

Electronique 1

Cours 9: BJT et Transistors a effet de champ

Methodologie de conception

- Un des aspects manquants dans l'enseignement classique c'est la conception
- L'enseignement de la conception est difficile:
 - Pas d'approche systematique pour l'enseigner
 - Trop de solutions possibles et donc, difficile a evaluer
 - La conception est comme un art... ca vient de notre vecu, de nos connaissances et de l'inspiration
- C'est pour ca que ce n'est pas evident...

Methodologie de conception

- Il y a certaines approches que nous pouvons utiliser pour nous guider vers le but
- Apprendre de l'oeuvre des maitres
 - Exposez-vous a un grand nombre de circuits
 - En adoptant leur facon de raisonner, on pourrait converger vers une bonne solution
 - Il est bien important de comprendre le raisonnement pour pouvoir adapter la solution a d'autres problemes

Adopter et adapter...

Methodologie de conception

- Avoir une base solide:
 - Quand on analyse des circuits existants, il faut avoir une base solide pour bien les comprendre
 - Il faut être capable de développer l'intuition sur le fonctionnement des composantes
 - L'intuition vient avec l'expérience et parfois avec les équations mathématiques
 - Vous devriez être en mesure de dire des choses comme "quand j'augmente ça, ceci devrait baisser"

Methodologie de conception

- Pour aborder une conception, je propose y aller de la maniere suivante:
 - Comprendre la situation
 - Tempete d'idees
 - Diviser pour conquerir/Integration
 - Verification et validation

Methodologie de conception

- De façon plus concrète, on pourrait dire:
 - 1) Identifier les entrées et les sorties
 - 2) Décomposer le problème en petits morceaux jusqu'à ce que je comprenne quelque chose
 - 3) Enumérer les choses que je connais qui POURRAIENT peut-être faire le travail
 - 4) Analyser ces morceaux de solution
 - 5) Penser à la façon d'interconnecter les morceaux.
 - 6) Analyser la solution finale

Methodologie de conception

- Parfois il est pertinent de faire abstraction des details
 - Dessiner avec des commutateurs ou avec des portes logiques a la place de transistors
 - Commencer avec un modele simple (modele ON/OFF avec chute de 0.7 pour une diode, $I_C=I_E$ pour BJT, etc.
- Une fois l'esquisse de base faite, on reviendra completer les details...

Ce sont des choses qui ne veulent rien dire jusqu'a ce qu'on commence a concevoir...

Mise en situation #1

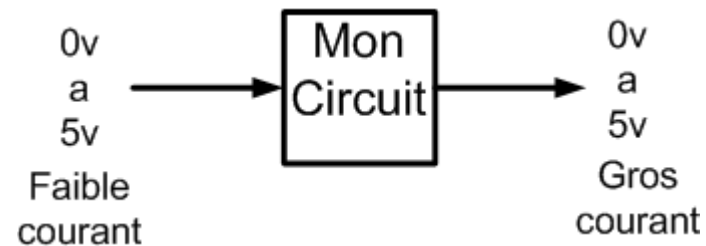
- J'essaie de contrôler un “gros” laser avec un microcontrôleur:
 - La sortie du microcontrôleur peut me donner 0v et 5v
 - 5v ça envoie un rayon et 0v ça n'en envoie pas
- Courant maximum du microcontrôleur de 5mA: pas assez pour notre laser.
 - Si notre laser tirait trop de courant, la sortie du microcontrôleur sera beaucoup moins que 5v
 - Le laser n'enverrait pas de rayon

Concevez un circuit pour contrôler votre laser avec un microcontrôleur

Hypothèse et indice: un transistor pourrait fournir un plus gros courant que 5mA

Conception

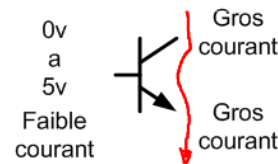
- Identifier les entrees et les sorties:



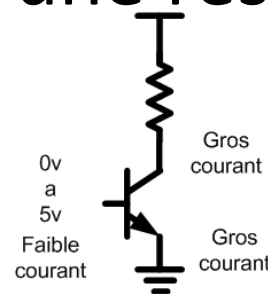
- Le probleme est petit: je n'ai pas besoin de decomposer en petit morceaux
- Qu'est-ce qui peut regler mon probleme?
 - Je dois mettre un petit courant pour qu'il m'en donne un gros?

Conception

- Solution: un transistor!
 - Petit courant I_B qui me donne un gros courant I_C/I_E
- La façon la plus simple d'implémenter ça c'est:

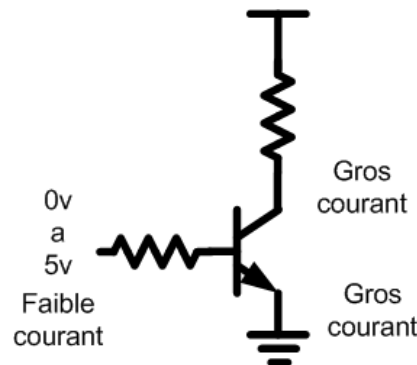


- J'ai un gros courant, mais je n'ai pas de 0v/5v
- Je pourrais mettre une résistance



Conception

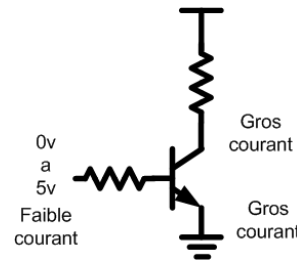
- Est-ce que je veux un transistor en active ou saturation?
 - Est-ce que je veux un gros V_{CE} ou un petit V_{CE} ?
- Est-ce qu'il manque quelque chose?
 - Mon V_{BE} pourrait être assez gros. Il faut protéger ma diode de la jonction BE
 - Parce que je veux être en saturation, I_C dépend de R_C



Analysons maintenant le circuit

Conception

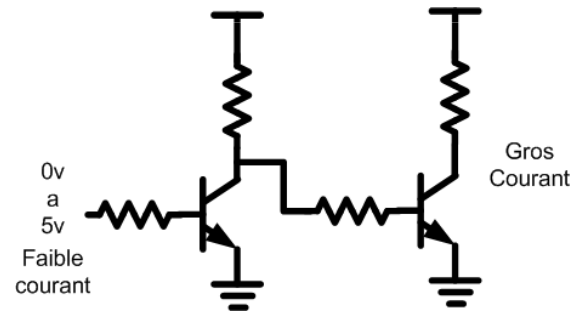
- Quand mon microcontrôleur donne 0v, je ne veux pas que ça illumine
- Quand mon microcontrôleur donne 5v, je veux que ça illumine



- Cependant, mon circuit donne le contraire...
 - Je dois donc INVERSER le signal...

Conception

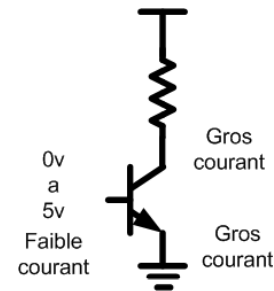
- Le courant dans le premier R_C n'a plus besoin d'être très grand:
 - C'est plutôt le 2^e R_C qui devrait avoir un gros courant



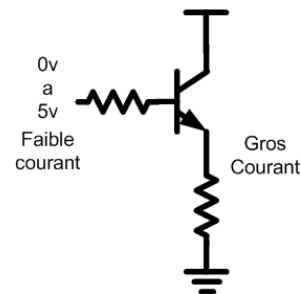
Une autre option...

Conception

- A la place de faire cette connexion...



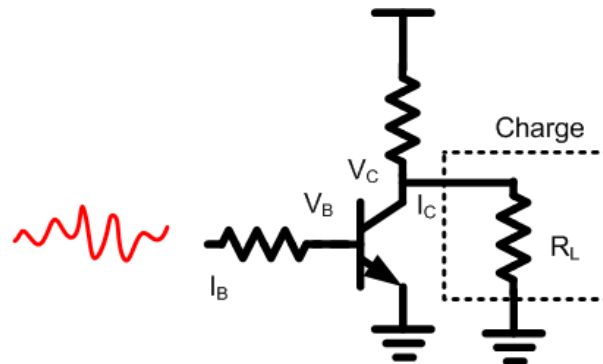
- Qu'arrive-t-il si je faisais cette connexion?
 - On se sauverait du travail et des composantes



Explorons ces connexions rapidement...

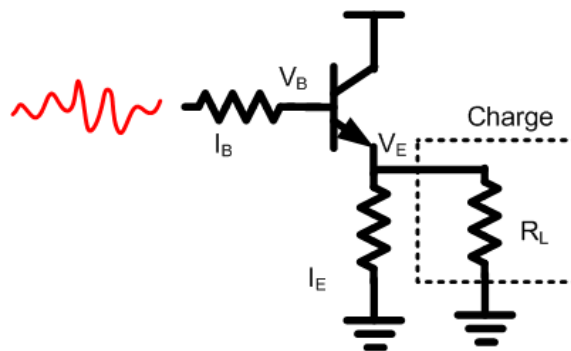
Sortie: collecteur ou emetteur?

- Sortie au collecteur:
 - I_C est bien determinee controlee: βI_B
 - La relation d'amplitude V_C et V_B est mal controlee: depend de R_C et de R_L
 - Amplitude de V_C pourrait donc etre plus grand ou plus petit selon R_C et R_L
 - Bon pour gain mais pas pour R_L faible (gros courant necessaire)



Sortie: collecteur ou emetteur?

- Sortie a l'emetteur
 - I_B est faible chute de tension faible: V_B sera comme l'entree
 - V_E est egal a $V_B - 0.7$ ($V_{BE} = 0.7$)
 - L'amplitude de V_E est tres semblable a l'amplitude a l'entree mais decalée de 0.7v (gain proche de 1)
 - Pas bon pour gain, mais bon imposer V_{OUT} voulu sur R_L de faible valeur



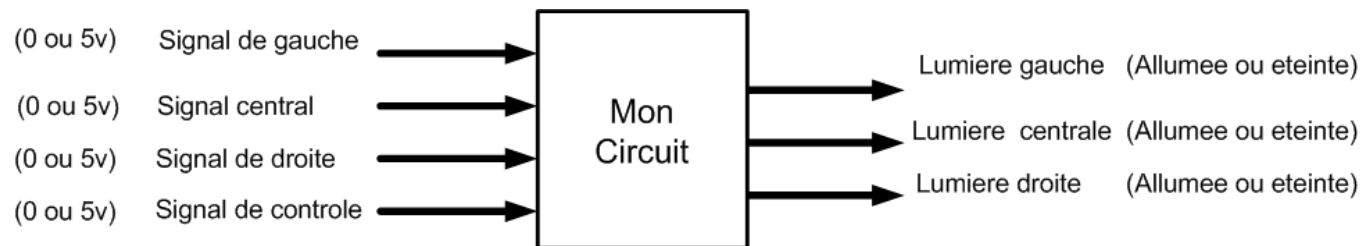
Mise en situation #2

- On veut un systeme qui allume les lumieres de facon sequentielle:
 - On allume une lumiere a gauche, puis celle au centre et finalement celle a droite
 - Ceci est vrai seulement si un autre signal est 5v... Si ce signal etait 0v, rien ne se produirait
- On recoit 4 signaux de 0v ou 5v
 - Gauche, centre, droite et le controle
 - Une entree de 5v veut dire "ON" sinon c'est "OFF"

Concevez le circuit qui repond a ces besoins

Debut de conception

- On identifie les entrees et les sorties



- La situation semble compliquee
 - Il faut allumer les lumieres selon les signaux
 - Il faut en plus dependre d'un signal
- Je propose qu'on divise en 2 parties...
 - Un pour allumer et l'autre pour controler

On sait comment allumer une lumiere et on sait comment agir comme un commutateur

Mise en situation #3

- Certaines telecommandes envoient des signaux infrarouges modules a 38KHz
- Le recepteur les recoit, les amplifie et utilise un systeme pour interpreter ces commandes
- On aimerait faire un amplificateur de signal infrarouge

Photodiode

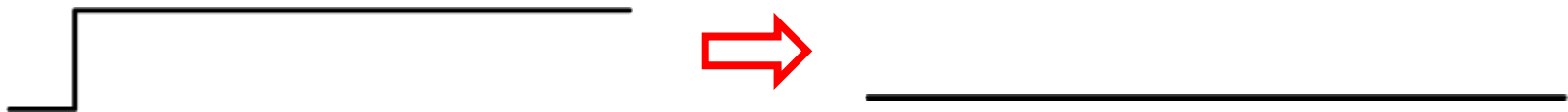


Systeme

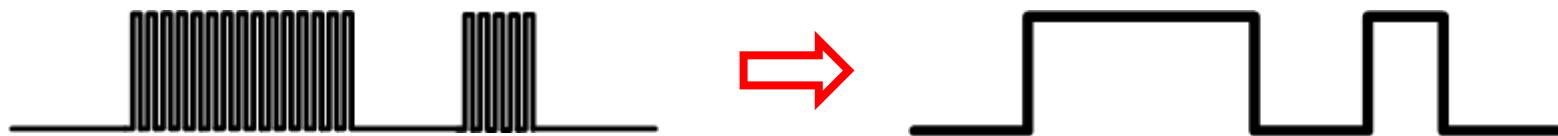


Mise en situation #3

- Contraintes:
 - Le soleil et la lumiere ambiante ont aussi une composante infrarouge: on ne veut pas detecter ca
 - Ca doit avoir une frequence assez elevee pour etre detectee: sinon, la sortie donne 0



- Concevez un circuit pour recevoir, amplifier et donner une sortie de ce style:



Transistors a effet de champ

- Les transistors bipolaires sont des structures interessantes dans la macroelectronique:
 - Quand on concoit au niveau des circuits discrets, c'est tres populaire
- Au niveau de la microelectronique, les transistors a effet de champs dominant
 - Ils prennent presentement 90%-95% du marche
 - On s'attend a ce qu'ils dominant pour au moins un autre 5-10 ans

Transistors a effet de champ

- Les transistors a effet de champ sont differents des BJT:
 - Les BJT fonctionnent avec un mecanisme de drift et diffusion
 - Les transistors a effet de champ fonctionnent avec le champ electrique
- En anglais on dit “field effect transistor” (FET)
- N’importe quel transistor a 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 puces modernes sont faites avec des (millions de) MOSFETs

C'est donc pertinent d'en parler

MOSFET

- Avantages:

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



Moins cher

- Désavantages:

- Moins rapides



Deviend 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 sous 2 formes:
 - Type N: NMOS
 - Type P: PMOS
- Au debut, les puces etaient d'une sorte
 - Soit NMOS ou soit PMOS (moins)
- Eventuellement, on a reussi a integrer les 2:
on appelle ca le CMOS
 - "C" est pour dire "complementary"

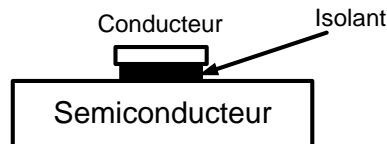
Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)

MOSFET

- En resume, il existe 2 genres de MOSFET
 - PMOS et NMOS
- Les puces qui ont des PMOS et NMOS a l'interieur sont appelees puces CMOS
 - De nos jours, les puces qui utilisent les MOSFETs sont toutes CMOS (presque)...
- De facon generale (mais erronee), on peut dire que MOSFET et CMOS sont pareils

CMOS

- Structure physique d'un MOSFET:



- La structure physique est:
 - Conducteur: Metal
 - Isolant: Oxyde
 - Semiconducteur...
- Metal-Oxyde-Semiconducteur (MOS)
 - En realite, le conducteur c'est du polysilicium...

Ajoutons plus de details a la structure

CMOS

- Une structure plus complete:

- On ajoute 2 regions



- Pour NMOS et PMOS, on a:

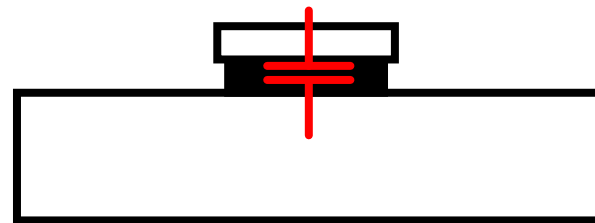
- Les NMOS ont des regions N+
- Les PMOS ont des regions P+
- Le bloc de silicium (substrat) est aussi different



Comment fonctionnent ces transistors?

CMOS

- Conducteur-isolant-“conducteur”: Capacité



Ignorons les 2 regions pour commencer

- En mettant +, on aura - et vice versa

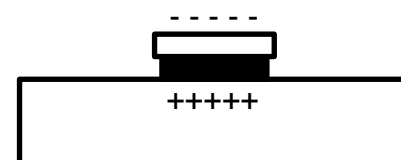
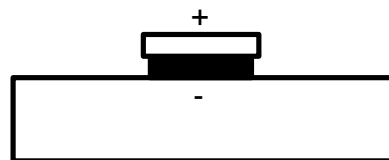
On met une tension



Resultat: On attire des charges

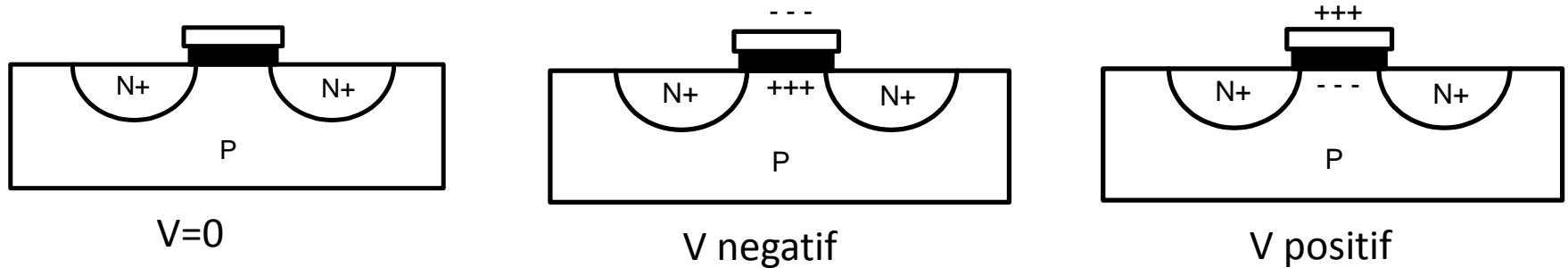
- Les charges sont proportionnelles

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

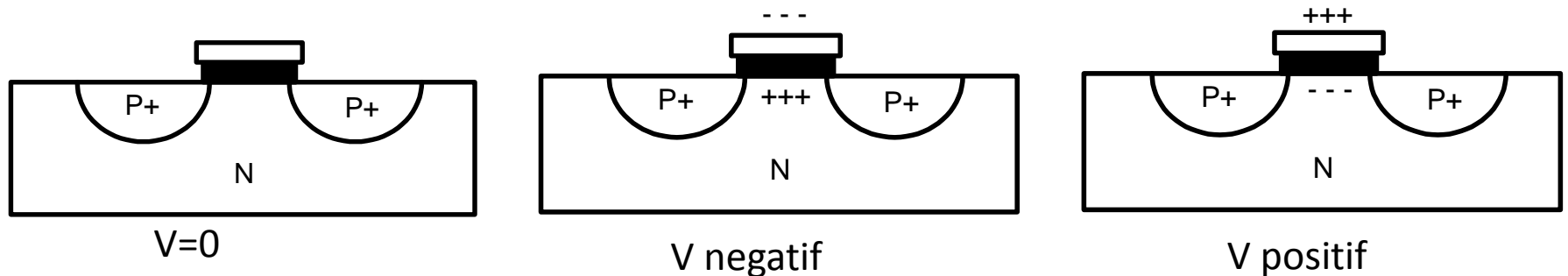


Comment ca fonctionne?

- Commencons pour NMOS:



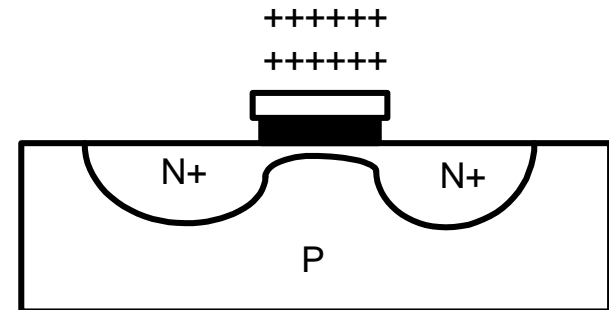
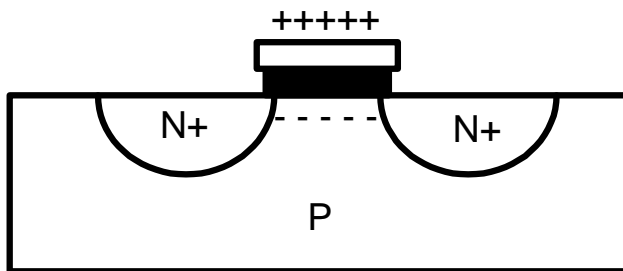
- Et pour le PMOS:



Ca fait la meme chose jusqu'a present

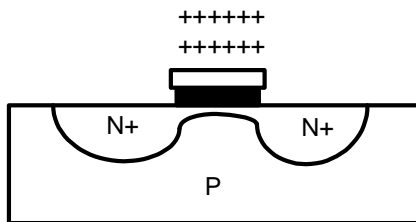
Comment ca fonctionne?

- 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 ca N+...
- Cette region devient **comme** du N+...



Comment ca fonctionne?

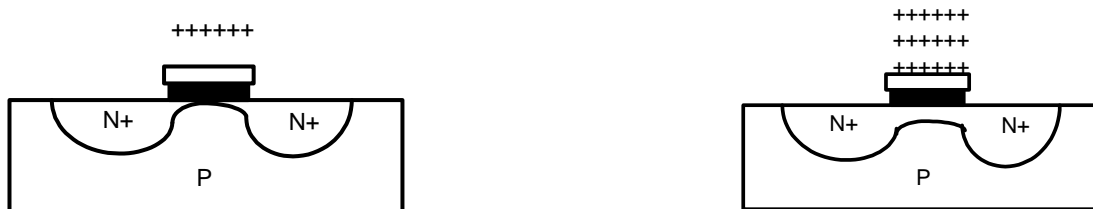
- C'est comme avoir un gros bloc de N+:
 - Le courant peut bien circuler d'un bord a l'autre
 - Cette nouvelle region s'appelle le canal
- La tension requise pour avoir un canal: V_{TH}
 - S'appelle tension de seuil (threshold)
 - Depend des proprietes physiques
- Avec $V_{TH} + \Delta V$, il peut y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



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

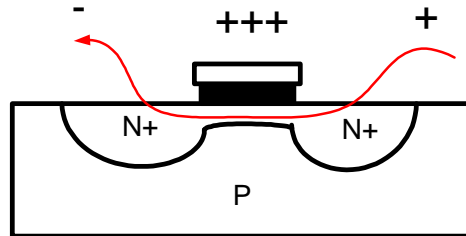
Comment ca fonctionne?

- Quand la tension est moins que V_{TH} , il y a un TRES 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 epais: plus de charges peuvent passer

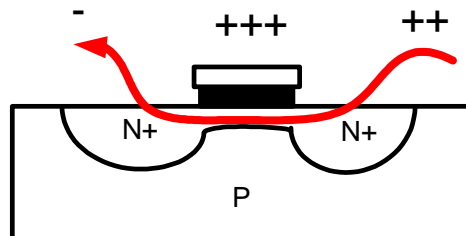


Comment ca fonctionne?

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



- Plus de tension \rightarrow plus de courant



Comment ca fonctionne?

- Resumons:
 - Si V au conducteur est moins que V_{TH} → aucun courant (courant negligeable)
 - Si V au conducteur est plus, ca “connecte” les deux bords (avec faible resistance)
- Est-ce que c’est juste ca? **NON!**
 - Mais c’est une bonne premiere approximation
- On completera le modele tantot...

Representation circuit

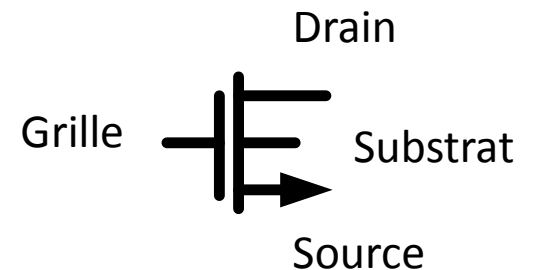
- Pour faire des circuits, il faut avoir des symboles pour les transistors:



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

Representation circuit

- Comment identifier les pattes?
 - Grille est toute seule 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

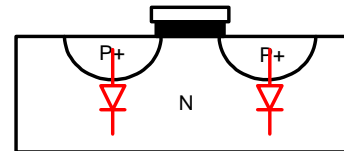
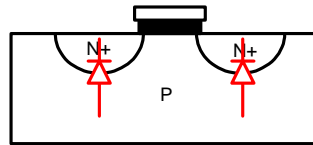
Notes sur la source

- 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 (important!)
 - Source a la tension la plus faible avec NMOS
 - Source a la tension la plus elevee avec PMOS

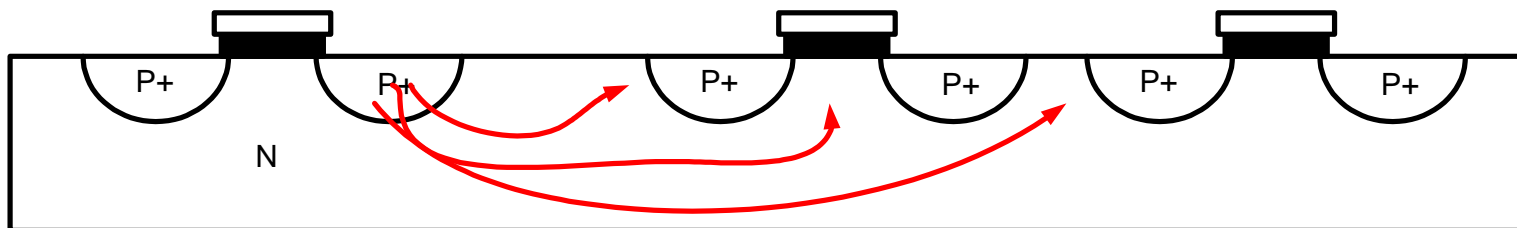


Demystification du substrat

- Qu'est-ce que fait le substrat?
- Structure CMOS donne des problemes:
 - Quand P et N sont colles, 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

Demystification du substrat

- Pour bloquer ces diodes on remarque:
 - Il faut 0.7 pour conduire
 - Tension plus elevee = alimentation
 - Tension moins elevee = ground

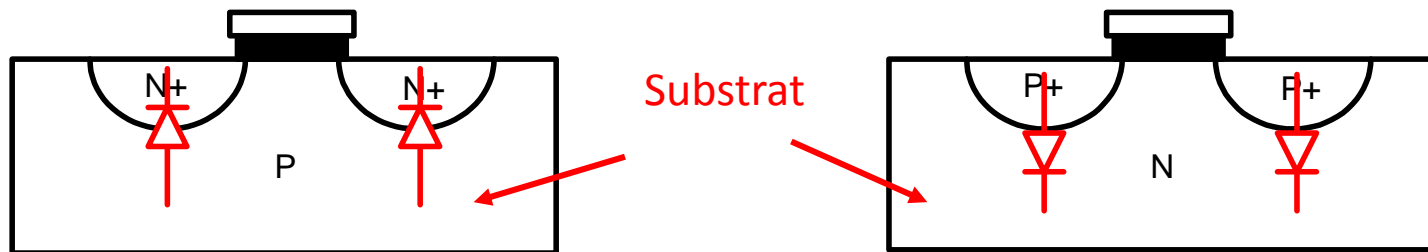
- Pour qu'une diode ne conduise pas:



- Avec ca, ce serait impossible d'avoir 0.7v

Demystification du substrat

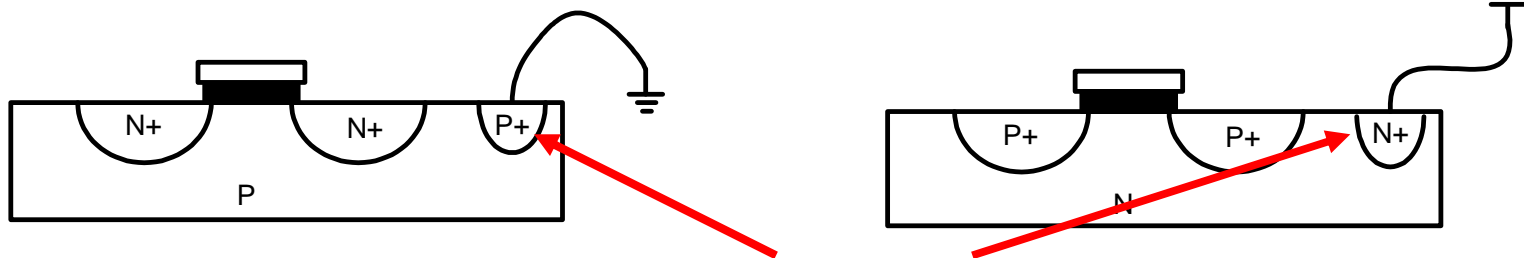
- Reprenons nos diagrammes:



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

Demystification du substrat

- On se retrouve avec ceci:



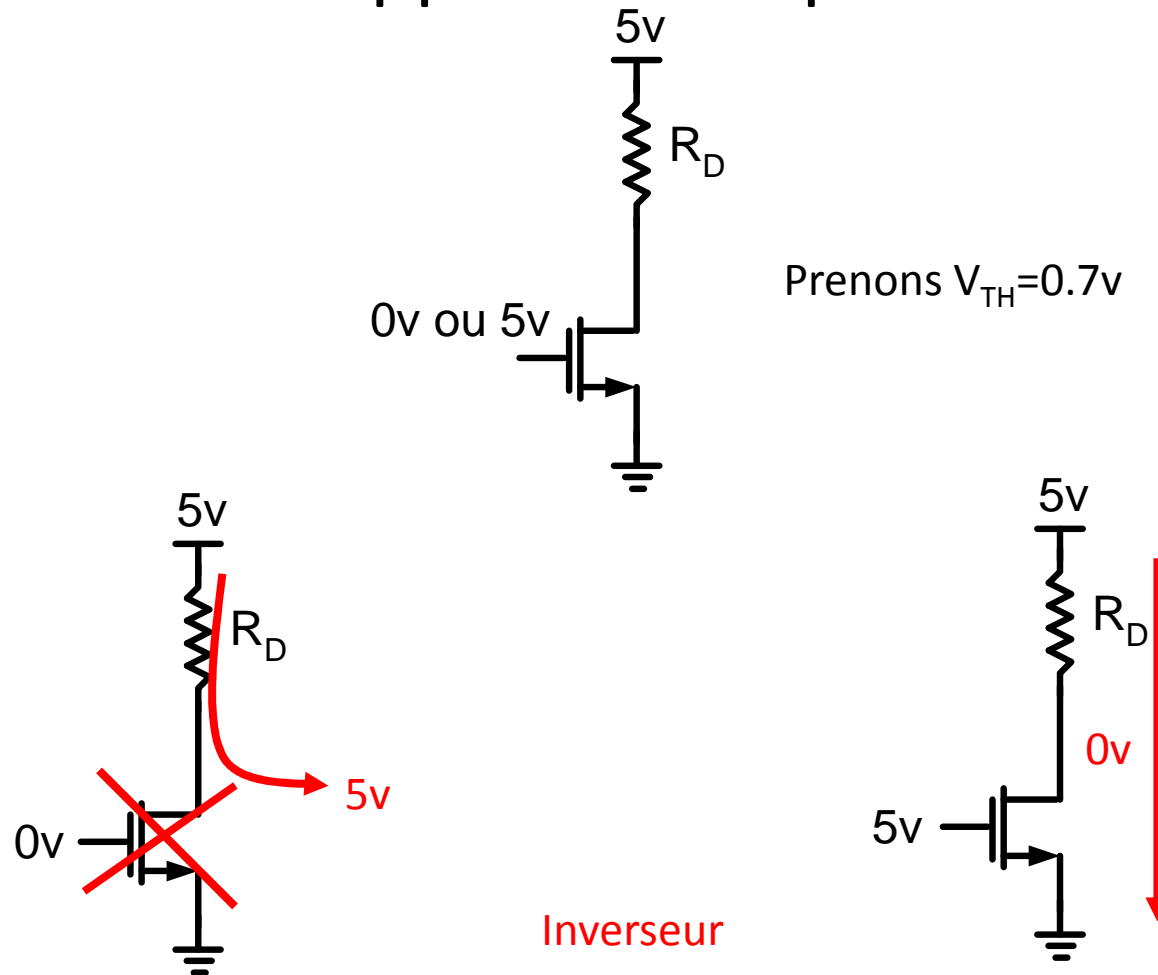
- En passant: pourquoi P+ et N+?
- Puisque le substrat est souvent connecte a l'alimentation/ground, on l'ignore...



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

Analyse rapide d'un circuit

- Regardons une application rapidement...



Notes

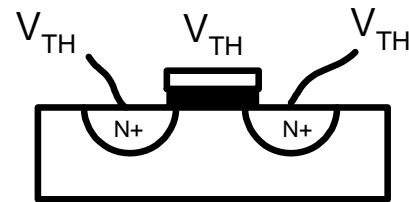
- On n'a pas besoin de resistance a la grille:
 - Aucun courant dans la grille: c'est un isolant.
- Tension a la grille n'est pas toujours 0.7v
 - Pensez aux BJT ou $V_{BE}=0.7$ quand ca conduit
- Aucun lien entre $V_{TH}=0.7v$ et $V_{BE}=0.7v$
 - C'est une coincidence!
- Courant identique a la source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

Allons compliquer les choses...

V_{GS} a la place de V_G

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

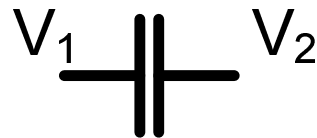
- Imaginez ceci:



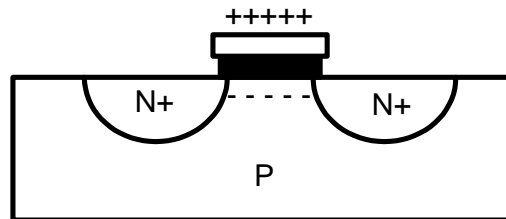
- Une tension a la grille de V_{TH} ne sera pas assez pour avoir un canal
 - V_{Source} et V_{Drain} augmentent V_{Canal}
 - Pour avoir – au canal, il faut avoir V_{Grille} plus gros

V_{GS} a la place de V_G

- Pensez a un condensateur:



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

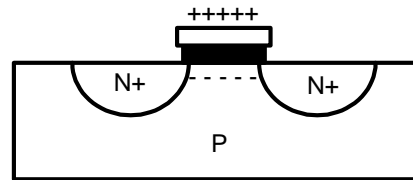


$$V_G - V_{CANAL} > V_{TH}$$

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

V_{GS} a la place de V_G

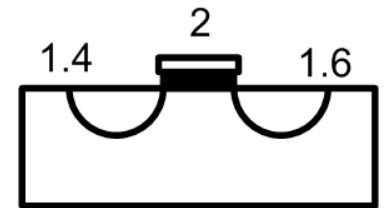
- Probleme: Canal n'a pas de pattes:
 - On ne peut pas mesurer la tension au canal



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

V_{GS} a la place de V_G

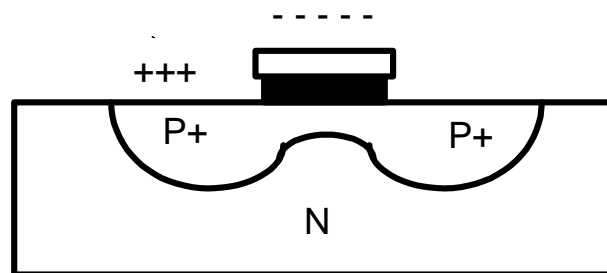
- Avec NMOS, la source a la tension la plus faible
 - La tension grille-source est plus grande que grille -drain
 - Si la tension grille-drain est plus petite que V_{TH} , il est possible d'avoir un canal du cote de la source
 - Si la tension grille-source est plus petite que V_{TH} , il y a 0% chance 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 a la source, il y en a nulle part.

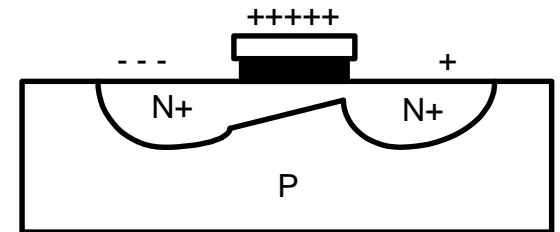
V_{GS} a la place de V_G

- 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 tension negative compare a V_S pour attirer des charges positives...
 - Donc, V_{GS} doit etre negatif pour avoir un canal
 - $|V_{GS}| > V_{TH}$



Encore plus de complications!

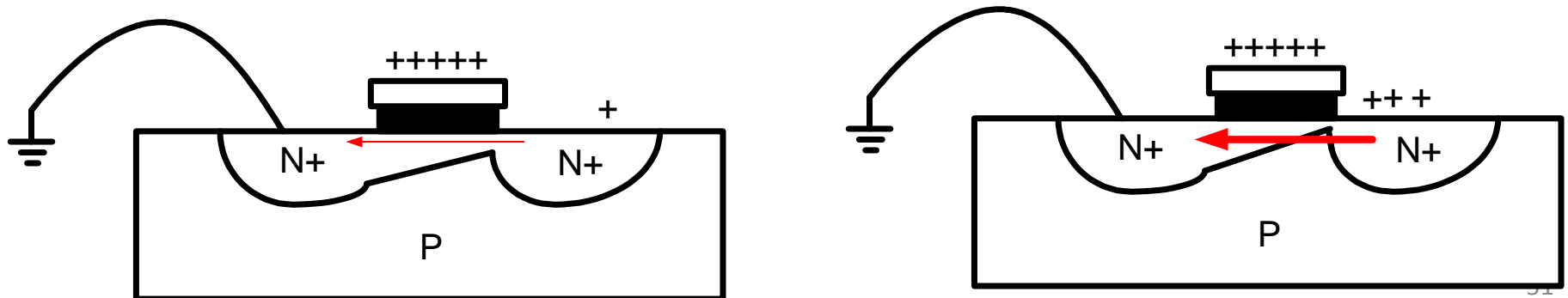
- Plus $V_{G-CANAL}$ gros, plus canal est “epais”
- On approxime $V_{G-CANAL}$ avec V_{GS} mais V_D et V_S sont souvent differents
 - $V_{G-CANAL}$ a la source sera differente de $V_{G-CANAL}$ au drain
 - L’epaisseur sera differente a la source et au drain
- Par exemple:
 - V_{GS} gros \rightarrow canal epais
 - V_{GD} faible \rightarrow canal plus mince



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

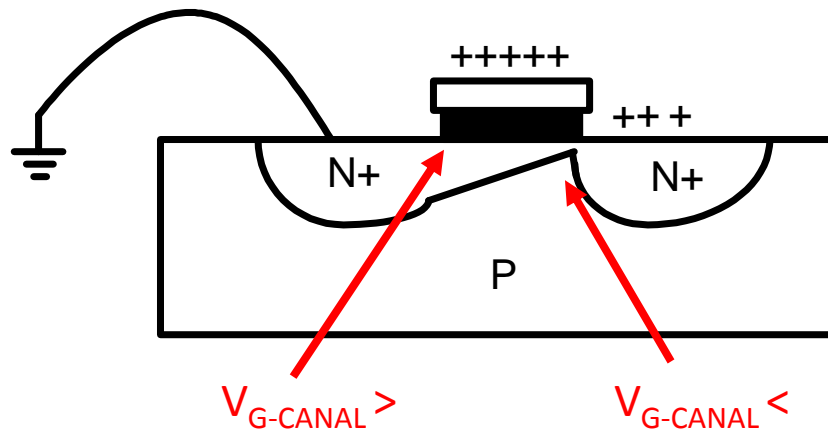
Reprenons les etapes...

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



J'augmente V_{DS} ...

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

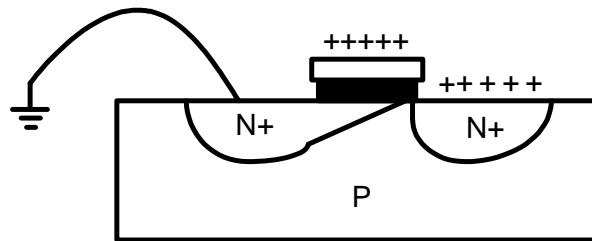


- Si V_D trop gros, $V_{G-CANAL} < V_{TH}$ au drain
 - Mais $V_{G-CANAL} > V_{TH}$ a la source

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

Le canal est coupe..

- Quand V_D est trop gros, ca coupe le canal



- Sans canal proche du drain, les charges traversent MOINS bien
 - La region coupee est une region qui est dopee P
 - Region P conduit moins bien qu'une region N+
 - Mais ca conduit quand meme...

Le canal est coupe..

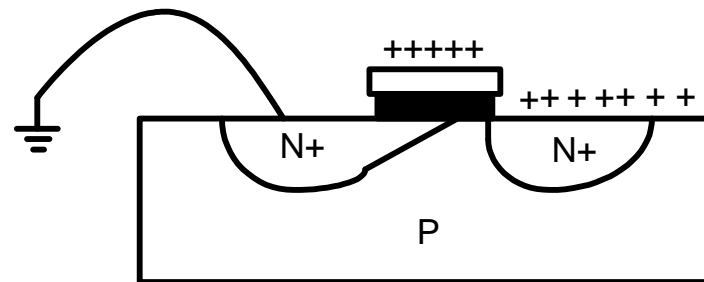
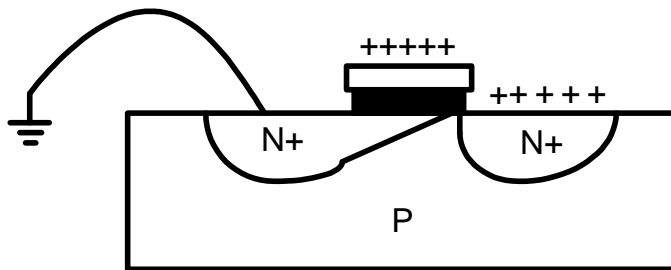
- En augmentant V_{DS} :

- Difference de voltage augmente

$V \uparrow$

- Zone coupee grossit: resistance augmente

$R \uparrow$



- Effet net: le courant ne change pas

- Courant independent de V_{DS}

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

Regions d'operation

- En revoyant nos acetates, on pourrait distinguer 3 regions d'operation:
 - Quand $V_{GS} < V_{TH}$ Cutoff
 - Quand $V_{GS} > V_{TH}$ et V_{DS} pas trop gros Lineaire
 - Quand $V_{GS} > V_{TH}$ et V_{DS} trop gros Saturation
- Trop gros?
 - On sait que $V_{G-CANAL}$ doit etre V_{TH} pour un canal
 - Donc, trop gros veut dire: $V_{GD} > V_{TH}$

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

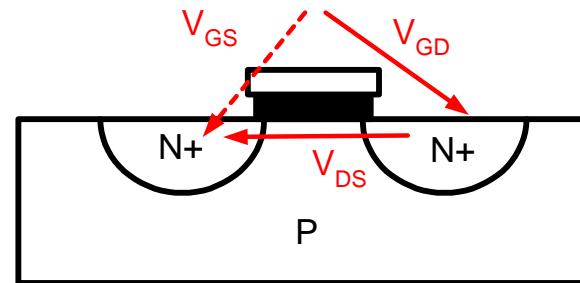
Regions d'operation

- 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 etre minimum V_{TH} pour avoir un canal au drain:
 - $V_{GS} = V_{TH} + V_{DS}$
- On rearrange 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 derive mathematiquement:
 - Mais ce n'est pas tres pertinent

- Il est possible de trouver ceci:

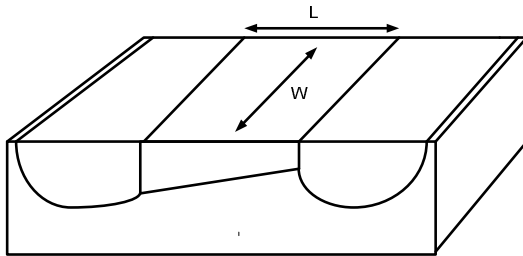
$$I_D = \mu C_{OX} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

C'est la version "precise"
de l'équation (pas utilise ici)

- Allons voir ce que les differentes 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 resistance est elevee



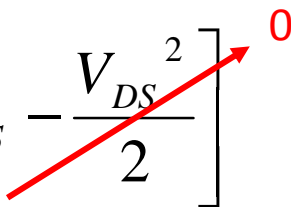
$$I_D = \mu C_{OX} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

- C_{OX} est la capacite d'oxyde et μ est la mobilite des electrons/trous

Typiquement, $\mu C_{OX} W/L$ et V_{TH} sont donnees ou peuvent etre trouves

Le courant

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

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


- Ca devient:

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

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

D'ou le nom "region lineaire"

Le courant

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

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

- Ca devient:

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

Le courant "sature" et ca devient independant de V_{DS}

Resume

- On regarde la tension a 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 ca peut se retrouver dans 2 zones:
 - Si V_{DS} est petit (ou $V_{GD} > 0.7$), le canal est present partout et on est en region lineaire

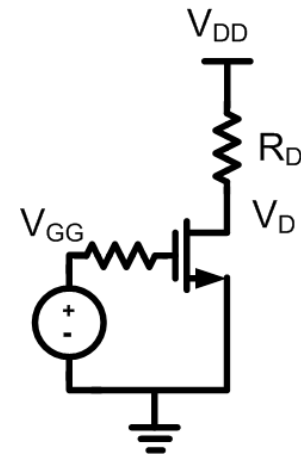
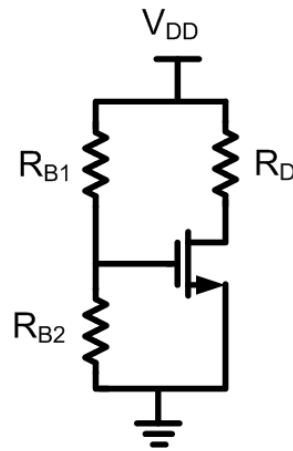
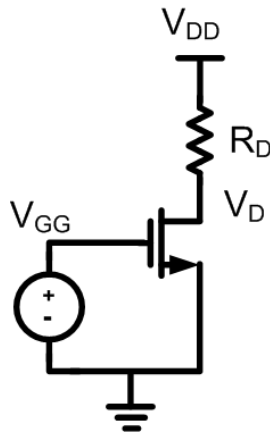
$$I_D \cong \mu C_{ox} \frac{W}{L} [(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS}]$$

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

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

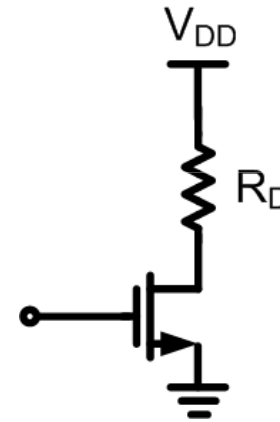
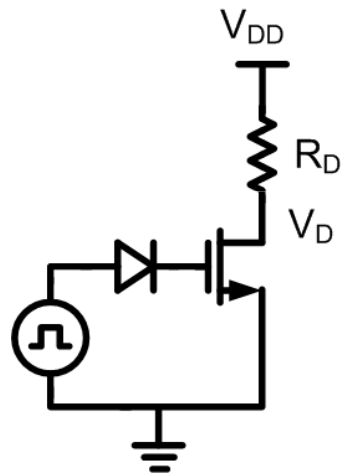
Analyse qualitative de circuits

- Voici 3 circuits de polarisation possibles
 - Ressemble beaucoup a la polarisation avec transistors bipolaires...
 - Y a-t-il une difference entre le 1er et le 3e?



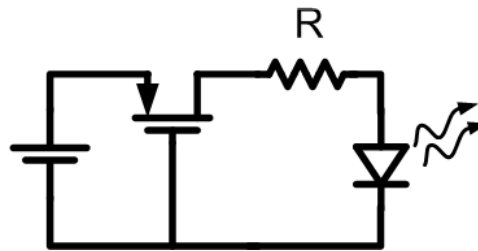
Analyse qualitative de circuits

- Comment fonctionnent les circuits suivants?



Analyse qualitative de circuits

- A quoi **pourrait** servir le circuit suivant?



Analyse qualitative de circuits

- A quoi **pourrait** servir le circuit suivant?

