends moins d'espace
    - Procedes moins compliques
    - Consomme moins de puissance

} Moins cher

- Desavantages:

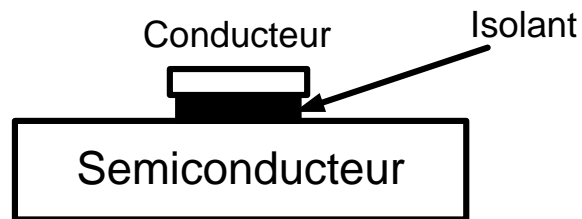
- Moins rapides

Devient de moins en moins vrai

90-95% des puces sont faites en CMOS

# MOSFET

- Structure physique simplifiée:



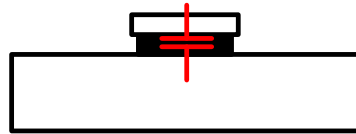
Ne ressemble pas du tout aux BJT

- Conducteur: “Metal”
  - Isolant: Oxyde de silicium
  - Semiconducteur: Silicium
- Metal-Oxyde-Semiconducteur (MOS)
    - D’ou le nom MOSFET...

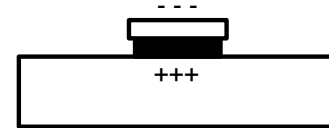
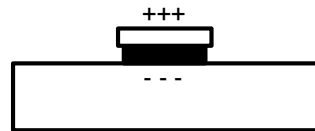
Ok, mais c’est quoi FET?

# MOSFET

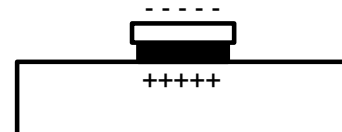
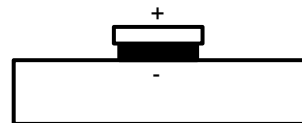
- Conducteur-Isolant-Conducteur: capacite



- En mettant +, on aura – et vice versa



- Les charges sont proportionnelles



- Fonctionne avec effet de champ electrique
  - “Field Effect Transistor”: FET (MOSFET)

On laisse ca de cote pour l'instant...

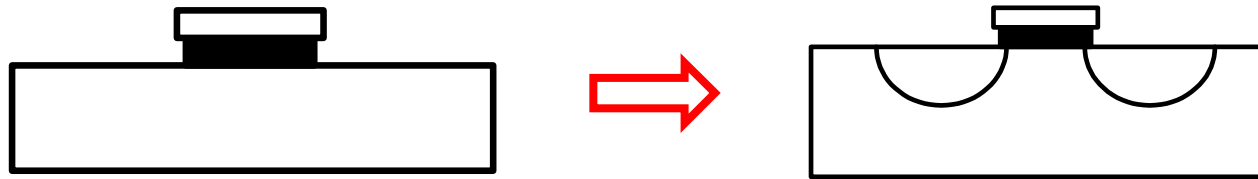
# MOSFET

- Les MOSFETs viennent sous 2 formes:
  - Type N: NMOS
  - Type P: PMOS
- Au debut les puces etaient faits soit en NMOS, soit en PMOS (moins)
  - Eventuellement, on a reussi a integrer les 2: on appelle ca le CMOS
- “C” c’est pour dire “complementaire” (les 2 sont presents)

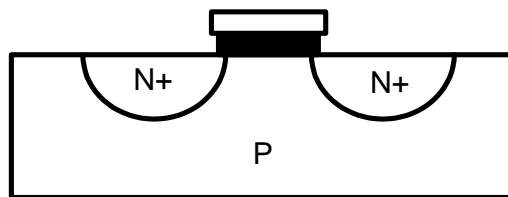
Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)

# CMOS

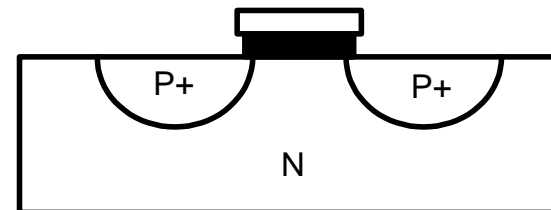
- La structure de tantot est trop simple:
  - On ajoute 2 regions



- Pour NMOS et PMOS, on a:



NMOS

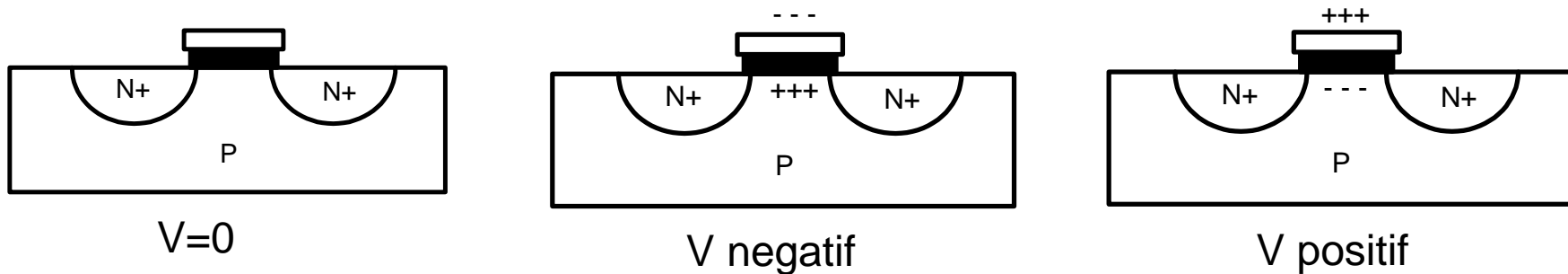


PMOS

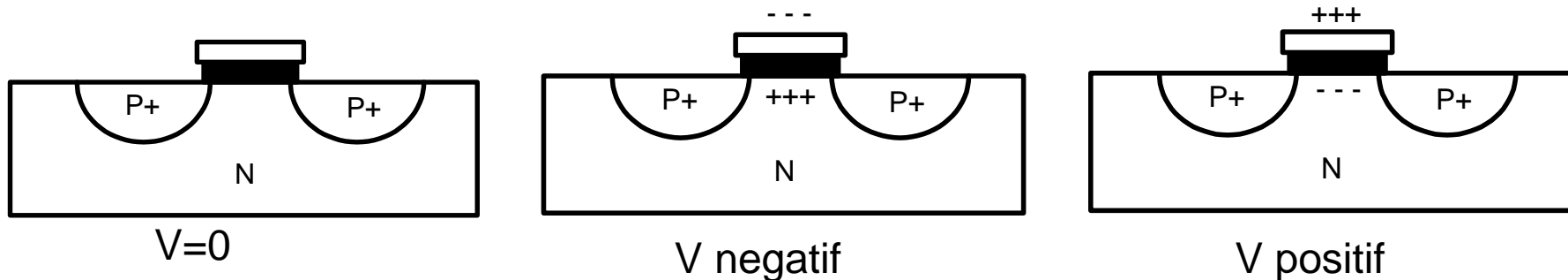
Allons voir comment ca fonctionne...

# Comment ca fonctionne?

- On applique une tension au NMOS:



- On fait la meme chose pour le PMOS:

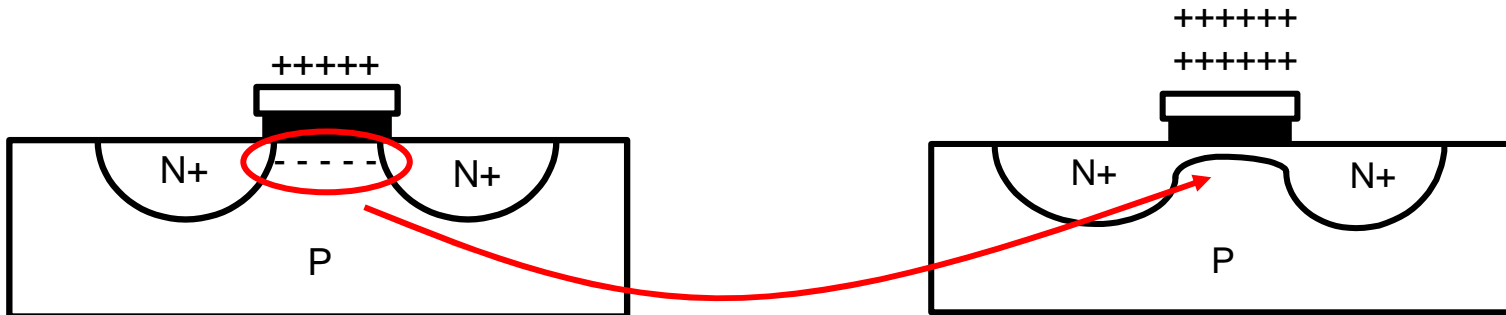


Les 2 font la meme chose jusqu'a present... pas tres interessant...



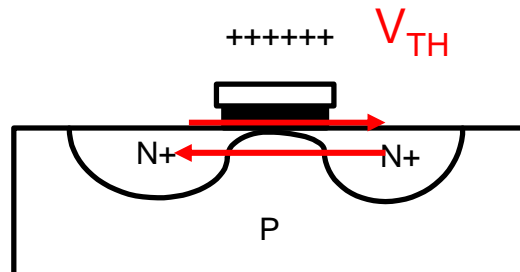
# Comment ca fonctionne?

- Observons le 3e cas du NMOS:
  - En appliquant une tension positive on a plus d'electrons libres sous l'isolant
- OR! On sait que le silicium avec beaucoup d'electrons libres c'est du N+
  - Cette region devient comme du N+...



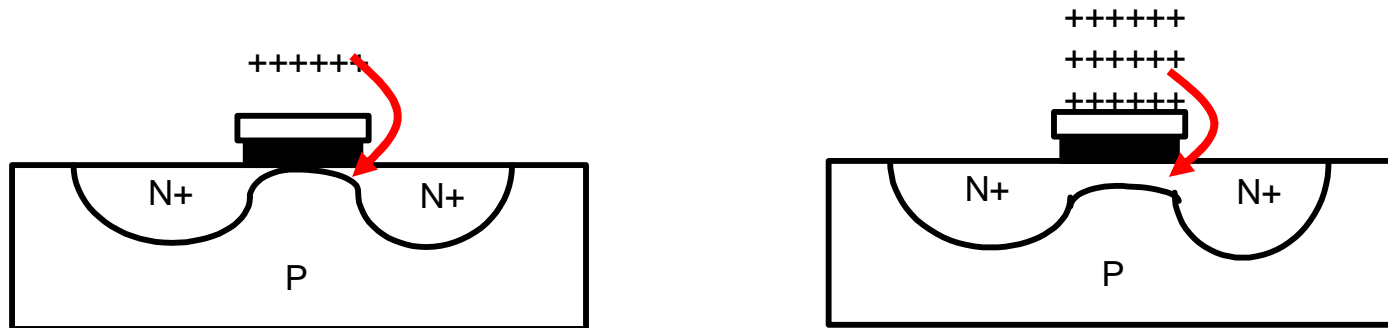
# Comment ca fonctionne?

- Avec cette nouvelle region, c'est comme avoir un gros bloc de N+:
  - Le courant **peut** donc circuler d'un bord a l'autre
  - Cette nouvelle region s'appelle le canal
- En appliquant un  $V (+)$ , on a des charges
  - Quand  $V$  assez (+), il y aura formation de canal
  - Cette valeur de  $V$ , c'est la tension de seuil (threshold):  $V_{TH}$



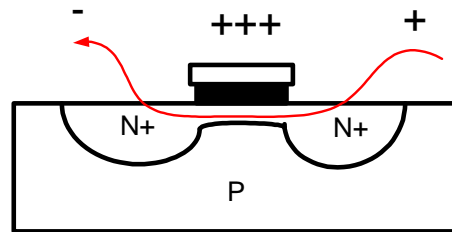
# Comment ca fonctionne?

- Quand la tension au conducteur est:
  - Moins que  $V_{TH}$ : Aucun courant ne peut circuler
  - Egale a  $V_{TH}$ : On a un canal
  - Pour permettre un courant, il faut au moins  $V_{TH}$
- Plus on augmente la tension, plus on peut transporter du courant

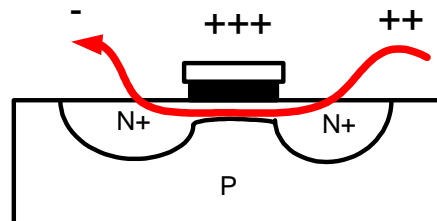


# Comment ca fonctionne?

- Avec + au conducteur on genere un canal
  - On a un chemin moins resistif entre les 2 bords
  - Sans tension ailleurs, il n'y aura aucun courant
- Il faut appliquer une tension aux 2 bornes:



- Plus de tension  $\rightarrow$  plus de courant



Relation presque LINEAIRE  
entre V et I

# Comment ca fonctionne?

- Resumons:
  - Si  $V$  est moins que  $V_{TH}$   $\rightarrow$  aucun courant possible
  - Si  $V$  est plus, ca “connecte” les deux bords
- Est-ce que c’est juste ca? **NON!**
  - Mais c’est une bonne premiere approximation
- Allons voir d’autres choses...
  - On completera le modele tantot...

# Representation circuit

- Voici la représentation des transistors au niveau “circuit”:



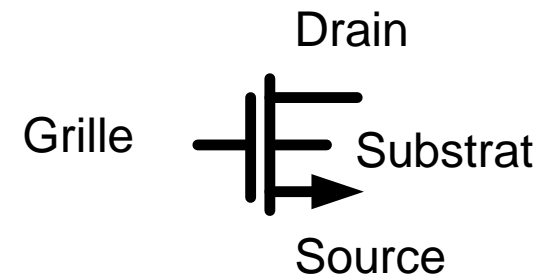
- On voit qu’il y a 4 pattes:
  - Grille
  - Source
  - Drain
  - Substrat

Comment fait-on pour identifier les pattes?

# Representation circuit

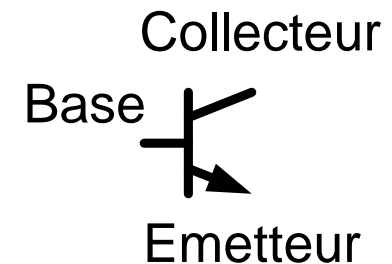
- Comment identifier les pattes:

- Grille est tout seul de son bord
- Substrat est adjacent
- Source est la patte avec la fleche
- Drain est celui qui reste



- On peut faire le parallele avec BJT:

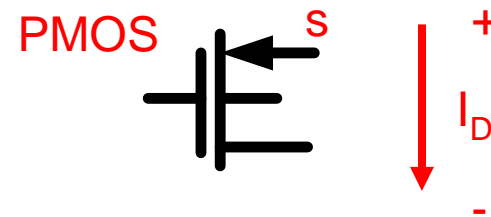
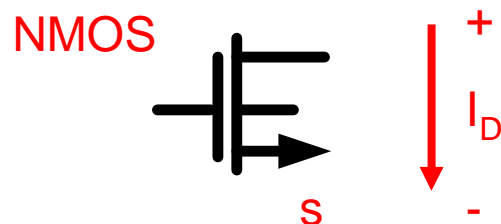
- Grille : Base
- Source : Emetteur
- Drain : Collecteur



Le substrat est "special"... aucun equivalent BJT

# Notes sur la source

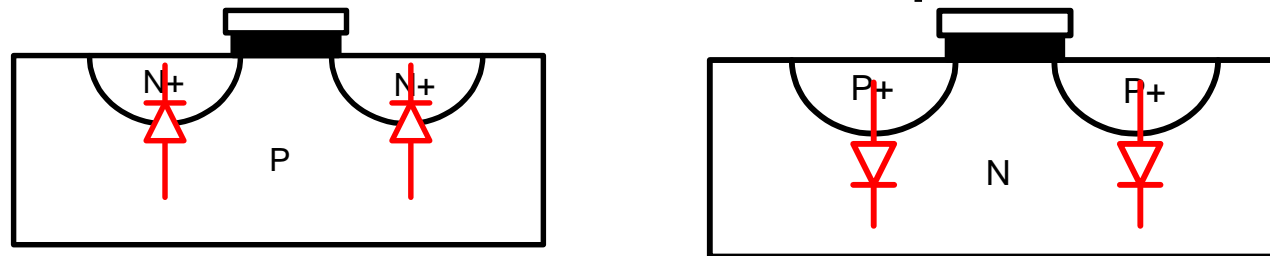
- La source a une fleche: direction suit le courant (comme l'émetteur)
- Contrairement aux BJTs, les CMOS sont symmetriques:
  - Source et drain sont IDENTIQUES
- Par convention:
  - NMOS: Source a la tension la plus faible
  - PMOS: Source a la tension la plus elevée



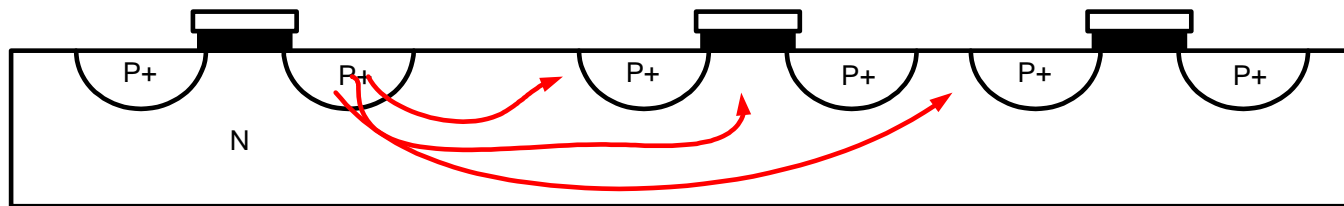


# Demystification du substrat

- Structure CMOS donne des problemes:



- Il existe des diodes “parasites”
  - Intersection de blocs P et N
  - On ne veut pas que ces diodes conduisent
  - Avec plusieurs transistors sur une meme puce:



Ce serait bien de bloquer les diodes

# Demystification du substrat

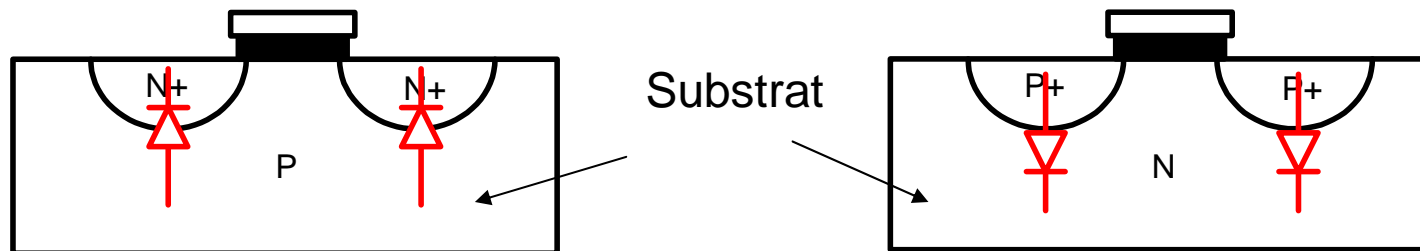
- Pour bloquer ces diodes on remarque:
  - Il faut  $\sim 0.7$  pour faire conduire du diode
- Pour qu'une diode ne conduise pas:



- Avec ça, ce serait impossible d'avoir  $0.7v$ 
  - Tension plus elevee = alimentation
  - Tension moins elevee = ground

# Demystification du substrat

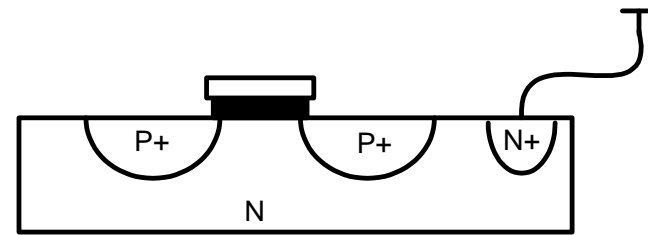
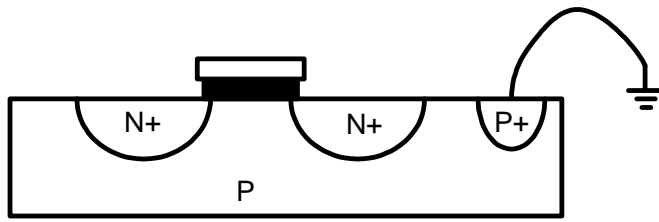
- Reprenons nos diagrammes:



- Substrat: section de silicium sur lequel les transistors sont faits
- On fait les connexions suivantes:
  - Substrat P au ground
  - Substrat N a l'alimentation

# Demystification du substrat

- On se retrouve avec ceci:



- Puisque le substrat est souvent connecté à l'alimentation/ground, on l'ignore...



C'est pour ça qu'on voit souvent des transistors CMOS avec 3 pattes

# Observations preliminaires

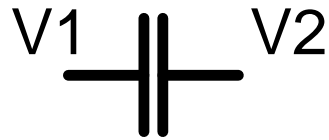
- On n'a pas besoin de resistance a la grille:
  - Il y a un isolant.  $I=0$  dans la grille
- Tension a la grille n'est pas "limitee" a 0.7v
  - Pensez aux BJT ou  $V_{BE}=0.7$  quand ca conduit
- Aucun lien entre  $V_{TH}=0.7v$  et  $V_{BE}=0.7v$ 
  - C'est une coincidence!
- Le courant est le meme d'un bord a l'autre:  $I_D=I_S$

Allons compliquer les choses...

# $V_{GS}$ a la place de $V_G$

- Je vous ai induit en erreur tantot:
  - “Si  $V_G > V_{TH}$ , ca conduit”: pas exact

- Pensez a un condensateur:

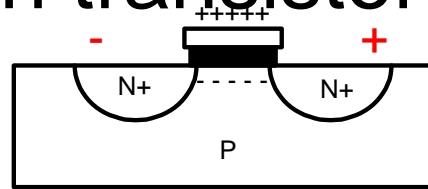


- Pour attirer des  $(-)$  a  $V2$ , il faut que  $V1$  soit positif **PAR RAPPORT** a  $V2$ 
  - Ex: Si  $V1$  est 5v et  $V2$  est 5v, aucune charge ne viendrait meme si  $V1$  est positif

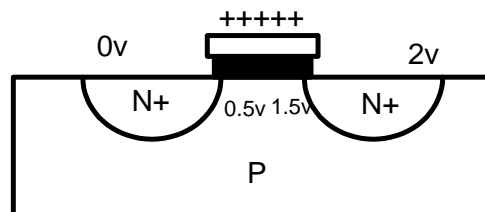
Il faut que “ $V1-V2$ ” soit positif pour attirer des  $(-)$  a  $V2$

# $V_{GS}$ a la place de $V_G$

- Dans le cas d'un transistor NMOS:

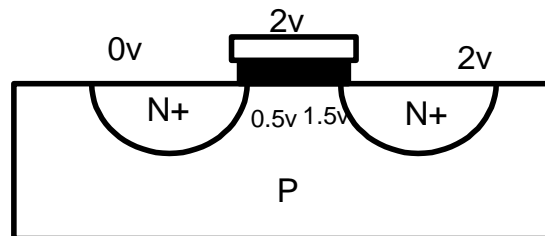


- $V_G$  doit être positif par rapport au CANAL
  - Le canal n'a pas de pattes: difficile de mesurer
- De plus, la tension au canal dépend de la position où on la mesure...
  - Proche du drain, plus haute tension
  - Proche de la source, plus petite tension...



# $V_{GS}$ a la place de $V_G$

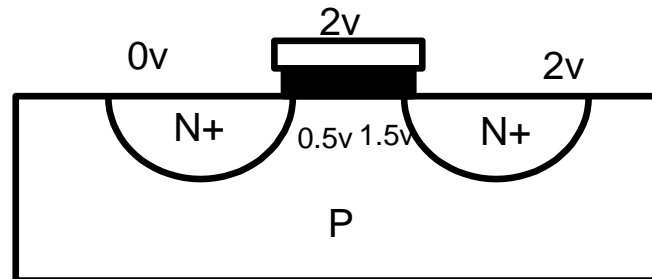
- On a 2 choix:
  - Mesurer  $V_G$  par rapport a  $V_D$  ( $V_{GD}$ )
  - Mesurer  $V_G$  par rapport a  $V_S$  ( $V_{GS}$ )
- Imaginons qu'on decide de mesurer  $V_{GD}$  pour decider si ca conduit:
  - Dans ce cas-ci,  $V_{GD}=0$ , on dirait qu'il n'y a aucun canal
  - Ce n'est pas vrai parce qu'il y en a proche de la source...





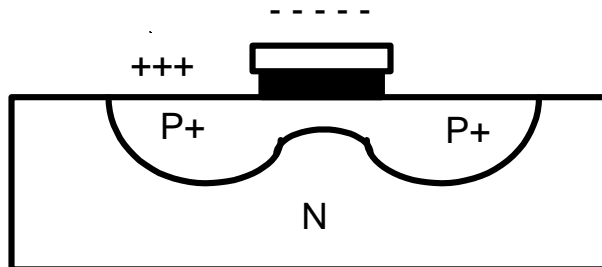
# $V_{GS}$ a la place de $V_G$

- Si on mesurait  $V_{GS}$ , on verrait qu'il y a un canal
  - Si  $V_{GS}$  nous dit qu'il n'y a pas de canal, ca veut dire qu'il n'y en a NULLE-PART
  - Probleme: ca n'indique pas que le canal n'existe pas au drain (on va gerer ca plus tard!)
- On va donc se servir de  $V_{GS}$  pour voir s'il y a un canal en quelque part (si ca conduit)



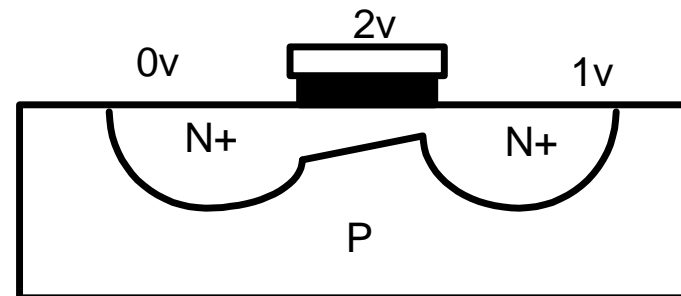
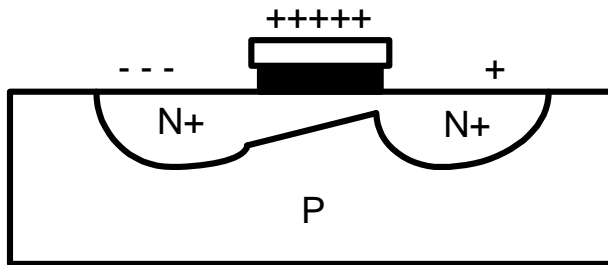
# $V_{GS}$ a la place de $V_G$

- Pour conduction, on regarde  $V_{GS} = V_G - V_S$ 
  - Il faut que cette valeur soit au moins  $V_{TH}$
- Pour le PMOS, c'est le contraire:
  - La source a la tension la plus elevee
  - On veut  $V_G$  negatif par rapport a  $V_S$
  - Donc,  $V_{GS}$  doit etre negatif
  - $|V_{GS}| > 0.7v$



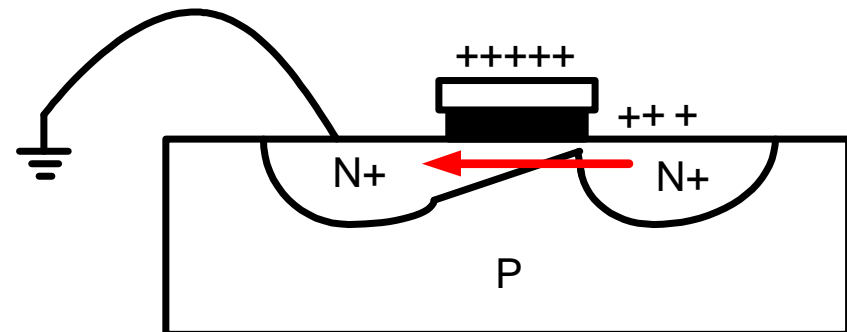
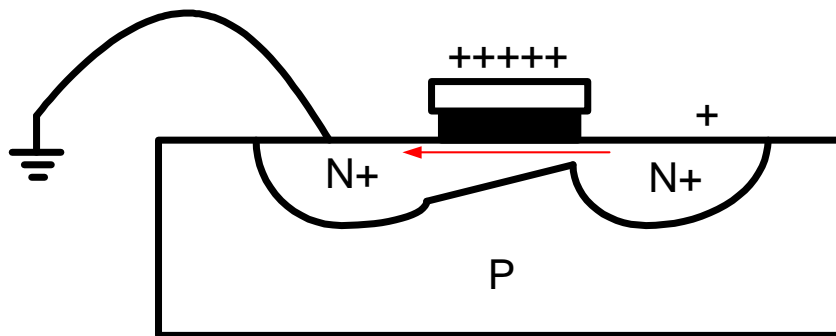
# Encore plus de complications!

- Plus  $V_{G-CANAL}$  gros, plus canal est “epais”
- Si je voulais un courant, j’applique  $V_{DS}$ 
  - Si  $V_D$  est different de  $V_S$ , l’epaisseur sera differente
- Par exemple:
  - $V_{GS}$  gros  $\rightarrow$  canal epais
  - $V_{GD}$  faible  $\rightarrow$  canal plus mince



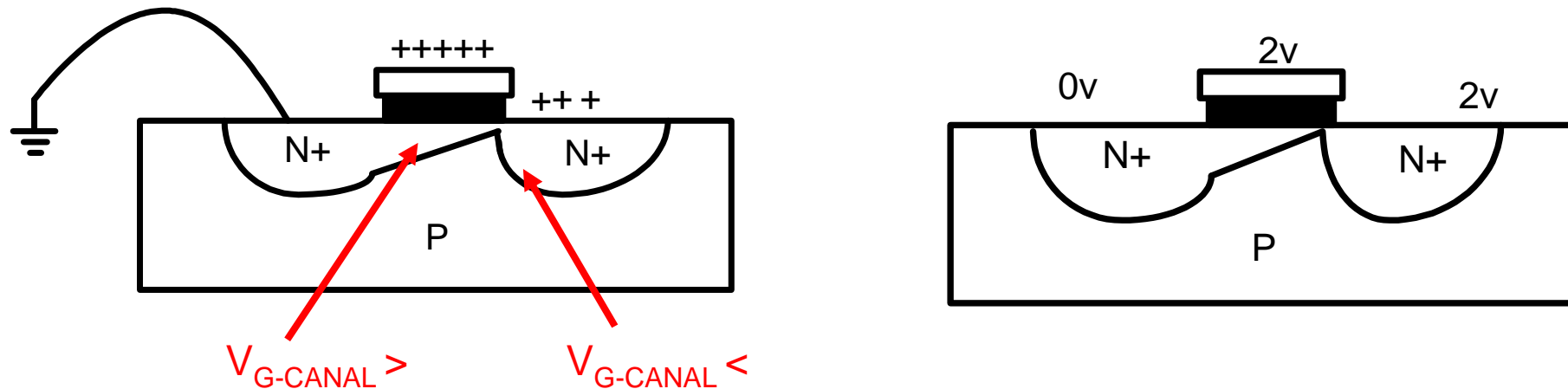
# Reprenons les etapes...

- 1) On applique une tension a la grille
- 2) Quand  $V_{GS} > V_{TH}$ , ca forme un canal
- 3) Grosse tension  $\rightarrow$  Gros canal
- 4) On applique tension entre drain-source
- 5) En augmentant la tension, ca augmente le courant



# J'augmente $V_{DS}$ ...

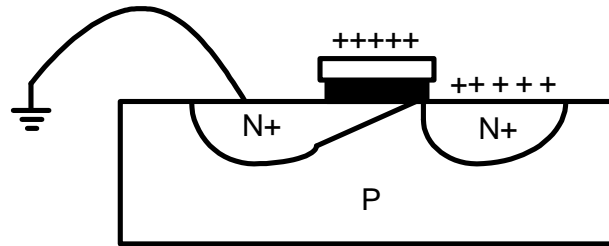
- En augmentant  $V_{DS}$ , j'augmente le courant
- Cependant, je diminue  $V_{G-CANAL}$  au drain



- Si  $V_D$  trop gros,  $V_{G-CANAL} < V_{TH}$  au drain

# Le canal est coupe..

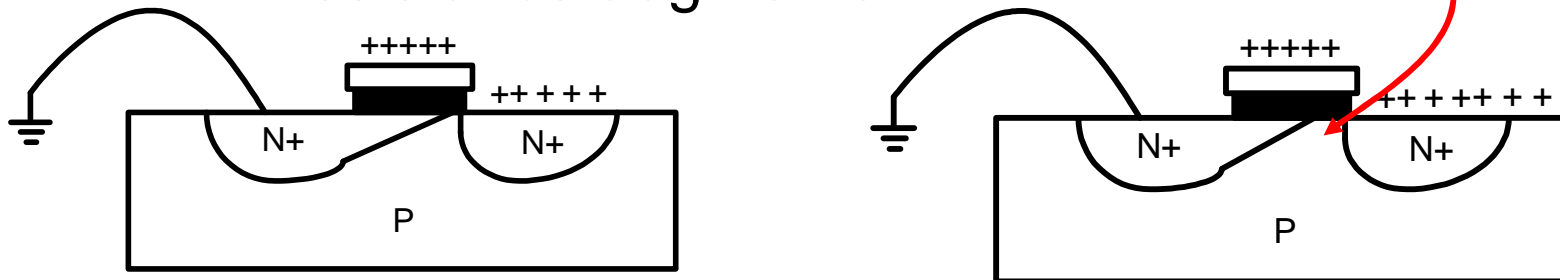
- Quand  $V_D$  est trop gros, ca coupe le canal



- Sans canal au drain, le courant passe moins bien
  - Sans canal, le substrat conduit quand meme
  - Le substrat est resistif mais le champ electrique est tres eleve

# Le canal est coupe..

- En augmentant  $V_{DS}$ , on remarque 2 choses dans le canal coupe:
  - Difference de potentiel augmente
  - Resistance augmente



- Effet net: le courant ne change pas
  - Courant independent de  $V_{DS}$

$$I = \frac{V \uparrow}{R \uparrow} \cong \text{Constant}$$

# Regions d'operation

- En revoyant nos acetates, on pourrait distinguer 3 regions d'operation:
  - Quand  $V_{GS} < V_{TH}$ : aucun canal
  - Quand  $V_{GS} > V_{TH}$  et  $V_D$  pas trop gros: canal partout
  - Quand  $V_{GS} > V_{TH}$  et  $V_D$  trop gros: canal coupe
- Que veut dire “trop gros”?
  - On sait que  $V_{G-CANAL}$  doit etre  $V_{TH}$  pour un canal
  - Si le canal est coupe, c'est que  $V_{GD} < V_{TH}$

On va donner des noms a ces modes d'operation



# Regions d'operation

- Quand  $V_{GS} < V_{TH}$ , c'est en **cut-off**
  - $I_D=0$

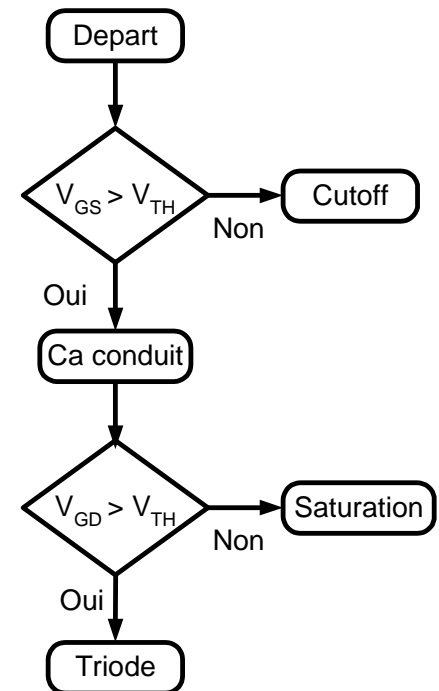
- Quand  $V_{GS} > V_{TH}$ , ca conduit:

- Si  $V_{GD} > V_{TH}$ , c'est en region **lineaire**
  - $I_D$  varie lineairement avec  $V_{DS}$

- Si  $V_{GD} < V_{TH}$ , c'est en **saturation**
  - $I_D$  cesse de varier avec  $V_{DS}$

- Note:

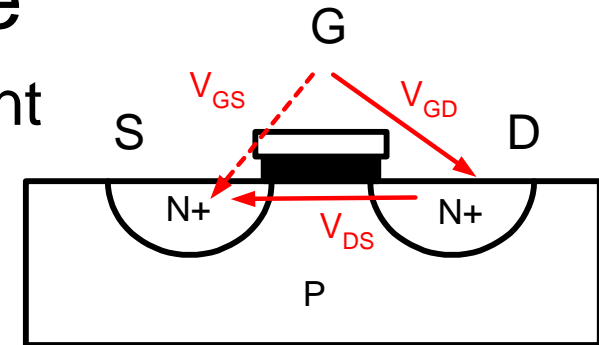
- Saturation en CMOS **DIFFERENT** du BJT



Nos equations sont pas “conventionnelles”  
Voyons une autre facon de s'exprimer...

# Regions d'operation

- $V_{GD} = V_{TH}$  est un point critique
  - J'aimerais l'exprimer differemment



- On peut voir que:

- $V_{GS} = \underline{V_{GD}} + V_{DS}$

- Le point critique c'est  $V_{GD} = V_{TH}$

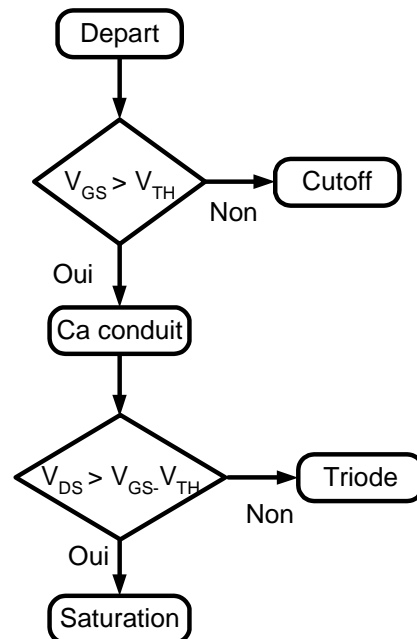
- On substitue dans l'equation:  $V_{GS} = \underline{V_{TH}} + V_{DS}$

- On isole  $V_{DS}$ :

- $V_{DS} = V_{GS} - V_{TH}$  ← C'est une autre facon de dire  $V_{GD} = V_{TH}$

# Regions d'operation

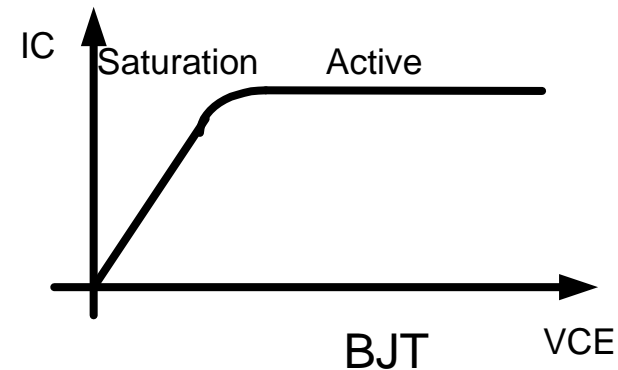
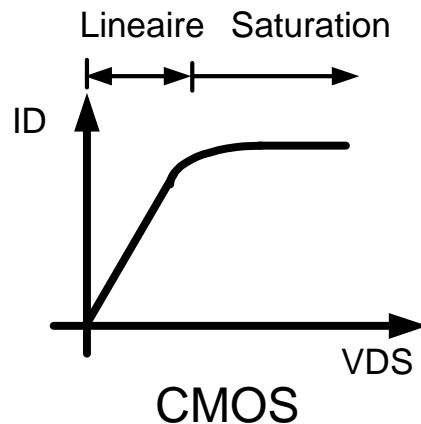
- Quand  $V_{GS} < V_{TH}$ , c'est en **cut-off**
- Quand  $V_{GS} > V_{TH}$ , ca conduit:
  - Si  $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$ , c'est en region **lineaire**
  - Si  $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$ , c'est en **saturation**



Passons maintenant aux relations  
VI des transistors

# Regions d'operation

- Caracteristiques VI des transistors:
  - **Cut-off**: aucun courant
  - **Lineaire (triode)**: I change lineairement avec  $V_{DS}$
  - **Saturation**: I independent de  $V_{DS}$



CMOS Lineaire/Triode = BJT Saturation

CMOS Saturation = BJT Active

# Le courant

- Les equations pour  $I_D$  ont ete derivees en electronique 1:
  - Referez-vous a ces acetates au besoin
- Voici les equations qu'on a trouvees:
  - En cutoff:  $I_D=0$
  - En region lineaire:

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

- En Saturation:

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

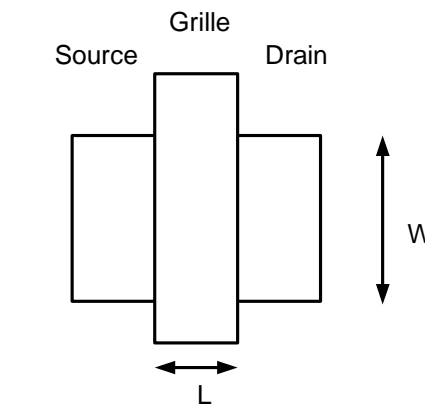
# Le courant

- Decrivons les parametres de l'equation
- Prenons l'equation en regime lineaire:

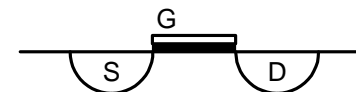
$$I_D = \mu C_{OX} \frac{W}{L} [(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS}]$$

- $\mu$ : mobilite des charges
- $C_{OX}$ : Capacite de l'oxyde (par unite de surface)
- $W$ : Largeur du canal
- $L$ : Longueur du canal

Vue de haut



Vue de coupe



# CMOS comme amplificateur

- Avec toutes ces caractéristiques, nous sommes prêts à travailler
- Certaines régions d'opération sont propices à certaines applications:
  - Pour des applications comme les portes logiques on veut être en linéaire et cut-off
  - Pour l'amplification on veut être en saturation
- Je me répète:
  - Saturation en CMOS c'est la region active pour BJT

# CMOS comme amplificateur

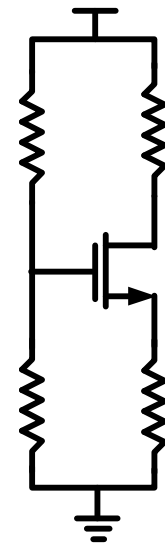
- En BJT, on voulait être en région ACTIVE pour amplifier
  - On ajuste les tensions pour s'assurer de se retrouver là ( $V_{BE}=0.7$  et  $V_{CE} > 0.2$ )
- En CMOS, on veut être en SATURATION
- On doit ajuster les tensions pour
  - Que le transistor conduise:  $V_{GS} > V_{TH}$
  - Que le transistor soit en saturation:  $V_{GD} < V_{TH}$

(pas de canal au drain!)



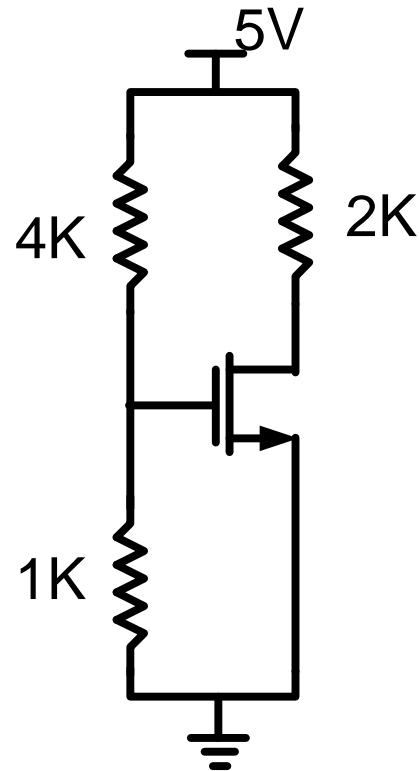
# CMOS comme amplificateur

- On utilise des resistances et des sources pour POLARISER (en DC):
  - On s'assurer d'etre en saturation
  - On choisit  $I_D$  et  $V_{GS}$  pour le gain voulu (pour analyse petit signal: prochain cours)
- On applique un signal pour amplifier (AC)
  - Prochain cours (encore une fois)



# Exemple DC

- Les problemes avec CMOS sont semblables a ceux avec BJT:
  - Trouver  $V_G$ ,  $V_S$  et  $V_D$ .
  - Trouver  $I_D$ .
  - $\mu C_{OX} W/L = 0.01$



# Exemple DC

- On a 3 regions d'operation possibles qui ont des equations differentes:
  - Il faut faire une hypothese
  - On applique les equations et on verifie l'hypothese
- Hypothese: Je suis en saturation
  - Mon courant sera:

$$I_D = \underbrace{\frac{1}{2} \mu C_{OX} \frac{W}{L}}_{\text{connu}} \underbrace{(V_{GS} - V_{TH})^2}_{\text{connu}}$$

Allons trouver  $V_{GS}$

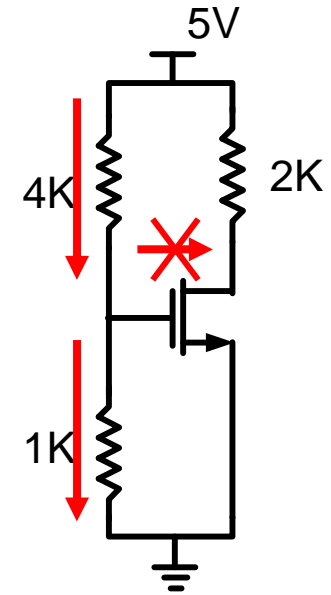
# Exemple DC

- $V_{GS} = V_G - V_S$
- $V_G$  est un diviseur de tension
  - $I_G = 0$

$$V_G = \frac{1K}{1K + 4K} 5 = 1$$

- $V_S$  est mis a 0, donc  $V_{GS} = V_G - V_S = 1$
- Le courant devient:

$$I_D = \frac{1}{200} (1 - 0.7)^2 = 450 \mu A$$



# Exemple DC

- On va maintenant trouver  $V_D$ :

$$V_D = 5 - 450\mu A \cdot 2K = 4.1V$$

- Resultats:

- $V_D=4.1$
- $V_G=1v$
- $V_S=0v$

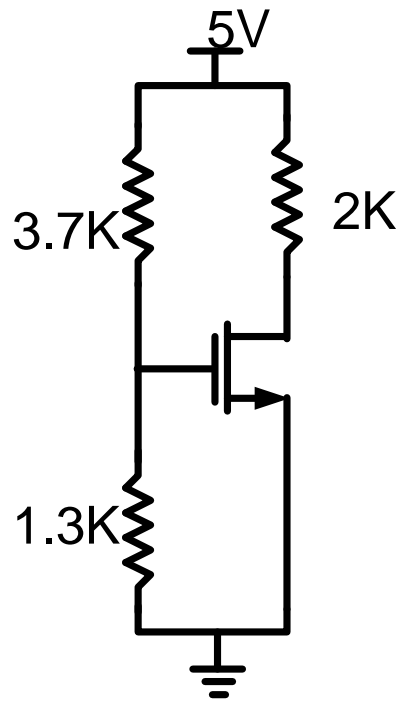
NOTEZ:  $V_{GS}$  a le DROIT d'etre plus que 0.7v  
contrairement a  $V_{BE}$  des BJT

- On verifie l'hypothese de la saturation:
  - $V_{GD} = -3.1v < V_{TH}$  (pas de canal)

C'est confirme... on a fini...

# Exemple DC (seul)

- Exemple (seul)
  - $\mu C_{OX} W/L = 0.01$
  - $V_{TH} = 0.7v$



# Exemple DC (seul)

- Hypothese de region de saturation:
- On trouve la tension a la grille:

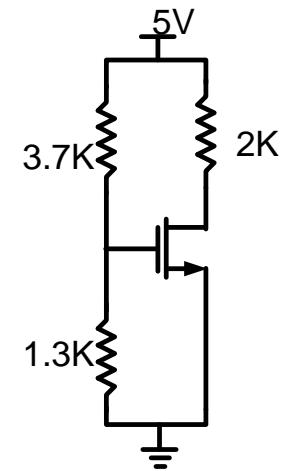
(Diviseur de tension)  $V_G = \frac{1.3K}{1.3K + 3.7K} 5 = 1.3$

- Puisque la tension  $V_S=0$

$$V_G = 1.3 \Rightarrow V_{GS} = 1.3$$

- On entre les chiffres dans l'equation  $I_D$ :

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \Rightarrow I_D = \frac{1}{2} (0.01)(1.3 - 0.7)^2 = 1.8mA$$

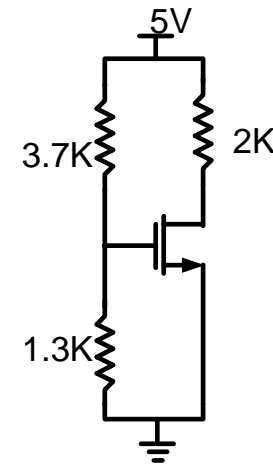


# Exemple DC (seul)

- On trouve  $V_D$ :

$$V_D = 5 - 1.8mA \cdot 2K = 1.4V$$

- $V_G = 1.3$
- $V_S = 0$
- $V_{GD} = -0.1$  (pas de canal au drain)
- On est encore en region de saturation
  - Cependant, pas tres loin de la region triode

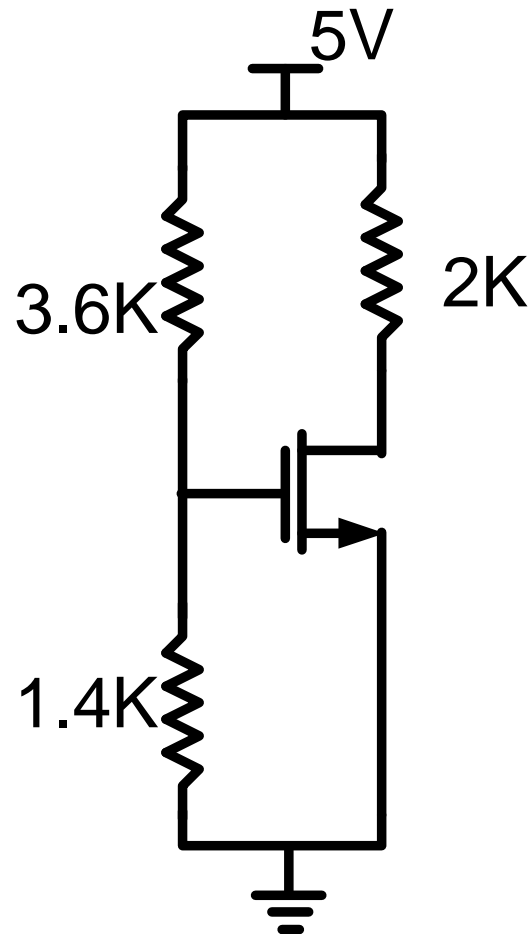


Si  $V_G$  augmentait ou si  $R_D$  augmentait, on aurait des “problemes”...



# Exemple DC en triode

- Poussons les chose un peu plus loin...



# Exemple DC en triode

- On trouve  $V_G$  avec diviseur de tension:

$$V_G = \frac{1.4K}{1.4K + 3.6K} 5 = 1.4 \quad V_{GS} = 1.4$$

- Avec  $V_{GS}$ , on trouve le courant:

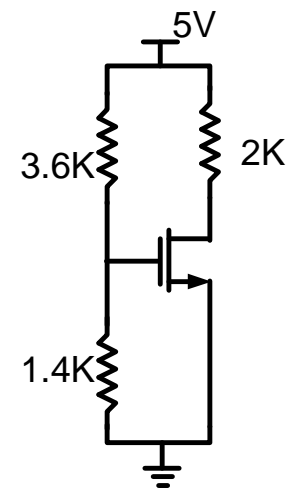
$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad \Rightarrow \quad I_D = \frac{1}{2} (0.01) (1.4 - 0.7)^2 = 2.45mA$$

- Avec le courant, on trouve  $V_D$ :

$$V_D = 5 - 2.45mA \cdot 2K = 0.1V$$

$V_{GD} = 1.3 > V_{TH}$  (Il y a un canal au drain)

Hypothese "saturation" n'est plus bonne!



# Exemple DC en triode

- On se trouve dans la region lineaire
  - Les chiffres qu'on a trouve ne sont plus bons.
- Il faut refaire TOUTES les etapes avec l'hypothese de la region lineaire (triode)
  - Il faut utiliser l'autre equation de courant:

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

- En plus, il faut maintenant trouver  $V_{DS}$ .

# Exemple DC en triode

- L'équation de  $V_{DS}$  est:

$$V_{DS} = V_D = 5 - 2000I_D$$

- On substitue dans l'équation du courant:

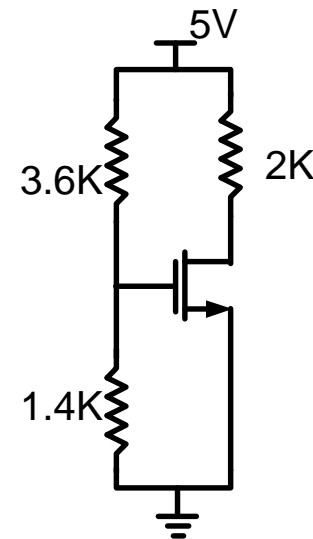
$$I_D = \mu C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} \Rightarrow I_D = 0.01(1.4 - 0.7)(5 - 2000I_D)$$

- On simplifie les chiffres:

$$I_D = 0.035 - 14I_D$$

- Et on isole  $I_D$ :

$$I_D = \frac{0.035}{15} = 2.33mA$$



# Exemple DC en triode

- On devrait vérifier que le transistor est bien en région linéaire.

$$V_D = 5 - 2.33mA \cdot 2K = 0.34$$

- $V_{GD} = 1.4 - 0.34 > 0.7$ 
  - Il y a canal au drain
  - On est bien en région linéaire

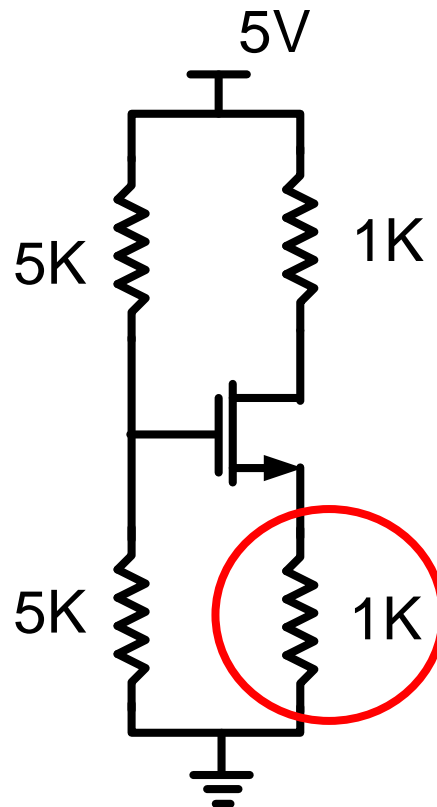
# Choses a retenir

- On commence l'analyse avec une hypothese:
  - Cette hypothese nous donne des equations a utiliser
- On fait les calculs et on VERIFIE la region d'operation
  - Si l'hypothese est toujours bonne, on a fini
  - Sinon, il faut faire une 2e hypothese et tout recommencer avec les nouvelles equations

Il ne faut surtout pas oublier de verifier la nouvelle hypothese!

# Exemple DC avec $R_S$

- Les choses se compliquent avec une resistance a la source



# Exemple DC avec $R_S$

- $V_G$  se trouve avec diviseur de tension

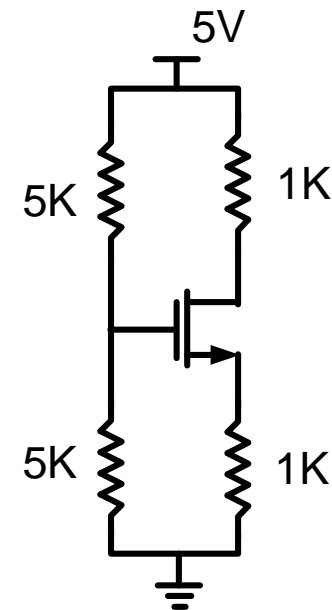
$$V_G = \frac{5K}{5K + 5K} 5 = 2.5$$

- On sait que le courant est:

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

- Puisque  $V_S$  n'est pas 0, il faut le calculer pour trouver  $V_{GS}$

$$V_S = 1000 I_D$$





# Exemple DC avec $R_S$

- On combine les deux pour former  $V_{GS}$ :

$$V_{GS} = V_G - V_S \quad \Rightarrow \quad V_{GS} = 2.5 - 1000I_D$$

- On substitue ce resultat dans l'equation  $I_D$ :

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad \Rightarrow \quad I_D = \frac{1}{2} (0.01) (1.8 - 1000I_D)^2$$

- Equation de 1 variable de 2e degre.
  - On manipule pour retrouver la forme connue:

$$0 = (0.0162 - 19I_D + 5000I_D^2)$$

# Exemple DC avec $R_S$

- Equation quadratique avec solutions:

$$\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

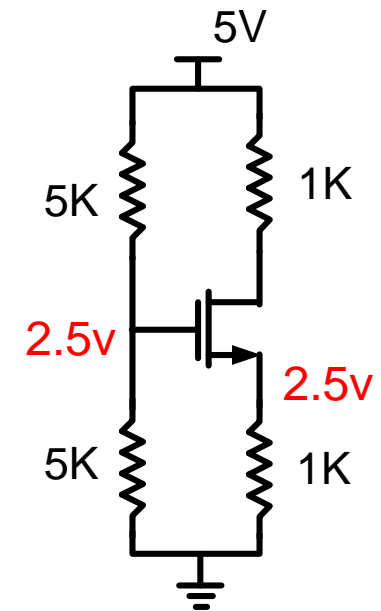
- Dans notre cas:

$$\frac{19 \pm \sqrt{19^2 - 4 \cdot 5000 \cdot 0.0162}}{10000} = \begin{matrix} 2.5mA \\ 1.29mA \end{matrix}$$

- Quelle solution prendre?

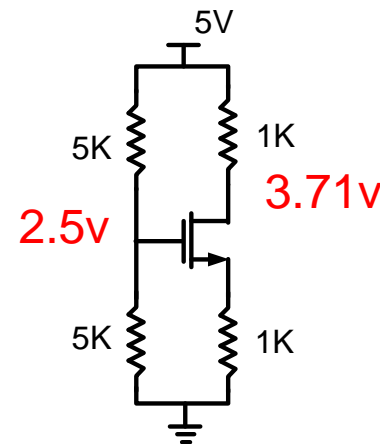
# Exemple DC avec $R_S$

- Essayons-en un pour le fun... le 2.5mA.
  - On pourrait trouver  $V_S=2.5v$
  - Ca ne semble pas si mauvais
- Probleme:  $V_G=2.5$ , donc  $V_{GS}=0$ 
  - Ca voudrait dire qu'on est en cut-off
- Contradiction:
  - $V_{GS} < 0.7$ : On est en cut-off
  - Le courant est de 2.5mA en **CUT OFF**?
  - Ca n'a pas de sens...



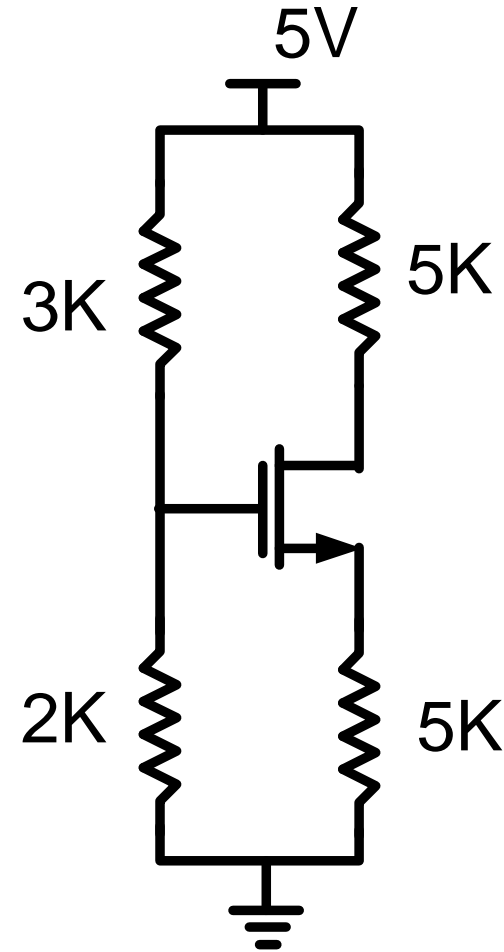
# Exemple DC avec $R_S$

- Essayons l'autre: 1.29mA
  - $V_S=1.29V$ , au moins le transistor conduit
- Verifions qu'il soit en region saturation
  - $I_S=I_D$
  - Donc  $V_D=5-1.29=3.71v$
- $V_{GD}=2.5-3.71 < 0.7$  (aucun canal au drain)
  - On est en saturation



# Exemple DC avec $R_S$ (seul)

- Trouvez  $V_G$ ,  $V_S$  et  $V_D$ .
- Trouvez  $I_D$ .
- $\mu C_{OX} W/L = 0.05$



# Exemple DC avec $R_S$ (seul)

- Hypothese: on est en saturation
- La tension de la grille (diviseur de tension)

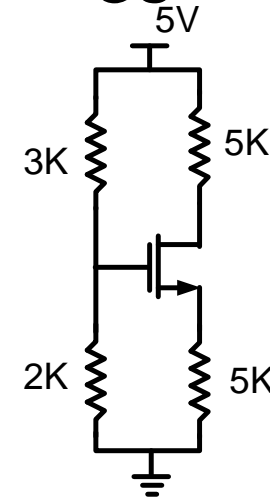
$$V_G = \frac{2K}{2K + 3K} 5 = 2$$

- On cherche  $V_S$  parce qu'on veut  $V_{GS}$

$$V_S = 5000I_D$$

- On trouve  $V_{GS}$ :

$$V_{GS} = 2 - 5000I_D$$



# Exemple DC avec $R_S$ (seul)

- On met les chiffres dans  $I_D$ :

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \Rightarrow I_D = \frac{1}{2} (0.05) (2 - 5000I_D - 0.7)^2$$

- On rearrange:

$$0 = 0.04225 - 326I_D + 625000I_D^2$$

- Il faut maintenant isoler  $I_D$

# Exemple DC avec $R_S$ (seul)

- Equation quadratique:

$$\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

- On remplace par les chiffres:

$$\frac{326 \pm \sqrt{326^2 - 4 \cdot 0.04225 \cdot 625000}}{1250000} = \frac{326 \pm \sqrt{651}}{1250000}$$

- Avec les calculs, on trouve 2 solutions:

$$\frac{326 \pm \sqrt{651}}{1250000} = \begin{matrix} 281 \mu A \\ 240 \mu A \end{matrix}$$



# Exemple DC avec $R_S$ (seul)

- On calcule  $V_S$  pour chacun des courants:
- $281\mu\text{A}$ :
  - $V_S=1.405$
- $240\mu\text{A}$ :
  - $V_S=1.2$
- Pour  $V_S=1.405$  et  $V_G=2$ ,  $V_{GS}=0.595 < 0.7$ 
  - $V_{GS} < 0.7$ , on est en cut off (contradiction)
- Pour  $V_S=1.2$  et  $V_G=2$ ,  $V_{GS}=0.8 > 0.7$

Le  $240\mu\text{A}$  semble correct...

# Exemple DC avec $R_S$ (seul)

- Dernière vérification:  $V_D$  pour saturation

$$V_D = 5 - 5000 \cdot 240 \mu A = 3.8$$

- $V_{GD} = 2 - 3.8 < 0.7$  (pas de canal au drain)
  - On est donc en saturation