

Introduction à l'électronique digitale

Microcontrôleurs

Cours n. 4 Capteurs 2



Section de Physique

D. Mari, C. Meinen

Capteurs : Analog vs. Digital

Tous les capteurs sont Analogiques !

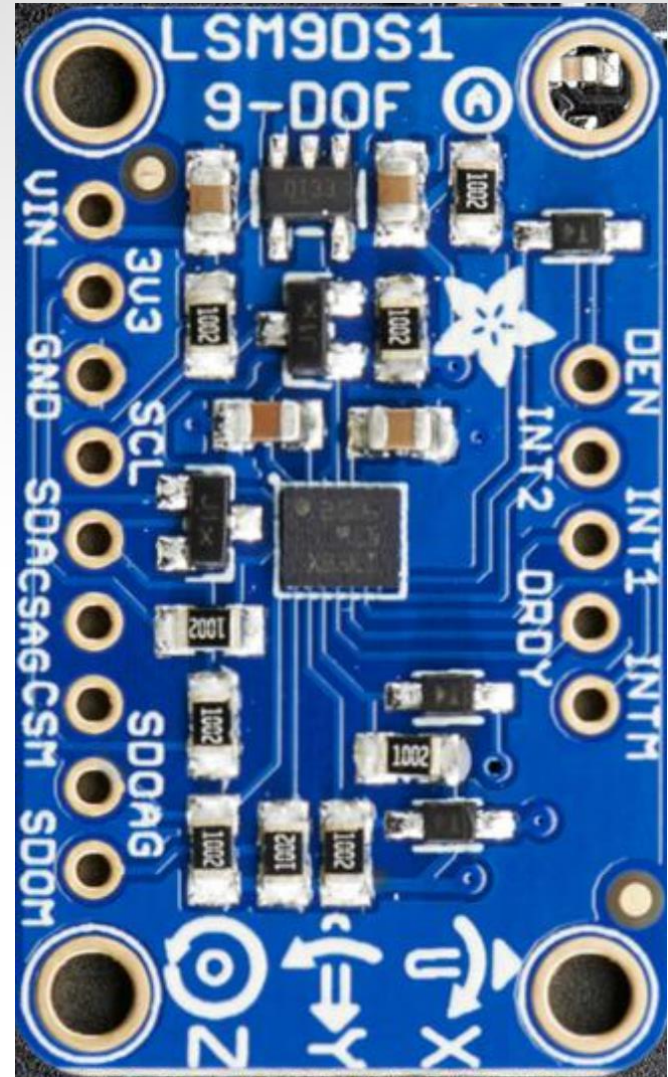
Fournissent un signal électrique en réponse à une grandeur physique mesurable

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

Capteurs digitaux

Adafruit LSM9DS1

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



Magnétomètre: fonctionnement

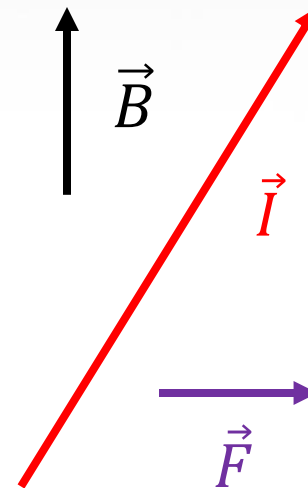
Différents effets physiques peuvent être utilisés pour la mesure e champs magnétiques: effet Hall, magnétorésistance géante par exemple.

Les capteurs intégrés utilisent la technologie MEMS

Rappel: force de Lorentz

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

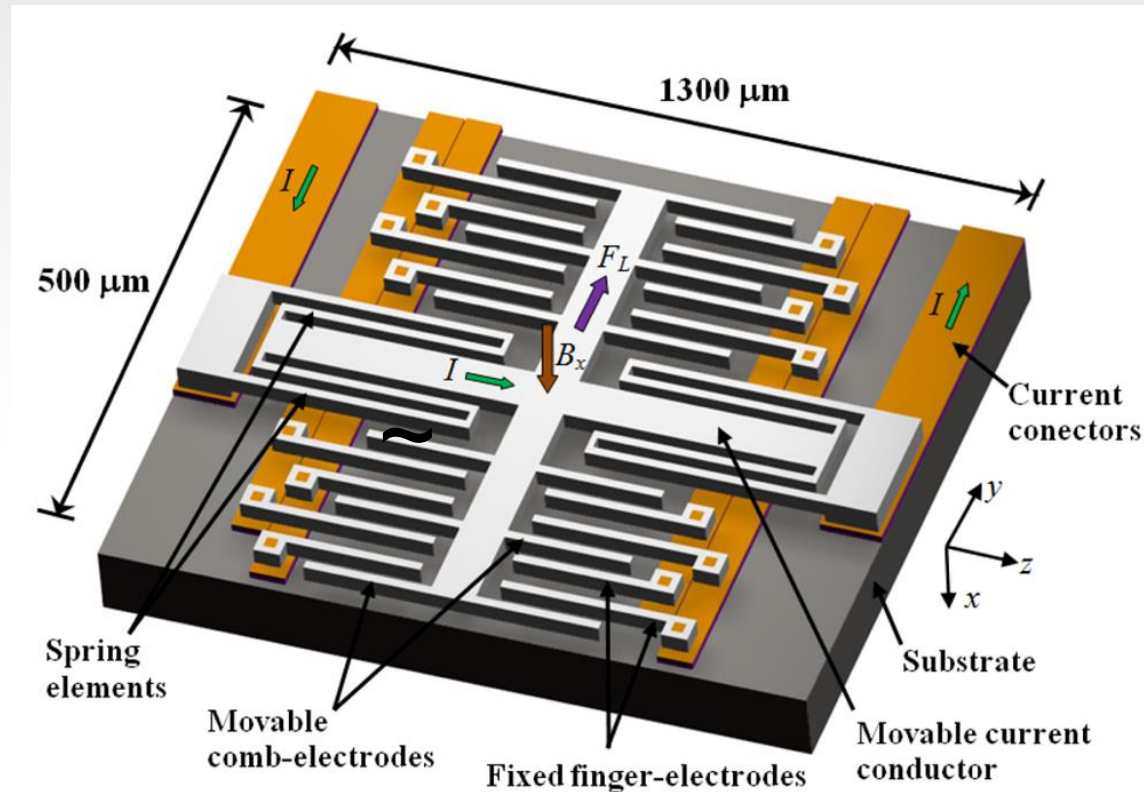
$$\vec{F} = L \cdot \vec{I} \wedge \vec{B}$$



Magnétomètre: fonctionnement

On fait passer un courant AC dans un conducteur

Le système va osciller si un champ magnétique externe est présent

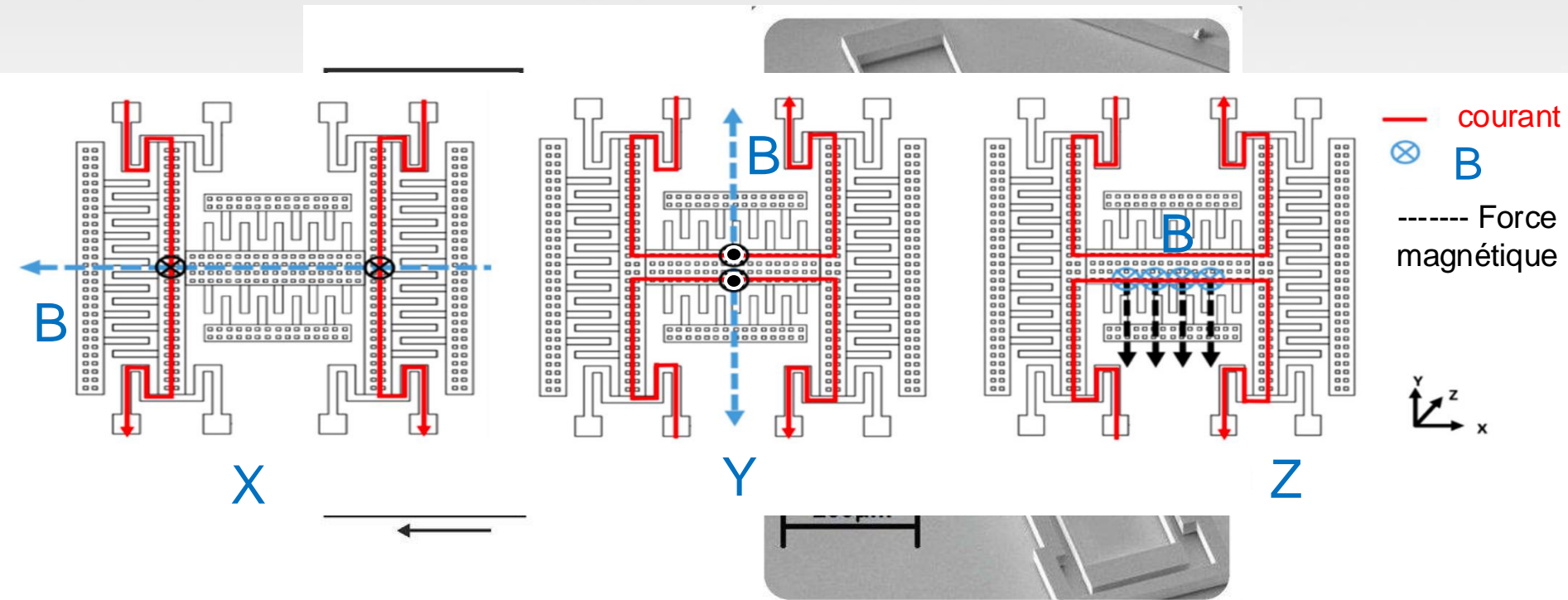


On detecte le signal et son amplitude par les électrodes qui forment des condensateurs

Magnétomètre: fonctionnement

On fait passer un courant AC dans un conducteur

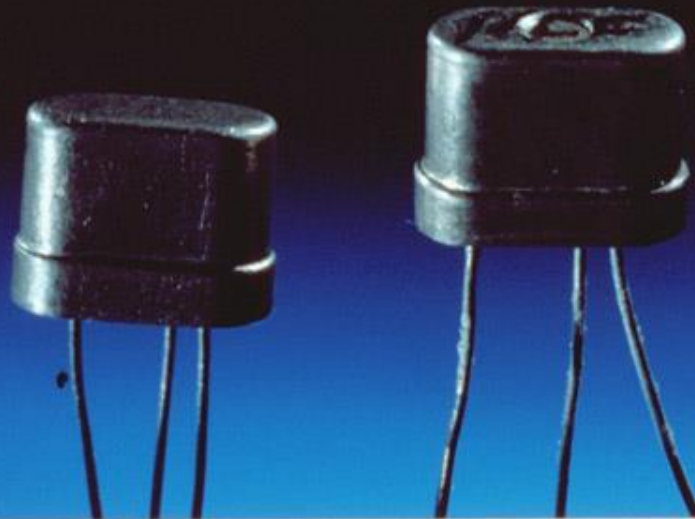
Le système va osciller si un champ magnétique externe est présent



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

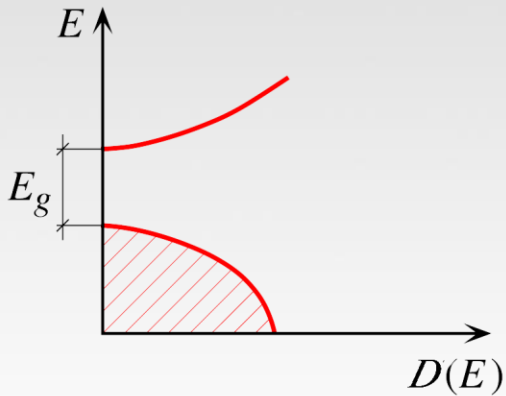
Semi-conducteurs

FIRST SILICON TRANSISTOR



Matériaux semi-conducteurs

Isolants a $T=0$

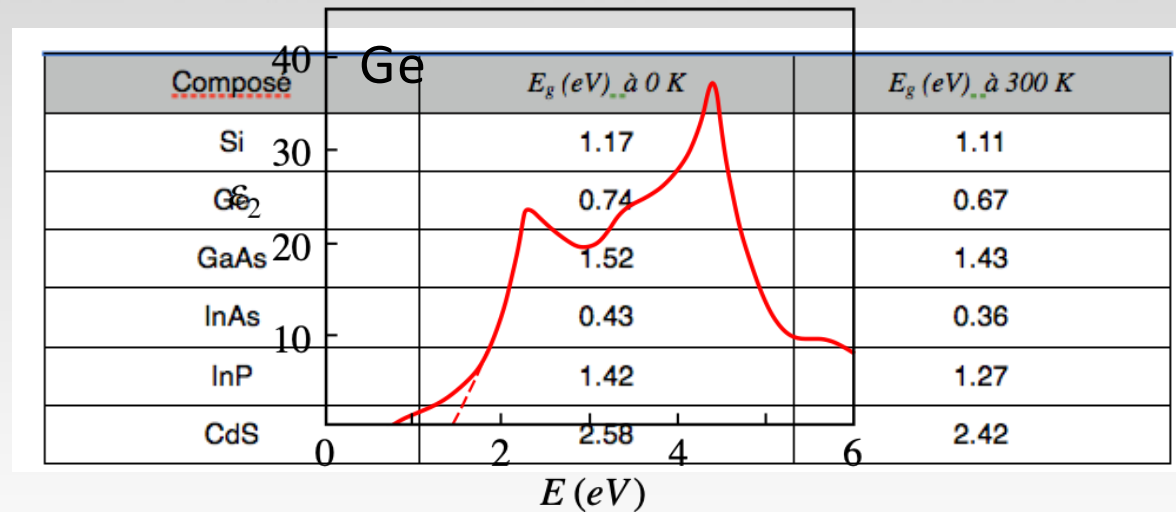


$\rho(T) = (10^{-2} - 10^9) \Omega \cdot \text{cm}$
dépend de la température

Semi-conducteur intrinsèques

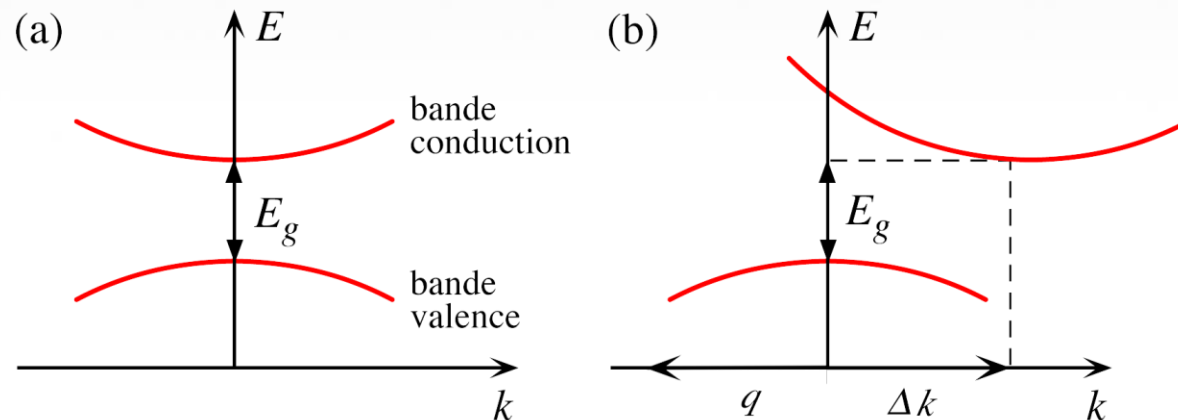
		IIIA		IVA		VA		VIA		VIIA		2 He 4.003
		5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.183					
		13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.064	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948					
IB	IIB	29 Cu 63.54	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.909	36 Kr 83.80			
		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)			

Matériaux semi-conducteurs



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

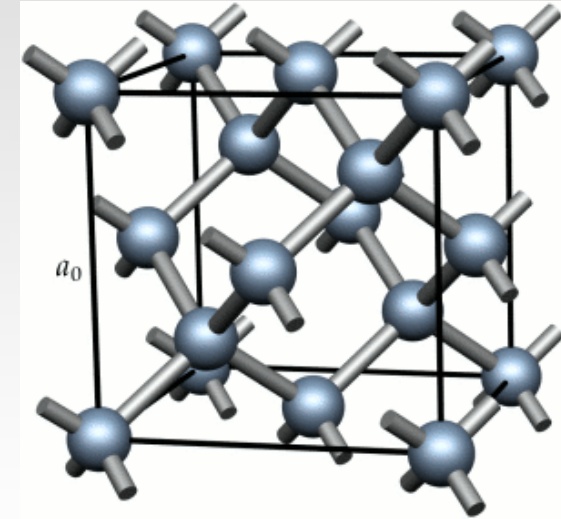
Absorption d'un photon



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

Semi-conducteurs classiques : Si et Ge

																VIIIA
																2
																He
																4.003
				IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA								10
				5	6	7	8	9								Ne
				B	C	N	O	F								20.183
				10.811	12.011	14.007	15.999	18.998								
		IB	IIB	13	14	15	16	17	18							
				Al	Si	P	S	Cl	Ar							
				26.982	28.086	30.974	32.064	35.453	39.948							
29	30			31	32	33	34	35	36							
Cu	Zn			Ga	Ge	As	Se	Br	Kr							
63.54	65.37			69.72	72.59	74.922	78.96	79.909	83.80							
47	48			49	50	51	52	53	54							
Ag	Cd			In	Sn	Sb	Te	I	Xe							
107.870	112.40			114.82	118.69	121.75	127.60	126.904	131.30							
79	80			81	82	83	84	85	86							
Au	Hg			Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn							
196.967	200.59			204.37	207.19	208.980	(210)	(210)	(222)							

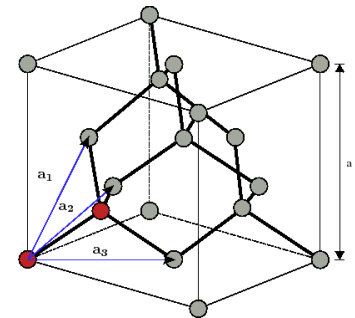


4 liaisons sp^3

8N électrons \longrightarrow 4 bandes

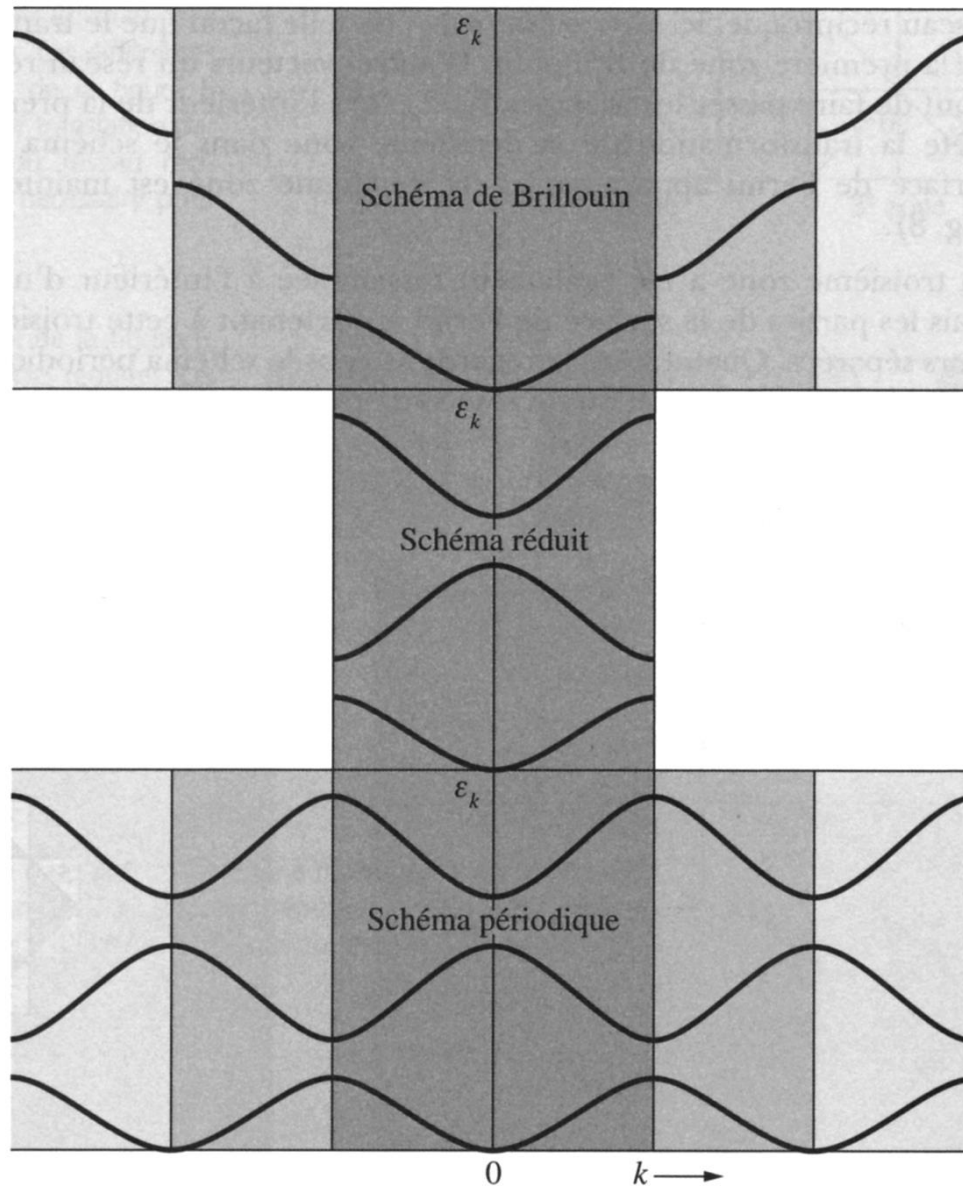
nombre de porteurs de charge

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

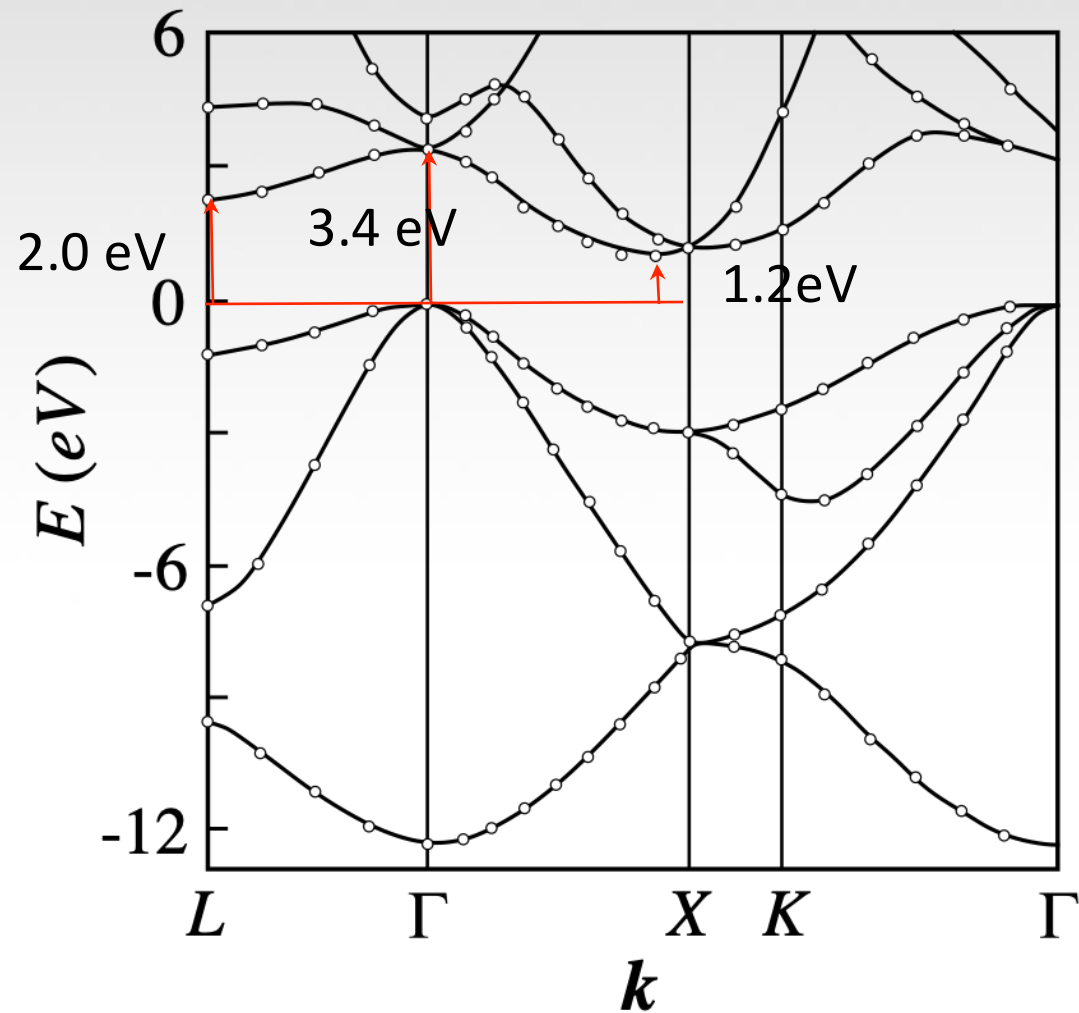


Dans Si à 300 K $np \approx 2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ dans Ge $np \approx 3 \cdot 10^{26} \text{ cm}^{-3}$

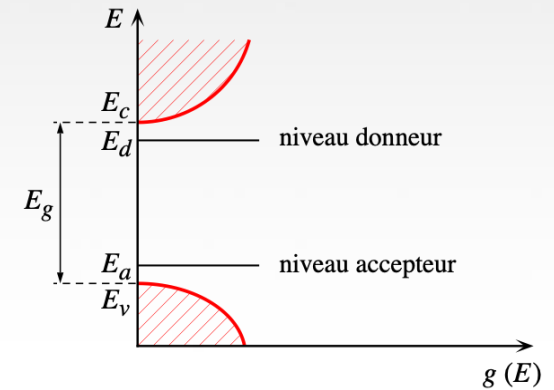
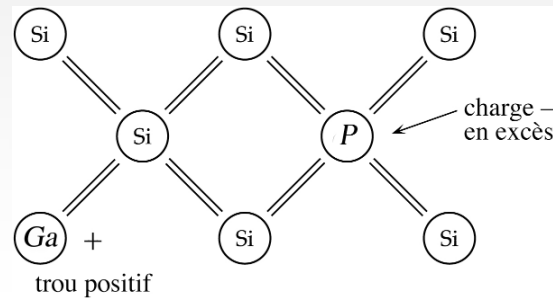
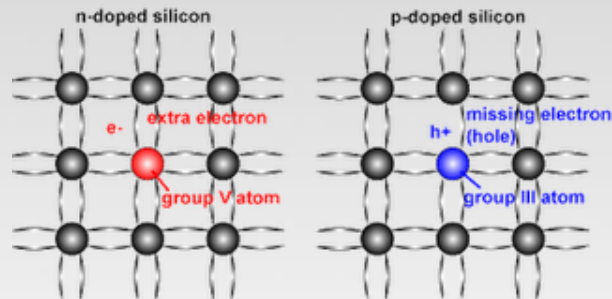
Structure de bandes



Structure de bandes du silicium



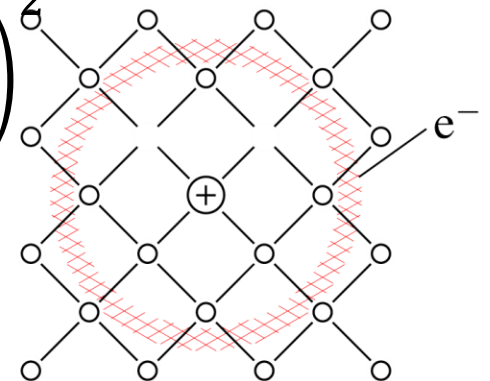
dopage



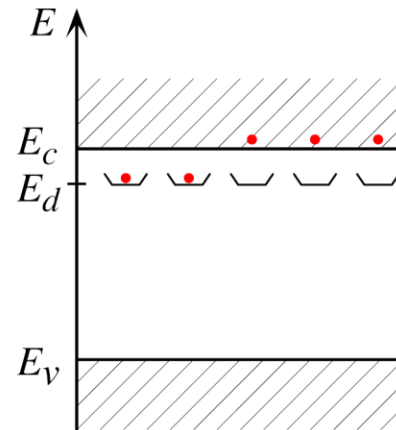
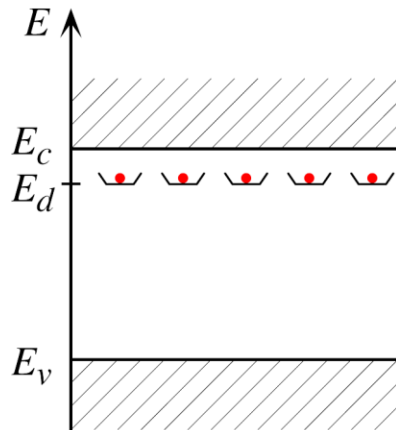
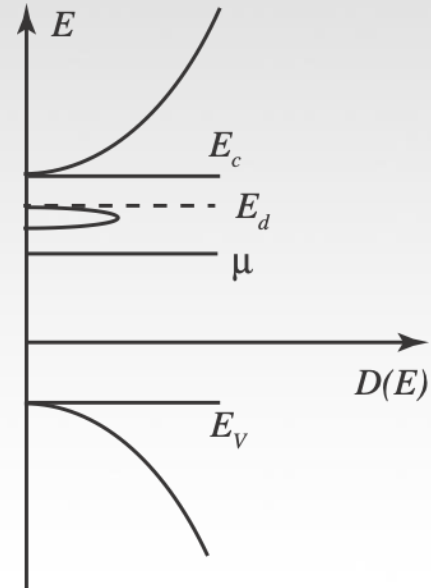
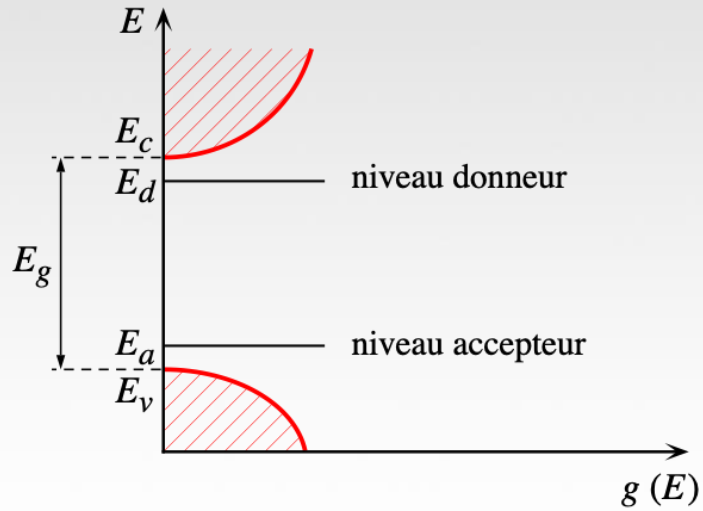
$$a_0 = \frac{(4\pi\epsilon_0)\hbar^2}{e^2 m_{el}} = 5.29 \cdot 10^{-11} m E_d = \frac{m_e}{2\hbar^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \right)^2$$

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

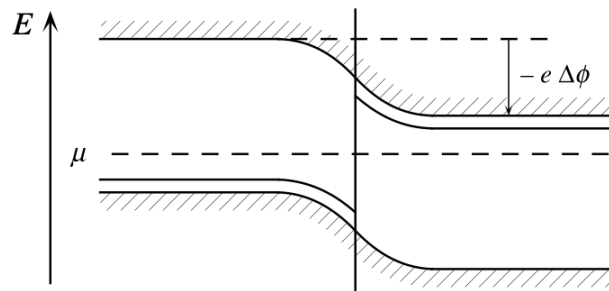
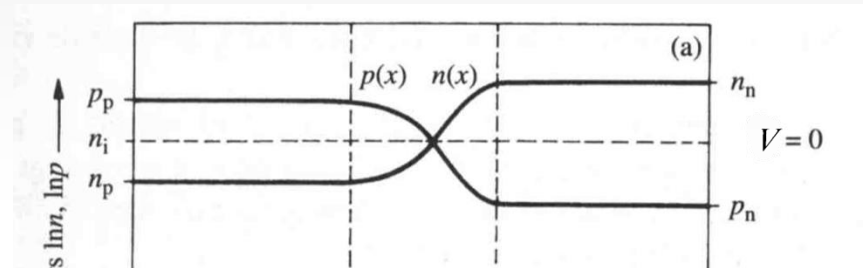
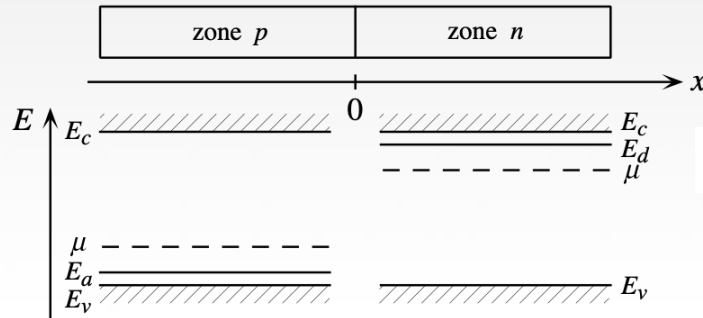
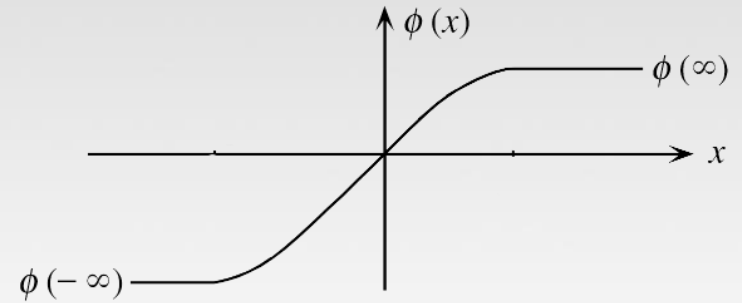
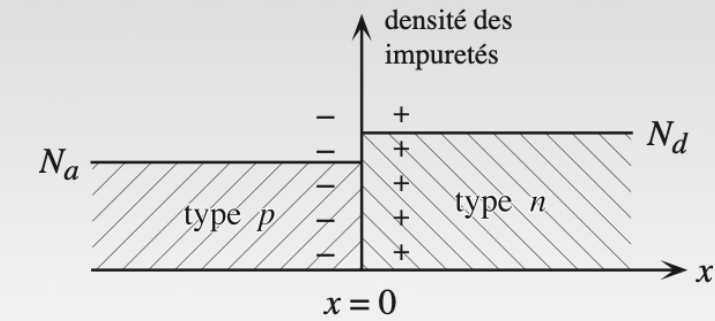
Typiquement $\sim 100^*$



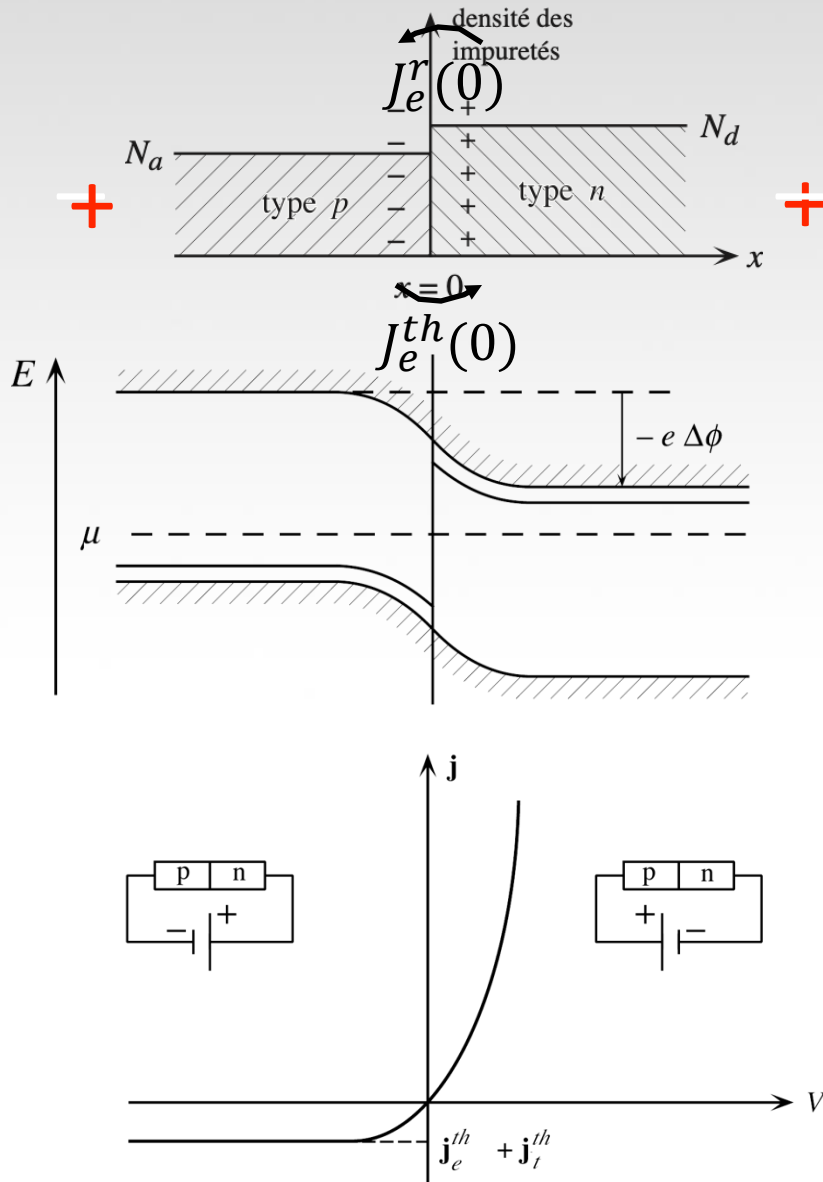
Bandes d'impuretés



Jonction p-n



Jonction p-n polarisée



$$V=0$$

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

Polarisation inverse

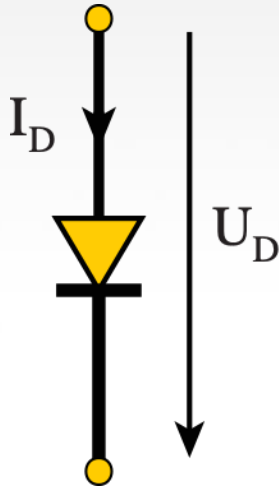
Polarisation directe

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

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

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..) .

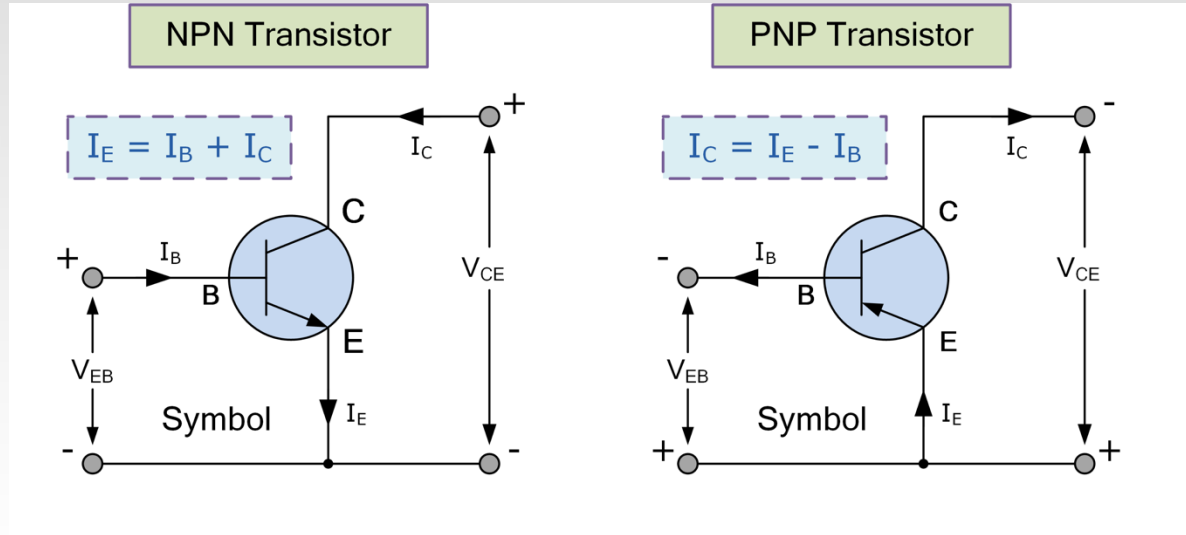


$$I_D = I_{s0} \left(e^{\frac{eU_D}{kT}} - 1 \right)$$

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

Effet de la température sur les jonctions semi-conductrices

Dans le cas présent on utilise plutôt un transistor bipolaire



L'équation complète régissant les tension base-emetteur V_{BE} et 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 :

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

