

Introduction à l'électronique digitale

Microcontrôleurs

Cours n. 4 Capteurs 2



D. Mari, C. Meinen

Capteurs : Analog vs. Digital

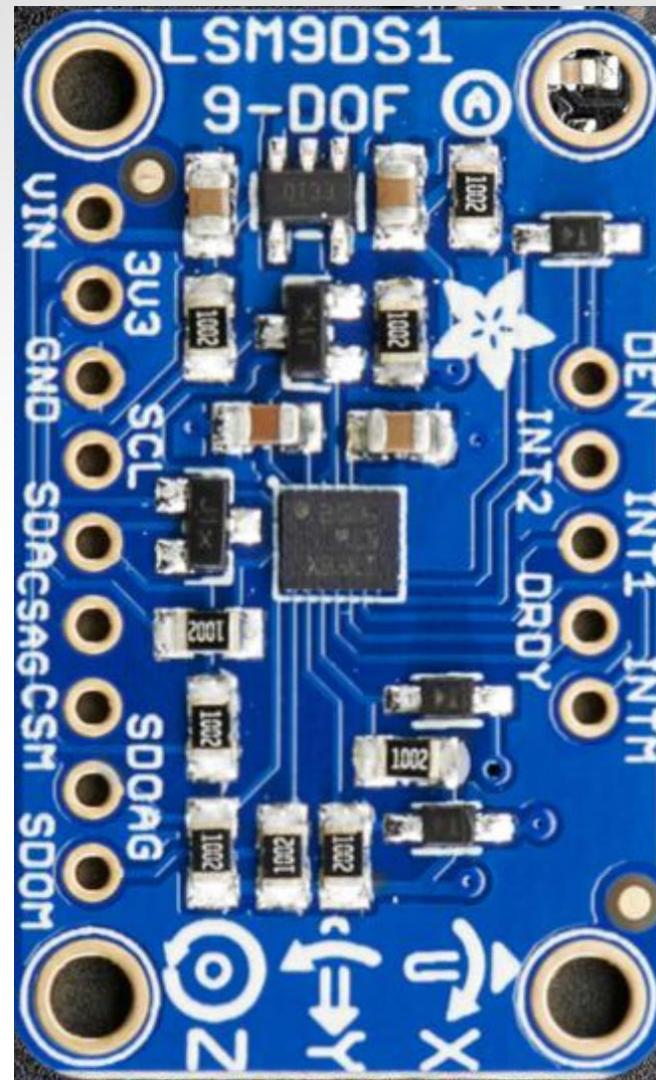
Tous les capteurs sont Analogiques !

Fournissent un signal électrique en réponse à une grandeur physique mesurable

Sensors	Variables
Microphone	Sound Volume
Photodiode	Light intensity
Potentiometer	Voltage
Temp Sensor	Temperature
Flex Sensor (piezoR)	Strain
Accelerometer	Acceleration
Gyroscope	Rotation

Capteurs numériques Adafruit LSM9DS1

- Accéléromètre 3 axes
- Gyroscope 3 axes
- Magnétomètre 3 axes
- Capteur de température



Magnétomètre: fonctionnement

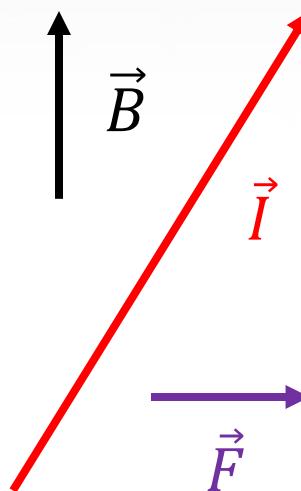
Différents effets physiques peuvent être utilisés pour la mesure de champs magnétiques: effet Hall, magnétorésistance géante par exemple.

Les capteurs intégrés utilisent la technologie MEMS

Rappel: force de Lorentz

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$$

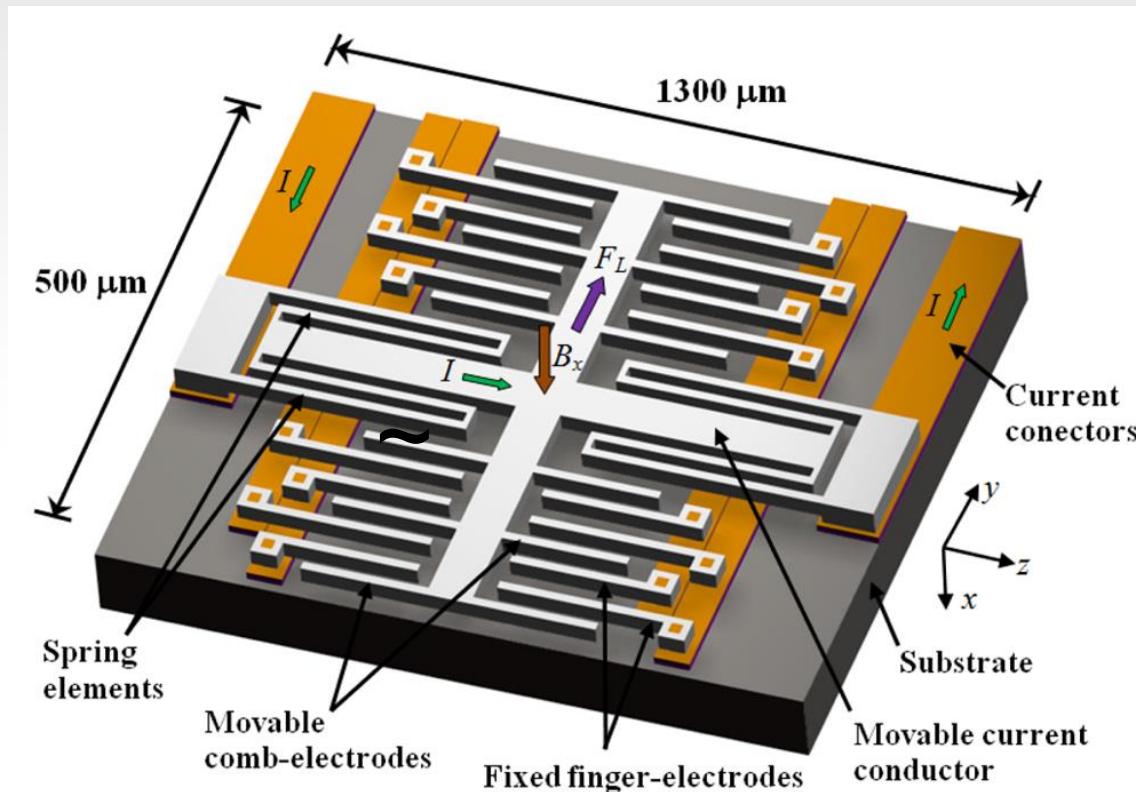
$$\vec{F} = L \cdot \vec{I} \wedge \vec{B}$$



Magnétomètre: fonctionnement

On fait passer un courant AC dans un conducteur

Le système va osciller si un champ magnétique externe est présent

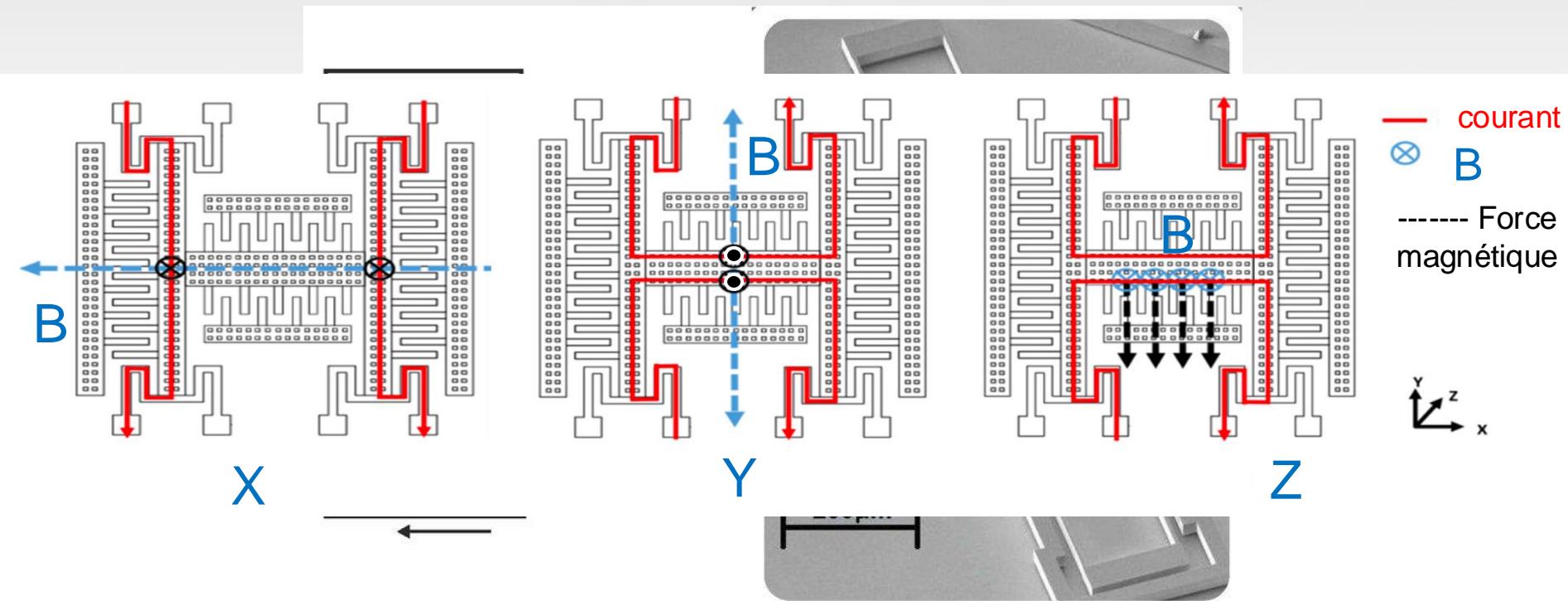


On détecte le signal et son amplitude par les électrodes qui forment des condensateurs

Magnétomètre: fonctionnement

On fait passer un courant AC dans un conducteur

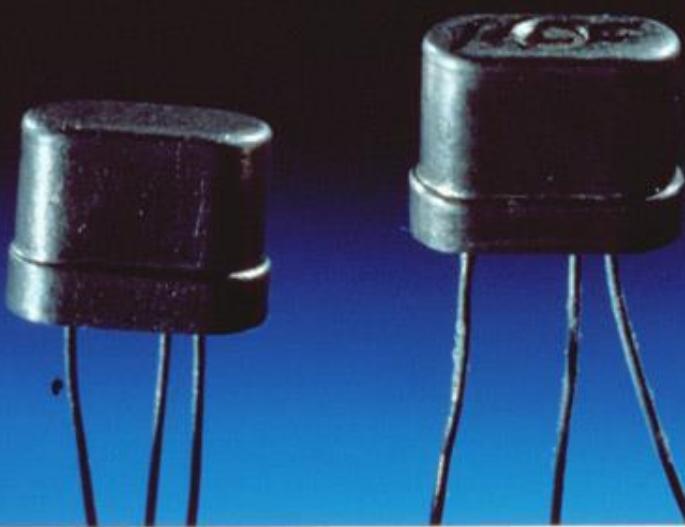
Le système va osciller si un champ magnétique externe est présent



Les variations des capacités (basse fréquence) vont moduler en amplitude un signal AC haute fréquence

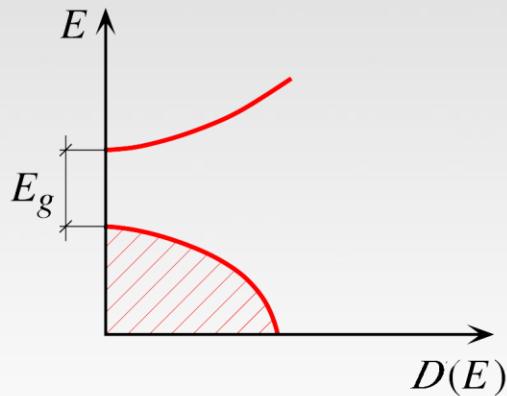
Semi-conducteurs

FIRST SILICON TRANSISTOR



Matériaux semi-conducteurs

Isolants à T=0



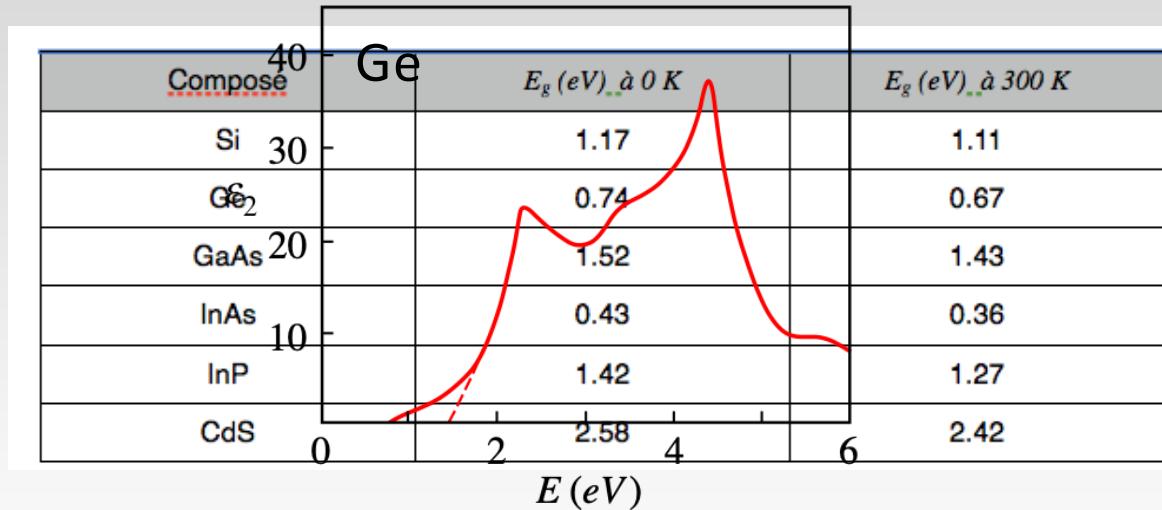
$$\rho(T) = (10^{-2} - 10^9) \Omega \cdot \text{cm}$$

dépend de la température

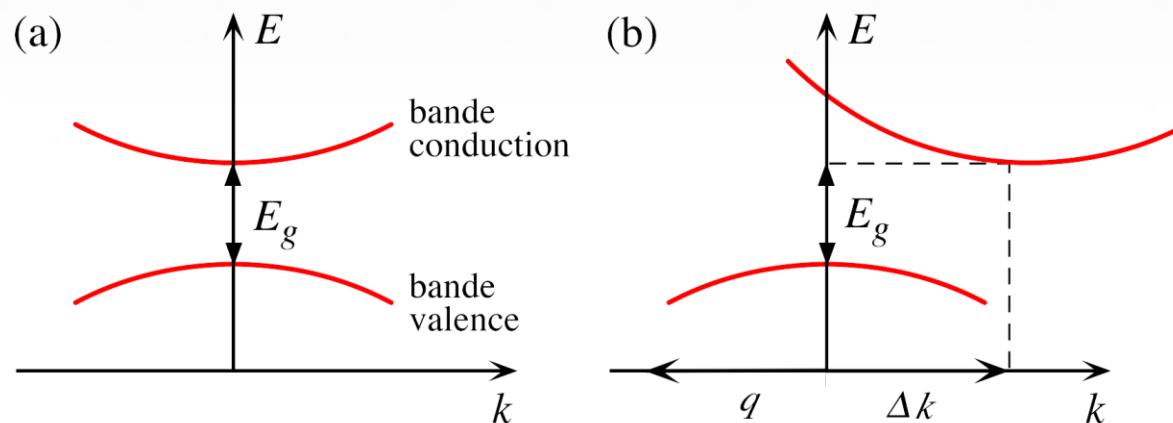
Semi-conducteur intrinsèques VIIIA

		IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	He
IB	IIB	B 10.811	C 12.011	N 14.007	O 15.999	F 18.998	Ne 20.183
29	30	Al 26.982	Si 28.086	P 30.974	S 32.064	Cl 35.453	Ar 39.948
Cu 63.54	Zn 65.37	Ga 69.72	Ge 72.59	As 74.922	Se 78.96	Br 79.909	Kr 83.80
Ag 107.870	Cd 112.40	In 114.82	Sn 118.69	Sb 121.75	Te 127.60	I 126.904	Xe 131.30
Au 196.967	Hg 200.59	Tl 204.37	Pb 207.19	Bi 208.980	Po (210)	At (210)	Rn (222)

Matériaux semi-conducteurs



$$\frac{E_g}{k_B T}$$

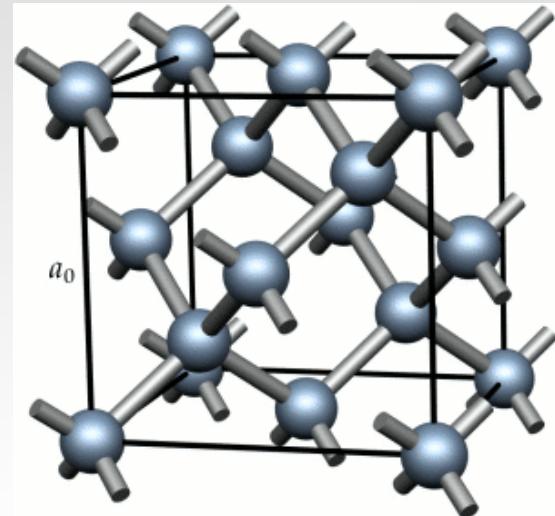


$$\hbar\omega_p = E_g k_p \simeq 0 = \Delta k + q\hbar\omega_p = E_g + \hbar\Omega$$

Semi-conducteurs classiques : Si et Ge

A periodic table highlighting groups IIIA, IVA, VA, VIA, VIIA, and group VIII A. The elements shown are Boron (B), Carbon (C), Nitrogen (N), Oxygen (O), Fluorine (F), Helium (He), Silicon (Si), Phosphorus (P), Sulfur (S), Chlorine (Cl), Argon (Ar), Gallium (Ga), Germanium (Ge), Arsenic (As), Selenium (Se), Bromine (Br), Krypton (Kr), Indium (In), Tin (Sn), Antimony (Sb), Tellurium (Te), Iodine (I), Xenon (Xe), Gold (Au), Mercury (Hg), Thallium (Tl), Lead (Pb), Bismuth (Bi), Polonium (Po), Astatine (At), and Radium (Rn). Atoms are represented by yellow spheres, and bonds by grey lines.

VIIIA							
IIIA		IVA		VA		VIA	
		5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 He 4.003
IB	IIB	13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.064	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
29 Cu 63.54	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.909	36 Kr 83.80
47 Ag 107.870	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.30
79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.19	83 Bi 208.980	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn (222)

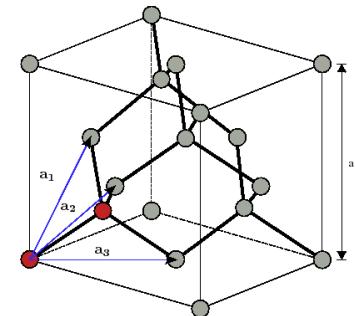


4 liaisons sp^3

8N électrons \longrightarrow 4 bandes

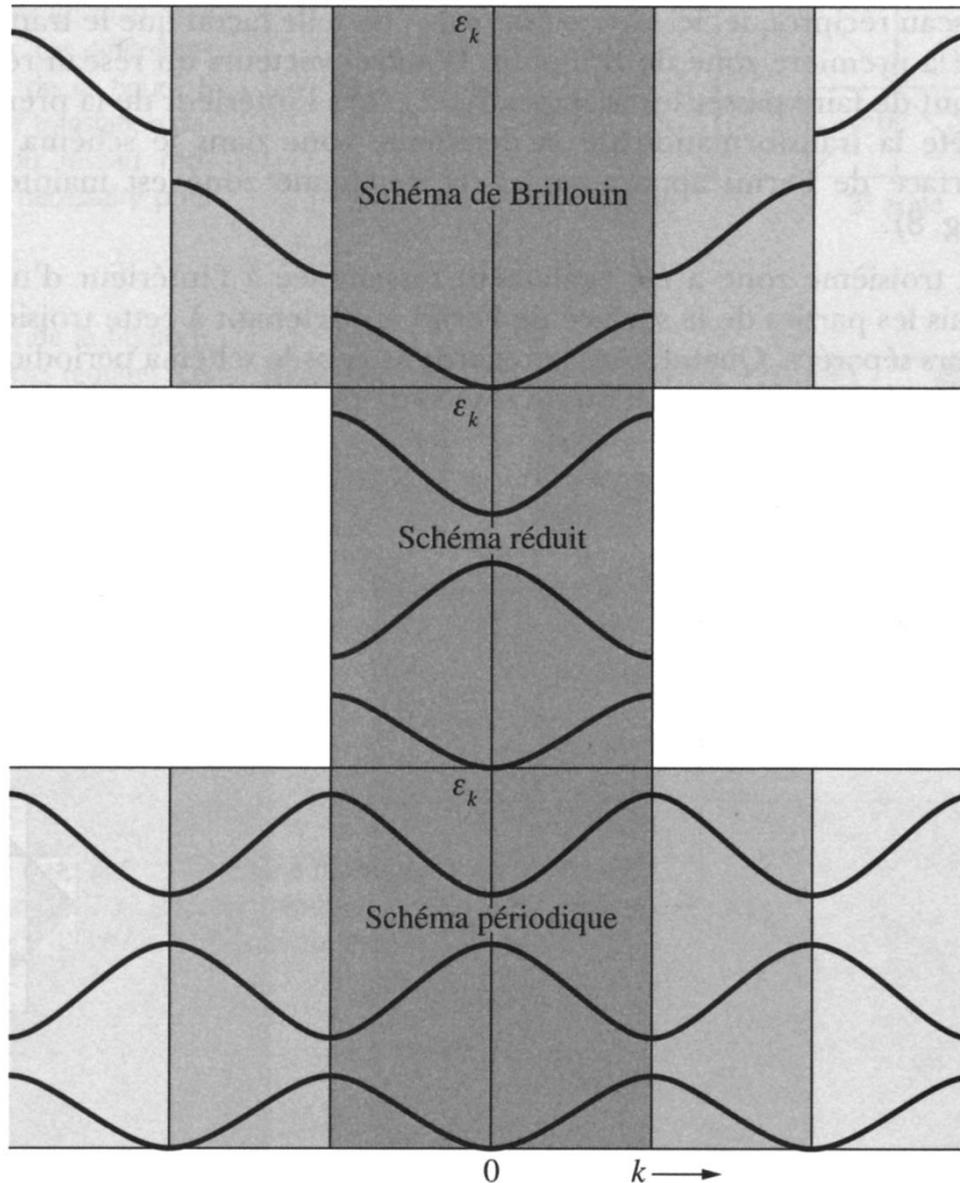
nombre de porteurs de charge

$$n \sim \exp(-E_g/k_B T) p \sim \exp(-E_g/k_B T)$$

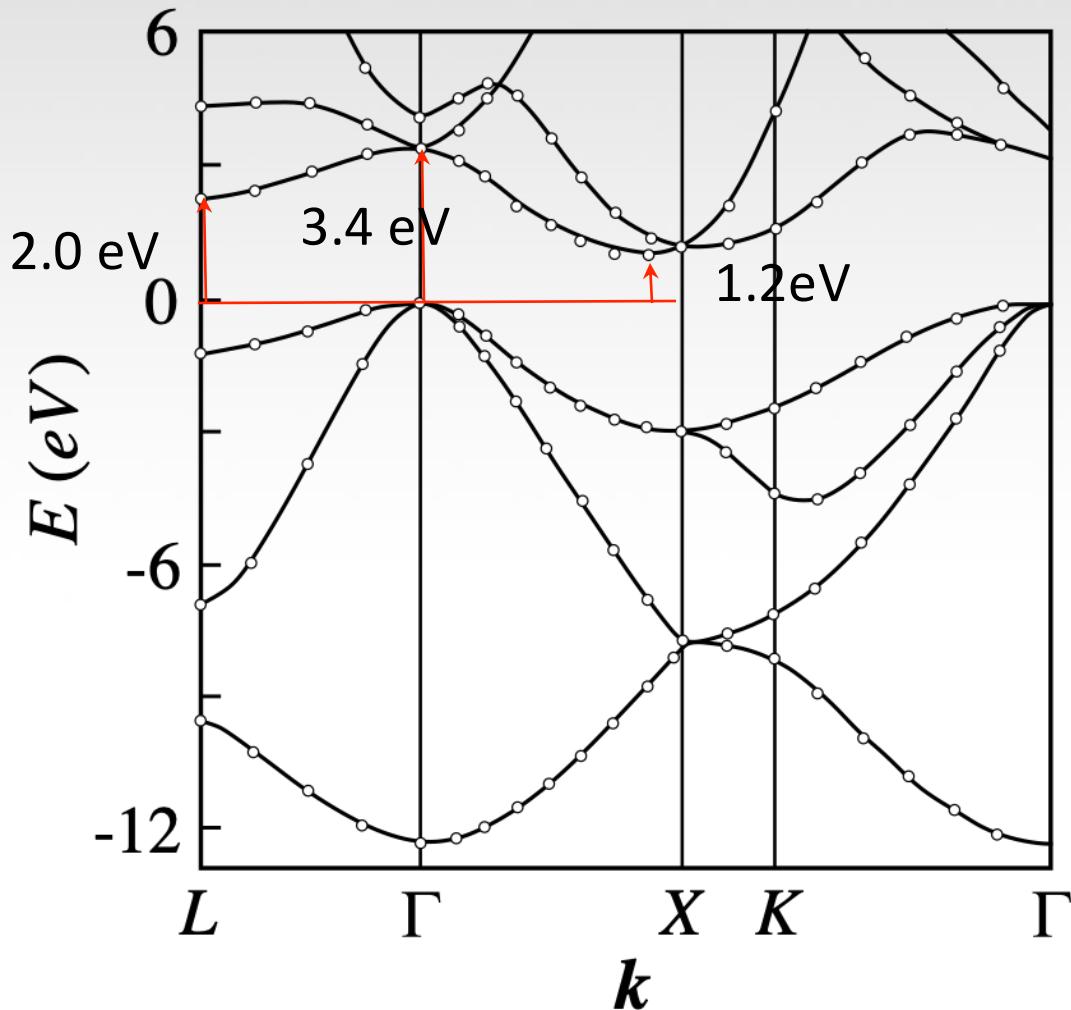


Dans Si à 300 K $np \approx 210^{19} \text{ cm}^{-3}$ dans Ge $np \approx 310^{26} \text{ cm}^{-3}$

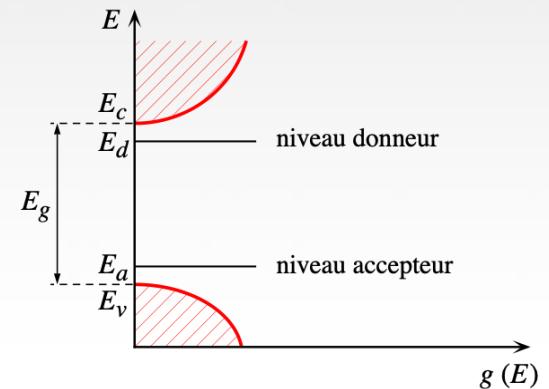
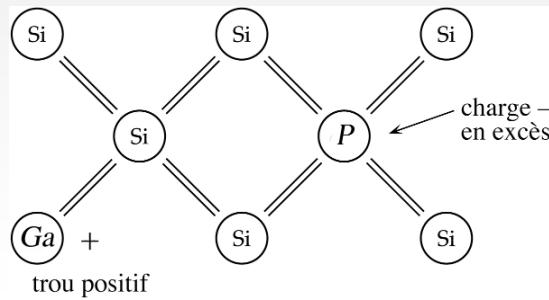
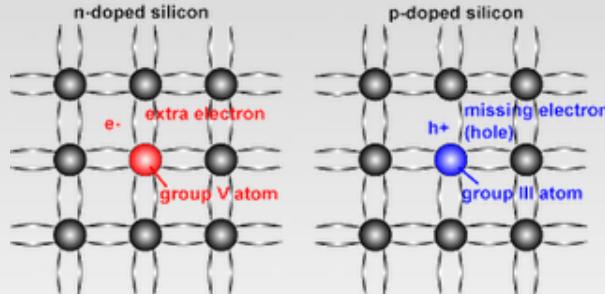
Structure de bandes



Structure de bandes du silicium



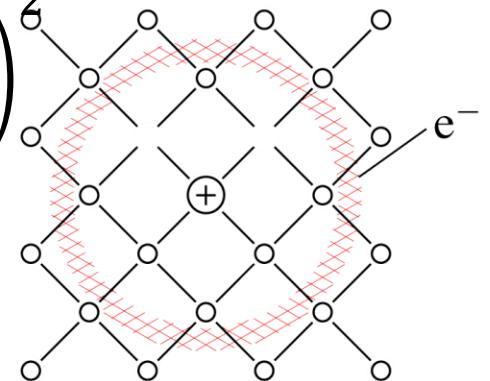
dopage



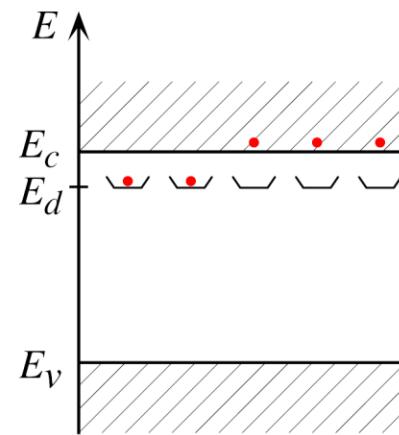
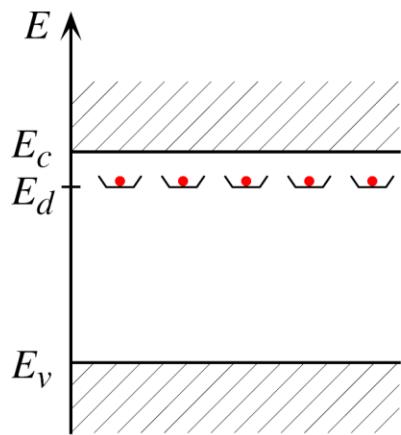
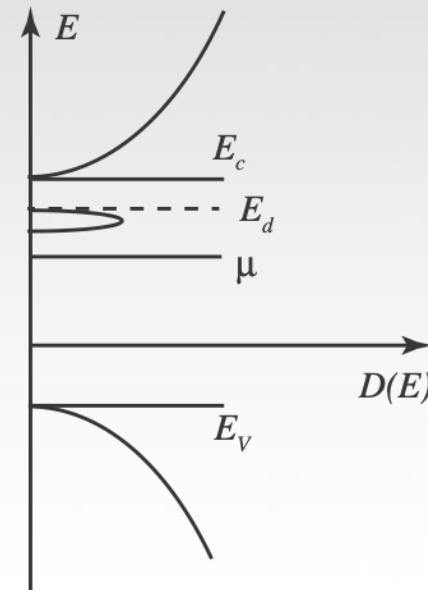
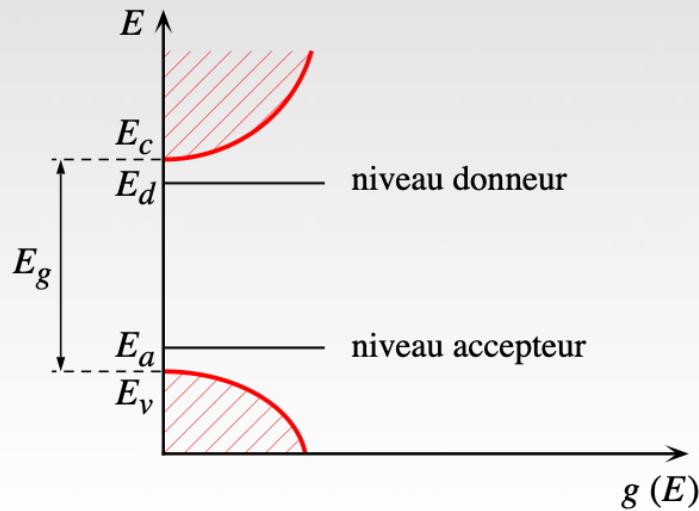
$$a_0 = \frac{(4\pi\epsilon_0)\hbar^2}{e^2 m_{el}} = 5.29 \cdot 10^{-11} m E_d = \frac{m_e}{2\hbar^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \right)^2$$

Rayon de Bohr * $\epsilon m_{el}/m_e$

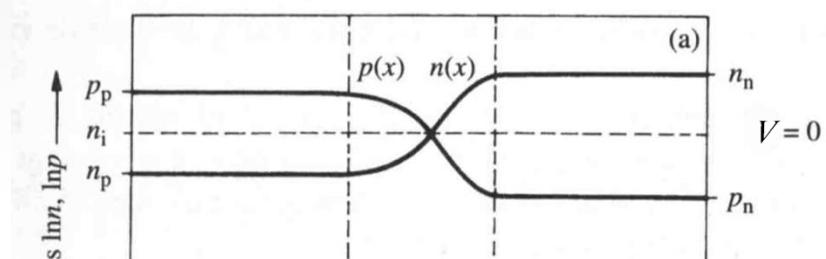
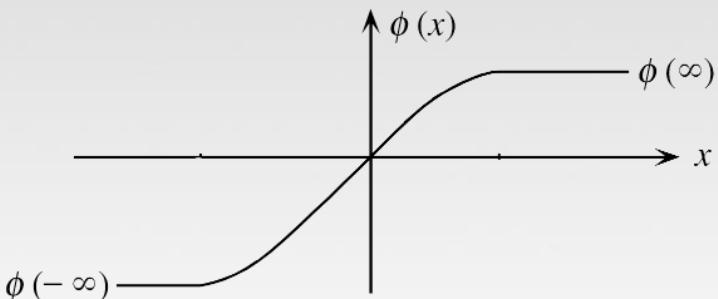
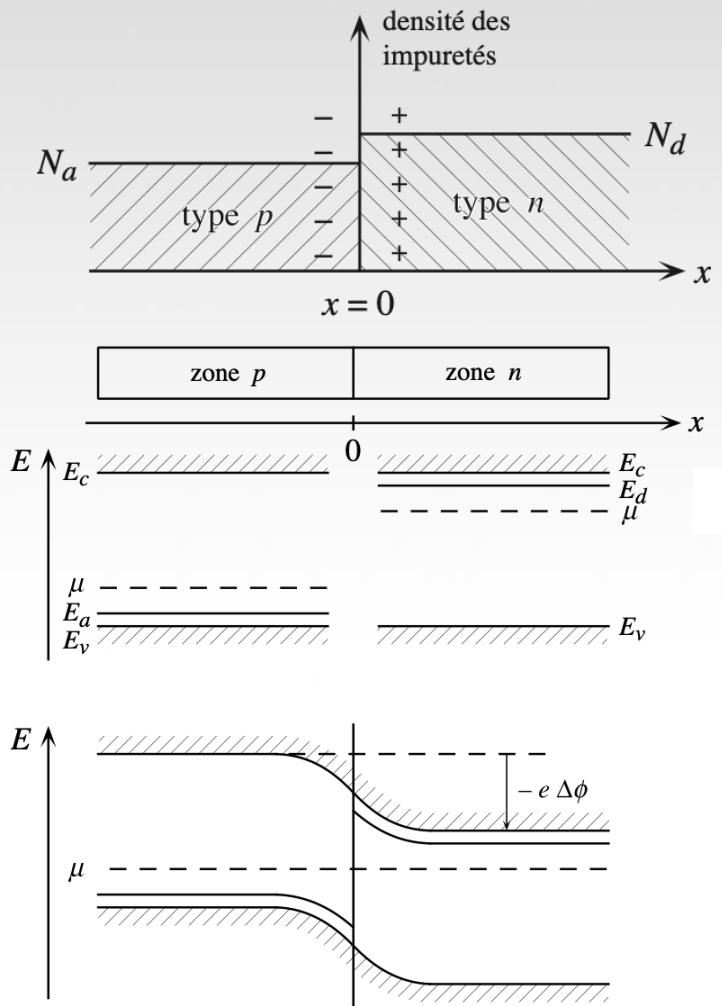
Typiquement $\sim 100^*$



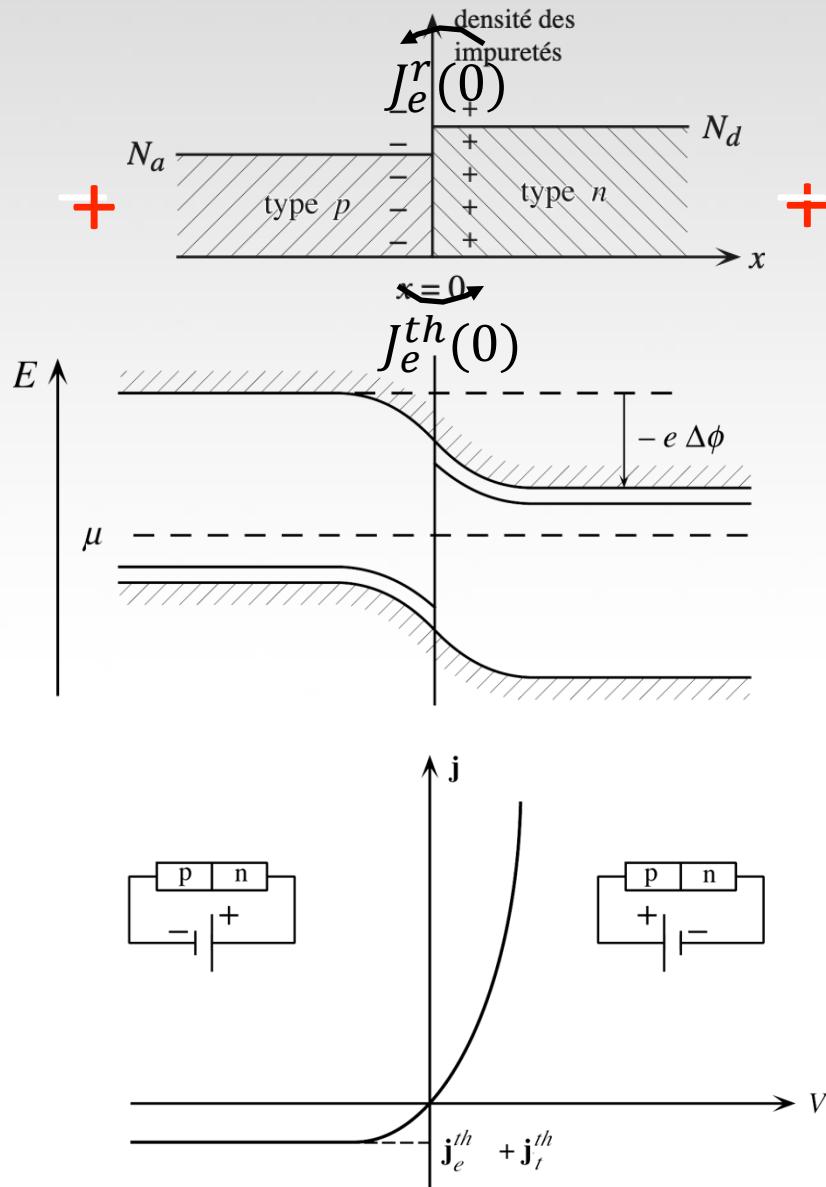
Bandes d'impuretés



Jonction p-n



Jonction p-n polarisée



$$V=0$$

$$J_e^{th}(0) + J_e^r(0) = 0$$

Polarisation inverse

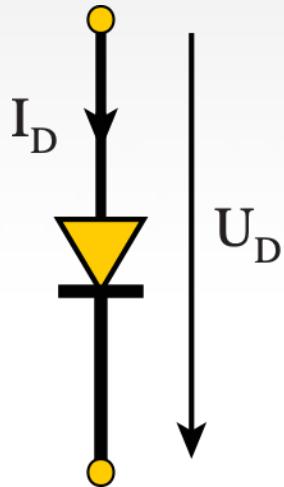
Polarisation directe

$$J = -(J_e^{th}(0) + J_t^{th}(0)) \exp[(eV/k_B T) - 1]$$

$$J = J_s \exp[(eV/k_B T) - 1]$$

Effet de la température sur les jonctions semi-conductrices

Les *jonctions semi-conductrices pn* que l'on trouve dans les diodes et les transistors présentent plusieurs effets que l'on peut utiliser pour réaliser des **capteurs** (effets thermiques, photovoltaïques, magnétiques, etc..) .

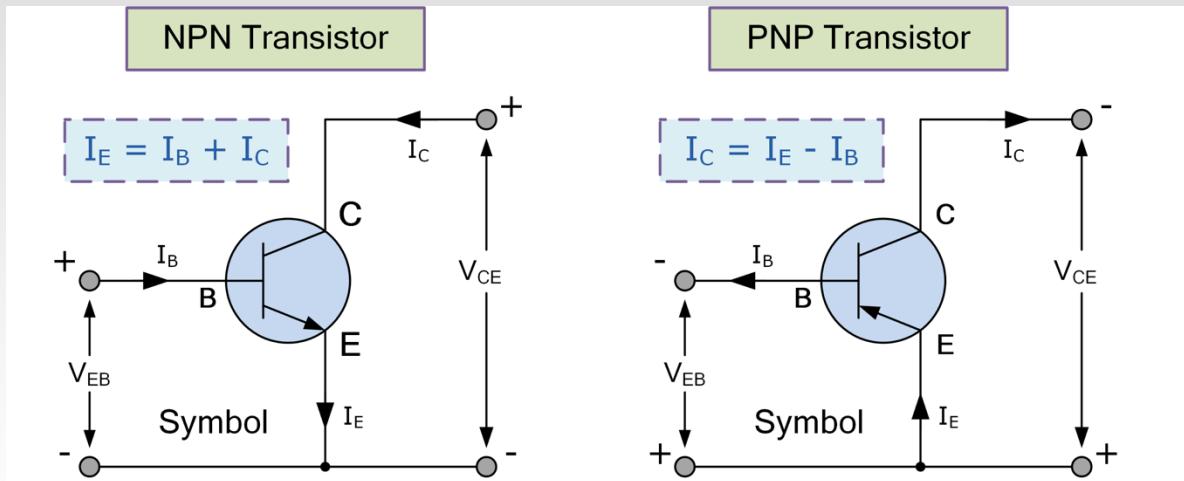


$$I_D = I_{s0} \left(e^{\frac{eU_D}{kT}} - 1 \right)$$

$$U_D = \frac{k}{e} \ln \left(\frac{I_0}{I_{s0}} + 1 \right) T$$

Effet de la température sur les jonctions semi-conductrices

Dans le cas présent on utilise plutôt un transistor bipolaire



L'équation complète régissant la tension base-emetteur V_{BE} et le courant collecteur I_C est donnée par :

$$V_{BE} = V_{G0} \left(1 - \frac{T}{T_0} \right) + V_{BE0} \left(\frac{T}{T_0} \right) + \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left(\frac{T_0}{T} \right) + \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{I_C}{I_{C0}} \right)$$

Silicon bandgap sensor

Afin de simplifier les influences des paramètres fixes du transistor on utilise un montage différentiel dont l'équation est :

$$\Delta U_{BE} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{C1}}{I_{C2}} \right)$$

