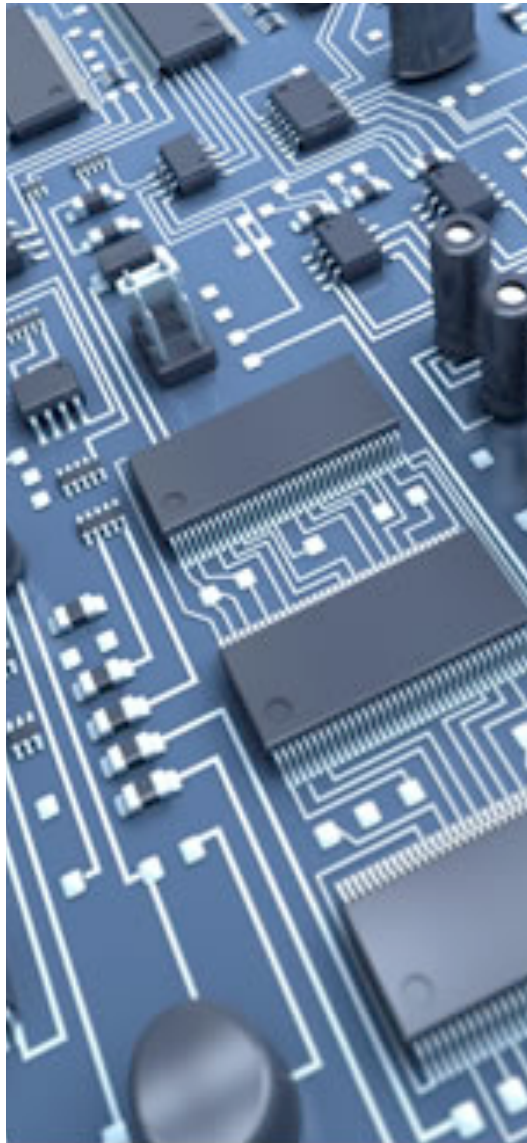


# 6 – **Fonctionnement interne des composants électroniques**



- Introduction
- 6.1 - Physique des semi-conducteurs
- 6.2 - Jonction PN et diode
- 6.3 – MOSFET

# Les composants électroniques courants sont en silicium

- Pourquoi utiliser du silicium pour faire les composants électroniques?
  - Quelles sont ses propriétés particulières?
  - En quoi le Si permet-il plus facilement que d'autres matériaux de réaliser les fonctions d'interrupteurs électroniques indispensables aux diodes et transistors?

Semi-conducteurs =  
mauvais conducteurs, mauvais isolants

| Corps     | catégorie       | résistivité à 25°C | conductivité à 25°C                   |
|-----------|-----------------|--------------------|---------------------------------------|
|           |                 | [Ohm.m]            | [Ohm <sup>-1</sup> .m <sup>-1</sup> ] |
| Cuivre    | conducteur      | 1,673E-08          | 5,977E+07                             |
| Aluminium | conducteur      | 2,655E-08          | 3,767E+07                             |
| Silicium  | semi-conducteur | 1,000E-03          | 1,000E+03                             |
| Germanium | semi-conducteur | 4,600E-03          | 2,174E+02                             |
| Steatite  | isolant         | 1,00E+12           | 1,000E-12                             |
| Teflon    | isolant         |                    |                                       |

## 6.1

# Physique des semi-conducteurs

- Solides conducteurs
- Cristal de Si (pur)
- Dopage
- Synthèse

# Solides conducteurs: origine de la conductivité

## ► cristal

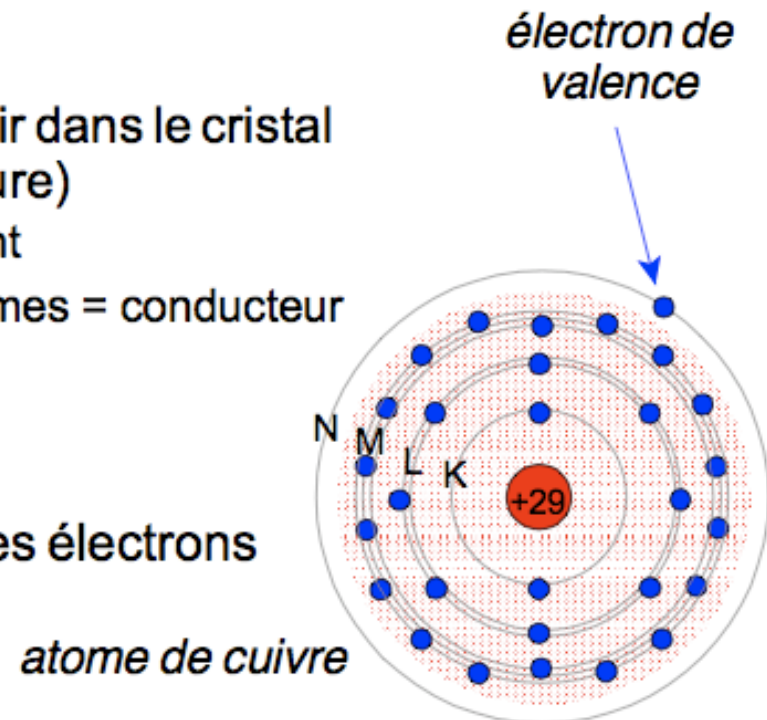
- ◆ ex: sucre
- ◆ arrangement
- ◆ liés par des liaisons chimiques

## ► conduction électrique

- ◆ due aux charges capables de se mouvoir dans le cristal
- ◆ = électrons de valence (couche extérieure)
  - $T=0^{\circ}\text{K}$ : toutes charges immobiles = isolant
  - $T>0^{\circ}\text{K}$ : agitation thermique ionise les atomes = conducteur

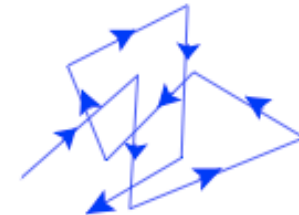
## ► métal (Cu, Al, Au, Ag)

- ◆ électrons peu liés à l'atome
  - énergie de liaison faible
- ◆ agitation thermique libère facilement des électrons
- ◆ beaucoup d'électrons libres
- ◆ => conductivité élevée



# Solides conducteurs: courant électrique

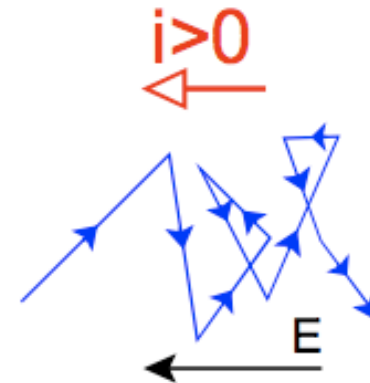
- ▶ Tension appliquée nulle
  - ◆ agitation thermique => mouvement aléatoire similaire à celui des molécules d'un gaz ( $I_{\text{net}}=0$ )



$$E = 0$$

$$V=10^5 \text{ m/s } (300^\circ \text{ K})$$

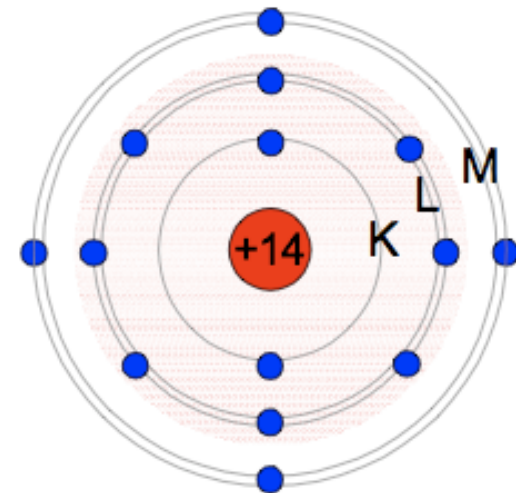
- ▶ Tension appliquée non nulle
  - ◆ déplacement d'ensemble des électrons sous l'effet d'un champ extérieur (ddp)
  - ◆ sens conventionnel = inverse du déplacement des électrons



# Cristal de Si pur: structure atomique et cristalline

- ▶ structure atomique différente

- ◆ moins de couches électroniques
- ◆ 4 électrons de valence au lieu d'un
- ◆ charge du coeur plus élevée
  - coeur = noyau + couches internes

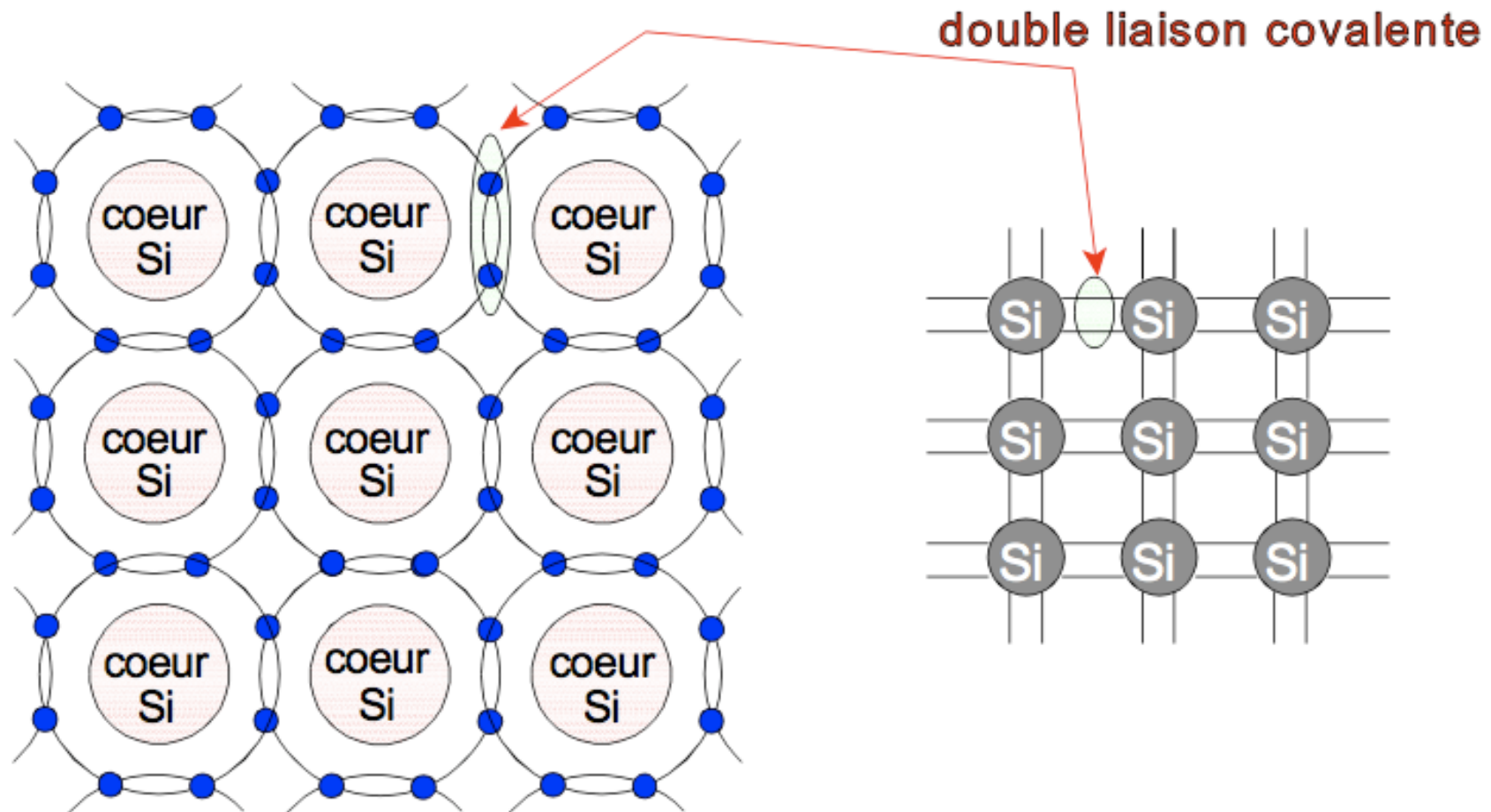


- ▶ arrangement en cristal comme les métaux

- ◆ compléter couche périphérique pour avoir 8 électrons
- ◆ => 8 liaisons covalentes
  - liaison covalente = mise en commun d'un  $e^-$  entre 2 atomes
  - chaque atome met 4x un  $e^-$  en commun avec ses voisins
  - total: 8 liaisons covalentes



# Cristal de Si pur: structure du cristal à 0°K





# Cristal de Si pur

## charges mobiles et conductivité

### ► Liaison électron/atome

- ♦ énergie de liaison électron/atome plus élevée (Si: 1eV à 25°C)
  - moins de couches => e<sup>-</sup> de valence plus proches du noyau
  - électrons de valence plus nombreux => coeur plus chargé
  - tous les électrons de valence bloqués dans des liaisons covalentes
- ♦ => agitation thermique libère difficilement des électrons
  - seul 1 atome sur 10000000000000 (10<sup>12</sup>) fournit un électron libre!!

$$N_{\text{Si}} = 5.10^{28} \text{ [/m}^3\text{]}$$

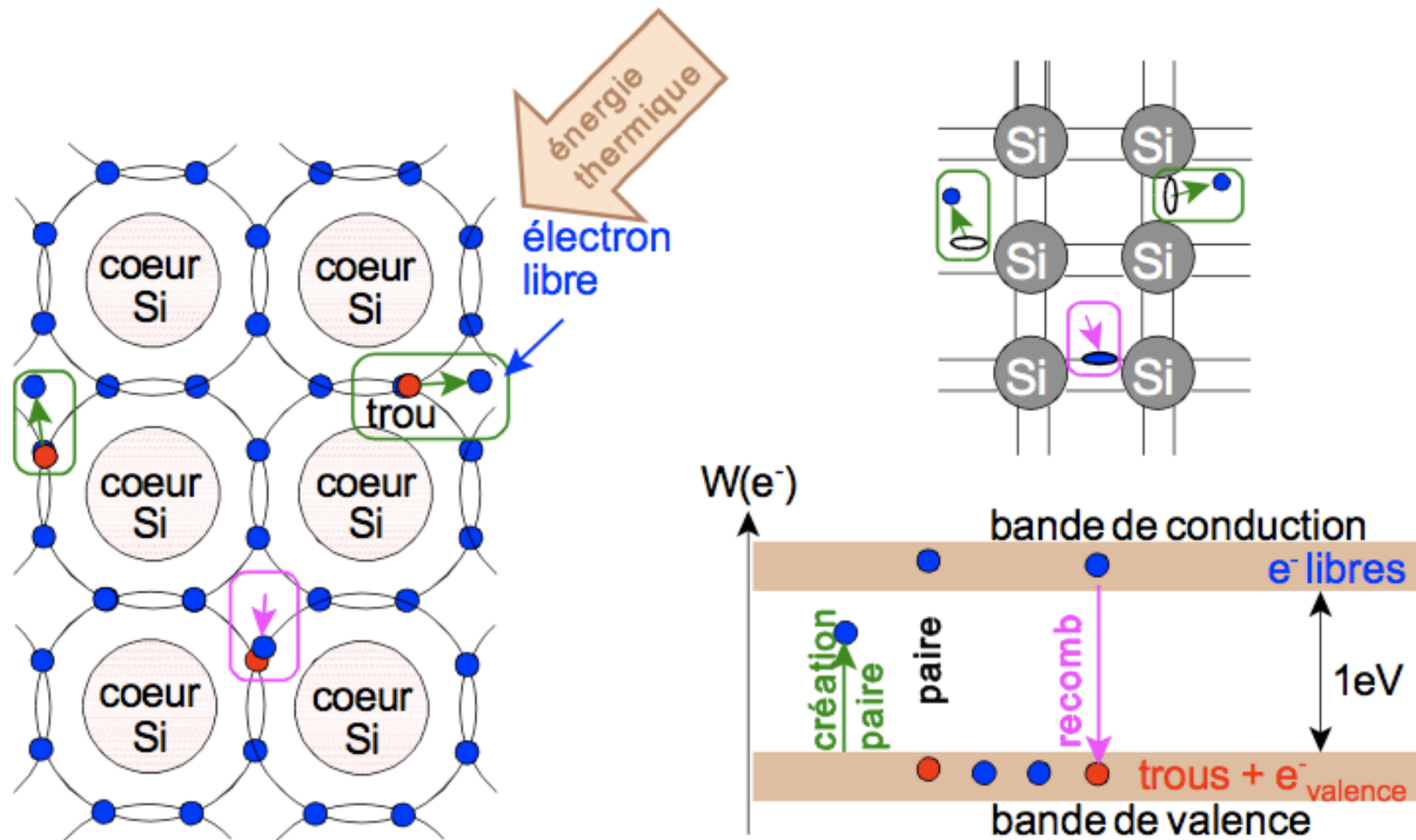
$$n_{\text{Si}} (25^{\circ}\text{C}) = 6,8.10^{16} \text{ [/m}^3\text{]}$$

$$n_{\text{Cu}} (25^{\circ}\text{C}) = 10^{29} \text{ [/m}^3\text{]}$$

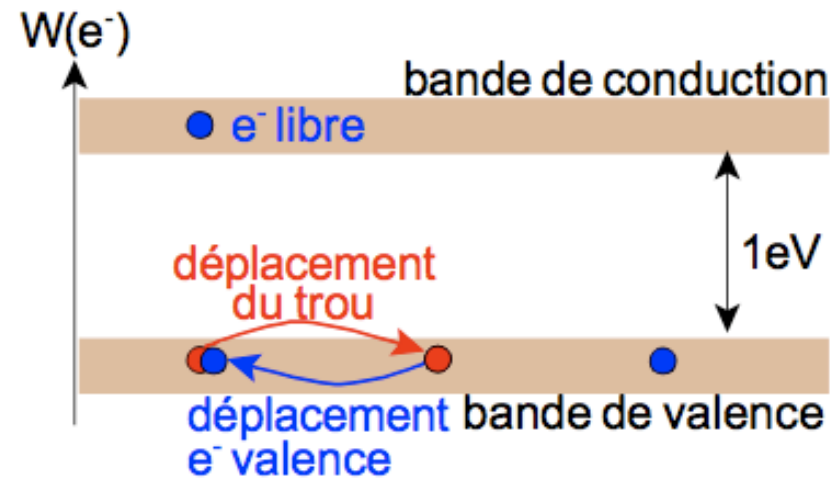
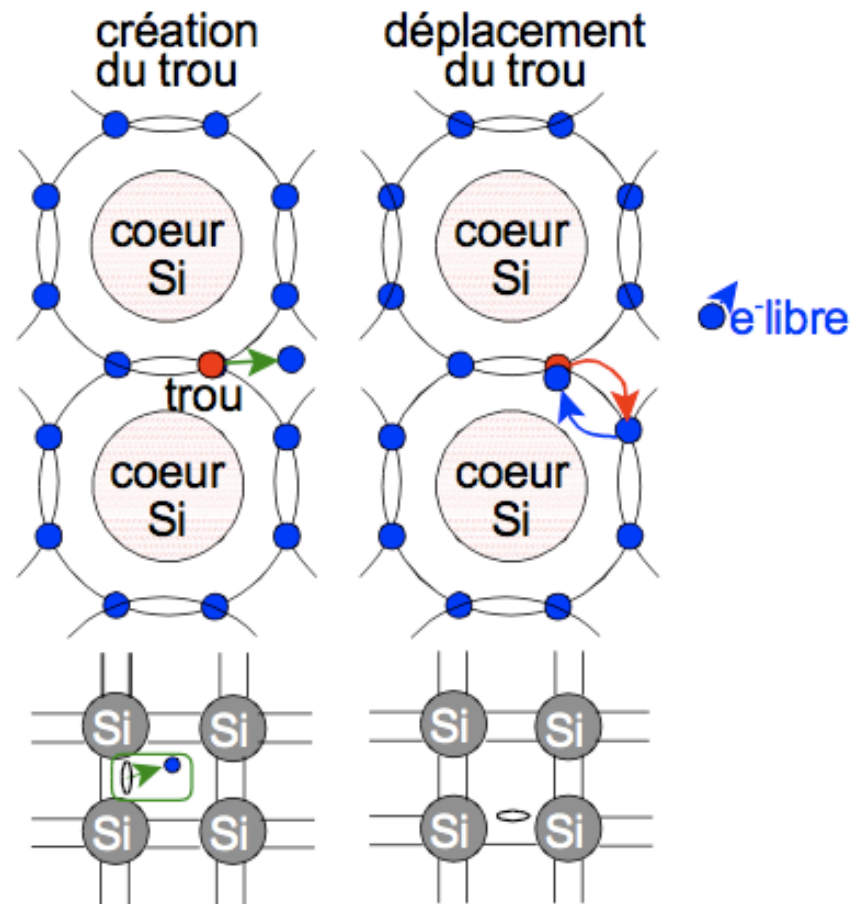
### ► Conductivité

- ♦ peu d'électrons libres => conductivité médiocre
- ♦ la libération d'un électron crée un "trou"
  - trou = charge positive mobile correspondant à un défaut d'électron

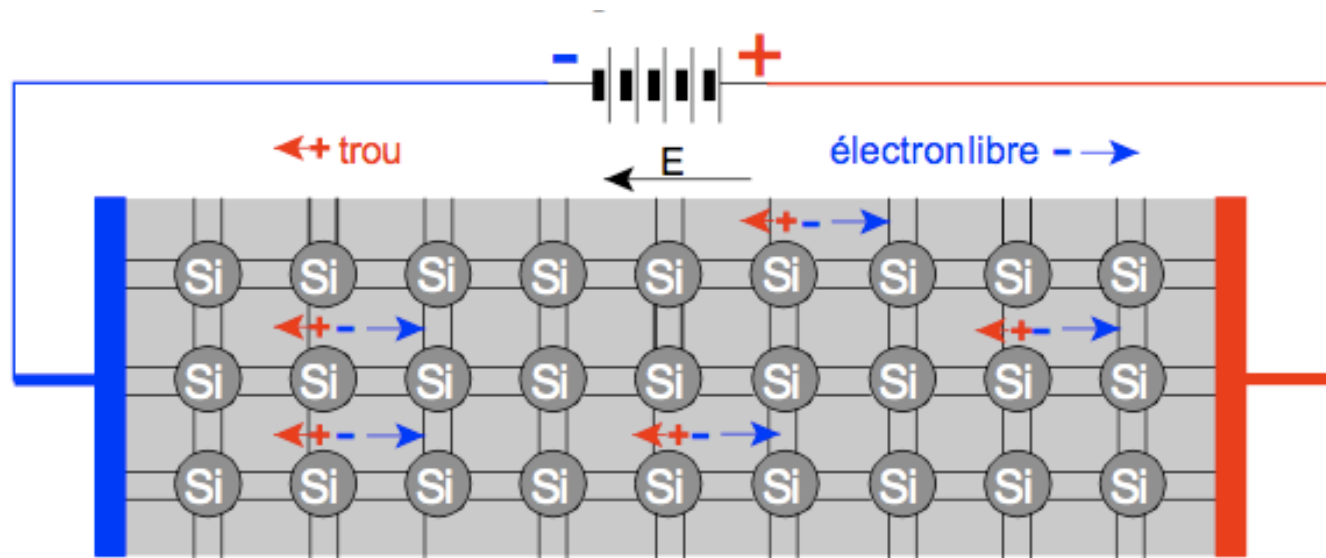
# Si pur (300°K): création/recombinaison de paires électron/trou



# Si pur (300°K): déplacement d'un trou



# Cristal de Si pur: synthèse



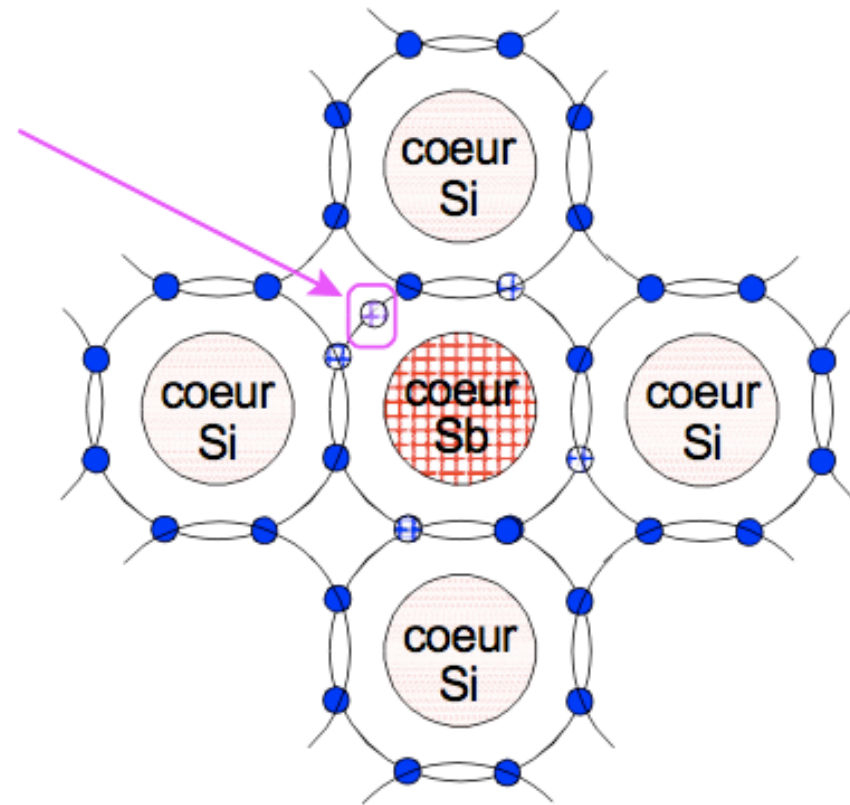
- ▶ 2 types de charges mobiles
  - ♦ négative:
  - ♦ positive: trou
  - ♦ silicium pur: autant d'électrons que de trous (électroneutralité)
- ▶ en présence d'un champ appliqué (tension extérieure)
  - ♦ se déplacent dans des sens opposés
  - ♦ deux courants différents contribuant à la conductivité

# Dopage = injecter dans le cristal de silicium pur des atomes étrangers ("dopants")

- une très faible quantité de dopant permet de modifier considérablement les propriétés
- pratiquement
  - technique de fabrication microélectronique bien maîtrisée
  - microélectronique = fabrication des composants intégrés
  - on peut choisir de doper différemment des zones différentes d'un bloc de silicium

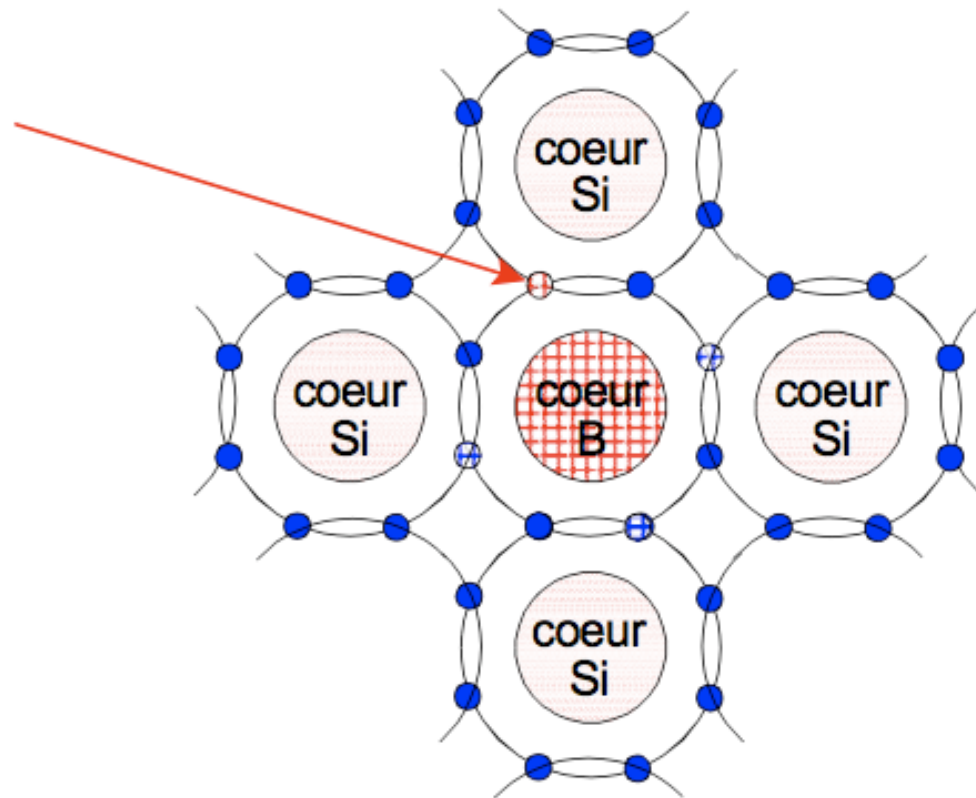
# Dopage par atome donneur: introduction d'un donneur d'électron

- ▶ adjonction d'atomes pentavalents (5  $e^-$  de valence)
  - ♦ P, As, Sb
- ▶ électron excédentaire



# Dopage par atome accepteur: introduction d'un accepteur d'électron

- ▶ adjonction d'impuretés trivalentes
  - ♦ Al, B, Ga
- ▶ trou excédentaire





# Dopage:

## SC intrinsèque et SC extrinsèque

- ▶ semi-conducteur **intrinsèque**
  - ◆ = propriétés du semi-conducteur dépendent uniquement de ses caractéristiques propres
    - silicium pur
    - silicium dopé à haute température
- ▶ semi-conducteur **extrinsèque**
  - ◆ = propriétés dépendent essentiellement du dopant
    - silicium dopé de type P ou N

# Dopage par atome donneurs: augmentation du nombre d'électrons

- Soit un cristal de silicium de densité atomique
  - $N_{Si} = 5.10^{28}$  [atome/m<sup>3</sup>]
- Dopons-le à raison de 1 atome donneur par 50 millions:
  - $N_d = 10^{21}$  [atome/m<sup>3</sup>]
  - chaque atome donneur fournit un électron libre
- à 300°K, le nombre d'électrons libres passe:
  - de  $6,8.10^{16}$  [m-3] (silicium pur)
  - à  $10^{21}$  [m-3] (silicium dopé)
- => la densité d'électrons libres croît considérablement et ne dépend plus que de la densité des donneurs

# Dopage par atomes donneurs: diminution du nombre de trous

- ▶ le produit des densités d'électrons et de trous est une constante dépendant uniquement de la température
  - ♦ sans démo, découle du principe d'électroneutralité
- ▶ à 300°K, le dopage fait passer le nombre de trous:
  - ♦ de  $6,8 \cdot 10^{16} \text{ [m}^{-3}\text{]}$  (silicium pur)
  - ♦ à  $4,6 \cdot 10^{12} \text{ [m}^{-3}\text{]}$  (silicium dopé)
- ▶ => il y a environ  **$2 \cdot 10^8$**  fois plus d' $e^-$  que de trous
  - ♦ les électrons deviennent nettement majoritaires
  - ♦ les trous deviennent nettement minoritaires

# Effet de la température:

p et n dépendent fortement de la T°

$$p.n \propto T^3 e^{-\frac{W_G}{kT}}$$

- ▶ le produit des densités de charges mobiles (e<sup>-</sup> et trou)
  - ♦ ne dépend que de la température
  - ♦ croît fortement avec la température
    - => les propriétés des SC sont très dépendantes de la température
- ▶ au-delà d'une certaine T° (≈ 200°C)
  - ♦ n devient ≥ Na ou Nd (densité de dopants)
  - ♦ le Si redevient intrinsèque, il n'y a plus de type "p" ou "n"
  - ♦ toutes les propriétés acquises par le dopage sont perdues !
  - ♦ => attention à la surchauffe des composants électroniques!!

# Dopage par atomes donneurs: synthèse

- ▶ le dopage par une "faible" quantité de donneurs modifie radicalement la composition des porteurs mobiles
  - "faible": par rapport au nombre d'atomes de Si mais élevée par rapport au nombre d'électrons libres dans le Si intrinsèque
- ▶ la densité d'électrons devient celle des donneurs et croît dans une proportion importante ( $\times 10^4$  ou plus)
  - ♦ les **électrons** sont devenus **majoritaires**
- ▶ la densité de trous baisse dans la même proportion
  - ♦ les **trous** sont devenus **minoritaires**
- ▶ on parle de **semi-conducteur de type n**
  - ♦ "n" car les charges libres négatives sont majoritaires

# Dopage par atomes accepteurs: conclusions symétriques

- ▶ le dopage par une faible quantité d'accepteurs modifie radicalement la composition des porteurs mobiles
- ▶ la densité de trous devient celle des accepteurs et croît dans une proportion importante ( $\times 10^4$  ou  $>$ )
  - ♦ les **trous** sont devenus **majoritaires**
- ▶ la densité d'électrons baisse dans la même proportion
  - ♦ les **électrons** sont devenus **minoritaires**
- ▶ on parle de **semi-conducteur de type p**
  - ♦ "p" car les charges libres positives sont majoritaires

# Semi-conducteurs

## synthèse

- ▶ Pourquoi utiliser du silicium pour faire les composants électroniques?
  - ◆ Pour ses propriétés de semi-conducteur:
    - 2 types de charges mobiles
    - on peut, par dopage, maîtriser sa conductivité en tout point
- ▶ En quoi cela permet-il de réaliser les fonctions d'interrupteurs électroniques indispensables aux diodes et transistors?
  - ◆ Suspense...



## 6.2

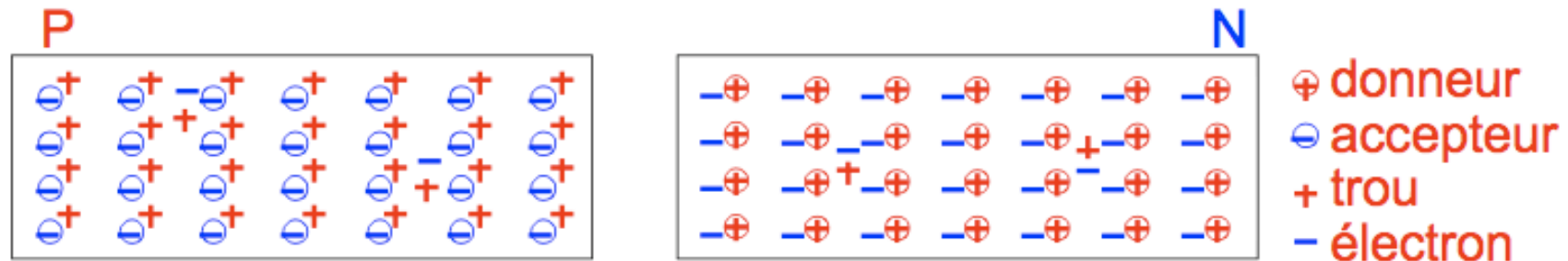
# Jonction PN et diode

- Jonction PN
- Jonction PN polarisée
- Caractéristique réelle d'une diode

# Jonction PN: définition

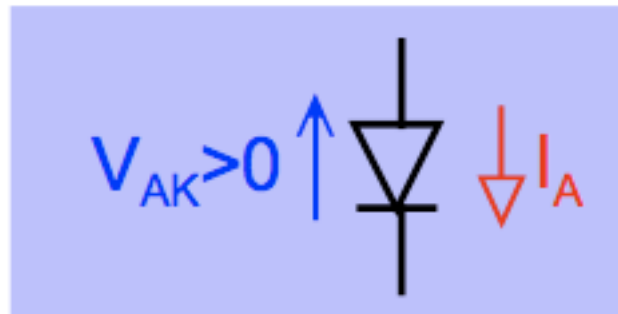
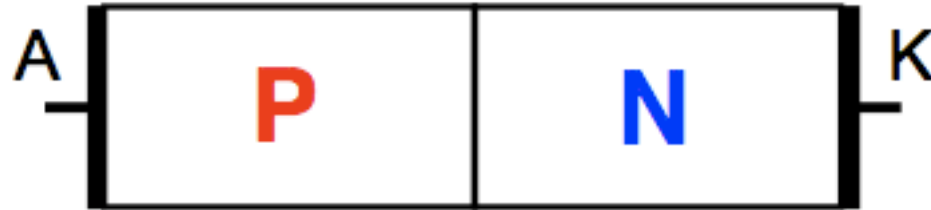
## ▶ Jonction PN

- ◆ = frontière entre deux blocs de semi-conducteur accolés
  - SC type N: porteurs majoritaires = électrons
  - SC type P: porteurs majoritaires = trous
- ◆ en pratique: dopage sélectif d'un bloc de Si

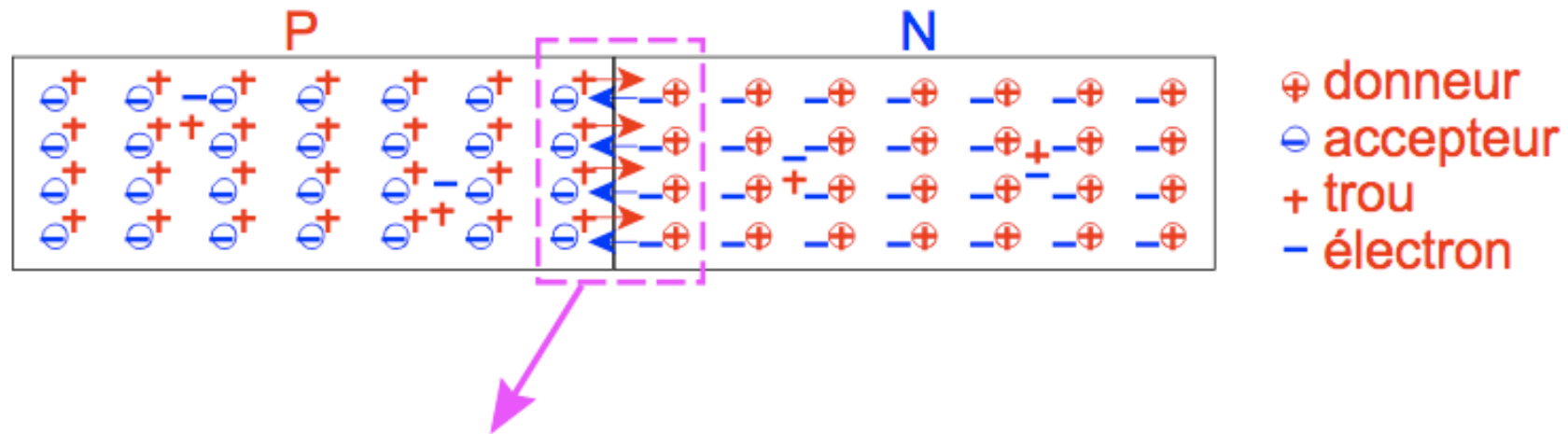


- ▶ Cette frontière possède des propriétés particulières sur lesquelles reposent tous les semi-conducteurs

Diode = jonction PN dont on métallise les extrémités

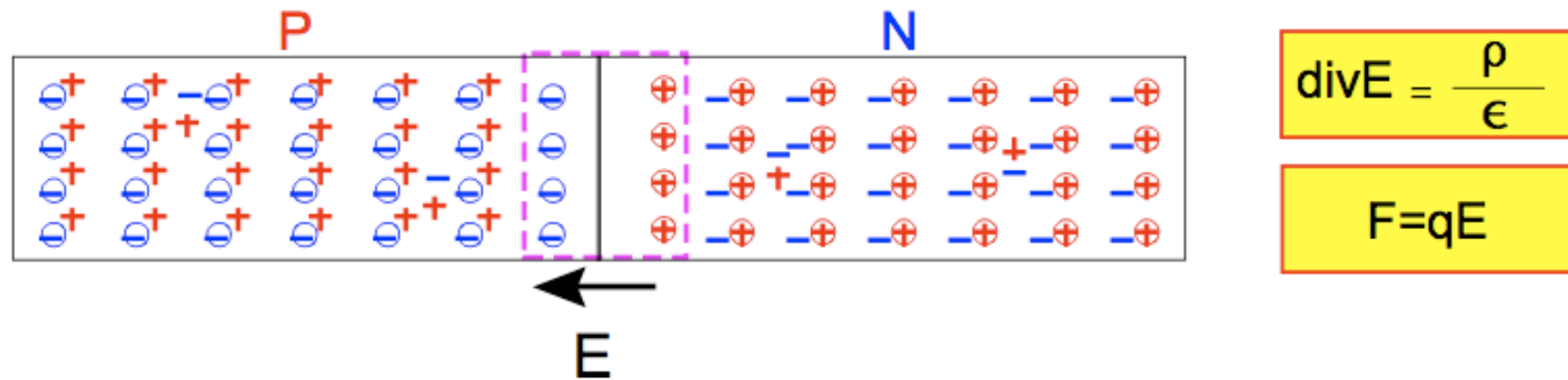


# Zone de charge d'espace



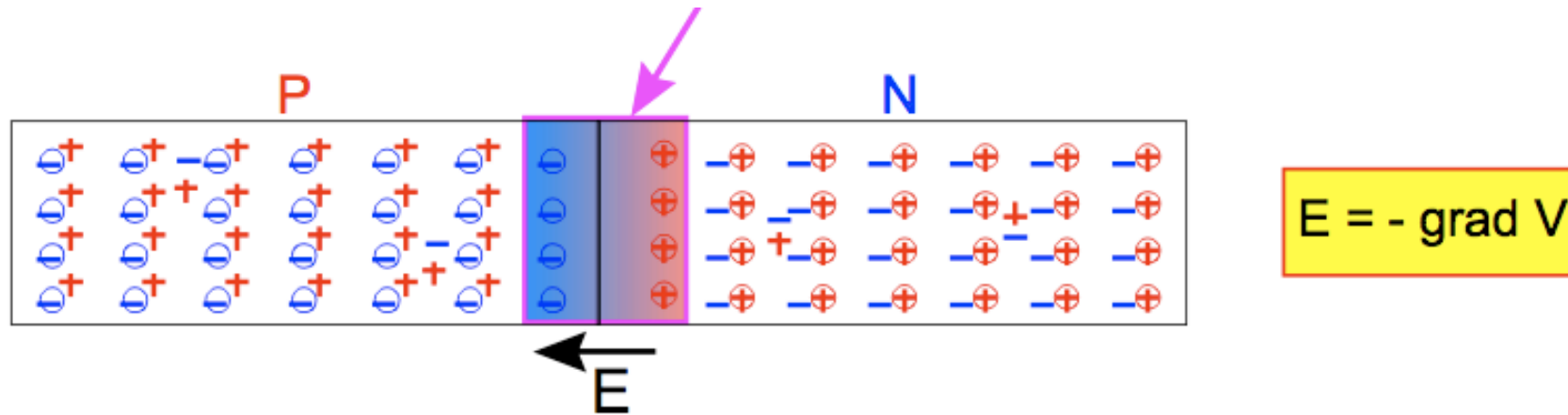
- ▶ à la frontière (=jonction), les porteurs majoritaires se recombinent
  - ◆ électrons provenant du côté N
  - ◆ trous provenant du côté P

# Zone de charge d'espace



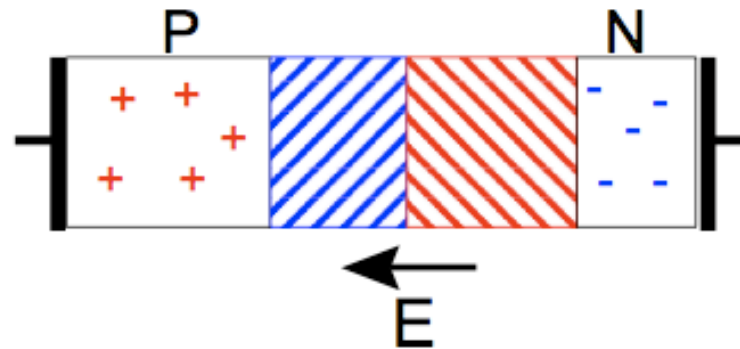
- ▶ aux abords de la frontière, l'électroneutralité n'est plus assurée
  - ♦ il n'y a plus de charges mobiles pour compenser les charges fixes
- ▶ les atomes du cristal (fixes et chargés) créent un champ électrique dirigé de N vers P qui:
  - ♦ repousse les porteurs majoritaires
  - ♦ attire les rares porteurs minoritaires

# Zone de charge d'espace



- ▶ => formation d'une zone "appauvrie" en charges mobiles
  - ◆ = **zone de charge d'espace**
  - ◆ = zone "d'appauvrissement" ou zone "de transition"
- ▶ barrière de potentiel entre les 2 côtés de la zone de transition
  - ◆ due au champ électrique
  - ◆ **empêche le passage des porteurs majoritaires** (de gauche à droite)

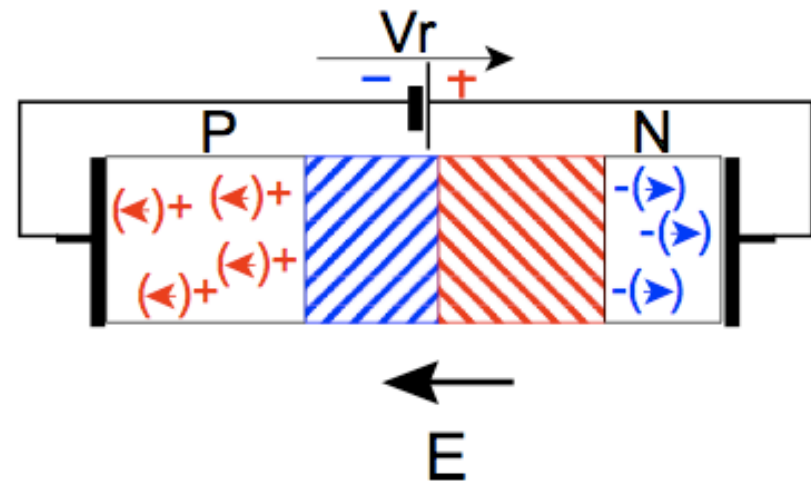
# Jonction PN récapitulatif



- ▶ grâce à la présence
  - ◆ de 2 types de charges fixes
  - ◆ de 2 types de charges mobiles
- ▶ on crée un champ électrique (=barrière de potentiel) qui empêche le passage du courant (majoritaires)
  - ◆ la jonction PN est spontanément "fermée" au courant
  - ◆ comment l'ouvrir?

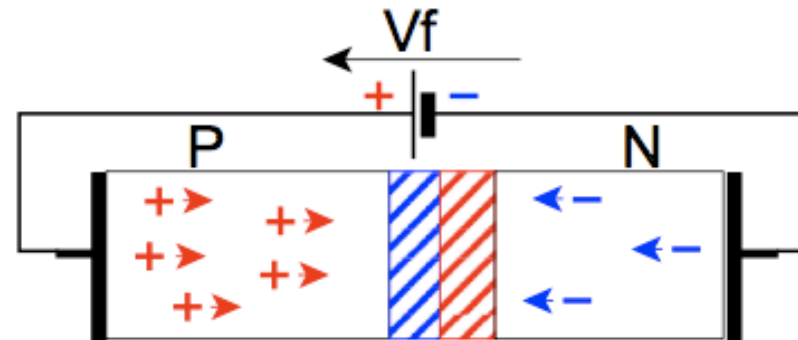


# Polarisation inverse



- ▶ Polarisation inverse
  - ♦ = tension positive du côté **N**
- ▶ => éloigne les majoritaires de la zone de transition
  - ♦ la zone de transition s'élargit
  - ♦ la barrière de potentiel augmente
    - la tension appliquée s'ajoute au potentiel d'équilibre
    - la diode reste imperméable au courant

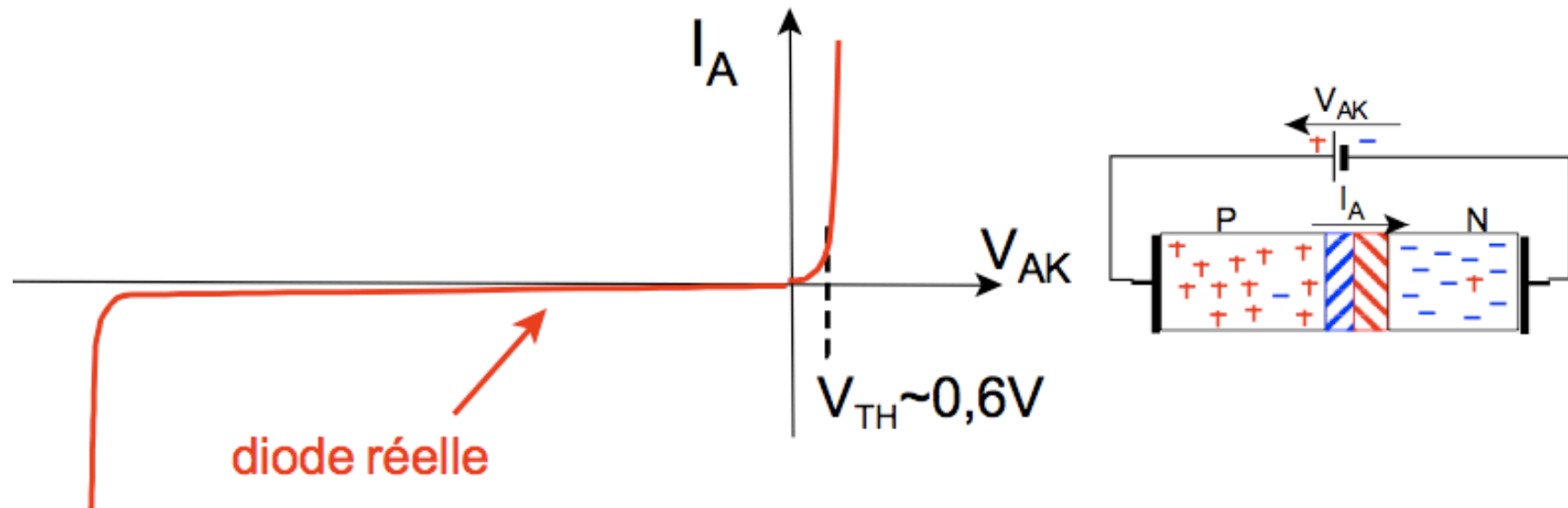
# Polarisation directe



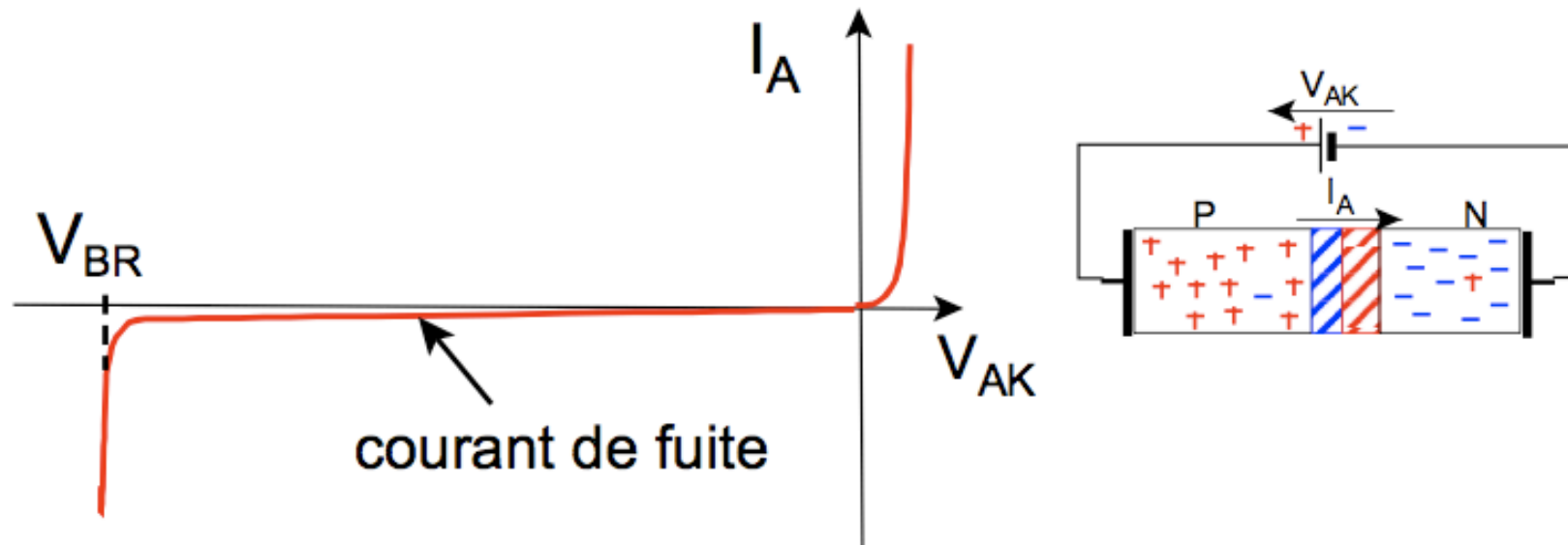
- ▶ Polarisation directe
  - ◆ = tension positive du côté **P**
- ▶ => rapproche les majoritaires de la zone de transition
  - ◆ la zone de transition se rétrécit
  - ◆ la barrière de potentiel diminue
  - ◆ les majoritaires ont plus de facilité à passer la barrière
  - ◆ => vers 0,6V, la diode devient passante
    - la barrière de potentiel est contrée par la source extérieure
    - recombinaisons  $e^-$ /trous massives dans la zone de transition

# Caractéristique réelle

- ▶ polarisation directe ( $V > 0$ ,  $I \neq 0$ )
  - ◆ courbe exponentielle  $I = f(V)$
  - ◆ "coude" de la courbe = seuil de conduction  $V_{TH}$ 
    - valeur pour laquelle la polarisation "contre" la barrière de potentiel "naturelle" de la diode
    - le courant de majoritaires augmente brusquement



# Caractéristique réelle: courant de fuite



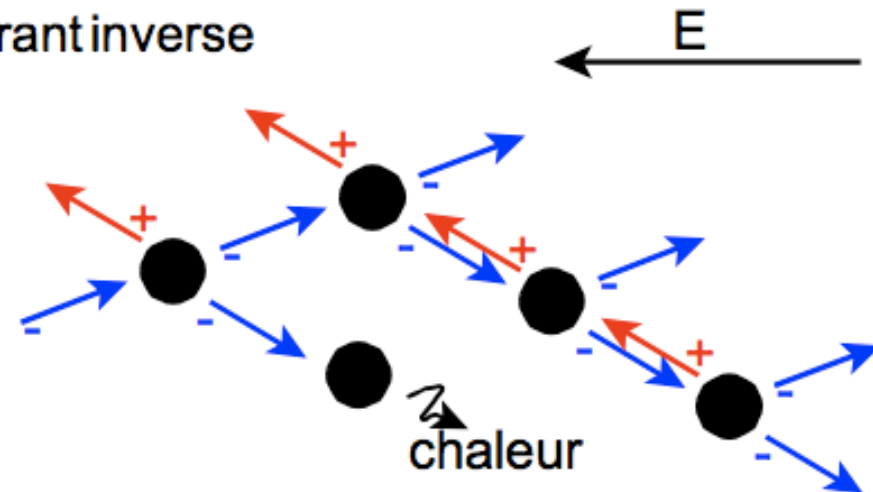
## ► polarisation inverse: courant de fuite

### ♦ origine:

- rares porteurs majoritaires ayant assez d'énergie pour franchir la barrière de potentiel
- porteurs minoritaires des régions P et N (peu nombreux)
- paires électron/trou générées dans la jonction
- courant de surface

# Caractéristique réelle de la jonction PN: avalanche

- ▶ électrons fortement accélérés
  - ♦ => collision des électrons avec les atomes
- ▶ si énergie faible
  - ♦ échauffement (peut détruire la jonction)
- ▶ si énergie plus élevée ( $E > 20 \text{ kV/mm}$ )
  - ♦ => ionisation des atomes: création d'une paire électron/trou
  - ♦ => effet "boule de neige"
  - ♦ => augmentation brusque du courant inverse



# Jonction PN

## synthèse

- ▶ une barrière de potentiel s'établit naturellement à la jonction entre un SC de type P et un SC de type N
  - ◆ phénomène d'origine électrostatique
  - ◆ empêche le passage du courant (sauf courant de fuite inverse)
  - ◆ mis à profit pour fabriquer une diode
- ▶ la polarisation permet de contrer cette barrière de potentiel
  - ◆ polarisation par une source de tension extérieure
  - ◆ à 0,6V, la diode devient brutalement passante
- ▶ => commande en tout ou rien du courant à partir de la tension = interrupteur électronique

# Jonction PN

## Synthèse

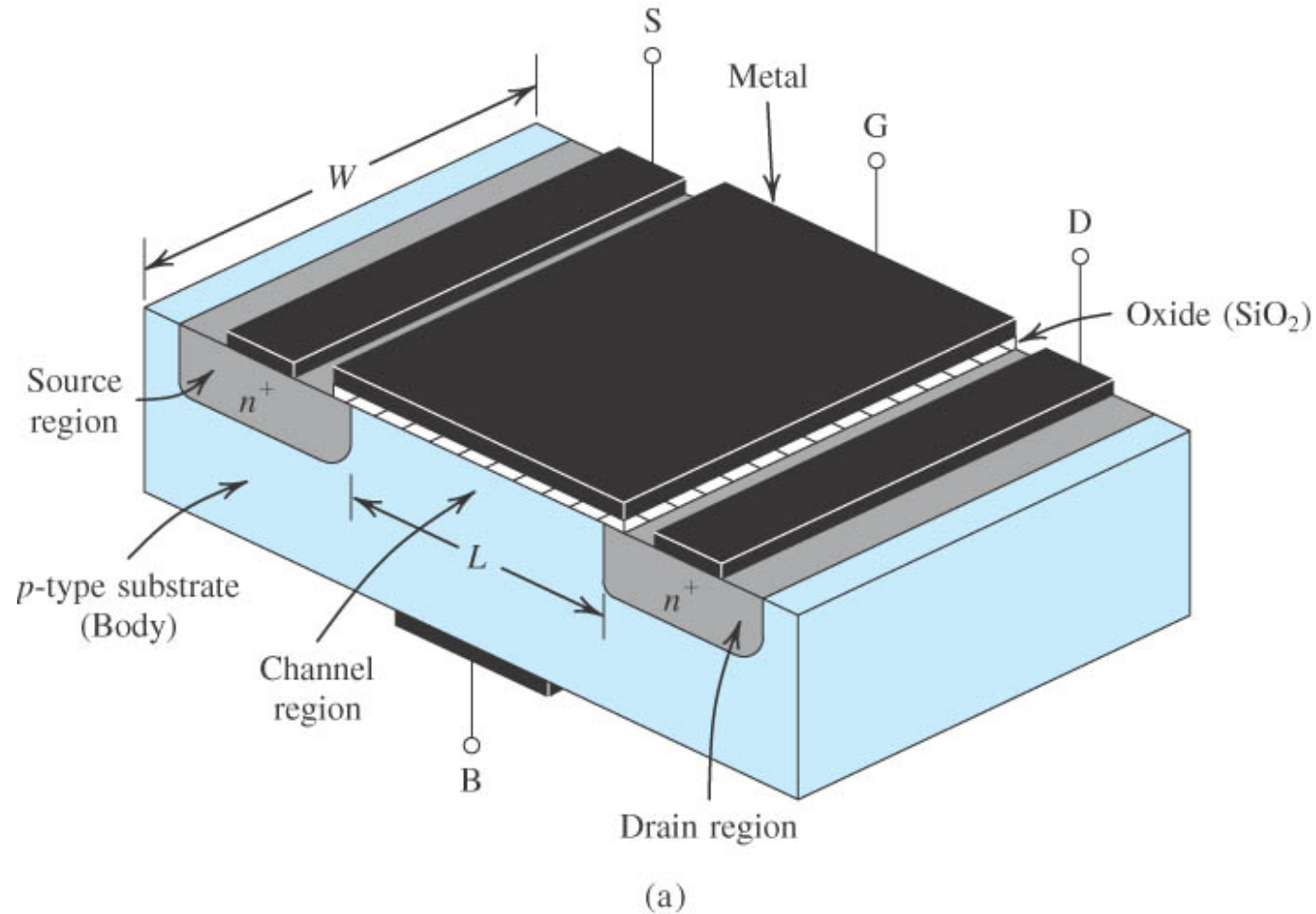
- ▶ En quoi le silicium permet-il plus facilement que d'autres matériaux de réaliser les fonctions d'interrupteurs électroniques des diodes et transistors?
- ▶ le rôle de "vanne électronique" des semi-conducteurs est lié au comportement à deux visages de la jonction
  - ◆ conductrice si polarisée en direct
  - ◆ bloquante si polarisée en inverse
- ▶ la jonction PN est la base de tous les semi-conducteurs

## 6.3

# Transistor MOSFET

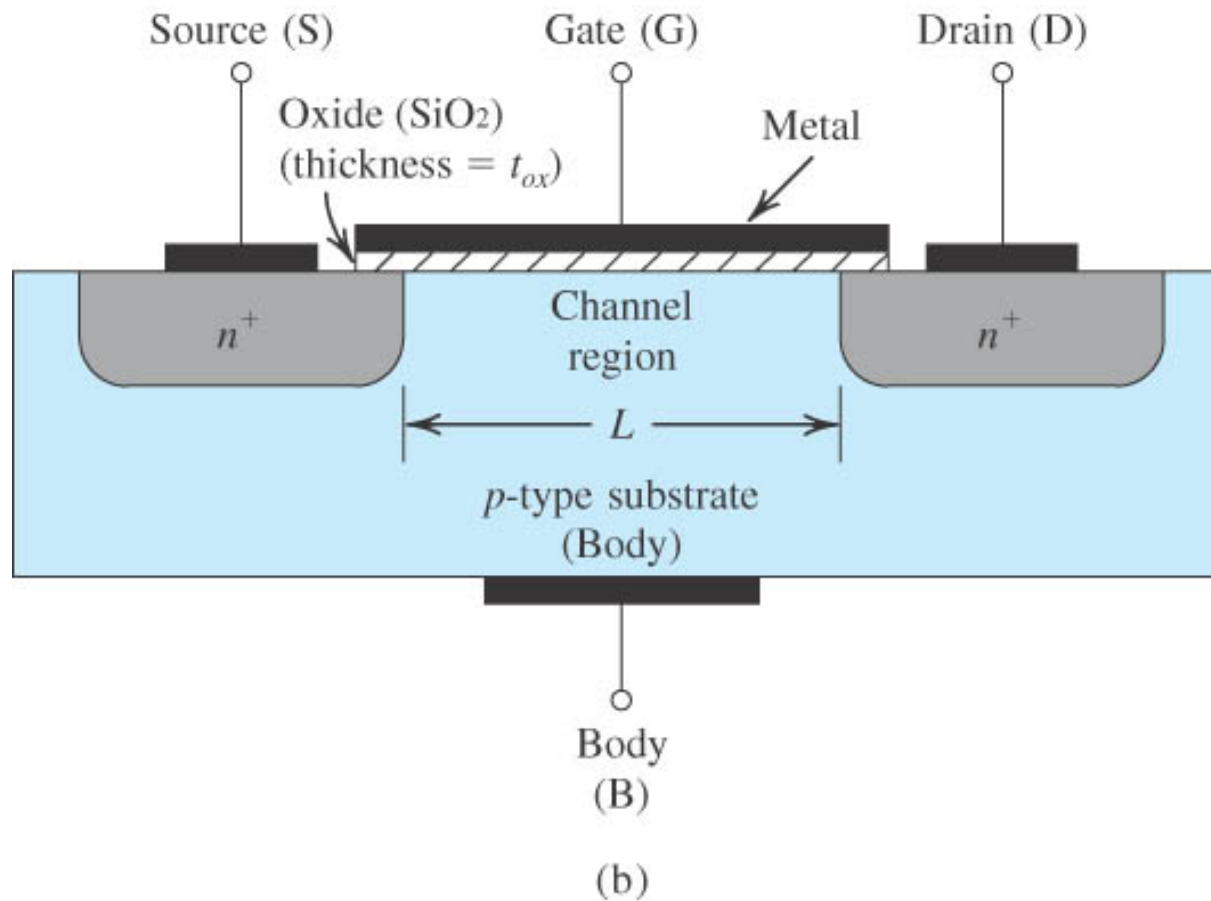


# transistor MOS



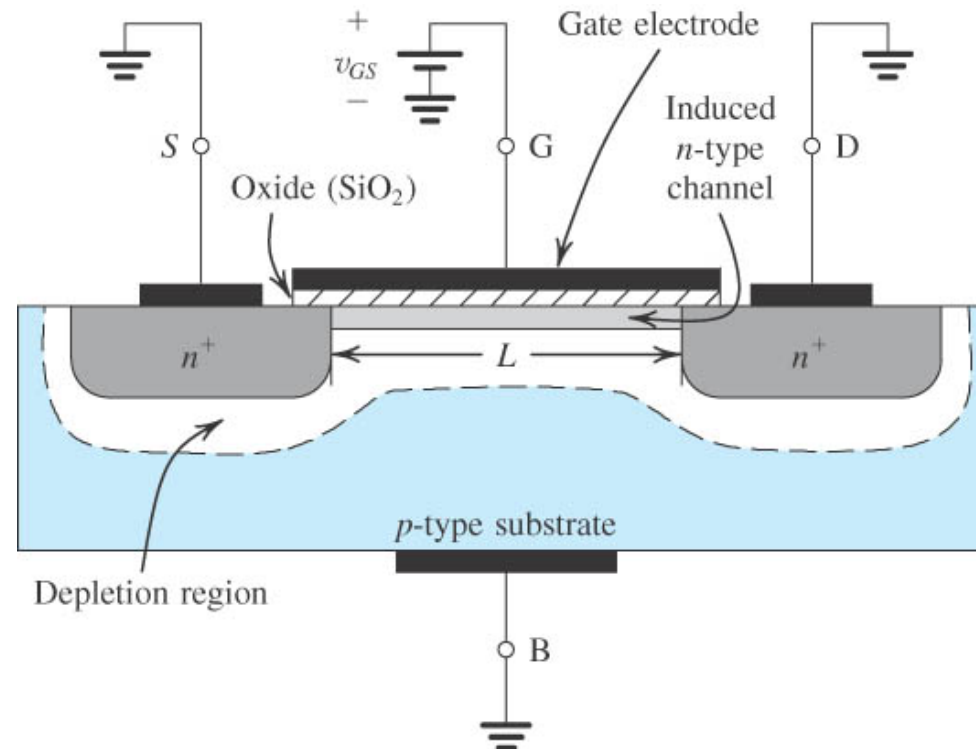
**Figure 4.1** Physical structure of the enhancement-type NMOS transistor: **(a)** perspective view; **(b)** cross-section. Typically  $L = 0.1$  to  $3\ \mu\text{m}$ ,  $W = 0.2$  to  $100\ \mu\text{m}$ , and the thickness of the oxide layer ( $t_{ox}$ ) is in the range of 2 to 50 nm.

# transistor MOS

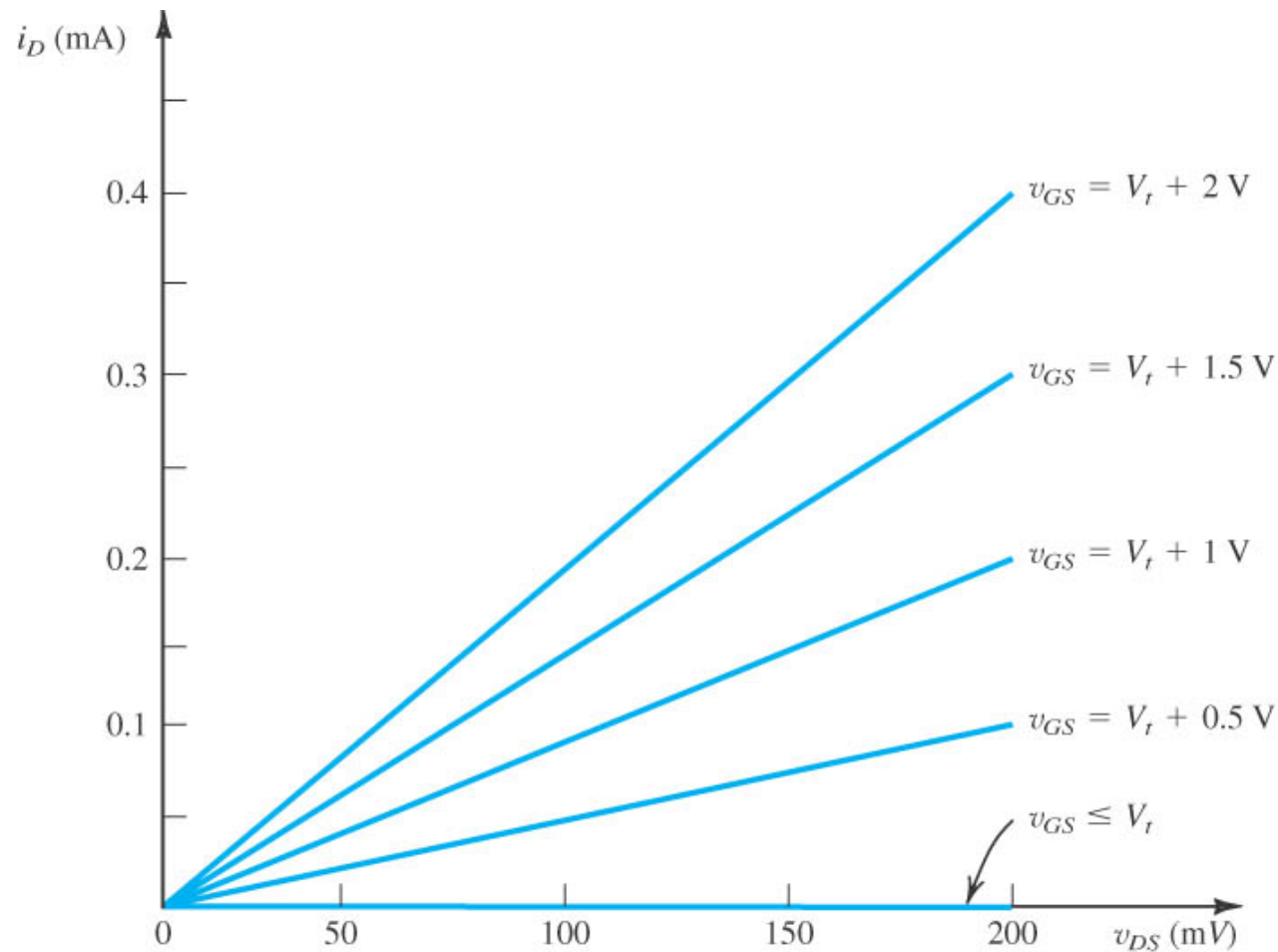


# Etablissement d'un canal

- **overdrive voltage**  $V_{OV} = V_{GS} - V_t$

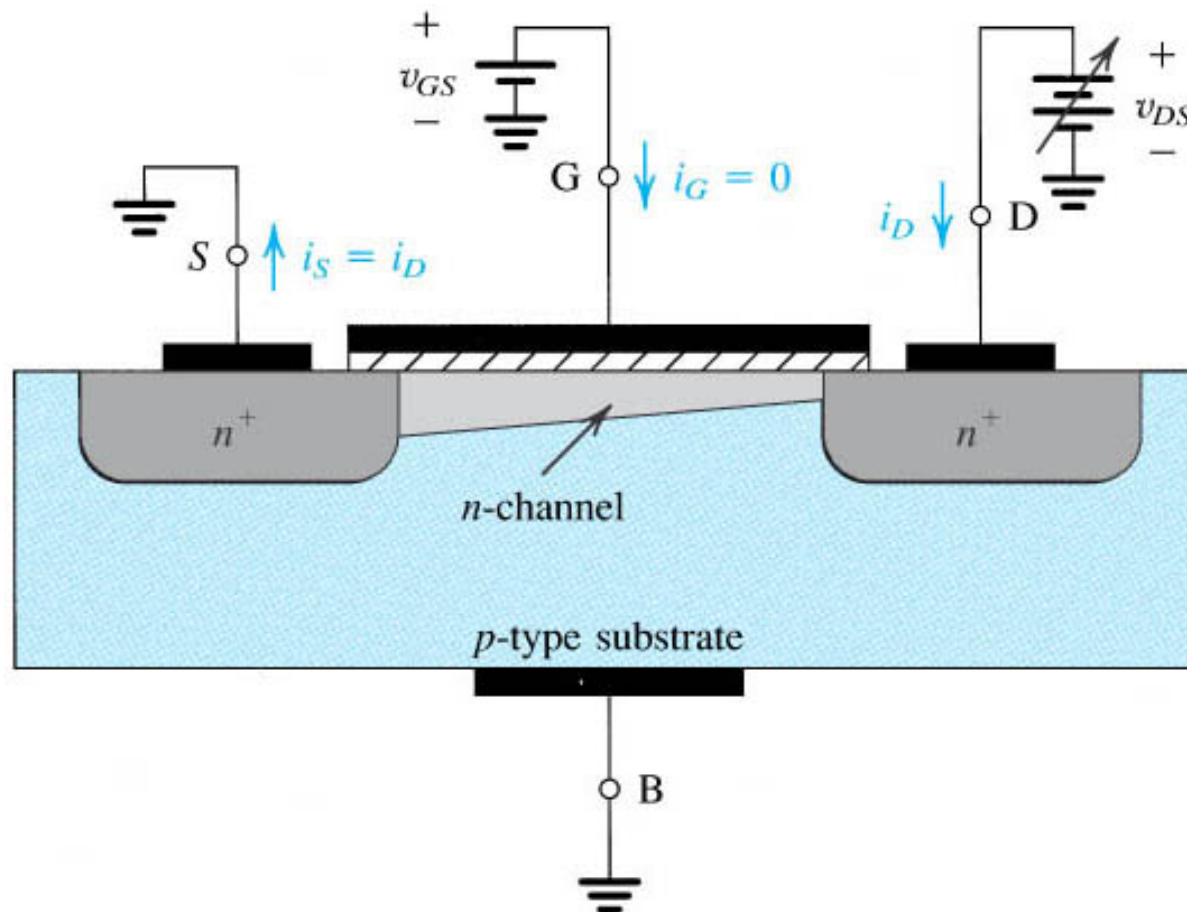


$V_{DS}$  faible: Le canal se comporte comme une "resistance" (contrôlée par  $v_{GS} - V_T$ )



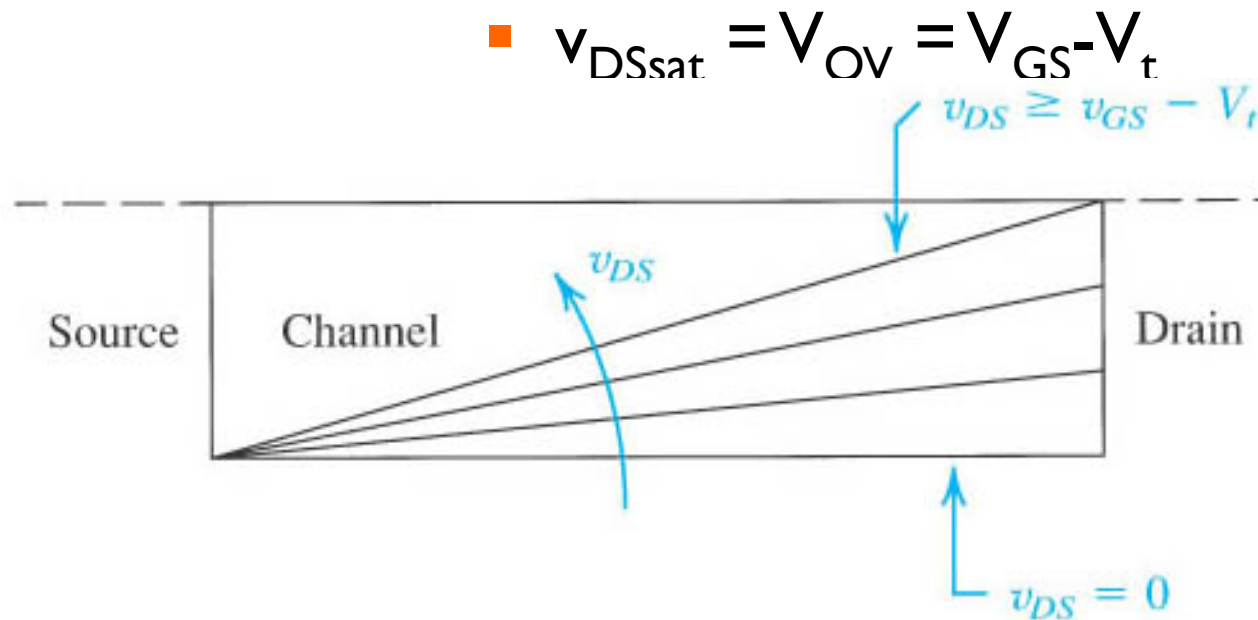
**Figure 4.4** The  $i_D$ - $v_{DS}$  characteristics of the MOSFET in Fig. 4.3 when the voltage applied between drain and source,  $v_{DS}$ , is kept small. The device operates as a linear resistor whose value is controlled by  $v_{GS}$ .

# Valeurs plus élevées de $v_{DS}$ ...



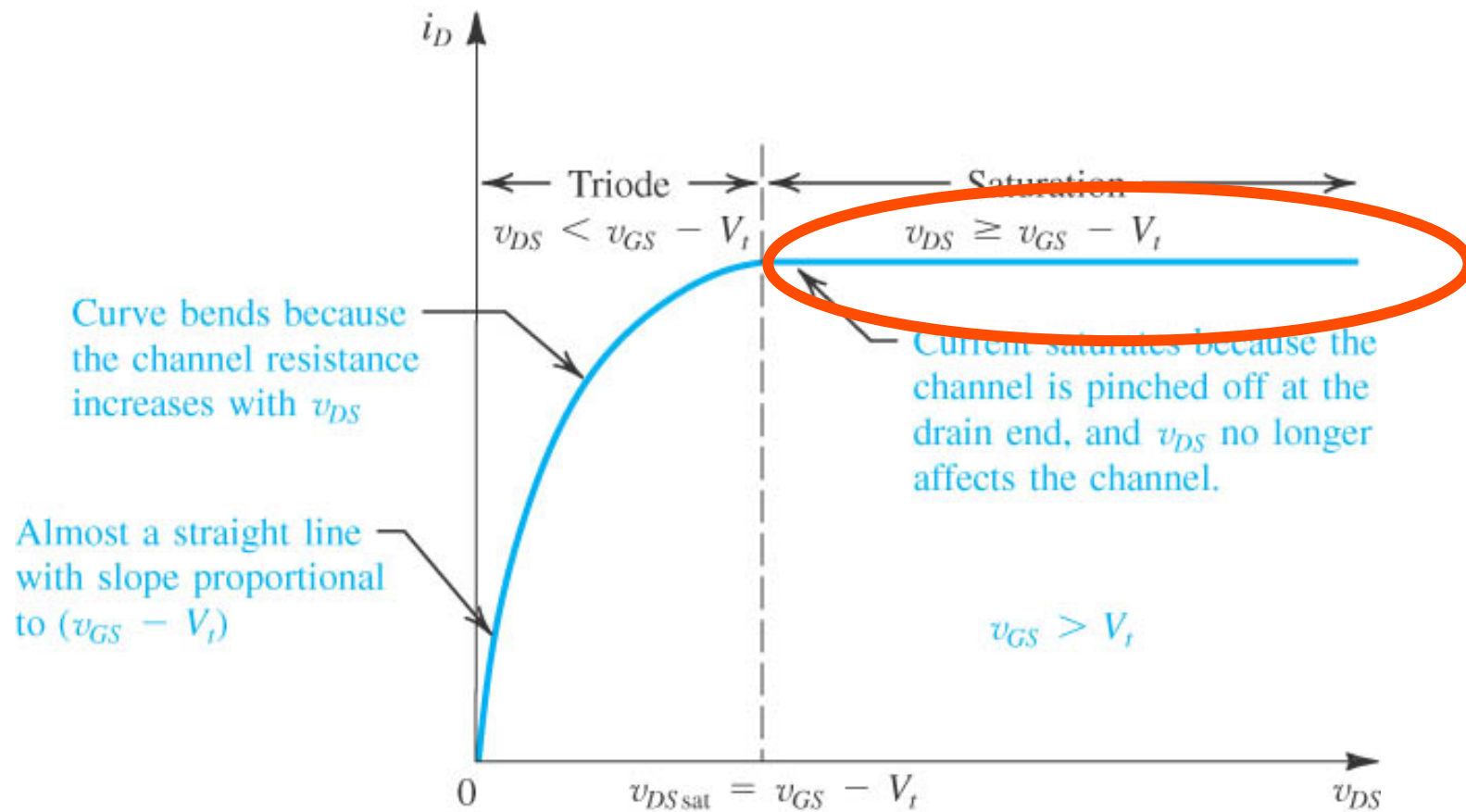
**Figure 4.5** Operation of the enhancement NMOS transistor as  $v_{DS}$  is increased. The induced channel acquires a tapered shape, and its resistance increases as  $v_{DS}$  is increased. Here,  $v_{GS}$  is kept constant at a value  $> V_t$ .

saturation: lorsque  $v_{DS} = v_{OV}$  ( $v_{GD} = 0$ )

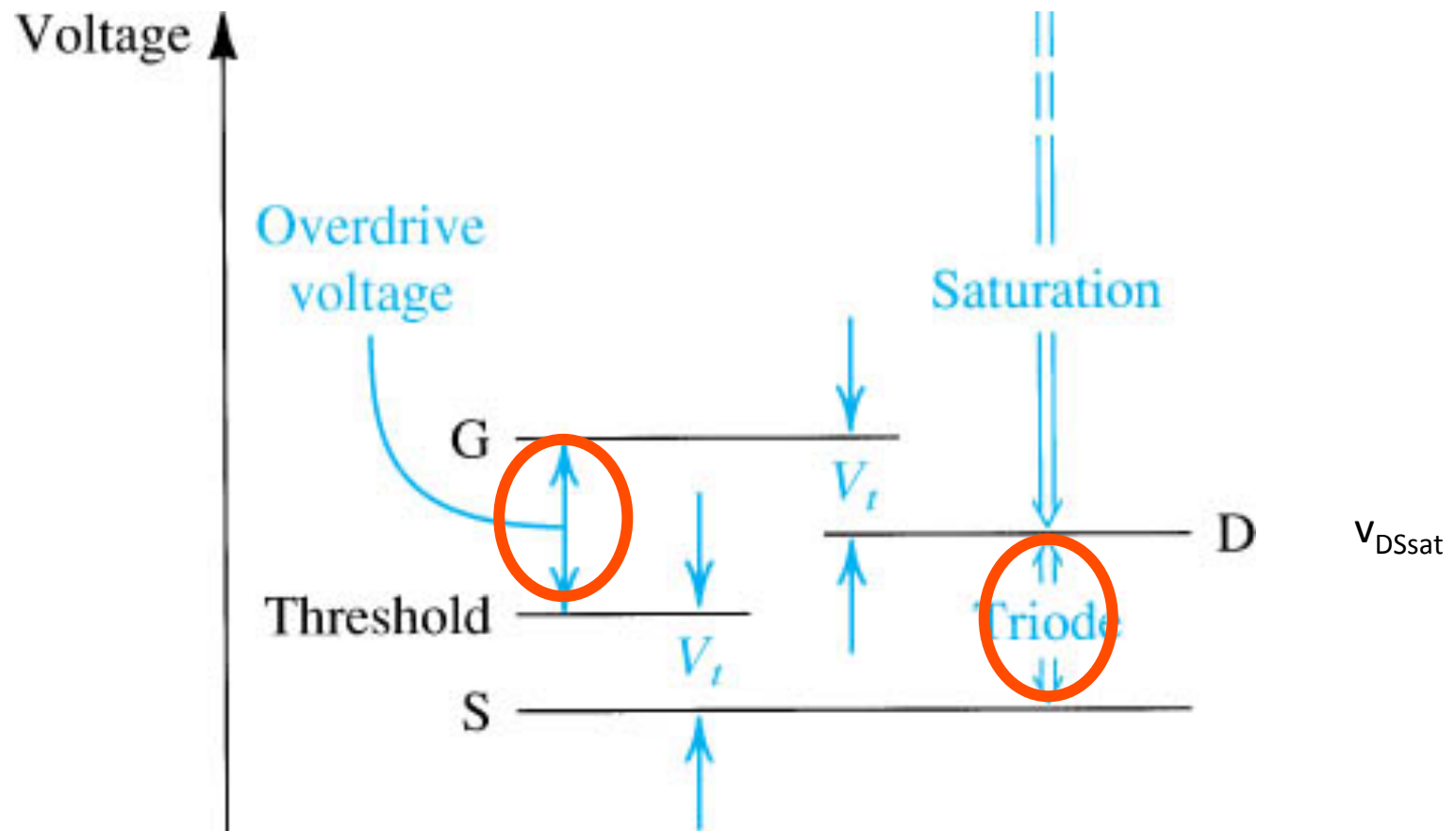


**Figure 4.7** Increasing  $v_{DS}$  causes the channel to acquire a tapered shape. Eventually, as  $v_{DS}$  reaches  $v_{GS} - V_t$  the channel is pinched off at the drain end. Increasing  $v_{DS}$  above  $v_{GS} - V_t$  has little effect (theoretically, no effect) on the channel's shape.

saturation: lorsque  $v_{DS} = v_{OV}$  ( $v_{GD} < V_T$ )



**Figure 4.6** The drain current  $i_D$  versus the drain-to-source voltage  $v_{DS}$  for an enhancement-type NMOS transistor operated with  $v_{GS} > V_t$ .



**Figure 4.14** The relative levels of the terminal voltages of the enhancement NMOS transistor for operation in the triode region and in the saturation region.