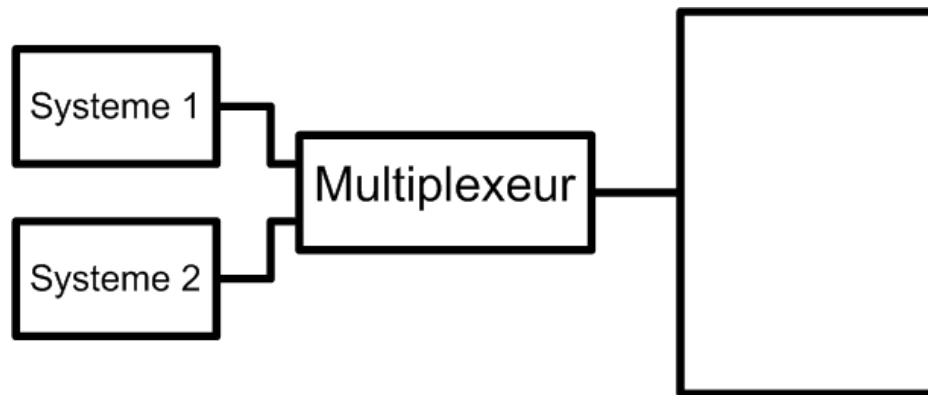


# Électronique

Cours 12: Conception et Révision

# Exemple pour portes CMOS

- Sur une puce, les pins sont dispendueux.
- Il est possible de partager un pin entre 2 (ou plus) systèmes
- On utilise typiquement un multiplexeur pour faire ce genre de travail.



# Exemple pour portes CMOS

- Un mutlipleur:
  - Nous transmet le signal A lorsqu'on sélectionne A
  - Nous transmet le signal B lorsqu'on sélectionne B
- Un mutlipleur est exprimé avec l'équation suivante:

$$F = A \bullet \overline{C} + B \bullet C$$

- Dessinez le circuit avec des PMOS et NMOS

# Exemple pour portes CMOS

- On peut réarranger l'équation:

$$F = \overline{\overline{A \bullet \bar{C} + B \bullet C}}$$

$$F = \overline{(A \bullet \bar{C}) \bullet (B \bullet C)}$$

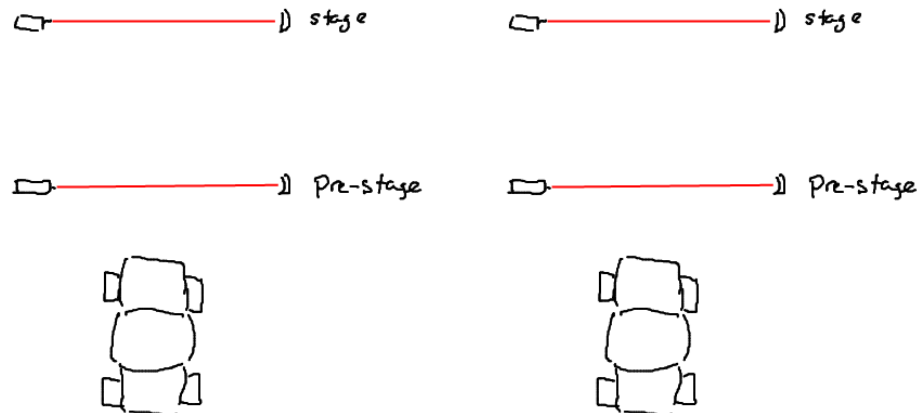
$$F = \overline{(\bar{A} + C) \bullet (\bar{B} + \bar{C})}$$

- On doit donc dessiner:

$$F = \overline{(\bar{A} + C) \bullet (\bar{B} + \bar{C})}$$

# Exemple de conception #1

- Dans un système de course de voiture, il y a des lasers qui détectent les voitures
  - Quand le 1<sup>er</sup> laser est coupé, on est au pre-stage
  - Quand le 2<sup>e</sup> laser est coupé, on est au stage
  - Quand les 2 voitures sont au stage, un temps aléatoire s'écoule et les lumières s'allument



# Exemple de conception #1

- On va changer les choses un peu...
  - Quand les 2 voitures coupent le stage et le prestage, un signal dit de commencer le décompte
- Concevez le système qui indique '1' lorsqu'on peut commencer le décompte.
  - Les entrées sont: prestage1, stage1, prestage2 et stage2.
  - Les entrées sont '1' lorsque le laser est détecté par le capteur

# Exemple de conception #2

- On aimerait avoir un système qui fournit 4v en sortie peu importe le courant tiré (presque)
- On a une source de 9v et des résistances.

# Exemple de conception #3

- On aimerait avoir un systeme qui génère la note LA (440Hz) dans des écouteurs à haute impedance
- Pour avoir de la musique, il faut générer un signal oscillatoire à la bonne fréquence
  - Vous avez des transistors, résistances et capacités
- Note: le temps de montée et de descente pour un transistor est estimé à  $10^{-9}$ s



# Exemple de conception #4

- On aimerait faire un système qui nous donne la note LA quand on pèse sur un bouton et DO quand on lâche le bouton.

# Exemple de conception #5

- On aimerait concevoir un comparateur
- Ce système va nous donner 5v quand le signal en entrée est plus que 3v et 0v quand c'est moins.

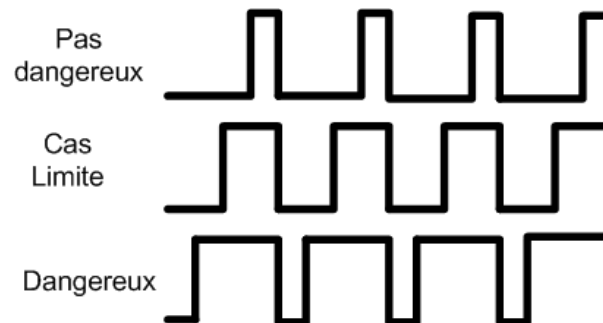
# Exemple de conception #6

- Concevez le système de sécurité pour les coffrets de sécurité dans une banque.
- Pour ouvrir un coffret, on a besoin de la clef du client (A) et du personnel de la banque
  - Soit 2 banquiers (B, C)
  - Soit seulement le gérant (D)
- Quand une clef est tournée, on a '1'. Sinon, on a '0'.

La sortie devrait être 1 en sortie pour indiquer l'ouverture du coffret

# Exemple de conception #7

- Un système détecte la quantité de monoxyde de carbone dans l'air
  - La sortie est sous forme de "largeur d'impulsion"
  - Un signal dont la largeur d'impulsion est plus que 50% indique un taux dangereux
- Faites un système qui détecte le danger en allumant une lumière



# But du cours

- Apprendre la base en électronique
- Identifier et faire le lien entre différentes composantes
- Permettre de jouer avec les composantes
- Développer des techniques d'analyse de circuits actifs non-linéaires

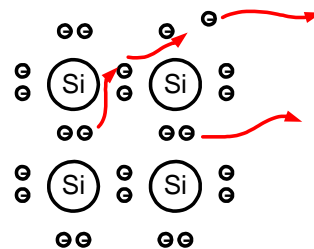
**BUT:** Donner un “feeling” de comment les choses fonctionnent

# But du cours

- Résumé du cours en 1 phrase:
  - Examiner la conduction dans les semiconducteurs
- Séparation en 4 parties:
  - Physique des semiconducteurs
  - Diodes
  - Transistors bipolaires
  - Transistors à effet de champ

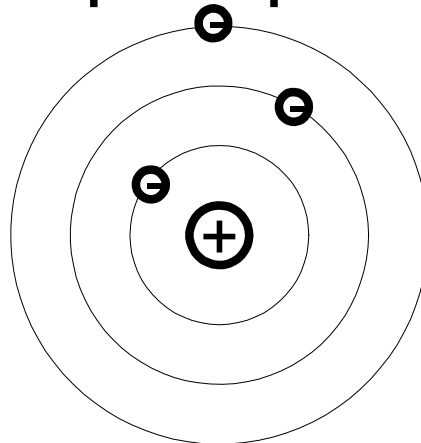
# Physique des semiconducteurs

- On veut comprendre l'électronique
  - L'électronique est basée sur les semiconducteurs
  - L'électronique est basée sur le courant et la tension
- Pour comprendre l'électronique il faut..
  - Comprendre le déplacement de charges dans les semiconducteurs
  - Est-ce que les charges vont conduire? Quelles sont les conditions?



# Physique des semiconducteurs

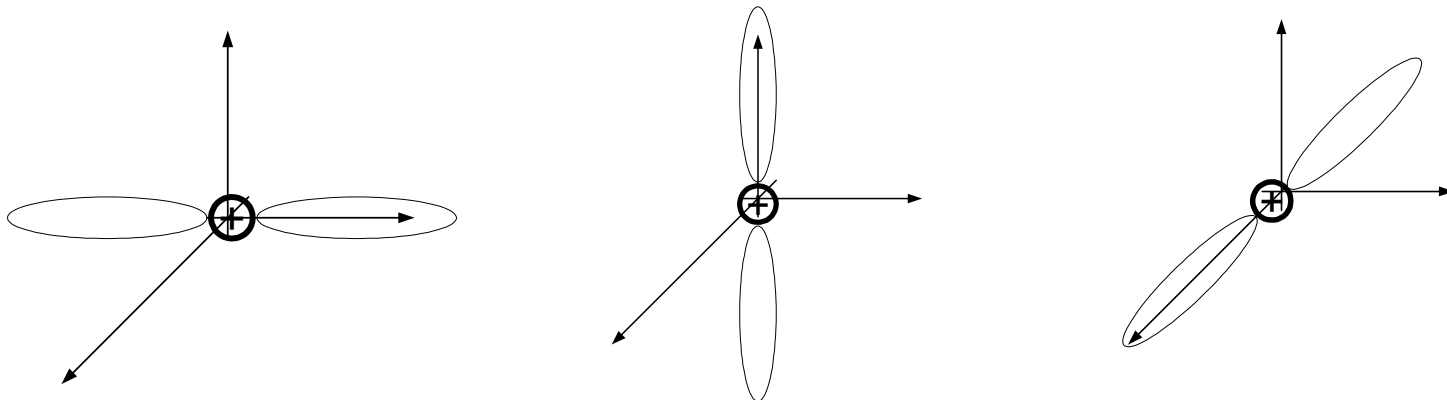
- Atome: Noyau (+) entouré par (-)
- On sait que les + et les – s’attirent
- FORCE dépend de la distance:
  - Plus c’est loin, **moins** c’est fort
  - Plus c’est proche, **plus** c’est fort
- Électrons loins plus portés à conduire...





# Physique des semiconducteurs

- Attraction dépend de distance mais aussi d'autres choses
- On dit que les électrons orbitent en cercle:
  - Pas toujours vrai: il y a d'autres formes d'orbites
  - Orbites peuvent être orientées différemment
  - Ces facteurs peuvent changer la force

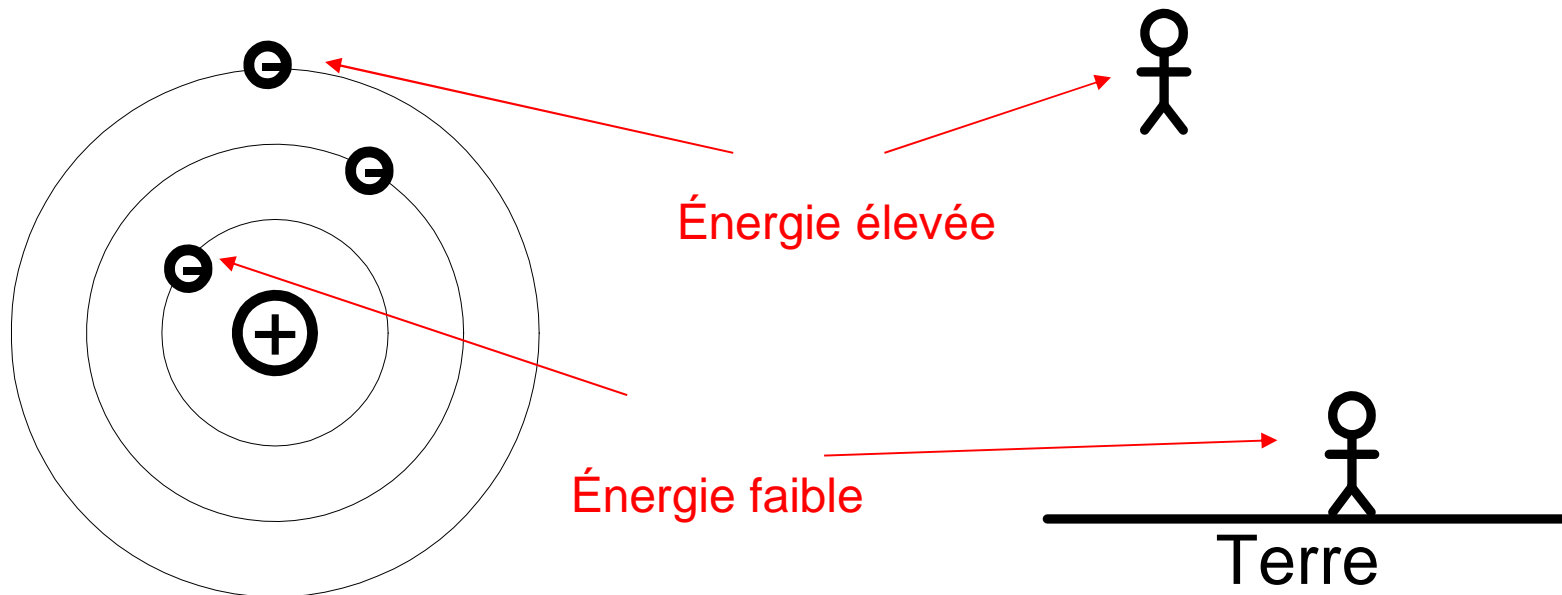


# Physique des semiconducteurs

- On donne un nom compliqué à ces caractéristiques: **nombres quantiques**
  - Nombre quantique primaire:  $n$  (distance)
  - Nombre quantique secondaire:  $l$  (forme)
  - Nombre quantique magnétique:  $m_l$  (orientation)
  - Spin:  $m_s$  (+ ou -)
- Nombres quantiques différents ont des “forces différentes”.
  - DEUX électrons (max) peuvent partager le même niveau SI ils ont des spins différents

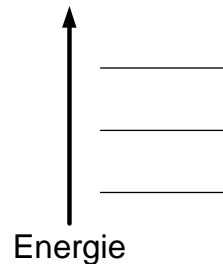
# Physique des semiconducteurs

- Chaque électron a une force qui l'attire
- Autre façon de le dire:
  - Chaque électron a un certain énergie potentiel
  - Analogie avec la gravité



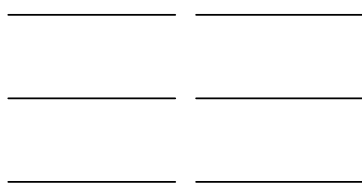
# Physique des semiconducteurs

- Un atome a des électrons avec des énergies différentes:



Chaque niveau peut avoir 2 électrons

- Si 2 atomes sont loins, pas de problème
  - En les rapprochant, on a un problème

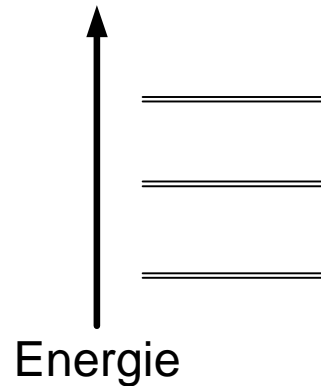


On pourrait avoir 4 électrons avec le même niveau

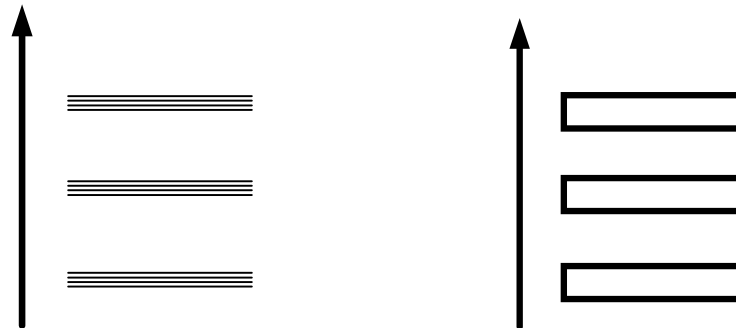
Pauli n'aimerait pas ça...

# Physique des semiconducteurs

- Il y aura décalage d'énergie:



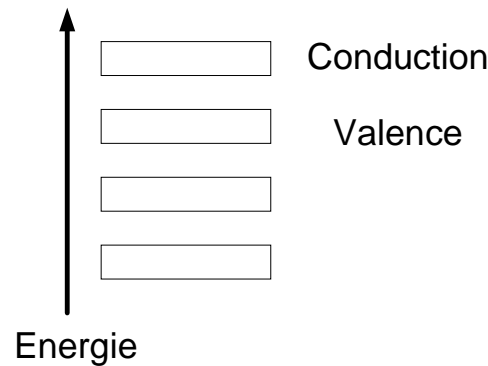
- Avec plus d'atomes collés:



Ça devient des  
"bandes d'énergie"

# Physique des semiconducteurs

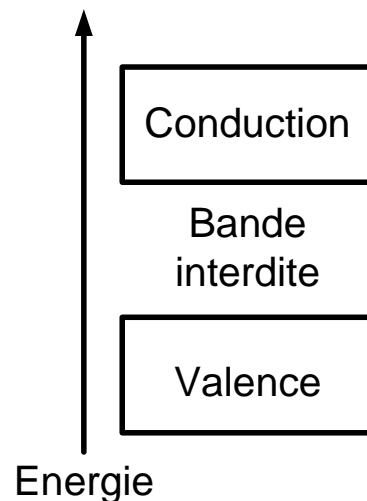
- Pour la conduction, on ne considère que les électrons qui sont faciles à bouger
- Ceux-ci se trouvent sur les 2 derniers niveaux



On va ignorer les autres niveaux

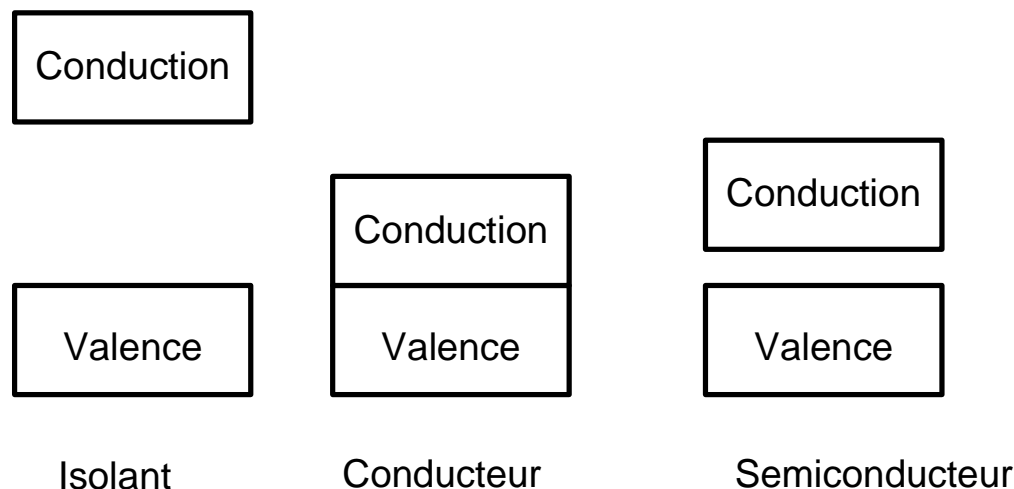
# Physique des semiconducteurs

- On donne de l'énergie aux électrons de valence pour les amener en conduction:
  - Thermique
  - Optique
  - Mécanique
  - Etc.



# Physique des semiconducteurs

- Énergie fournie doit être plus (ou égale) à la bande interdite (bandgap)
- Bandgap dépend du matériau
- On identifie 3 **types** de matériaux:



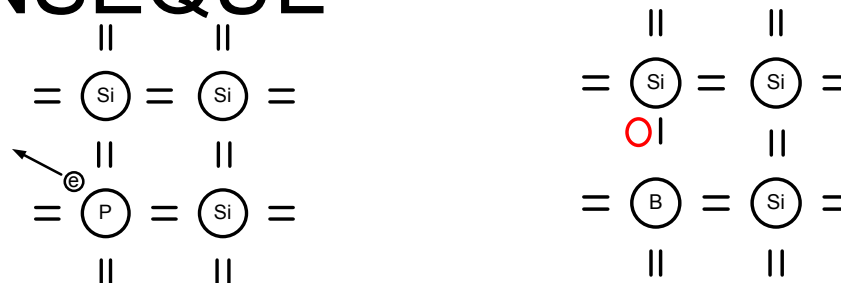


# Physique des semiconducteurs

- Pour améliorer la conduction, on pourrait faire 2 choses:
  - Augmenter les électrons disponibles
  - Augmenter la place où les électrons peuvent aller (trous)
- Ça se fait en ajoutant des impuretés:  
dopage

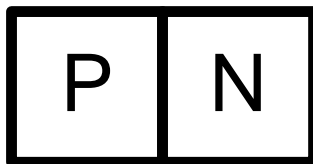
# Physique des semiconducteurs

- Pour ajouter électrons:
  - Ajouter atomes qui ont 1 électron de plus que Si
  - Ça devient plus NÉGATIF: dopage de type N
- Pour ajouter trous:
  - Ajouter atomes qui ont 1 électron de moins que Si
  - Ça devient plus POSITIF: dopage de type P
- Le silicium dopé est aussi appelé **EXTRINSÈQUE**



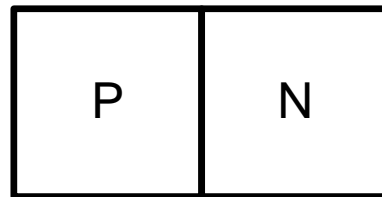
# Diode

- Le silicium pur (intrinsèque) et extrinsèque sont comme des résistances:
  - Pas très utile
- En plaçant P et N ensemble, on se retrouve avec une diode
  - Les choses deviennent plus intéressantes

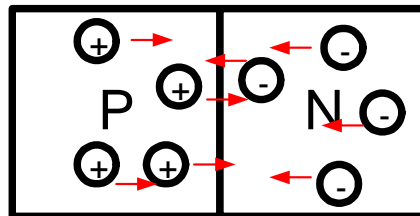


# Diode

- On examine la structure physique
  - Examinons le cas **hypothétique** lorsqu'on place un P et un N ensemble
- Étape 1: En collant P et N

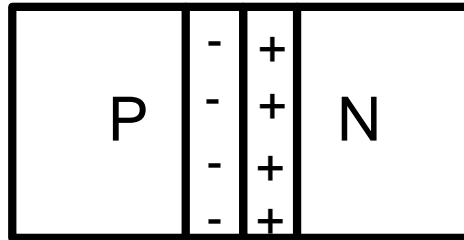


- Étape 2: Électrons et trous diffusent

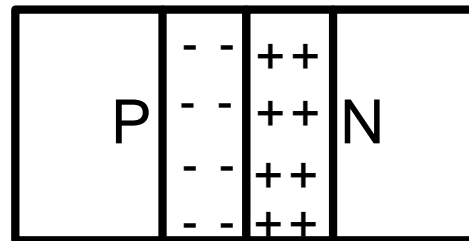


# Diode

- Étape 3: Création de la zone charge-espace

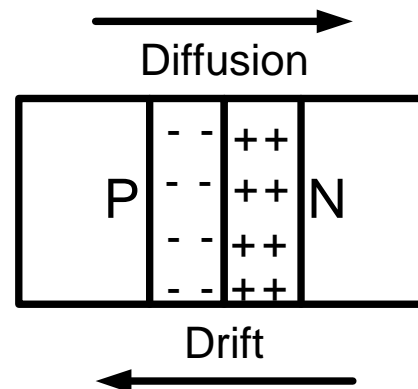


- Étape 4: Équilibre



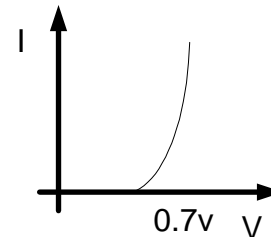
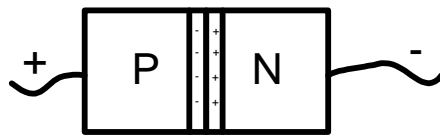
# Diode

- En équilibre, 2 courants existent:
  - Champ électrique “bloque” la diffusion
  - À cause de la température, les paires electrons-trous se forment continuellement
  - Électron-trou dans région charge espace est poussé par le drift
  - Diffusion rebalance les charges



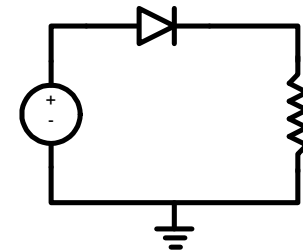
# Diode

- Il y a un champ à l'intérieur qui "bloque" le courant de diffusion
- Qu'arrive-t-il si on réduisait cette tension?
  - La diffusion "remporterait"
- On peut calculer cette valeur:
  - Pour les diodes "typiques", cette valeur est 0.7v
  - Avec la tension, le courant augmente exponentiellement



# Diode

- Le courant a une dépendance exponentielle sur la tension
  - L'exponentielle n'est pas linéaire



- La résolution des équations est difficile

$$e^{V_D/kT} = \frac{V_{DD} - V_D}{R I_S} + 1 \quad \leftarrow \text{Isolez } V_D$$

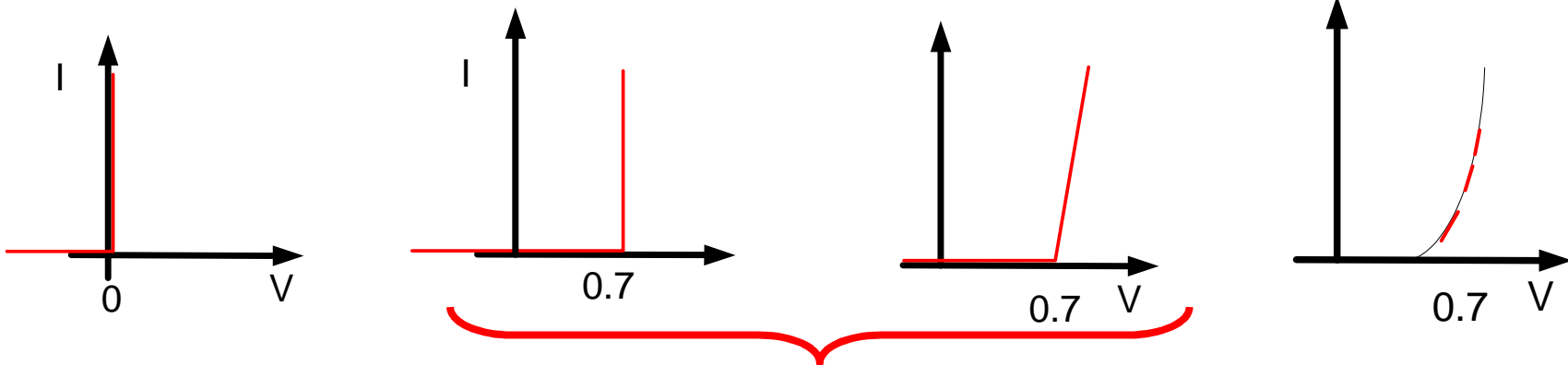
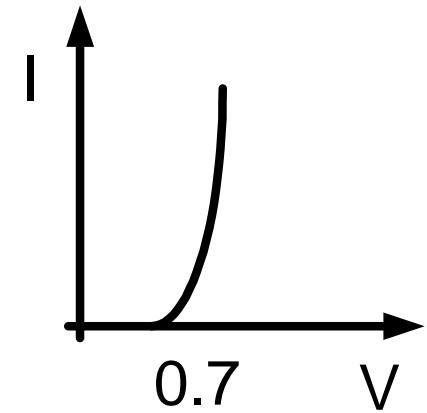
- Solutions:
  - Méthodes non-linéaires (graphique, itérative, etc.)
  - Faire semblant que c'est linéaire (approximation)

Oublions les méthodes non-linéaires



# Diode

- On a vu plusieurs modèles:
  - ON-OFF sans chute
  - ON-OFF avec chute
  - Segmenté linéaire
  - Petit signal



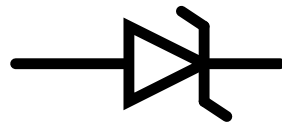
Les plus utiles

# Diode

- L'analyse n'est pas directe:
  - On ne sais pas si la diode conduit ou pas
- Il faut **DEVINER** si la diode conduit ou pas (hypothèse)
  - On calcule le reste avec nos équations
  - On **VÉRIFIE** si notre hypothèse est bonne ou pas
- **SINON**, on recommence...

# Diode

- Une diode peut aussi conduire si on polarise “à l’envers”
- 2 phénomènes existent:
  - Zener: Champ électrique arrache les électrons
  - Avalanche: Collision d’électron donne assez d’énergie pour déloger d’autres électrons
- Diodes conçues avec le but de conduire à l’inverse: diodes zener

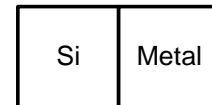


# Diodes: Applications

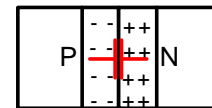
- Redressement
  - Générer tension non-nulle à partir d'un signal AC
- Clamping
  - Changer le niveau DC
- Limiteur
  - Bloquer les tensions trop hautes ou basses
- Régulation
  - Fournir une tension fixe indépendante du courant

# Diodes: Types

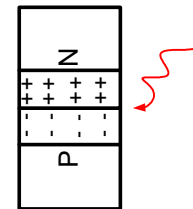
- Schottky: semiconducteur/métal



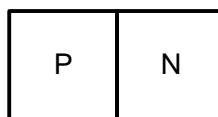
- Varacteur: PN utilisé en inverse



- Photodiode: PN utilisé en inverse



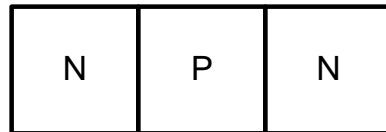
- Diode photoluminescente: Recombinaison redonne l'énergie "visible"



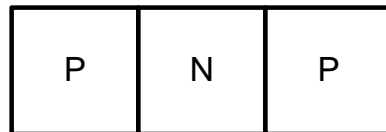
Matériau différent  
(bandgap direct)

# Transistors Bipolaires

- En connectant un P et un N: diode
- En connectant un autre bloc de silicium: on obtient un transistor bipolaire
- NPN: transistor de type N



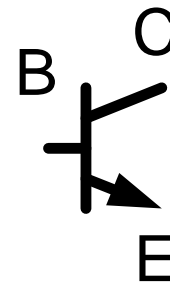
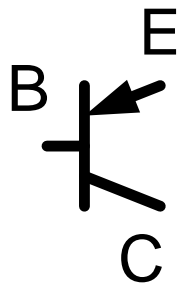
- PNP: transistor de type P



BJT: Bipolar Junction transistor (transistors bipolaires)

# Transistors Bipolaires

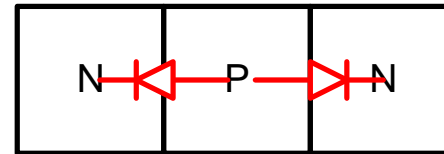
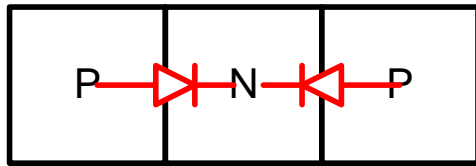
- On peut se connecter à chacun des blocs
- Chaque bloc sera une “patte” du transistor
  - Base: Patte qui est seule
  - Émetteur: Celle avec la flèche
    - PNP: Flèche entre      NPN: Flèche sort
  - Collecteur: L'autre



La flèche suit la direction du courant

# Transistors Bipolaires

- On peut voir les BJT comme étant 2 diodes dos-à-dos



- Les BJT fonctionnent différemment selon la conduction (ou non) de ses diodes
- Avec 2 diodes qui peuvent être ON-OFF, il y a  $2^2=4$  modes possibles

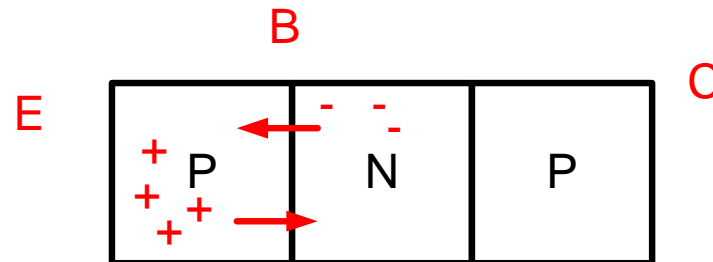


# Transistors Bipolaires

B-E	B-C	Mode	Application
OFF	OFF	Cutoff	Switch OFF
OFF	ON	Inverse	Aucune
ON	OFF	Active	Amplification
ON	ON	Saturation	Switch ON

# Transistors Bipolaires

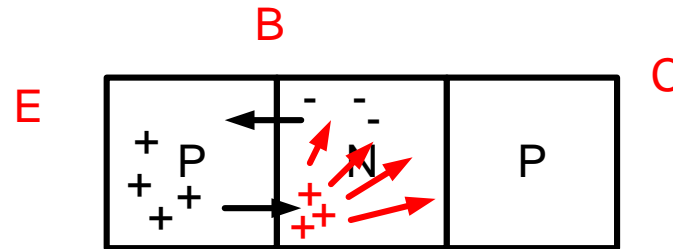
- On utilise la région active pour expliquer le fonctionnement
- Examinons le PNP pour faire changement
- En active la jonction BE conduit



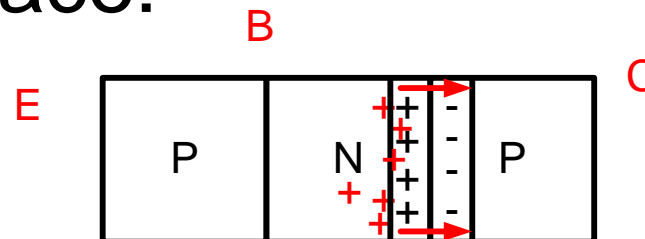
- B envoie des – et E envoie des +

# Transistors Bipolaires

- Quand les + arrivent à la base il y a différence de concentration: diffusion



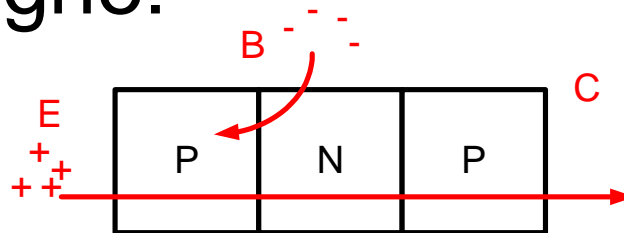
- Certains diffusent et se rendent à la région charge-espace:



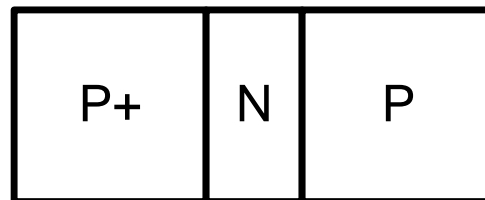
Le champ pousse les + au collecteur (DRIFT)

# Transistors Bipolaires

- En bout de ligne:

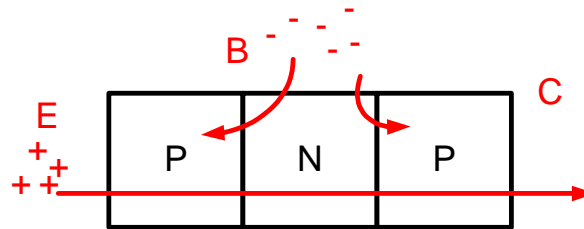


- Petit courant a la base donne gros courant EC
- On limite recombinaison à la base: mince
- Pour gros courant EC: gros dopage à l'émetteur



# Transistors Bipolaires

- En saturation, on a un courant dans BC



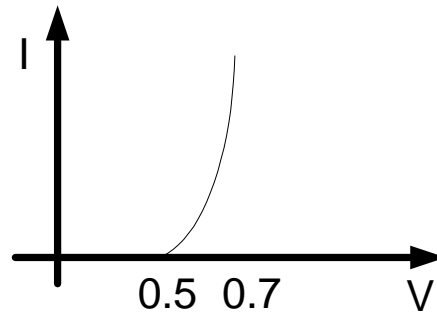
- La base injecte maintenant des – au collecteur
- Diminue le courant effectif de E à C
  - Raison: E à C sont des + et on injecte des -

# Transistors Bipolaires

- En saturation on a gros courant  $I_B$ 
  - $I_C$  est habituellement gros
  - Mais le ratio  $I_C/I_B$  ( $\beta_F$ ) n'est pas élevé
- $\beta$  est à son maximum en active:
  - Raison pourquoi **active** est bon pour **amplifier**
- En saturation, on ne se préoccupe pas de  $\beta$ : on veut juste un gros  $I_C$ 
  - Pour faire ça, on met un gros  $I_B$ .

# Transistors Bipolaires

- C'est quoi le  $V_{CESAT}=0.2v$ ?
- Une diode conduit pleinement à 0.7v
- On estime qu'elle commence à conduire à 0.5v

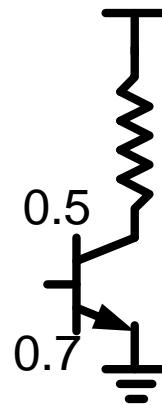


- Saturation c'est quand BC COMMENCE à conduire

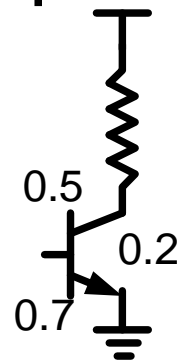
On estime que  $V_C$  ne change plus une fois en saturation

# Transistors Bipolaires

- Ces tensions donneraient un transistor en saturation



- Ça veut aussi dire que  $V_{CE}=0.2v$



D'où  $V_{CESAT}=0.2v$

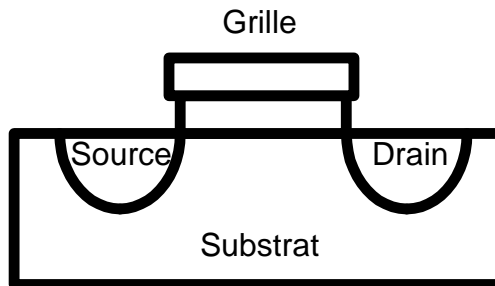


# Transistors Bipolaires

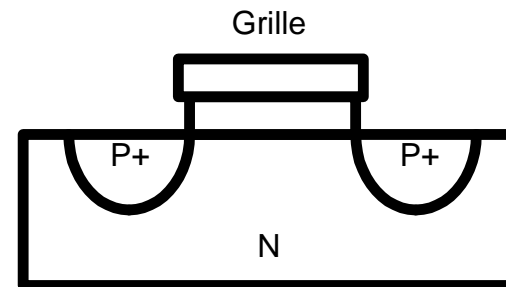
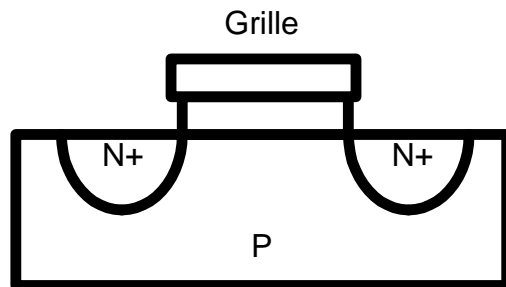
- On connaît les équations pour calculer le courant et la tension.
- Mais on ne sait pas dans quel mode le transistor se trouve
- Il faut faire une hypothèse, faire les calculs et vérifier
- Si les hypothèses ne sont pas justifiées, il faut recommencer du début

# Transistors CMOS

- Les transistors CMOS n'utilisent plus les équations des diodes
- On a une structure différente



- Il y a 2 sortes: NMOS et PMOS



# Transistors CMOS

- On contrôle la connexion entre source et drain avec la grille:

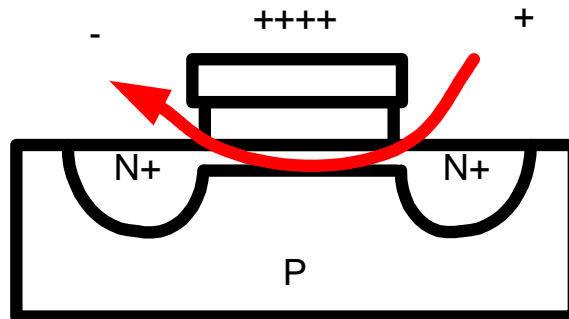


- Avec la grille, on crée un champ électrique
  - Transistor “à effet de champ”
- Cette région s’appelle le canal

Tension requise pour avoir le canal:  $V_{TH}$

# Transistors CMOS

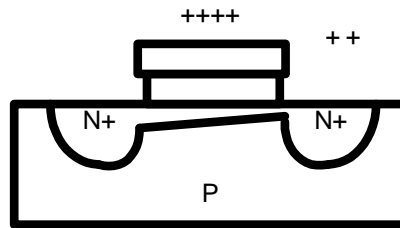
- On peut appliquer une tension pour avoir un courant entre drain et source



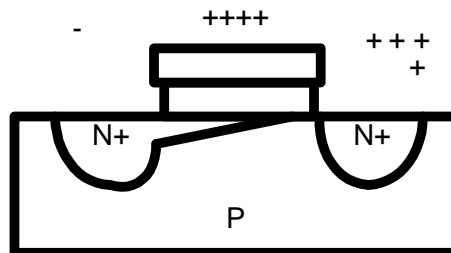
- En augmentant la tension le courant augmente LINÉAIREMENT
  - On est dans la région LINÉAIRE

# Transistors CMOS

- Si on augmente TROP la tension au drain,  $V_{G-CANAL}$  sera faible au drain ( $V_{GD}$ )

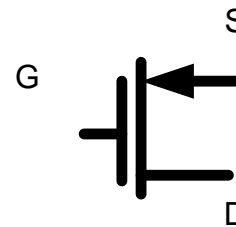
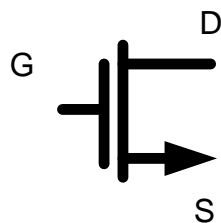


- Si  $V_D$  trop gros, ça peut couper le canal
  - On tombe en saturation
  - Le courant cesse d'augmenter avec  $V_D$



# Transistors CMOS

- Symbole des transistors CMOS:



- On identifie les pattes:
  - Grille: la patte seule
  - Source: patte avec la flèche
  - Drain: l'autre patte
  - Substrat: Pas présentée ici. Sert souvent à bloquer les diodes parasites.

# Transistors CMOS

- Analyse des circuits ne peut pas se faire facilement
- On ne connaît pas le mode de fonctionnement a priori
- Il faut faire une hypothèse, faire les calculs et vérifier

# Comparaison

- Voici quelques caractéristiques

Caractéristique	BJT	CMOS
Conduction	$V_{BE}=0.7$	$ V_{GS}  >  V_{TH} $
Amplification	Active	Saturation
Switch	Saturation	Linéaire
Contrôle	Faible $I_B$	$I_G=0$