

Électronique

Transistors à effet de champ

Transistors à effet de champ

- Les transistors bipolaires sont des structures intéressantes dans la macroélectronique:
 - Au niveau des circuits discrets, c'est populaire
- Au niveau de la microélectronique, les transistors à effet de champs dominant
 - Ils prennent présentement 95% du marché
 - On s'attend à ce qu'ils dominant pour au moins un autre 5-10 ans

Transistors à effet de champ

- Les transistors à effet de champ sont différents des BJT:
 - Les BJT fonctionnent avec un mécanisme de drift et diffusion (comme les diodes)
 - Les transistors à effet de champ fonctionnent avec le champ électrique
- En anglais on dit “field effect transistor” (FET)
- N’importe quel transistor à effet de champ s’appelle un FET...

MOSFET

- Le FET le plus populaire est le MOSFET
- MOS: Metal Oxide Semiconductor
 - Nom reflète la structure physique
 - Terme erroné pour transistors modernes
- 90-95% des circuits intégrés modernes sont fabriqués avec des (millions de) MOSFETs

MOSFET

- Avantages:

- Prends moins d'espace
- Procédés moins compliqués
- Consomme moins de puissance

Moins cher

- Désavantages:

- Moins rapides ← Devient de moins en moins vrai

- L'industrie investit beaucoup d'argent dans cette technologie:

- Cependant, on atteindra ses limites physiques bientôt

MOSFET

- Les MOSFETs viennent en 2 formes:
 - Type N: NMOS
 - Type P: PMOS
- Au début, les puces étaient d'une sorte
 - Soit NMOS ou soit PMOS
- Éventuellement, on a réussi à intégrer les 2:
on appelle ça le CMOS
 - "C" est pour dire "complementary"

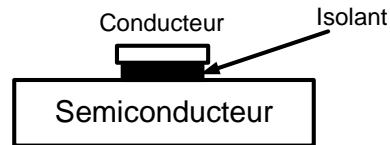
Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)

MOSFET

- En résumé, il existe 2 genres de MOSFET
 - PMOS et NMOS
- Les puces qui ont des PMOS et NMOS à l'intérieur sont appelées puces CMOS
 - De nos jours, les puces qui utilisent les MOSFETs sont toutes CMOS...
- Plusieurs utilisent les mots MOSFET et CMOS de façon interchangeable
 - Mais c'est faux

CMOS

- Structure physique d'un MOSFET:



- La structure physique est:
 - Conducteur: M/tal
 - Isolant: Oxyde
 - Semiconducteur...
- Métal-Oxyde-Semiconducteur (MOS)
 - En réalite, le conducteur c'est du polysilicium...

Ajoutons plus de détail à la structure

CMOS

- Une structure plus complète:

- On ajoute 2 régions



- Pour NMOS et PMOS, on a:

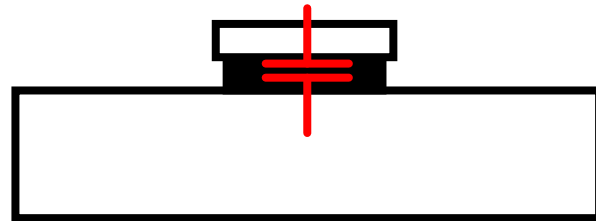
- Les NMOS ont des régions N+
- Les PMOS ont des régions P+
- Le bloc de silicium (substrat) est aussi différent



Comment fonctionnent ces transistors?

CMOS

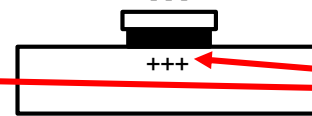
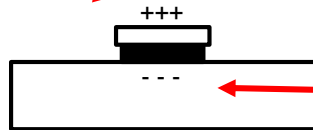
- Conducteur-isolant-“conducteur”: Capacité



Ignorons les 2 regions pour commencer

- En mettant +, on aura – et vice versa

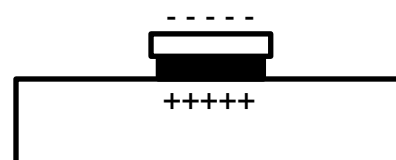
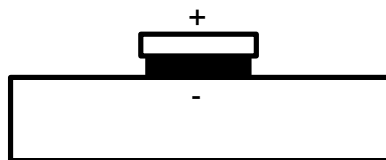
On met une tension



Resultat: On attire des charges

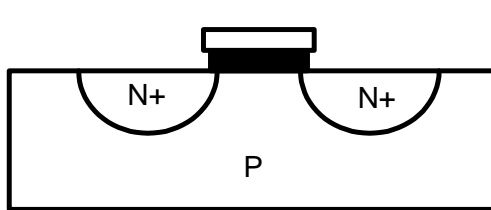
- Les charges sont proportionnelles

- Plus la tension est grande, plus il y a de charges

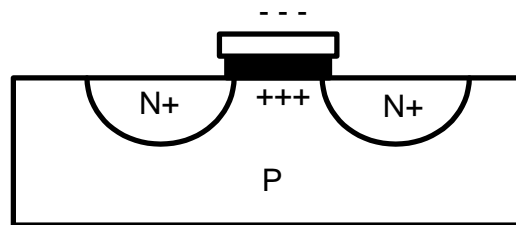


Comment ça fonctionne?

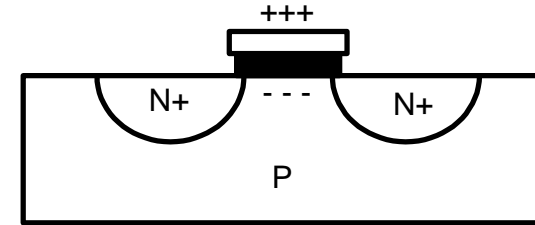
- Commençons pour NMOS:



V=0

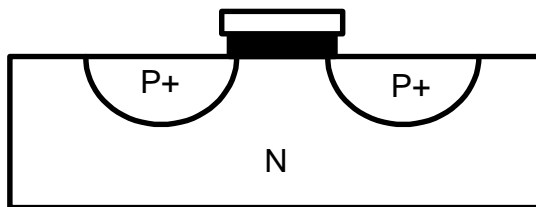


V négatif

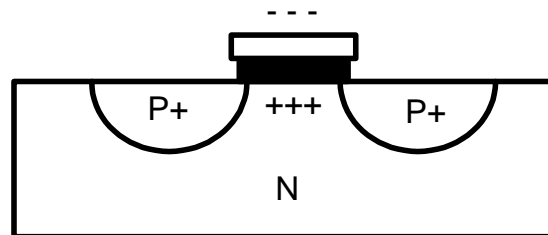


V positif

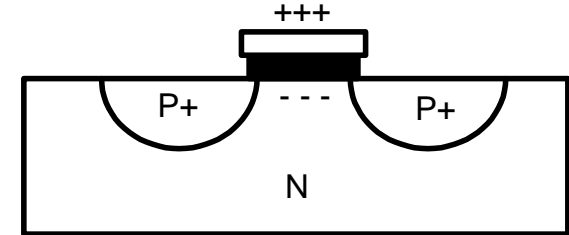
- Et pour le PMOS:



V=0



V négatif

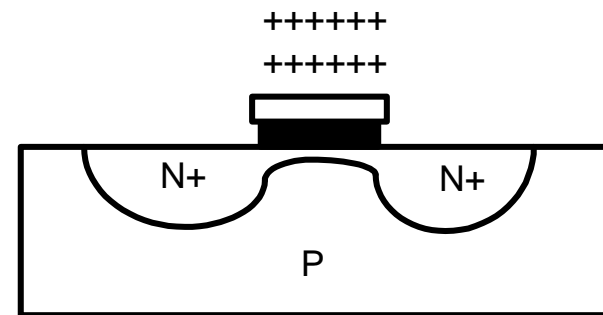
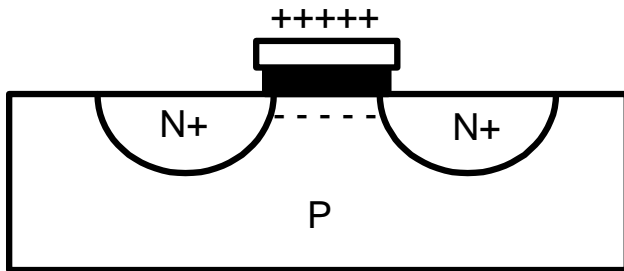


V positif

Ça fait la même chose jusqu'à présent

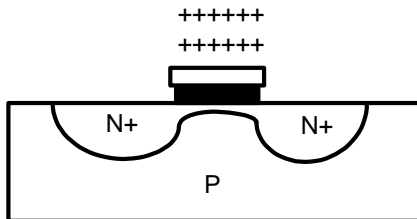
Comment ça fonctionne?

- Regardons le 3e cas du NMOS:
 - En appliquant une tension positive on a plus d'électrons libres "en surface"
- OR! Du silicium avec beaucoup d'électrons libres on appelle ça N+...
- Cette région devient comme du N+...



Comment ça fonctionne?

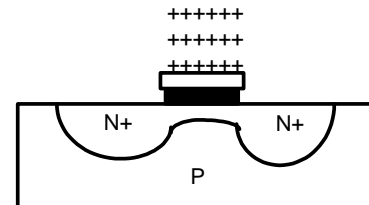
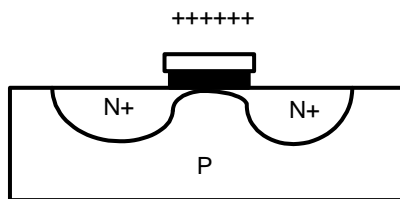
- C'est comme avoir un gros bloc de N+:
 - Le courant peut bien circuler d'un bord à l'autre
 - Cette nouvelle région s'appelle le canal
- La tension requise pour avoir un canal: V_{TH}
 - S'appelle tension de seuil (threshold)
 - Dépend des propriétés physiques
- Avec $V_{TH} + \Delta V$, il peut y avoir du courant



Avec V_{TH} , le canal est très mince... il en faut un peu plus

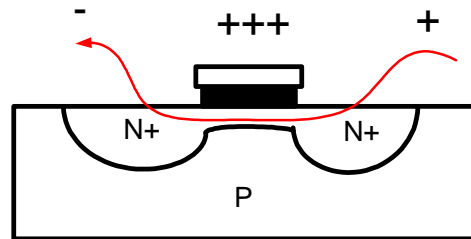
Comment ça fonctionne?

- Quand la tension est moins que V_{TH} , il y a un TRÈS petit courant
 - On fait semblant qu'il n'y en a pas
- Avec V_{TH} , on a le minimum requis pour transporter du courant
- Plus on augmente la tension, plus on peut transporter du courant
 - Canal épais: plus de charges peuvent passer

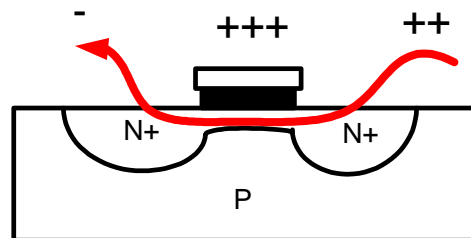


Comment ça fonctionne?

- Avec + au conducteur on crée un canal
 - Sans tension ailleurs, il n'y aura aucun courant
 - C'est comme une résistance faible...
- Il faut appliquer une tension aux 2 bornes:



- Plus de tension → plus de courant



Comment ça fonctionne?

- Résumons:
 - Si V au conducteur est moins que V_{TH} \rightarrow aucun courant (courant négligeable)
 - Si V au conducteur est plus, ça “connecte” les deux bords (avec faible résistance)
- Le modèle n’est pas complet
 - Mais c’est une bonne première approximation
- On complètera le modèle tantot...

Représentation circuit

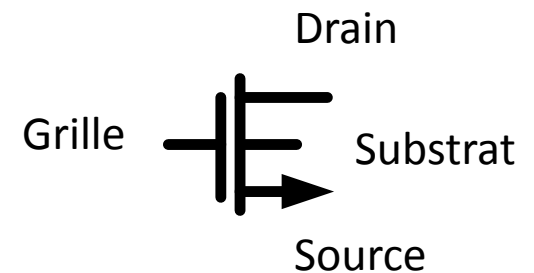
- Pour faire des circuits, il faut avoir des symboles pour les transistors:



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

Représentation circuit

- Comment identifier les pattes?
 - Grille est isolée de son bord
 - Substrat est adjacent
 - Source est la patte avec la flèche
 - Drain est celui qui reste
- On peut faire le parallèle avec BJT:
 - Grille : Base
 - Source : Émetteur
 - Drain : Collecteur



Le substrat est “spécial”... aucun équivalent BJT

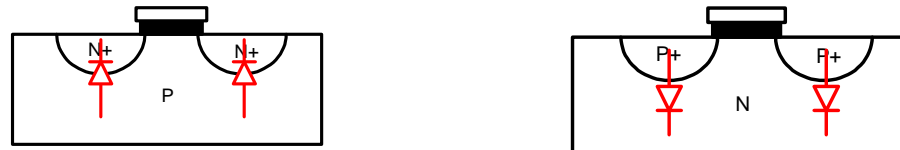
Notes sur la source

- La source a une flèche: direction suit le courant (comme l'émetteur)
- Contrairement aux BJTs, les CMOS sont symétriques:
 - Source et drain sont **IDENTIQUES**
- Par convention (important!)
 - Source a la tension la plus faible avec NMOS
 - Source a la tension la plus élevée avec PMOS

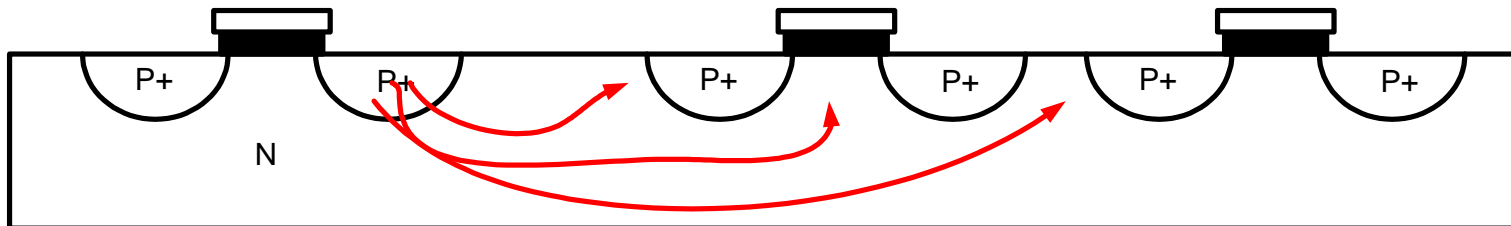


Démystification du substrat

- Qu'est-ce que fait le substrat?
- Structure CMOS donne des problèmes:
 - Quand P et N sont collés, il y a une diode...



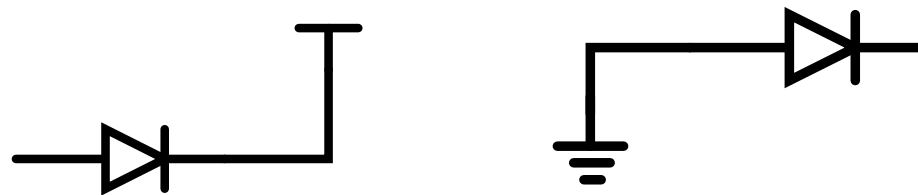
- Ces diodes sont non-voulues (parasites)
 - On ne veut pas que ces diodes conduisent



Ce serait bien de les bloquer

Démystification du substrat

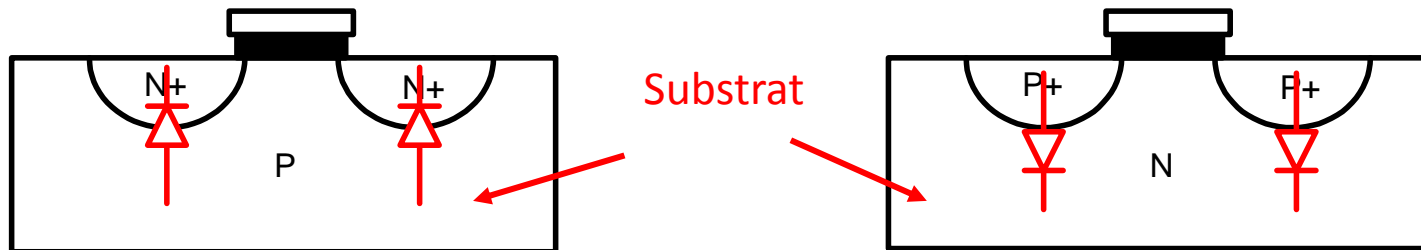
- Pour bloquer ces diodes on remarque:
 - Il faut 0.7 pour conduire
 - Tension plus élevée = alimentation
 - Tension moins élevée = ground
- Pour qu'une diode ne conduise pas:



- Dans ces cas, ce serait impossible d'avoir 0.7v

Démystification du substrat

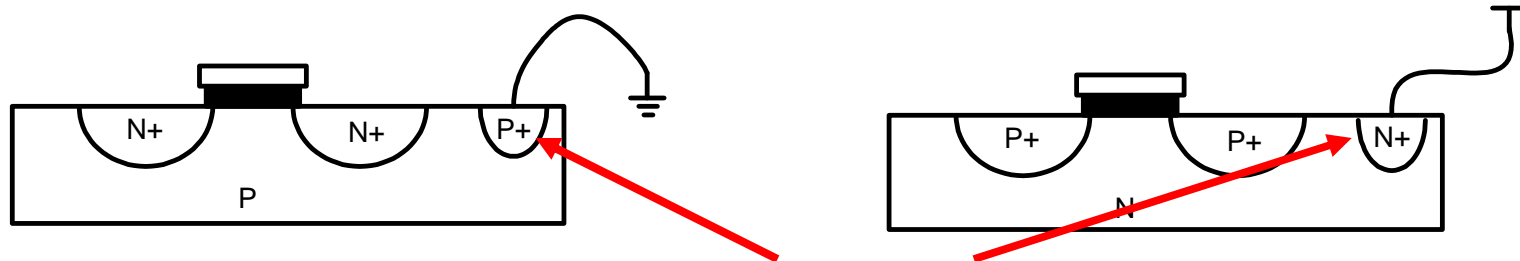
- Reprenons nos diagrammes:



- Substrat: section de silicium sur laquelle les transistors sont formés
- On fait les connexions suivantes:
 - NMOS: Substrat P (anode) au ground
 - PMOS: Substrat N (cathode) à l'alimentation

Démystification du substrat

- On se retrouve avec ceci:



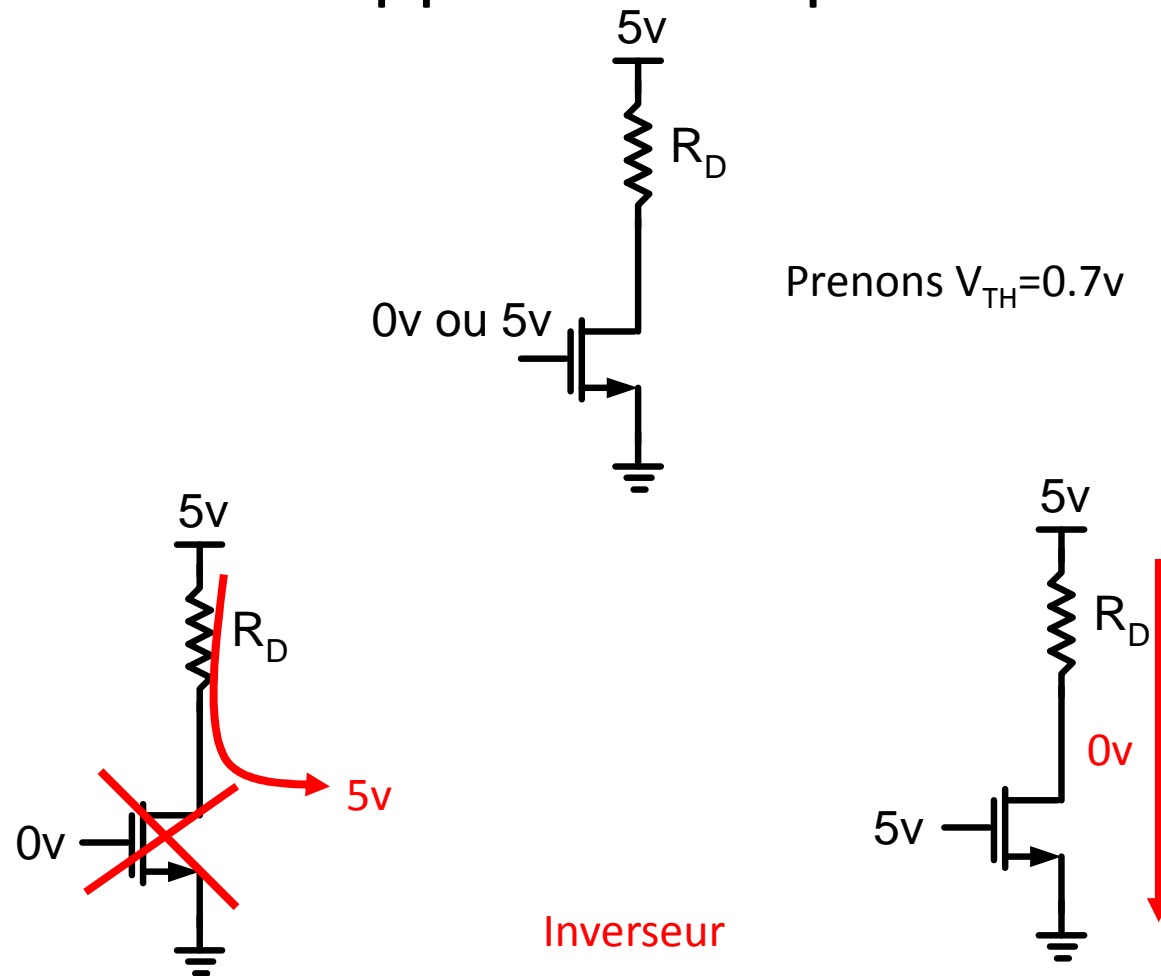
- En passant: pourquoi P+ et N+?
- Puisque le substrat est souvent connecté à l'alimentation/ground, on l'ignore...



C'est la raison pour laquelle certains dessinent des CMOS avec 3 pattes

Analyse rapide d'un circuit

- Regardons une application rapidement...



Notes

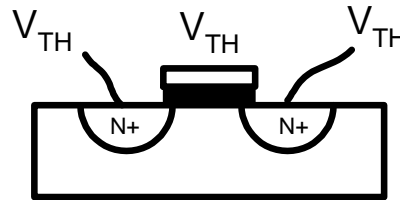
- On n'a pas besoin de résistance à la grille:
 - Aucun courant dans la grille: c'est un isolant.
- Tension à la grille **n'est pas** toujours 0.7v
 - Pensez aux BJT où $V_{BE}=0.7$ quand ça conduit
- Aucun lien entre $V_{TH}=0.7v$ et $V_{BE}=0.7v$
 - C'est une coïncidence!
- Courant identique à la source et au drain: $I_D=I_S$

Allons compliquer les choses...

V_{GS} à la place de V_G

- “Si tension à la grille $> V_{TH}$, ça conduit”
 - Pas totalement vrai!

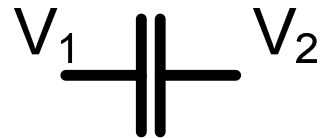
- Imaginez ceci:



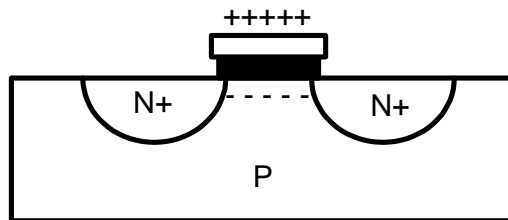
- Une tension à la grille de V_{TH} ne sera pas assez pour avoir un canal
 - V_{Source} et V_{Drain} augmentent V_{Canal}
 - Pour avoir – au canal, il faut avoir V_{Grille} plus gros

V_{GS} à la place de V_G

- Pensez à un condensateur:



- Pour attirer des $(-)$ à V_2 , il faut que V_1 soit positif PAR RAPPORT à V_2
- Dans le cas d'un transistor NMOS:
 - V_G doit être plus grand que V_{CANAL} de plus que V_{TH}

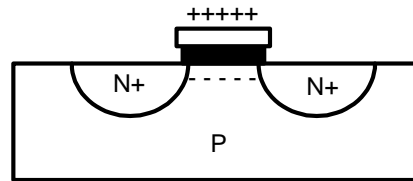


$$V_G - V_{CANAL} > V_{TH}$$

$$V_{G-CANAL} > V_{TH}$$

V_{GS} à la place de V_G

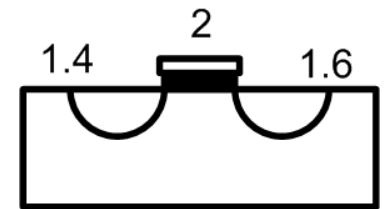
- Problème: Canal n'a pas de pattes:
 - On ne peut pas mesurer la tension au canal



- On n'a seulement accès qu'aux pattes
 - On peut utiliser le drain ou la source
- Lequel devrait-on regarder?
 - Voltage grille-drain ou voltage grille-source?

V_{GS} à la place de V_G

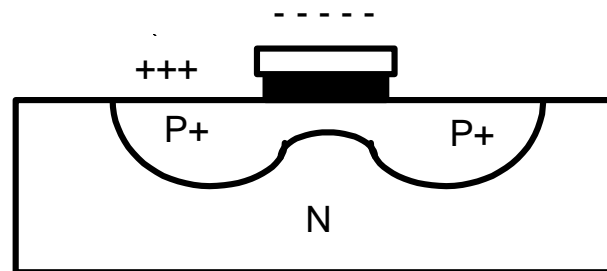
- Avec NMOS, la source a la tension la plus faible
 - La tension grille-source est plus grande que grille -drain
 - Si la tension grille-drain est plus petite que V_{TH} , il est possible d'avoir un canal du côté de la source
 - Si la tension grille-source est plus petite que V_{TH} , il y a 0% chance d'avoir un canal
- On va approximer $V_{G-CANAL}$ avec V_{GS} :
 - On va dire que, si $V_{GS} > V_{TH}$, il y a un canal



S'il n'y a pas de canal à la source, il y en a nulle part.

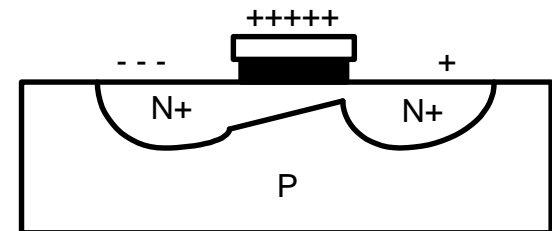
V_{GS} à la place de V_G

- 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 élevée
 - On veut tension négative comparé à V_S pour attirer des charges positives...
 - Donc, V_{GS} doit être négatif pour avoir un canal
 - $|V_{GS}| > V_{TH}$



Encore plus de complications!

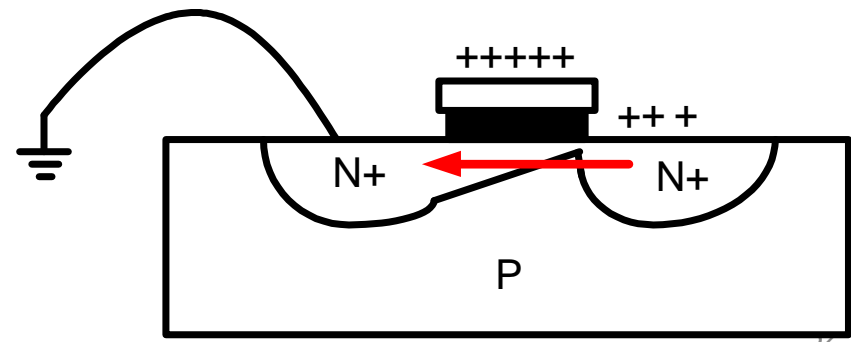
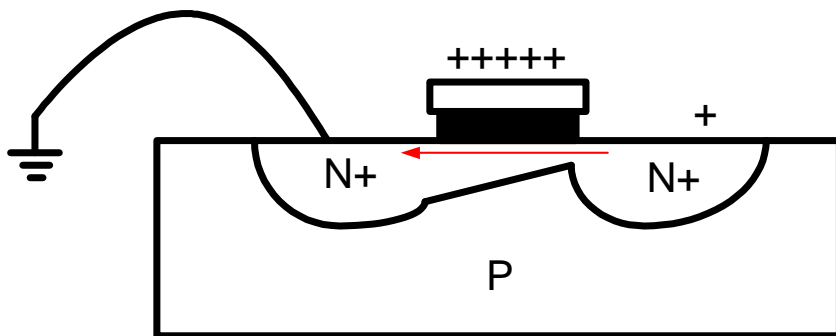
- Plus $V_{G-CANAL}$ gros, plus canal est “épais”
- On approxime $V_{G-CANAL}$ avec V_{GS} mais V_D et V_S sont souvent différents
 - $V_{G-CANAL}$ à la source sera différente de $V_{G-CANAL}$ au drain
 - L'épaisseur sera différente à la source et au drain
- Par exemple:
 - V_{GS} gros \rightarrow canal épais
 - V_{GD} faible \rightarrow canal plus mince



On y est presque... récapitulons avant de continuer...

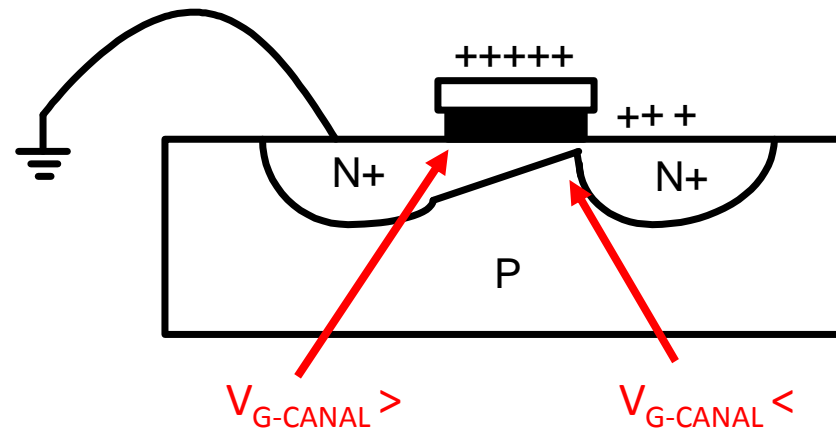
Reprenons les étapes...

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



J'augmente V_{DS} ...

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

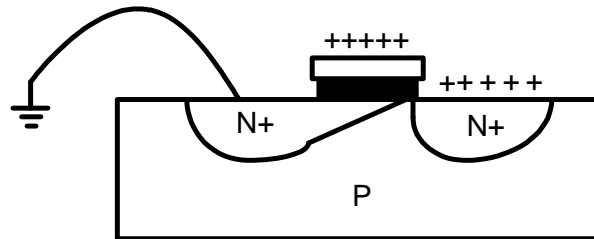


- Si V_D trop gros, $V_{G-CANAL} < V_{TH}$ au drain
 - Mais $V_{G-CANAL} > V_{TH}$ a la source

Si $V_{GD} < V_{TH}$, il n'y a plus de canal au drain...

Le canal est coupé..

- Quand V_D est trop gros, ça coupe le canal



- Sans canal proche du drain, les charges traversent MOINS bien
 - La région coupée est une région qui est dopée P
 - Région P conduit moins bien qu'une région N+
 - Mais ça conduit quand même...

Le canal est coupé..

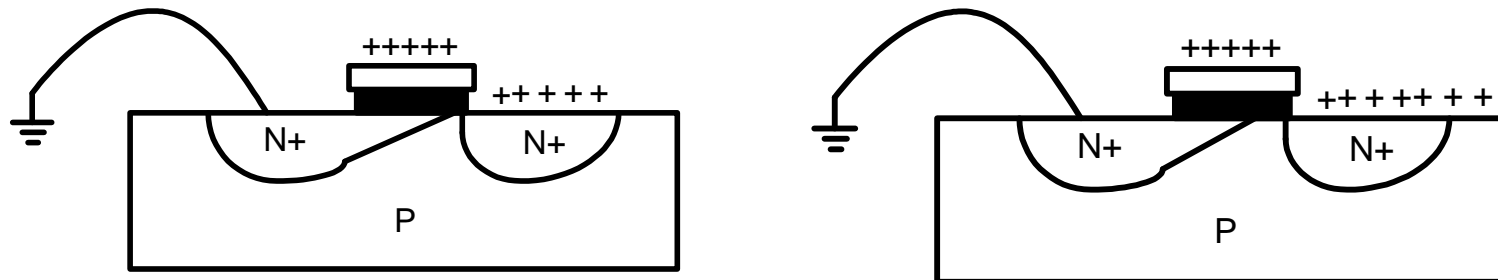
- En augmentant V_{DS} :

- Différence de voltage augmente

$V \uparrow$

- Zone coupée grossit: résistance augmente

$R \uparrow$



- Effet net: le courant ne change pas

- Courant indépendant de V_{DS}

$$I_D \propto \frac{V_{DS} \uparrow}{R \uparrow} = \text{constante}$$

Régions d'opération

- En revoyant nos powerpoint, on pourrait distinguer 3 régions d'opération:
 - Quand $V_{GS} < V_{TH}$ **Cutoff**
 - Quand $V_{GS} > V_{TH}$ et V_{DS} pas trop gros **Linéaire**
 - Quand $V_{GS} > V_{TH}$ et V_{DS} trop gros **Saturation**
- Trop gros?
 - On sait que $V_{G-CANAL}$ doit être V_{TH} pour un canal
 - Donc, trop gros veut dire: $V_{GD} > V_{TH}$

On pourrait exprimer cette condition d'une autre manière... (parfois pratique)

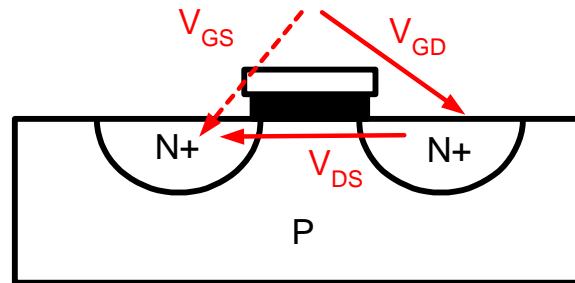
Régions d'opération

- Sachant que

1) $V_{GS} = V_G - V_S$

2) $V_{DS} = V_D - V_S$

3) $V_{GD} = V_G - V_D$



- Si on additionne 2 et 3, V_D s'annule:
 - $V_{GS} = V_{GD} + V_{DS}$
- V_{GD} doit être minimum V_{TH} pour avoir un canal au drain:
 - $V_{GS} = V_{TH} + V_{DS}$
- On réarrange et on obtient ceci: $V_{DS} = V_{GS} - V_{TH}$

Si V_{DS} plus gros, on n'aura plus de canal au drain

Le courant

- L'équation du courant se dérive mathématiquement:
 - Mais ce n'est pas très pertinent
- Il est possible de trouver ceci:

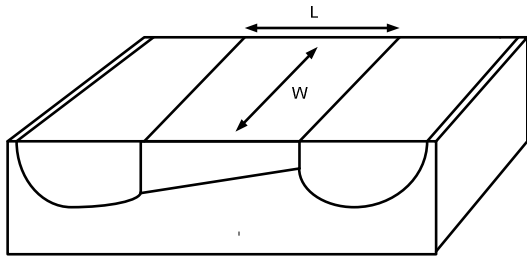
$$I_D = \mu C_{OX} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

C'est la version "précise"
de l'équation (pas utilisée ici)

- Allons voir ce que les différentes parties veulent dire...

Le courant

- Les termes L et W sont les dimensions physiques du canal
 - Plus c'est large, mieux les charges passent
 - Plus c'est long, plus la résistance est élevée



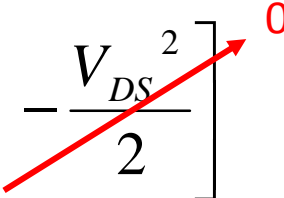
$$I_D = \mu C_{OX} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

- C_{OX} est la capacité d'oxyde et μ est la mobilité des électrons/trous

Typiquement, $\mu C_{OX} W/L$ et V_{TH} sont donnés ou peuvent être trouvés

Le courant

- Quand V_{DS} est petit, il y a canal partout:

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


- Ça devient:

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

- Le courant a une dépendance LINÉAIRE sur V_{DS}

D'où le nom "region linéaire"

Le courant

- Quand V_{DS} est grand, le courant devient indépendant de V_{DS} :
 - Il est constant et égal au courant lorsque $V_{DS}=V_{GS}-V_{TH}$
 - On substitue: $V_{DS}=V_{GS}-V_{TH}$

$$I_D = \mu C_{OX} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{TH}) \underline{V_{DS}} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \Rightarrow I_D = \mu C_{OX} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{TH}) \underline{(V_{GS} - V_{TH})} - \frac{(V_{GS} - V_{TH})^2}{2} \right]$$

- Ça devient:

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

Le courant "sature" et ça devient indépendant de V_{DS}

Résumé

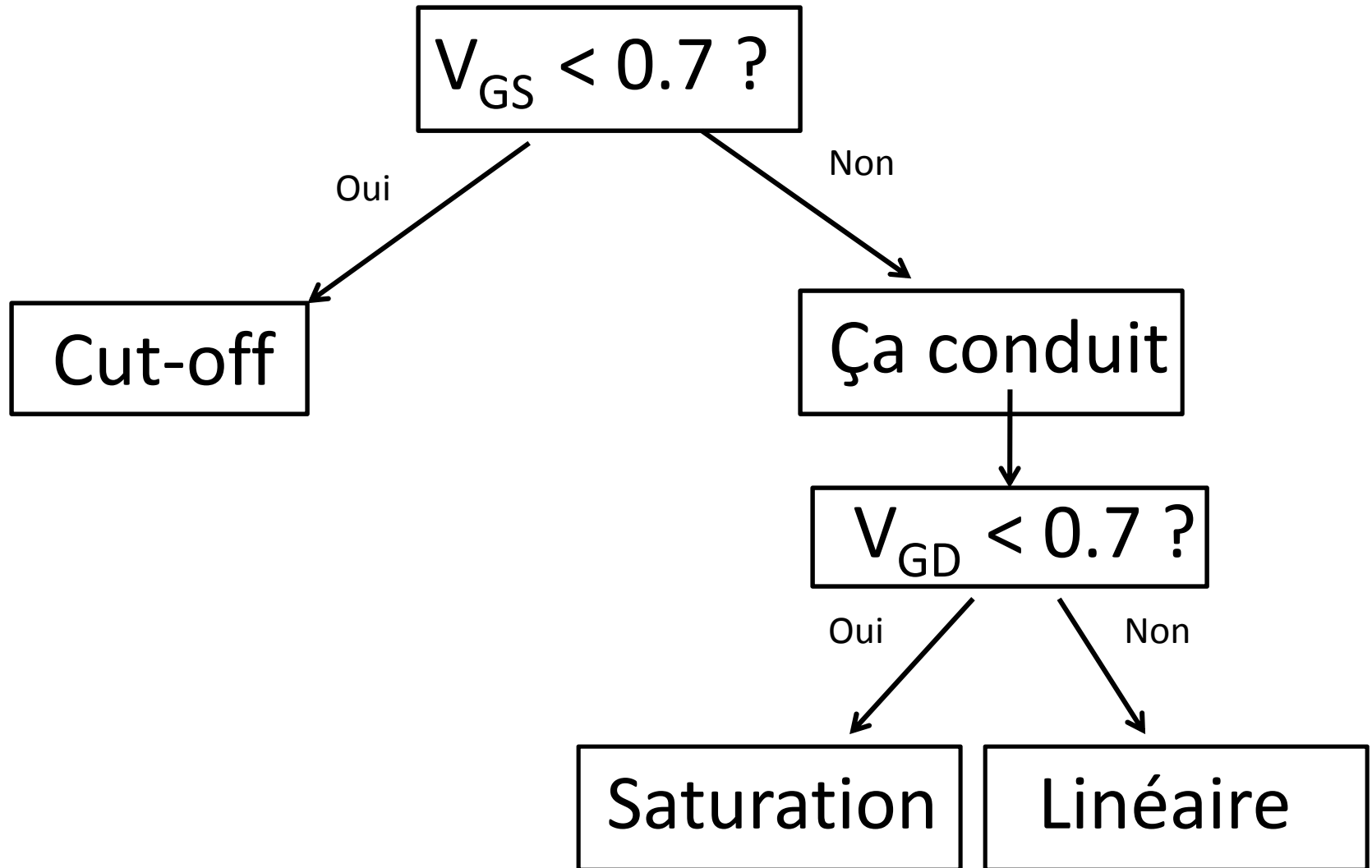
- On regarde la tension à la grille (V_{GS})
 - Si c'est plus petit que $V_{TH}=0.7$, c'est en cutoff ($I_D=0$)
- Si $V_{TH} > 0.7$, c'est en conduction et ça peut se retrouver dans 2 zones:
 - Si V_{DS} est petit (ou $V_{GD} > 0.7$), le canal est présent partout et on est en région linéaire

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

- Si V_{DS} est grand (ou $V_{GD} < 0.7$), le canal est coupé. On est en saturation

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

Résumé



Approche

- Approche semblable aux BJT et diodes
 - 1) Hypothèse
 - 2) Écrire équations et trouver tensions/courants
 - 3) Vérifier l'hypothèse

Paramètres

- Voici les équations 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/linéaire

- μ : Mobilité des électrons/trous
- C_{OX} : Capacité d'oxyde de grille
- V_{TH} : Tension de seuil

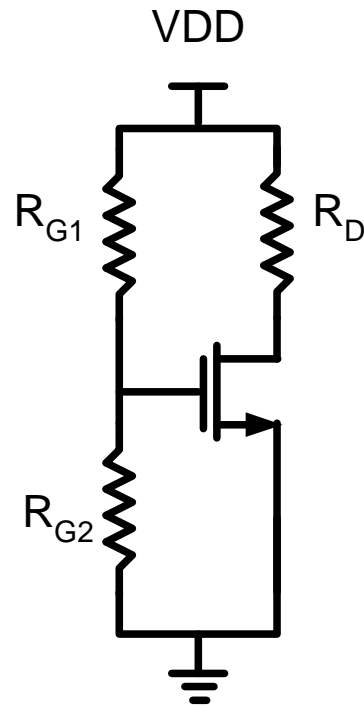
Nous avons aucun contrôle
sur ces paramètres

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 (pour l'examen):
 - 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...

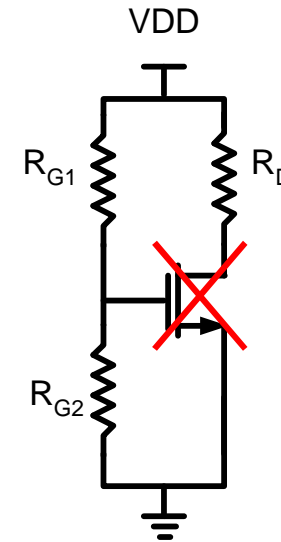
Exemple

- Commençons avec un circuit simple:
 - On veut trouver I_D , V_D et V_G pour **les 3** régions d'opération



Exemple (cut-off)

- On commence par le cutoff
- Il faudrait que $V_{GS} < V_{TH}$
- Dans ce cas, $I_D = 0$
 - Circuit-ouvert au drain
 - $V_D = V_{DD}$
- Il n'y a JAMAIS de courant DC à la grille
 - V_G se trouve avec diviseur de tension



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

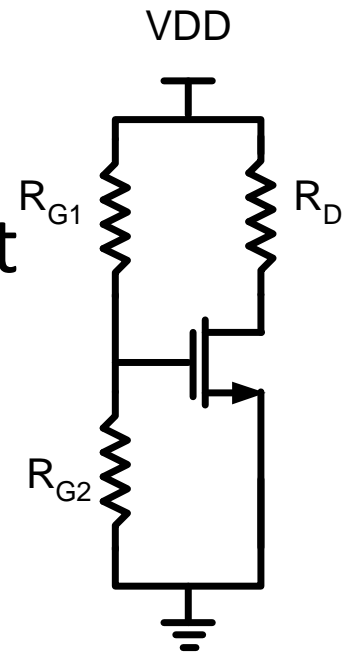
Exemple (cut-off)

- L'équation de la tension à la grille est:

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

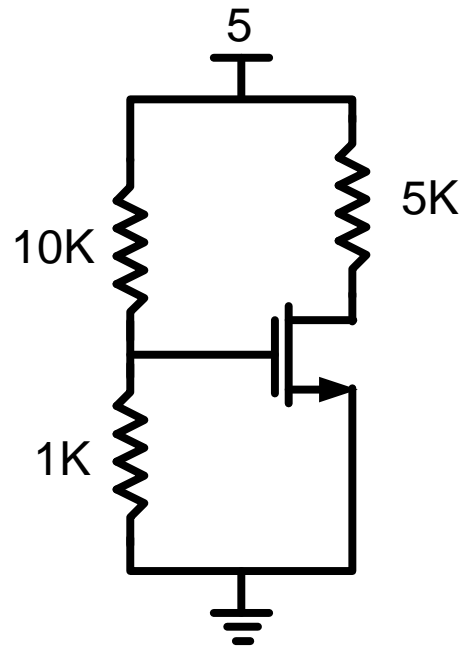
- Pour être en cut-off, il faut que R_{G2} soit petit comparé à R_{G1}

- La tension à V_G sera donc assez faible
- Avec R_{G2} élevé, le transistor conduira...



Exemple (seul)

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

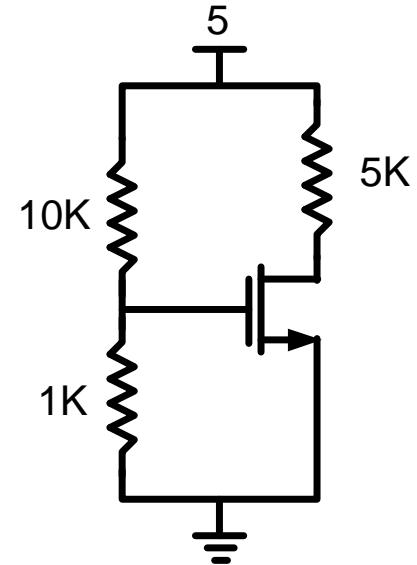


Exemple (seul)

- La résistance de 1K à la grille nous dit que le canal sera mince ou non-existant

$$V_G = VDD \left(\frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \right) \quad V_G = 5 \left(\frac{1K}{10K + 1K} \right) = 0.45$$

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

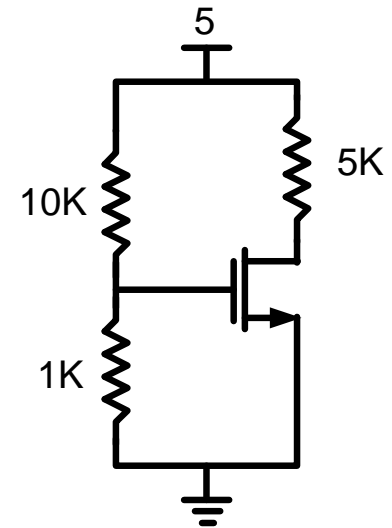


Proposez 3 façons de mettre le transistor en conduction...

Exemple (seul)

- La réponse se trouve dans l'équation:

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



- 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 (linéaire)

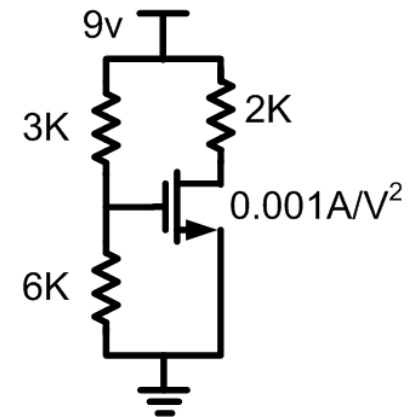
- En région linéaire, on a
 - $V_{GS} > V_{TH}$ (Il y a un canal)
 - $V_{GD} > V_{TH}$ (Le canal n'est pas coupé)



- Le courant serait donné par:

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

- $\mu C_{OX}(W/L)$ est typiquement connu
 - Il faudrait juste calculer V_{DS} et V_{GS}



Exemple (linéaire)

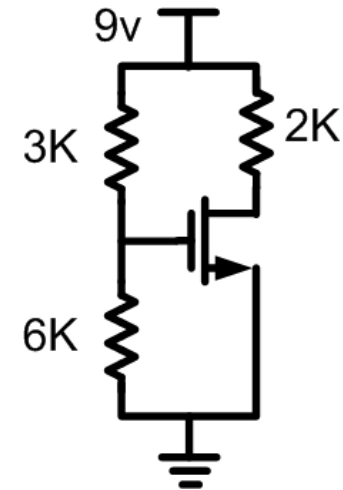
- V_{GS} est facile:
 - Aucun courant n'entre à la grille
 - Diviseur de tension

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

- Écrivons l'équation pour V_{DS} :

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

C'est quoi I_D ?



Exemple (linéaire)

- I_D dépend de V_{DS}

$$I_D = \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} \qquad I_D = 0.001(6 - 0.7)V_{DS}$$

- Pour trouver V_{DS} , on doit connaître I_D

$$V_{DS} = V_D = VDD - I_D R_D \qquad V_{DS} = 9 - I_D 2K$$

- On les combine ensemble:

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

On peut maintenant isoler I_D

Exemple (lineaire)

- On entre le 0.0053 dans la parenthèse:

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

- On isole I_D :

$$I_D = 4.11mA$$

- On vérifie la zone d'opération:

$$V_{DS} = 9 - 4.11mA \cdot 2K = 0.776$$

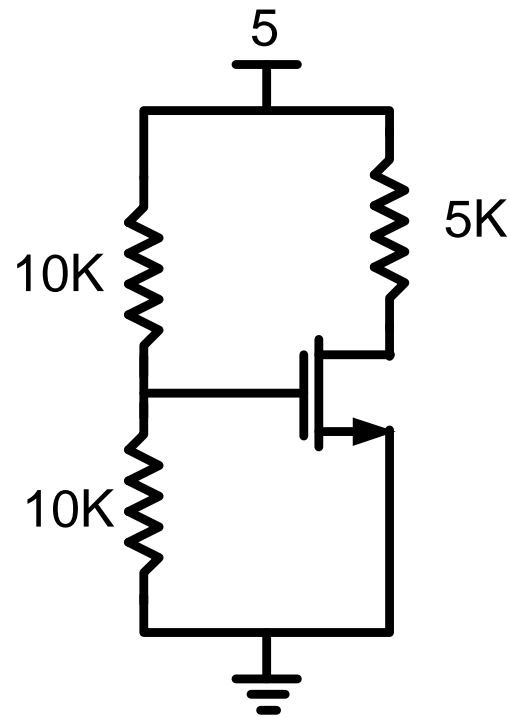
$$V_{GD} = 5.224$$

$$V_{GS} = 6$$

On est en région linéaire...

Exemple (seul)

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

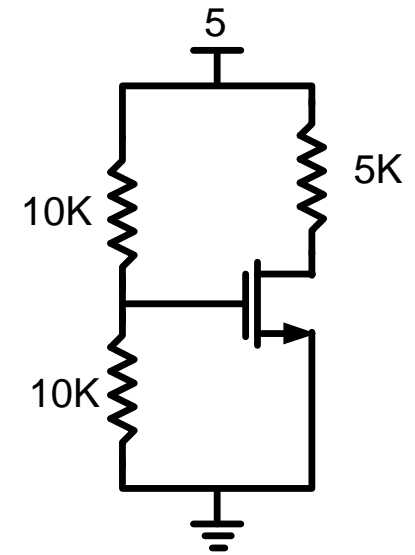


Exemple (seul)

- On 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 début... allons voir V_S et V_D

Exemple (seul)

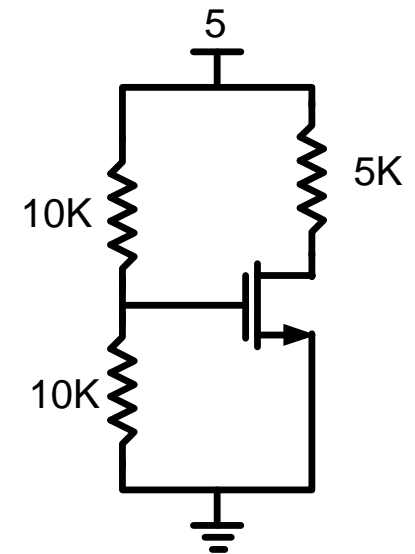
- La source est à la masse: $V_S=0$
- Pour V_D , il faut avoir I_D :

$$V_D = V_{DD} - R_D I_D \quad \Rightarrow \quad V_D = 5 - 5K \cdot I_D$$

- Hypothèse: linéaire

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

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



2 équations à 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 opérations:

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

- Après 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:
 - $V_{GD}=2v$
 - $V_{GS}=2.5v$

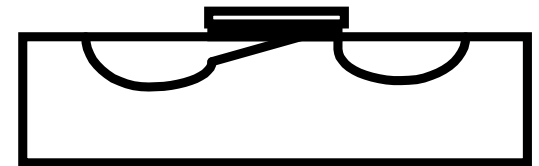
Ça confirme l'opération en région linéaire

Exemple (saturation)

- En saturation, on a

- $V_{GS} > V_{TH}$ (Il y a canal)

- $V_{GD} < V_{TH}$ (Le canal est coupe)



- Le courant serait donné par:

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

- Il faut simplement connaître V_{GS}
 - Le courant ne dépend pas de V_{DS}

Exemple (saturation)

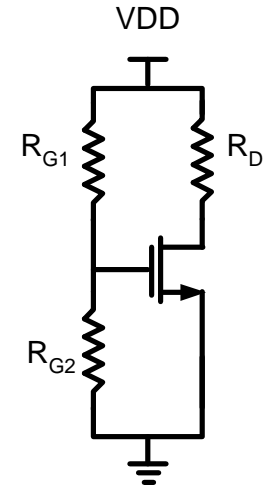
- Sans courant dans la grille, c'est un diviseur de tension:

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

- On entre le chiffre dans l'équation:

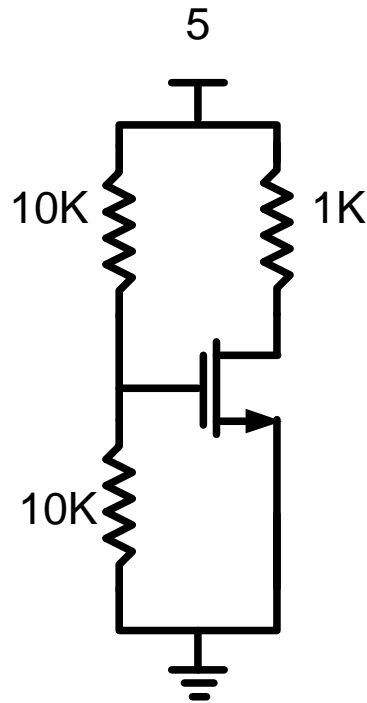
$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{TH})^2$$

Et le problème est résolu...



Exemple (seul)

- Trouvez les tensions et les courants
- Confirmez la région d'opération
- Utilisez $\mu C_{ox}(W/L)=0.001A/V^2$ et $V_{TH}=0.7$



Exemple (seul)

- On commence avec l'hypothèse 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 vérifier 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 vérifie 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'opération, on procède différemment
- En ordre de difficulté d'analyse:
 - Cut off (rien à faire)
 - Saturation (calculer V_{GS} seulement)
 - Linéaire (calculer V_{GS} et V_{DS})
- Bonnes choses:
 - Aucun courant dans la grille
 - Diviseur de tension pour trouver V_G

Mais les choses vont changer bientôt!