
Systèmes Electroniques

Prof. Ian O'Connor

ian.oconnor@ec-lyon.fr

EEA - INL

F7 - 207



Introduction



Agenda

- L'électronique aujourd'hui
 - Définitions
 - Domaines d'application
 - L'industrie des semiconducteurs
- L'électronique du futur
 - Calcul haute-performance
 - Systèmes cyber-physiques
- AF STI tc1 (ce cours) :
 - Plan et approche
 - Compétences visées



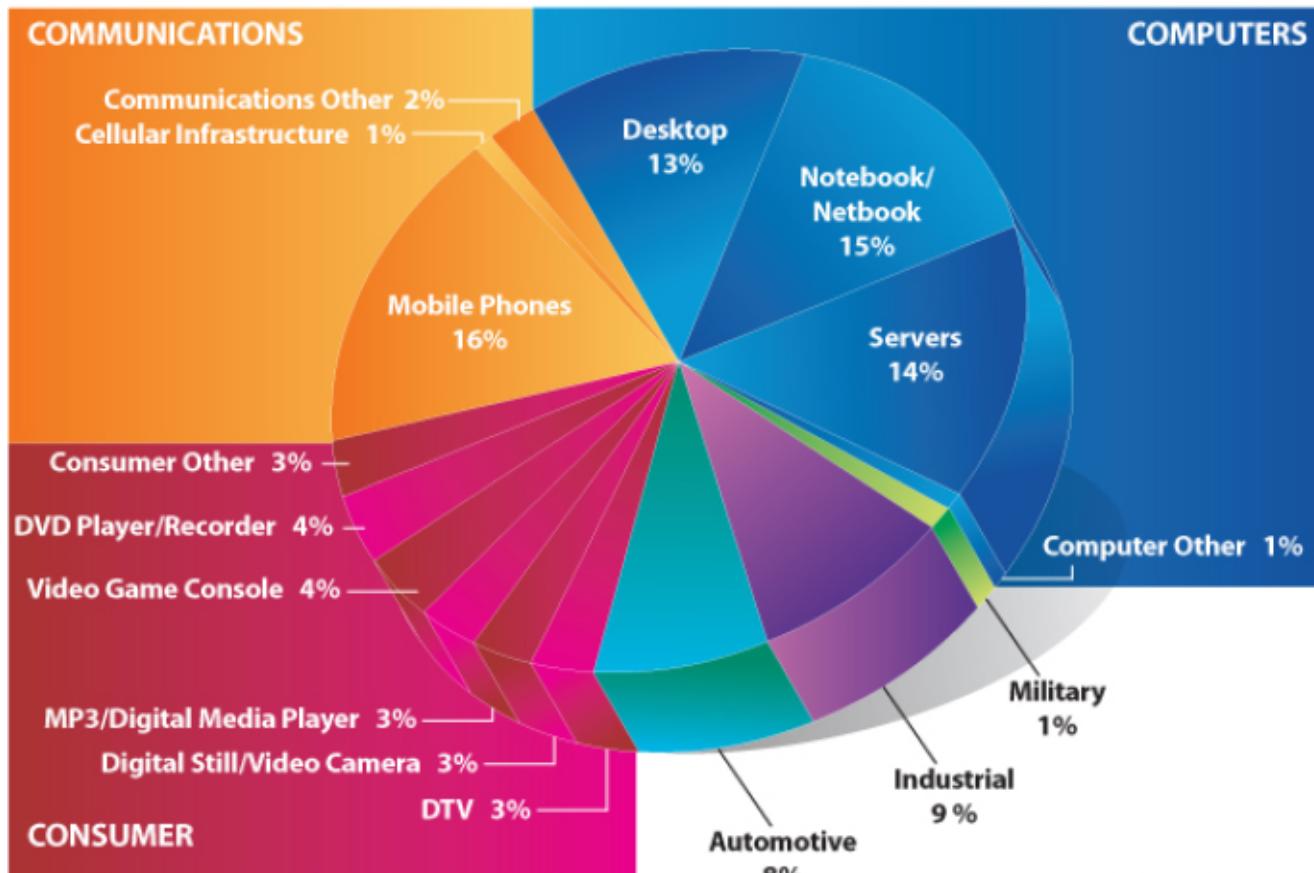
Electronique : des définitions

- L'**électronique** est une science technique, ou science de l'ingénieur, constituant l'une des branches les plus importantes de la physique appliquée
- Étude et conception de structures effectuant des traitements de signaux électriques porteurs d'informations (courants ou tensions, de valeurs plutôt faibles pour minimiser l'énergie consommée)
- La notion de l'information est considérée dans le sens le plus large :
 - Grandeurs physiques (température, son ...)
 - Grandeurs abstraites (image, code ...)

Quelques domaines d'application

2009
Semiconductor Revenue
\$226.3 Billion

Computers and Communications Account for >64%



Exemples d'applications d'aujourd'hui

- Télécommunications
 - Téléphones portables, 4G, Wifi, liens optiques ...
- Transports terrestres et aériens
 - capteurs (accélération, distance), airbag, freinage, suspension active ...
- Santé et aide à la personne
 - échographe, pacemaker, amplificateur auditif, robotique médicale
- Grand-public
 - TV HD, blu-ray, box ...
- Informatique
 - Processeurs, laptops, centres de traitement de données
- Sécurité
 - Cartes à puce, identification, bancaire, téléphonie ...
- Agriculture
 - Surveillance de terrain, troupeaux, drones, robotique ...
- Développement durable



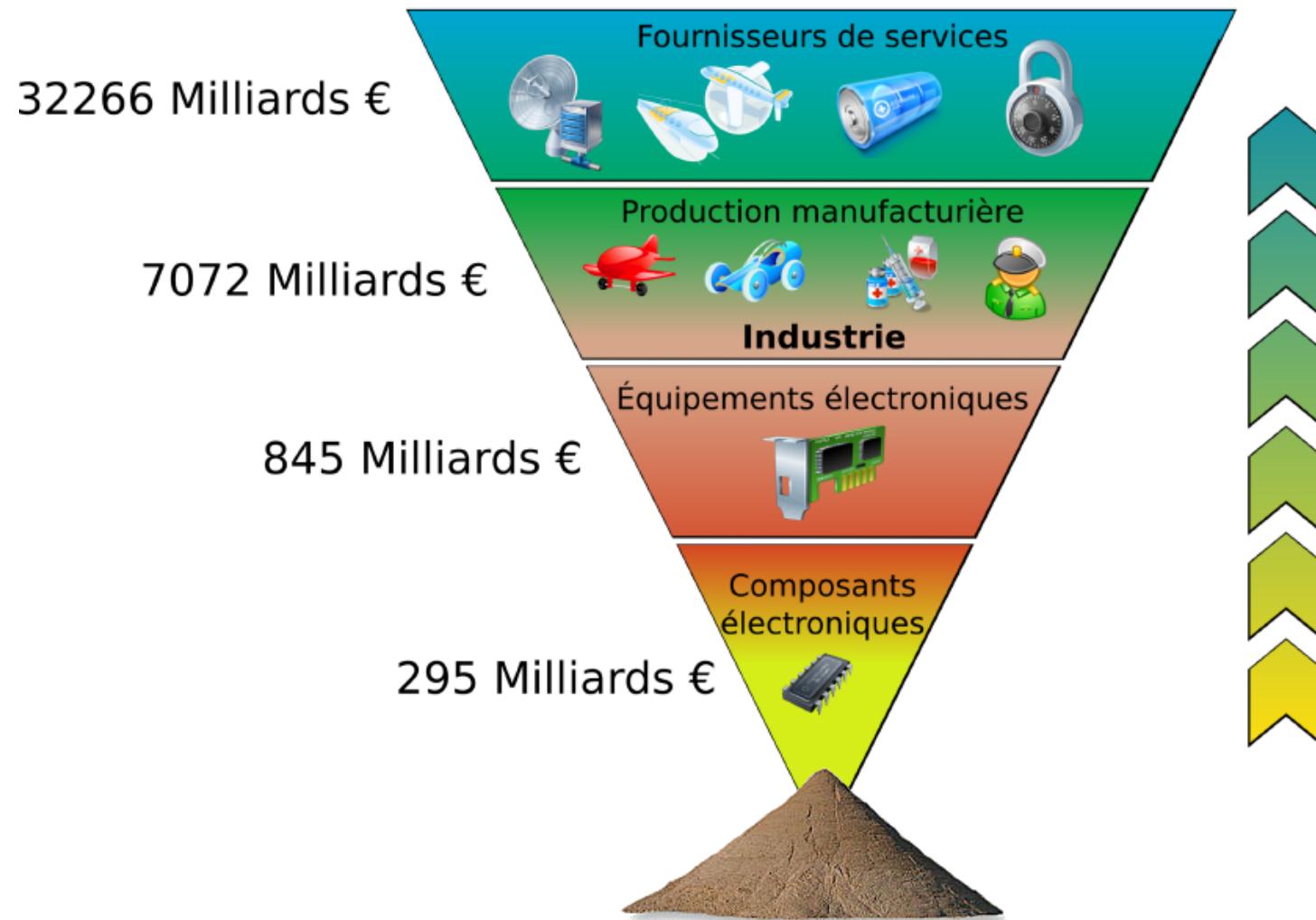
ÉCOLE

CENTRALE LYON

Systèmes Electroniques

STI tc1

Structure de l'industrie semiconducteurs



Quelques sociétés de l'électronique



Fabricants des semiconducteurs

Rank 2013	Rank 2012	Company	Country of origin	Revenue (million \$ USD)	2013/2012 changes	Market share
1	1	Intel Corporation ⁽¹⁾	USA	46 960	-1.0%	14.8%
2	2	Samsung Electronics ⁽²⁾	South Korea	33 456	+7.0%	10.5%
3	3	Qualcomm	USA	17 341	+31.6%	5.5%
4	10	Micron Technology ⁽³⁾	USA	14 168	+109.2%	4.5%
5	7	SK Hynix	South Korea	13 335	+48.7%	4.2%
6	5	Toshiba Semiconductor	Japan	12 459	+11.9%	3.9%
7	4	Texas Instruments	USA	11 379	-5.5%	3.6%
8	9	Broadcom	USA	8 121	+3.5%	2.6%
9	8	STMicroelectronics	France Italy	8 076	-4.9%	2.5%
10	6	Renesas Electronics ⁽⁴⁾	Japan	7 822	-15.3%	2.5%
11	13	Infineon Technologies	Germany	5 096	+5.7%	1.6%
12	12	AMD	USA	5 076	-4.2%	1.6%
13	14	NXP	Netherlands	4 658	+13.2%	1.5%
14	18	MediaTek	Taiwan	4 434	+32.1%	1.4%
15	11	Sony	Japan	4 394	-28.1%	1.4%
16	16	Freescale Semiconductor	USA	3 958	+5.8%	1.2%
17	15	NVIDIA	USA	3 612	-5.6%	1.1%
18	19	Marvell Technology Group	USA	3 281	+3.6%	1.0%
19	22	ON Semiconductor	USA	2 740	-4.5%	0.9%
20	23	Analog Devices	USA	2 677	+0.2%	0.8%

Ordres de grandeurs en \$\$

\$10Md

1 usine



\$100M
1 design à
1Md transistors

\$10M
1 jeu de masques à
1Md transistors



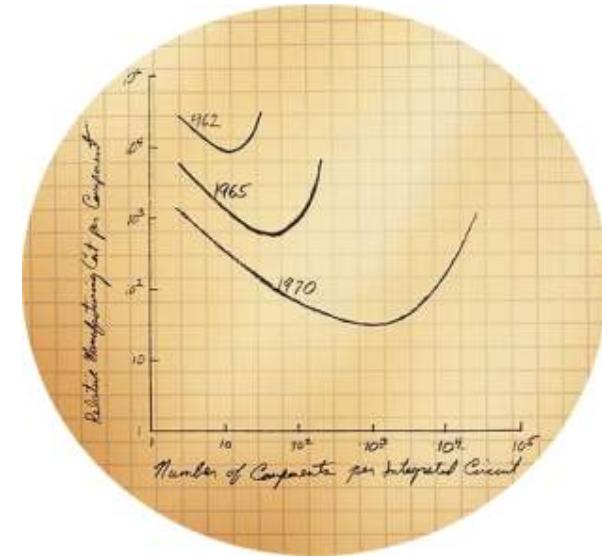
ÉCOLE
CENTRALE LYON

Systèmes Electroniques

STI tc1

Tendances technologiques : loi de Moore

- Gordon Moore, 1965: « la complexité des circuits intégrés (le nombre de transistors par circuit intégré) double tous les ans »
- Cette « loi » (empirique) a servi de ligne directrice pour l'industrie des semiconducteurs depuis un demi-siècle



www.intel.com/pressroom/kits/events/moores_law_40th



Gordon Moore
ISSCC'03

Loi de Moore

- Mesure : longueur de canal des transistors (L_{gate})
- Pourquoi les performances augmentent ?
 - Facteur d'échelle $S = 1/L_{gate}$
 - # transistors / unité de surface augmente en S^2
 - Fréquence de fonctionnement augmente en S
 - Performances augmentent en S^3 ...
- D'autres bénéfices en conséquence de la Loi de Moore, plusieurs aspects de calcul
 - Capacité de mémorisation / \$, fréquence de fonctionnement, performances / \$, surface d'un point de mémorisation, énergie / opération de calcul, bande passante / \$...

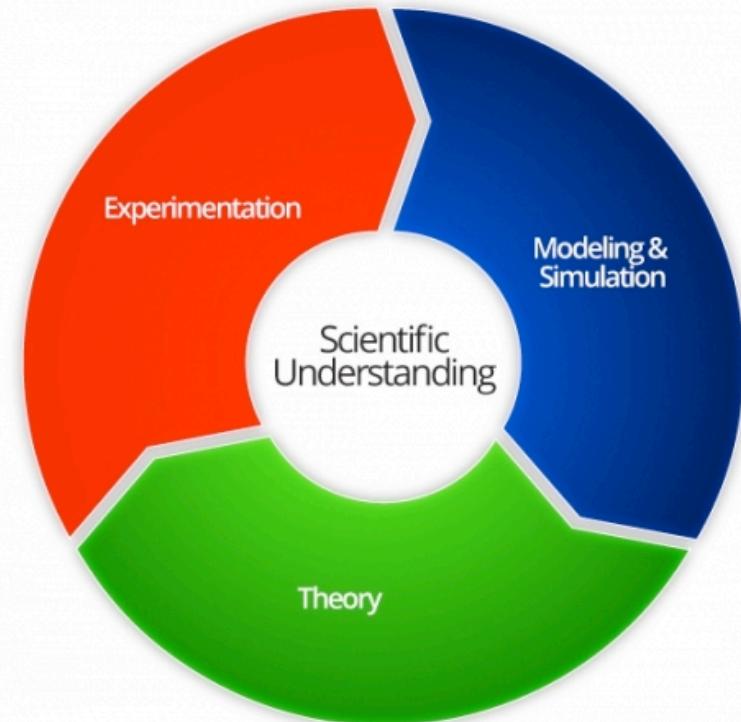
L'information et la mutation numérique

- Cloud Computing / Big Data ...
- centres de calcul haute-performance pour manipuler et stocker, de manière sécurisée, les exa-octets de données recueillies
- infrastructure de communication capable de véhiculer des centaines de Mbps par terminal mobile ou des centaines de Gbps par nœud de calcul
- systèmes sur puce au cœur de ces maillons de la révolution numérique (architectures comptant quelques dizaines, voire centaines, de cœurs)



Le 3^{ème} pilier de la découverte scientifique

- La science computationnelle est devenue le troisième pilier de la découverte scientifique (en complément de la théorie et de l'expérimentation physique) qui permet aux scientifiques d'étudier des phénomènes qui sont trop grands, trop petits, trop rapides ou trop dangereux à reproduire au laboratoire

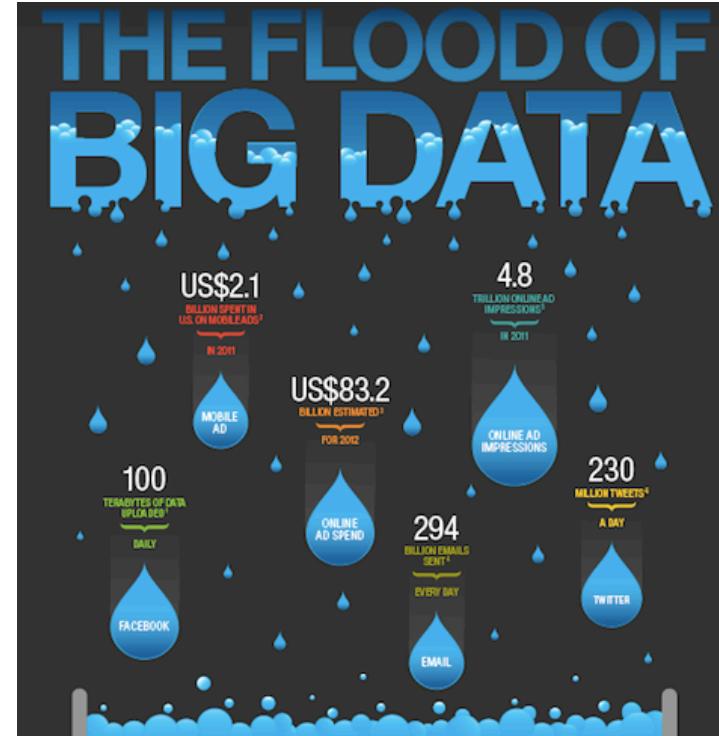


Source : US Department of Energy



Big Data

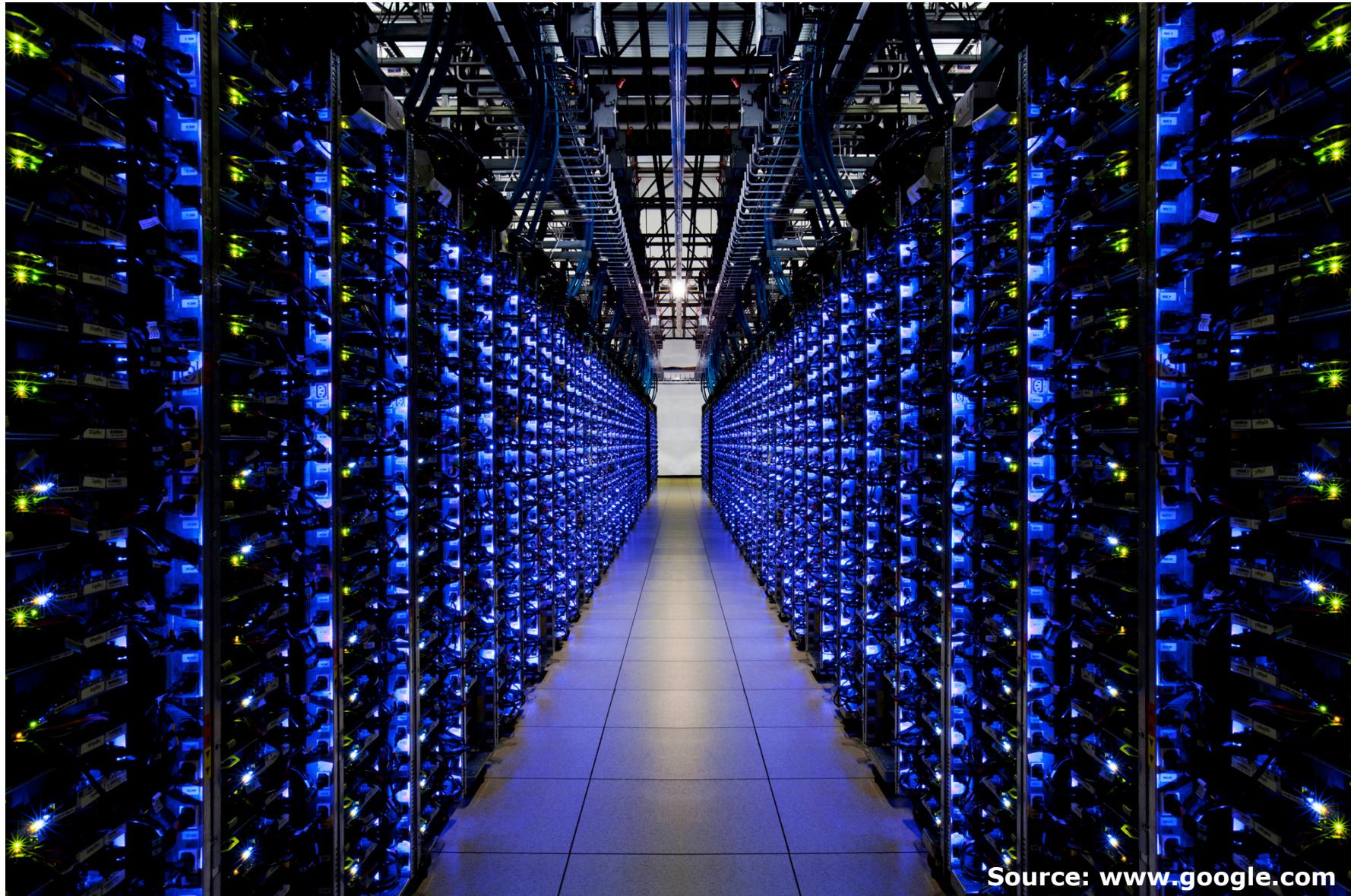
- Une société numérique : nous avons créé plus de 1.8Zo (1.8×10^{21} octets) en 2011, x10 par rapport à 2006
- Big data = big problems (calcul complexe)
 - Analyse des données en temps réel (indexation vidéo ...)
 - Modélisation des phénomènes naturels
 - Interfaces avec le monde réel



Source : IBM

Teraflops: 100 cores, 100Tbit/s, 100Gb ...

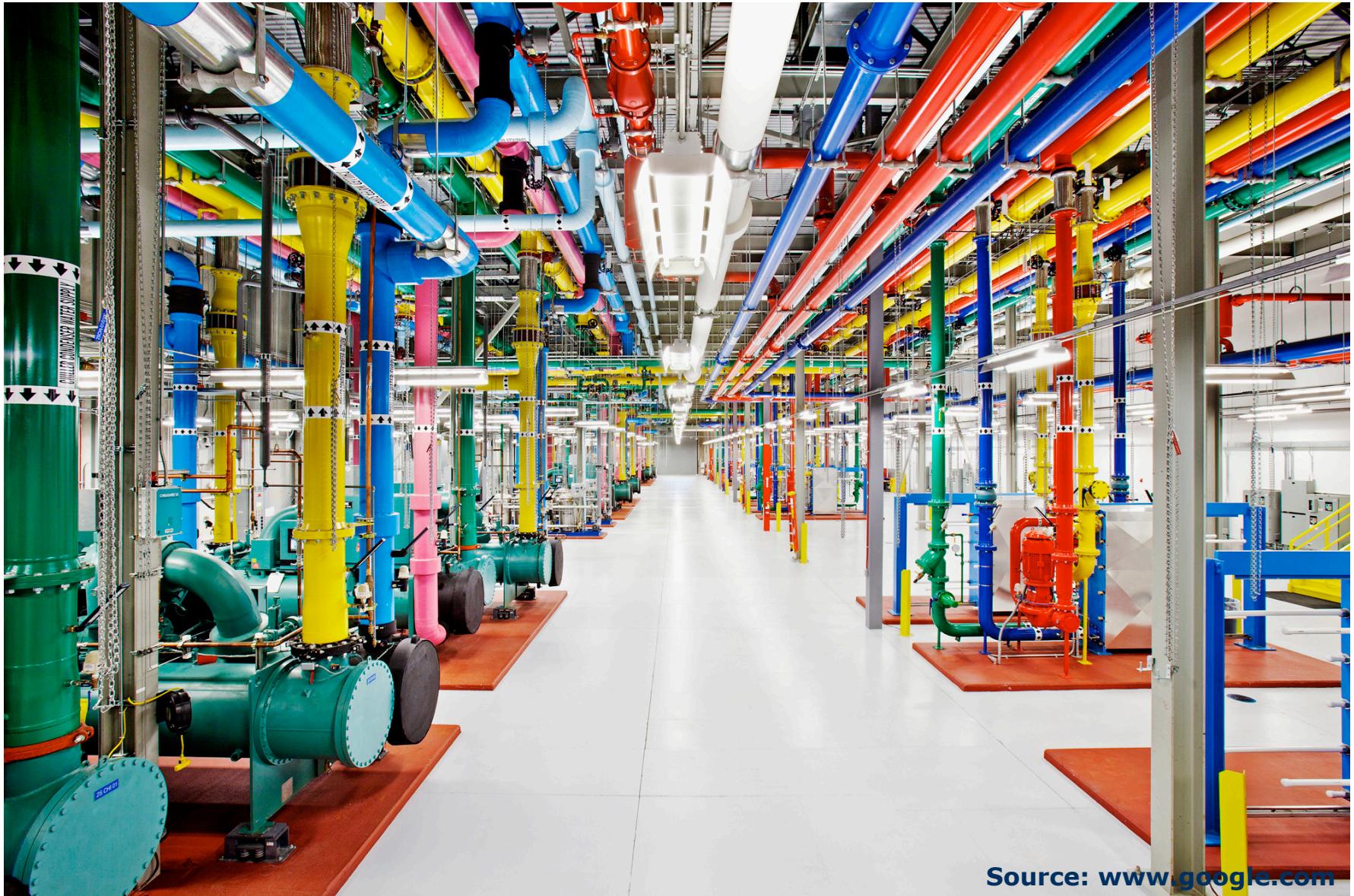
Centre de traitement de données



Source: www.google.com



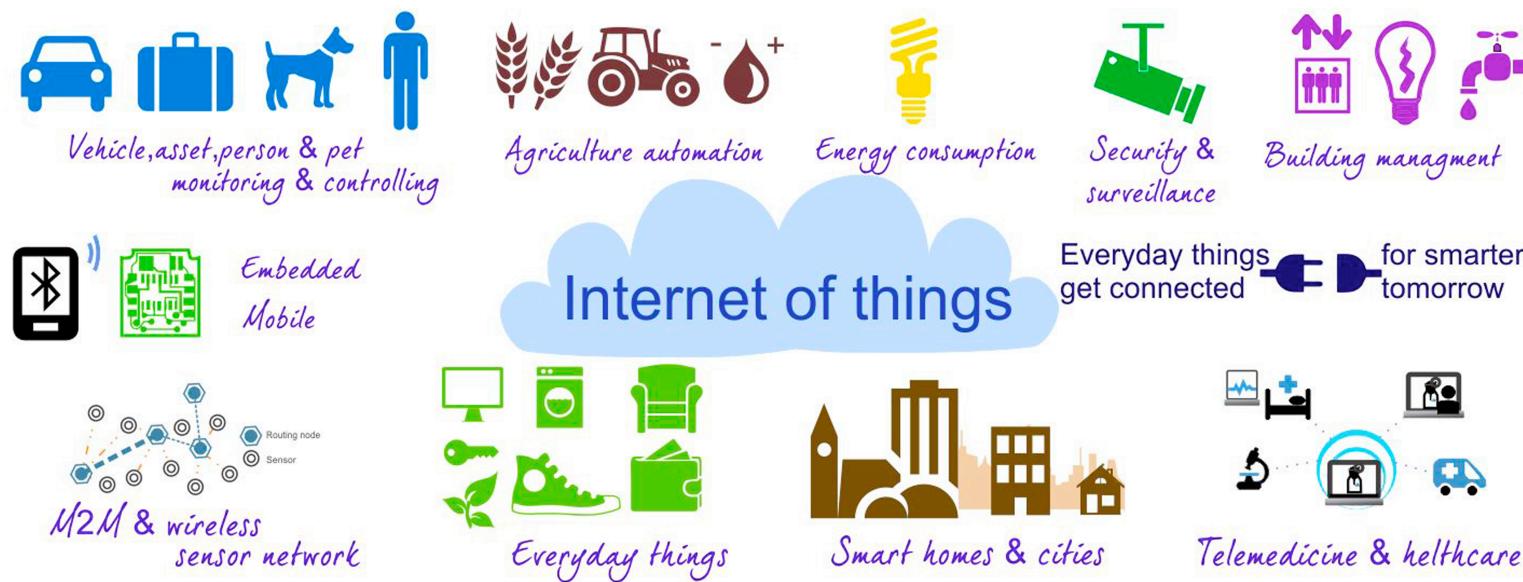
Et son infrastructure de fonctionnement



Source: www.google.com

Systèmes cyber-physiques

- Internet des Objets
- systèmes embarqués ultra-faible consommation (pJ/bit) pour instrumenter et interagir avec l'environnement physique en temps réel et de manière autonome



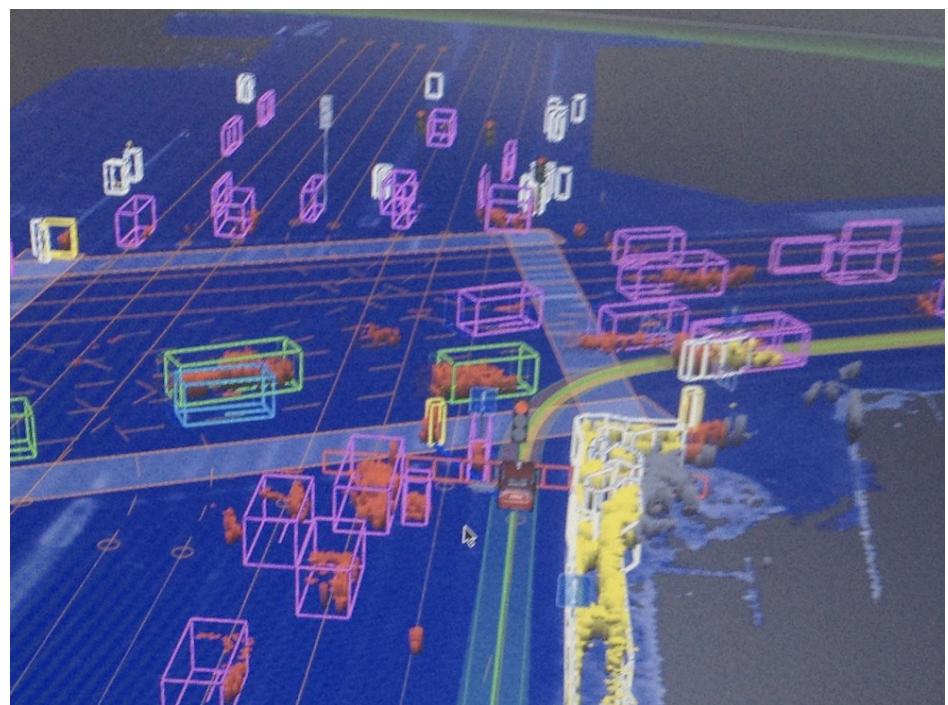
Du calcul « pervasif »

- Fusion des données en temps réel (radar, GPS, caméra ...)
- Prise de décisions par des processeurs Atom
- Alimentation par la batterie du véhicule
- Système d'exploitation dédié
- Première licence au Nevada, mai 2012
- 500000km en août 2012

Google driverless car

From Wikipedia, the free encyclopedia

The **Google driverless car** is a project by Google that involves developing technology for [driverless cars](#). The project is currently being led by Google engineer [Sebastian Thrun](#), director of the [Stanford Artificial Intelligence Laboratory](#) and co-inventor of [Google Street View](#). Thrun's team at Stanford created the robotic vehicle [Stanley](#) which won the [2005 DARPA Grand Challenge](#) and its US\$2 million prize from the [United States Department of Defense](#).^[2] The team developing the system consisted of 15 engineers working for Google, including Chris Urmson, Mike Montemerlo, and Anthony Levandowski who had worked on the DARPA Grand and Urban Challenges.^[3]



AF STI tc1

- Structure de l'AF :
 - 7 cours de 1h45
 - 7 TD de 2h
 - 1 TP de 4h + 1 TP de 2h
 - 1 test de 2h00
- Lien avec tc0
 - Autonomie, sujets de TD
- Lien avec tc3
 - Acquisition et conversion analogique / numérique dans un système audio (CD)
 - TP 4h sur un modulateur sigma-delta (numérisation d'un signal analogique)

Plan du cours

- Physique du semiconducteur
- Modélisation quadripolaire du transistor MOS et schéma équivalent
- Blocs élémentaires (1 à 3 transistors)
- Étude de l'inverseur MOS
- Fonctions logiques combinatoires
- Fonctions logiques séquentielles
- Architecture microprocesseur



Intervenants

Sébastien Le Beux



David Navarro



Ian O'Connor



Claude Santinelli



Fabien Mieyeville



Hai Son Nguyen



Pedro Rojo Romeo



Hassan Omran



ÉCOLE
CENTRALE LYON

Systèmes Electroniques

STI tc1

Règles de vie

- Ce qu'on aime :
 - L'écoute, les questions, la volonté d'apprendre
- Ce qu'on n'aime pas
 - Les SMS furtifs (ou autres), les distractions, l'extinction cérébrale
- Les supports de cours
 - Le poly : un texte de soutien
 - Les transparents : des images de soutien
 - Le discours : pour faire passer les messages
 - Les TDs : pour passer de l'écoute à l'action
 - Les TPs : pour manipuler, programmer
 - L'autonomie : pour s'entraîner

tc0 : Autonomie

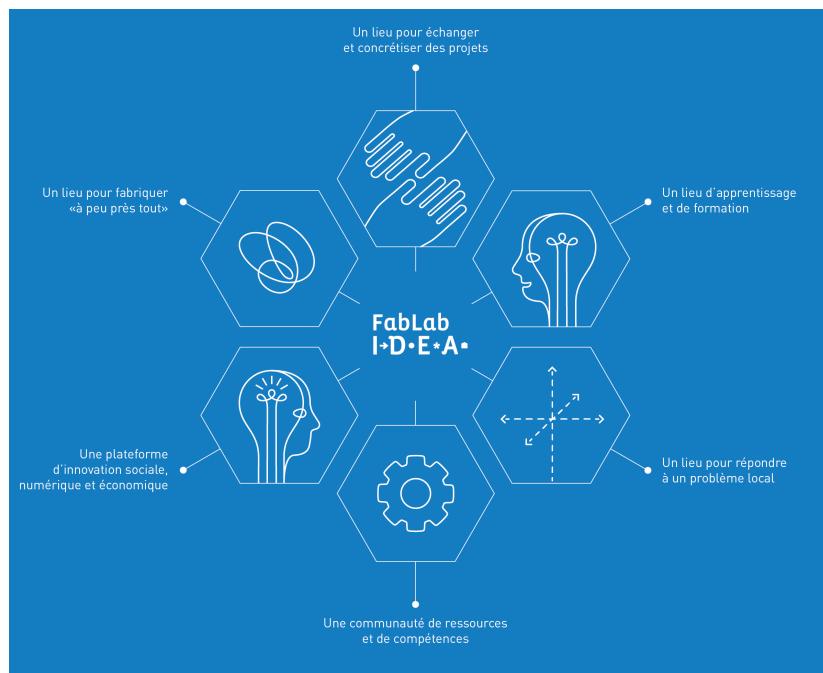
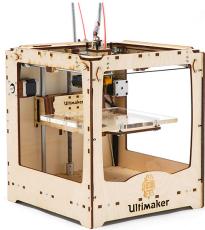
- En appui de tc1 et tc2
- Pour tc1 :
 - Simulation PSpice des exercices de TD
 - Evaluation en fin de semestre
- PSpice :
 - Simulateur de circuits électroniques analogiques et numériques
 - Version étudiante 9.1 Cadence / Orcad
 - Utilisation (décrise dans le tutoriel, expliquée pendant la séance de lancement) :
 - Saisi de schémas de circuits
 - Simulation (temporelle, fréquentielle, statique)
 - Visualisation des résultats

L'évaluation

- Test 90%
 - 2h
 - Sans documents
 - Questions de cours
 - Exercices type TD (dont un extrait d'un TD)
- TP 10%
 - Compréhension du fonctionnement d'un microprocesseur (architecture étudiée en TD7), pratiquer la programmation bas niveau
 - Séance 1 (4h) : apprentissage et appropriation
 - Séance 2 (2h) : exercices en quasi-autonomie

Fablab

- « User empowerment »



Physique de semi-conducteurs



Matériaux semiconducteurs

- Un semiconducteur est un matériau dont les **propriétés électriques** sont intermédiaires entre métal et isolant
- Le comportement électrique des semiconducteurs est généralement modélisé à l'aide de la théorie des bandes d'énergie :
 - un matériau semiconducteur possède une **bande interdite** suffisamment petite pour que des électrons de la **bande de valence** puissent facilement rejoindre la **bande de conduction**
 - Si un potentiel électrique est appliqué à ses bornes, un faible courant électrique apparaît, provoqué à la fois par le déplacement des électrons et par celui des « trous » (absences d'électrons) qu'ils laissent dans la bande de valence



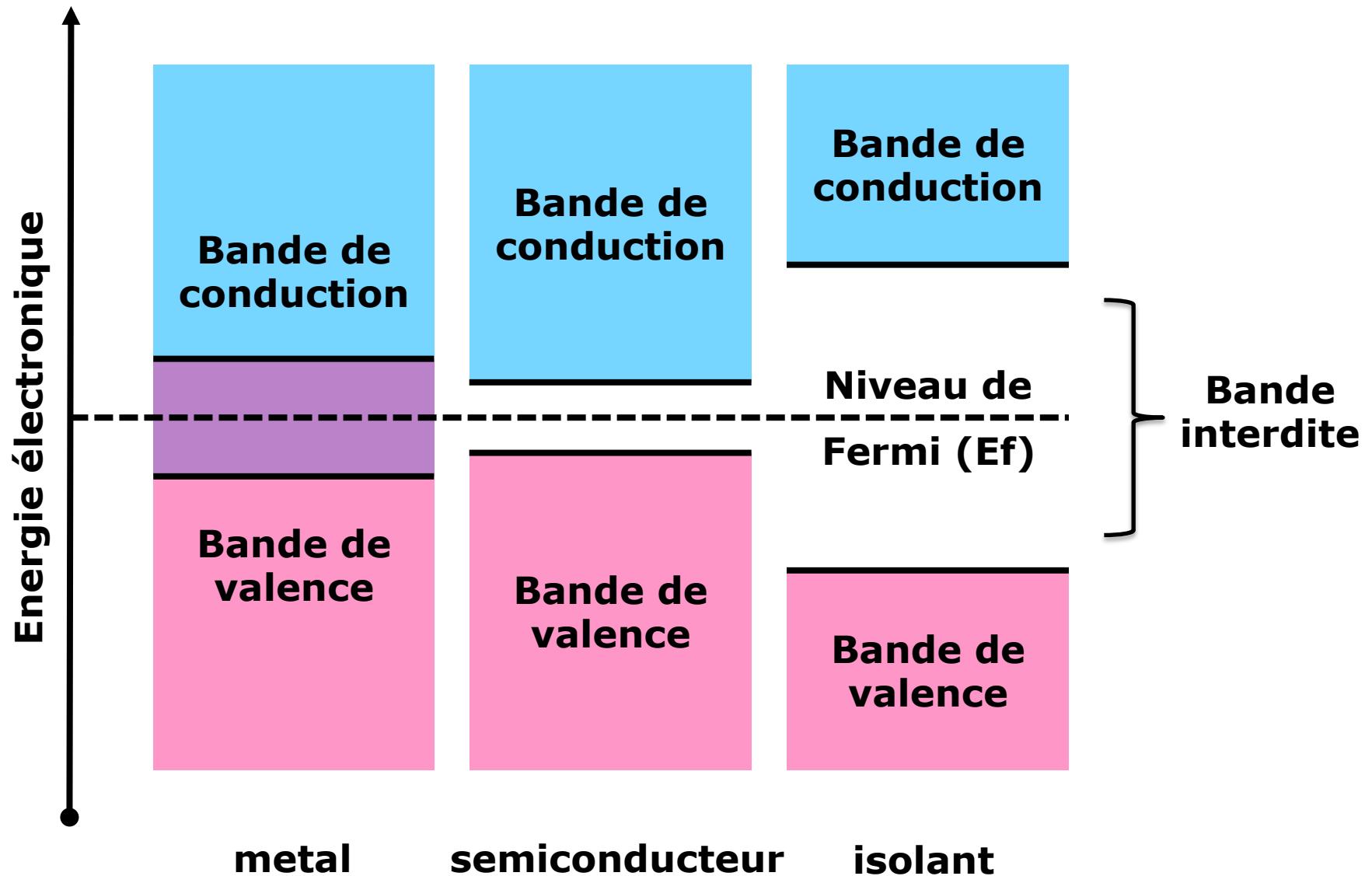
ÉCOLE

CENTRALE LYON

Systèmes Electroniques

STI tc1

Théorie des bandes : aperçu



Éléments semiconducteurs

Elemental semiconductors
C(diamond), Si, Ge

B
P-type dopant for C

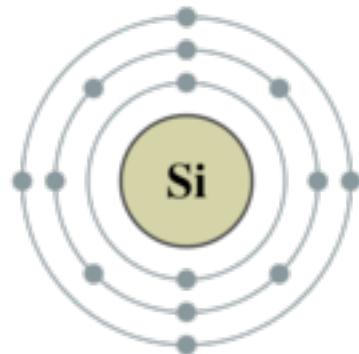
B, Al, Ga, In
P-type dopant for Si

Al, Ga, In
P-type dopant for Ge

The diagram shows a portion of the periodic table from group 13 to group 15. A bracket on the left groups B, Al, Ga, In as P-type dopants for C, Si, and Ge respectively. Another bracket on the right groups N, P, As, Sb as N-type dopants for C, Si, and Ge respectively. Carbon (C) is highlighted in red in the table.

	13 IIIA	14 IVA	15 VA
B	5 Boron 10.81 2p ¹	6 Carbon 12.011 2p ²	7 Nitrogen 14.0067 2p ³
Al	13 Aluminum 26.9815 3p ¹	14 Silicon 28.0855 3p ²	15 Phosphorus 30.9738 3p ³
Ga	31 Gallium 69.723 4p ¹	32 Germanium 72.61 4p ²	33 Arsenic 74.92159 4p ³
In	49 Indium 114.82 5p ¹		51 Antimony 121.75 5p ³

Structure électronique du silicium



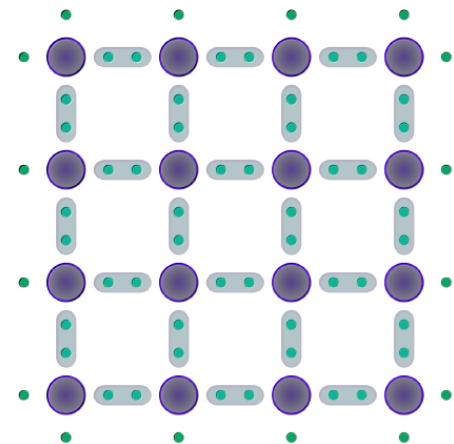
1 atome

Si - numéro atomique : 14 (protons)

Niveau 1 (K) : 2 électrons

Niveau 2 (L) : 8 électrons

Niveau 3 (M) : 4 électrons



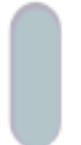
plusieurs atomes



Atome de silicium



Electron de valence



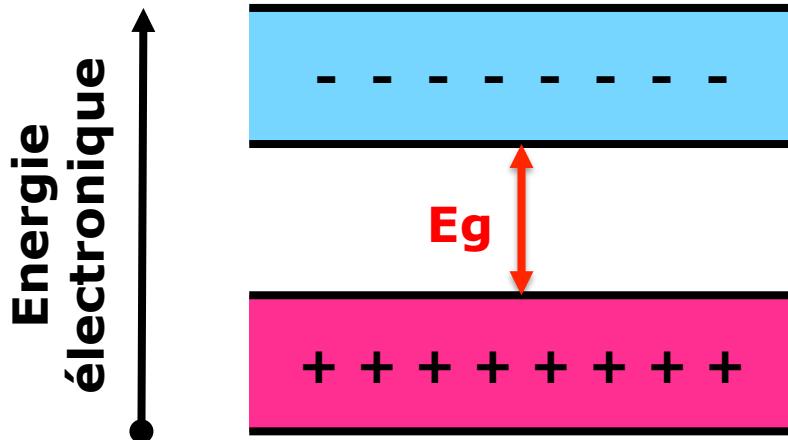
Liaison de covalence



Modèle de bandes



Modèle des bandes



- **A T=0K : cristal parfait**
 - Bande de valence pleine
 - Bande de conduction vide
- **A T>0K : remplissage de la bande de conduction dépend de la valeur de Eg (exprimée en eV) :**
 - Métaux : Eg nul, bande de conduction pleine
 - Isolant : Eg grand (>4eV), bande de valence pleine

Bandé de conduction (électrons, e^-)

Bandé interdite

Bandé de valence (trous, h^+)

- La « distance » en énergie séparant la bande de conduction de la bande de valence s'appelle la **bande interdite**, ou plus couramment le « gap » (d'où Eg)
- Dans les semiconducteurs la valeur valeur du gap Eg est faible
- Pour le silicium, Eg = 1.12eV

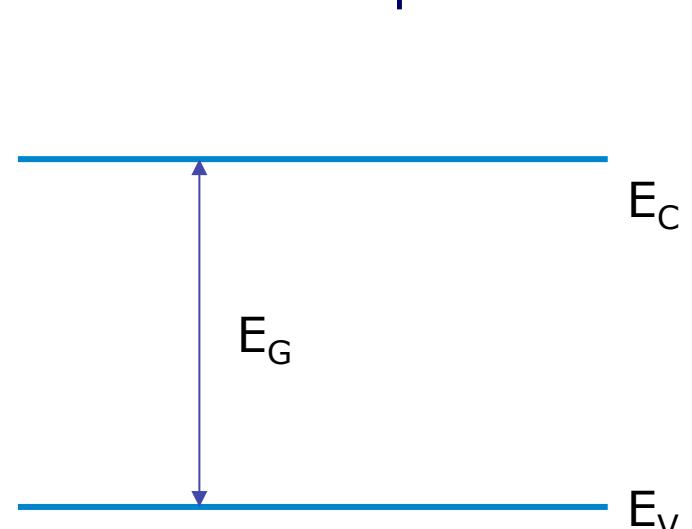
Application numérique

- Calculer la longueur d'onde λ d'une radiation lumineuse transportant l'énergie nécessaire à la création d'une paire électron-trou dans le silicium pur

$$E_G = \frac{hc}{\lambda}$$

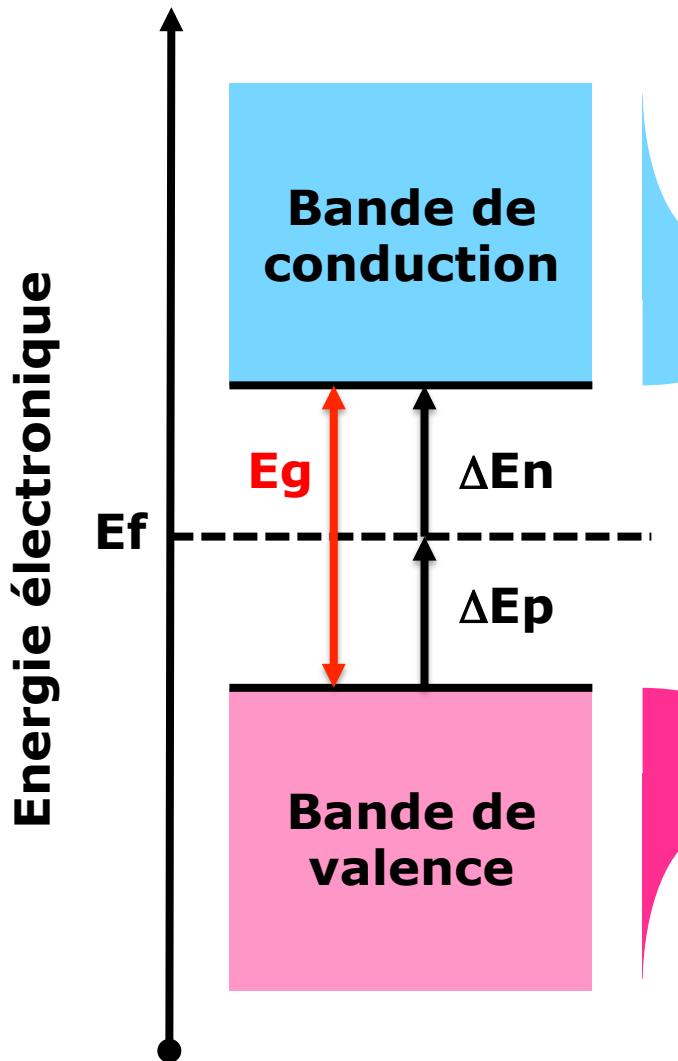
$$\lambda = \frac{6.63 \times 10^{-34} Js \times 3 \times 10^8 ms^{-1}}{1.12eV \times 1.6 \times 10^{-19} C}$$

$$\lambda = 1.1 \times 10^{-6} m = 1.1 \mu m$$



E_G : énergie (bande interdite)
h : constante de Planck
c : vitesse de la lumière
 λ : longueur d'onde

Un semiconducteur intrinsèque



Population des électrons dans la bande de conduction

$$n_i = N_c \exp\left(-\frac{\Delta E_n}{k_B T}\right)$$

Neutralité électrique

$$p_i = N_v \exp\left(-\frac{\Delta E_p}{k_B T}\right)$$

Population des trous dans la bande de valence

Nc : densité effective d'états des électrons dans la bande de conduction ($=2.82 \times 10^{19} \cdot \text{cm}^{-3}$ à 300K pour Si)

ΔE_n : différence d'énergie entre la bande de conduction et le niveau de Fermi

Nv : densité effective d'états des trous dans la bande de valence ($=1.83 \times 10^{19} \cdot \text{cm}^{-3}$ à 300K pour Si)

ΔE_p : différence d'énergie entre la bande de valence et le niveau de Fermi

k_B : constante de Boltzmann $= 8.6 \times 10^{-5}$ eV.K⁻¹

T : température absolue en °K



Application numérique

- En supposant qu'il y a autant d'états possibles pour les électrons dans la bande de conduction et dans la bande de valence d'un semiconducteur pur (silicium) ($N_C = N_V$) à température ambiante :
 - À partir de la valeur de n_i du silicium ($1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$), calculer la valeur de N_V correspondant à 1 cm^3 de cristal
 - Sachant que chaque atome de Si possède 4 électrons de valence, quelle valeur s'attendrait-on à trouver ?

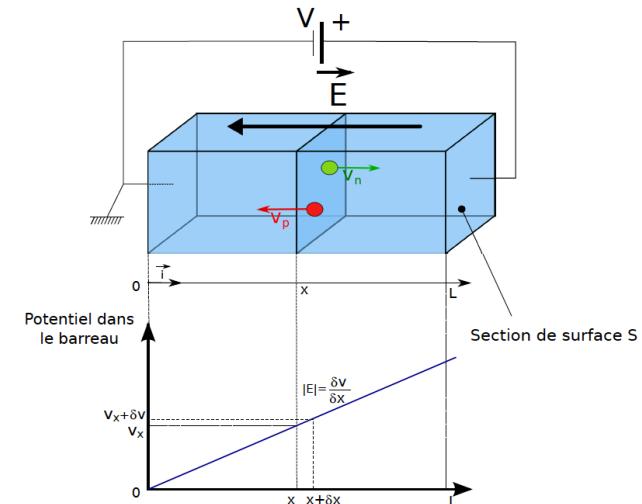
-
- $N_c = N_v$ et $\Delta E_n = E_g / 2$
 - Donc $n_i = N_v \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right)$
 - Et $\exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) = \exp\left(-\frac{1.12}{2 \times 8.6 \times 10^{-5} \times 300}\right) = 3.74 \times 10^{-10}$
 - $N_v = 1.5 \times 10^{10} / 3.74 \times 10^{-10} = 0.4 \times 10^{20}$ états possibles pour les électrons de valence d'un cm^3 de Si.
 - On s'attend à trouver 20×10^{22} car il y a 5×10^{22} atomes de Si par cm^3 , avec 4 électrons de valence chacun, tous occupés à 0 K. La valeur calculée est une densité effective qui correspond à un modèle (très) simplifié

Densité de courant de conduction (1/2)

- Considérons un barreau de silicium homogène de section S et de longueur L à température constante
- Les porteurs libres sont constitués de p trous par cm^3 et n électrons par cm^3

- Mobilité μ_n (Si) = $1500\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
- Mobilité μ_p (Si) = $475\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$

- La différence de potentiel V appliquée au barreau crée un champ électrique de norme constante qui provoque le déplacement des porteurs



Densité de courant de conduction (2/2)

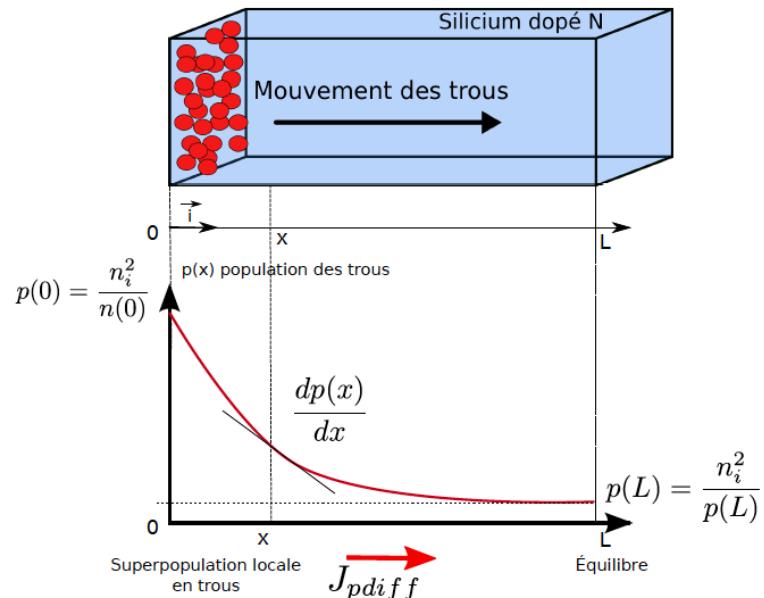
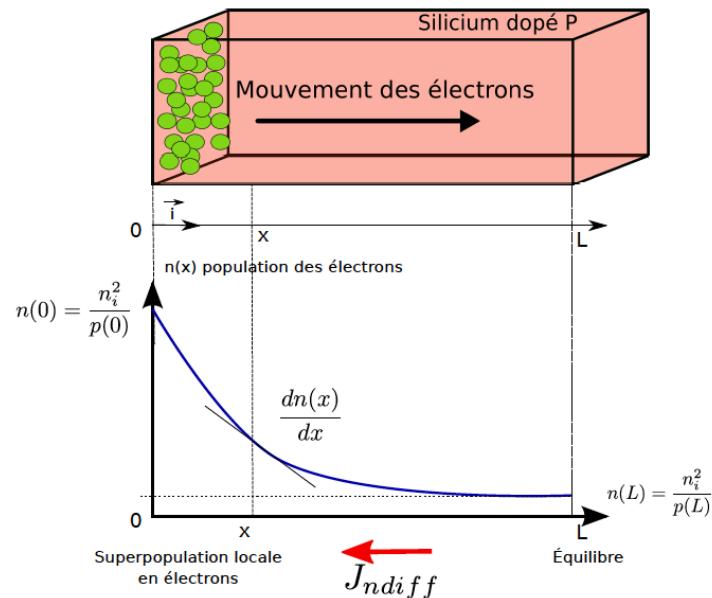
- Les électrons se déplacent en sens inverse au champ électrique créé E , alors que les trous se propagent dans le même sens que E
- Durant un temps dt , un observateur placé en x voit passer
 - Un déplacement des électrons $\delta x_n = \mu_n |E| \delta t$
 - Un déplacement des trous $\delta x_p = \mu_p |E| \delta t$
- La densité de courant s'exprime par :

$$J = q \frac{N}{S\delta t} + q \frac{P}{S\delta t} \quad \text{avec} \quad \delta t = \frac{\delta x_n}{\mu_n E} + \frac{\delta x_p}{\mu_p E}$$

- Et au final $J = q(n\mu_n + p\mu_p)E = \sigma E$



Densité de courant de diffusion



J_{ndiff} opposé au mouvement des électrons

$$J_{ndiff} = qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad D_n = \mu_n \frac{k_B T}{q}$$

J_{pdif} dans le même sens que le mouvement des trous

$$J_{pdif} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad D_p = \mu_p \frac{k_B T}{q}$$

Densité de courant totale

$$J_{total} = J_n + J_p$$

$$J_n = q \cdot n(x) \cdot \mu_n \cdot |E| + qD_n \frac{dn(x)}{dx}$$

$$J_p = q \cdot p(x) \cdot \mu_p |E| - qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

$$\vec{J}_{total} = \sigma \vec{E} + q \left(D_n \vec{\nabla} n - D_p \vec{\nabla} p \right)$$



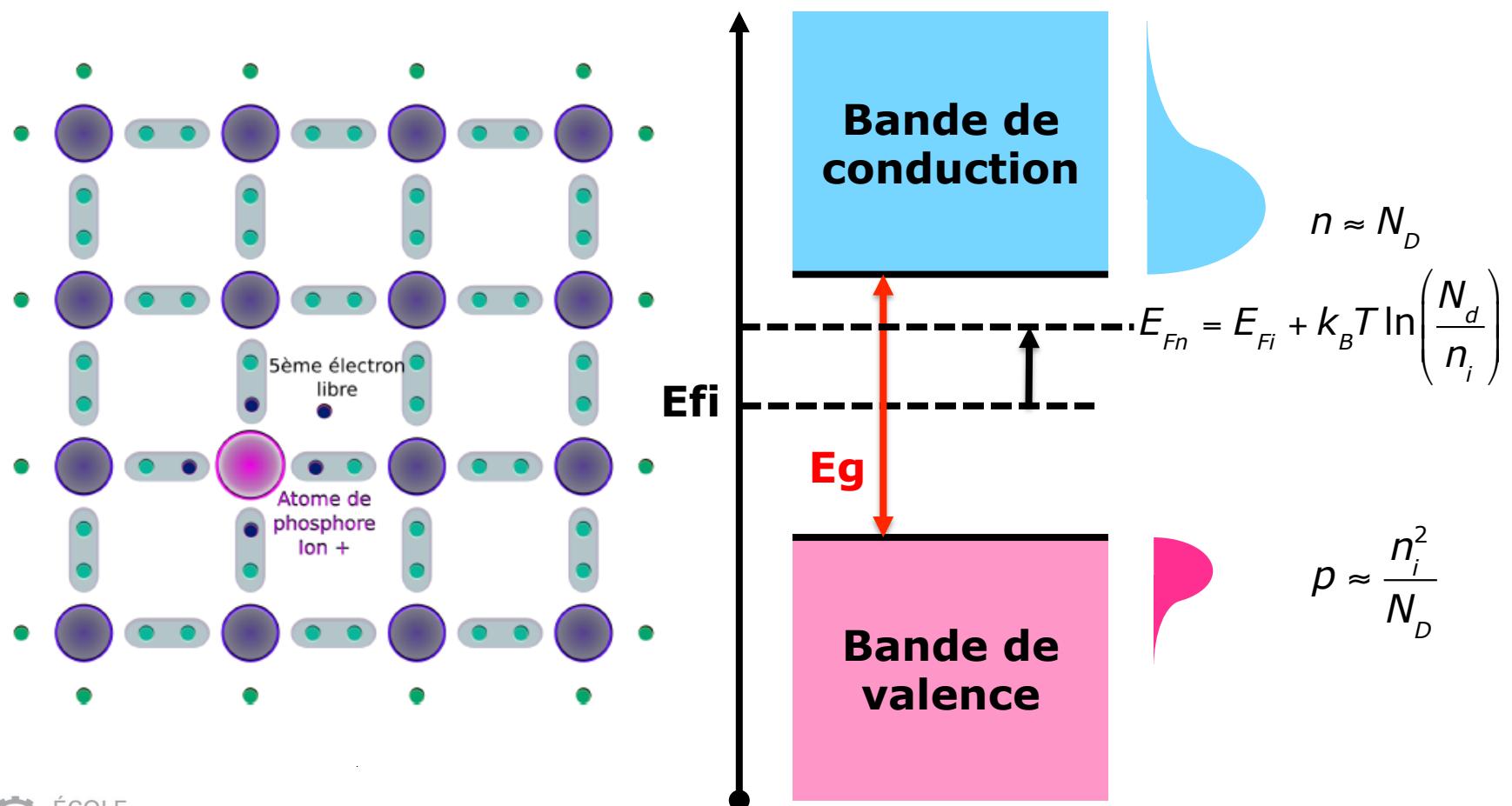
Séminconducteurs extrinsèques

- Le silicium intrinsèque est rarement utilisé en tant que tel
- L'adjonction d'éléments étrangers par le biais de **dopage** (à raison de 10^{16} à 10^{18} atomes étrangers par cm^3) permet de changer significativement les propriétés de conduction tout en conservant les propriétés physiques et chimiques du silicium
- On parle alors de silicium extrinsèque dopé N (si on favorise les électrons) ou P (sinon favorise les trous)



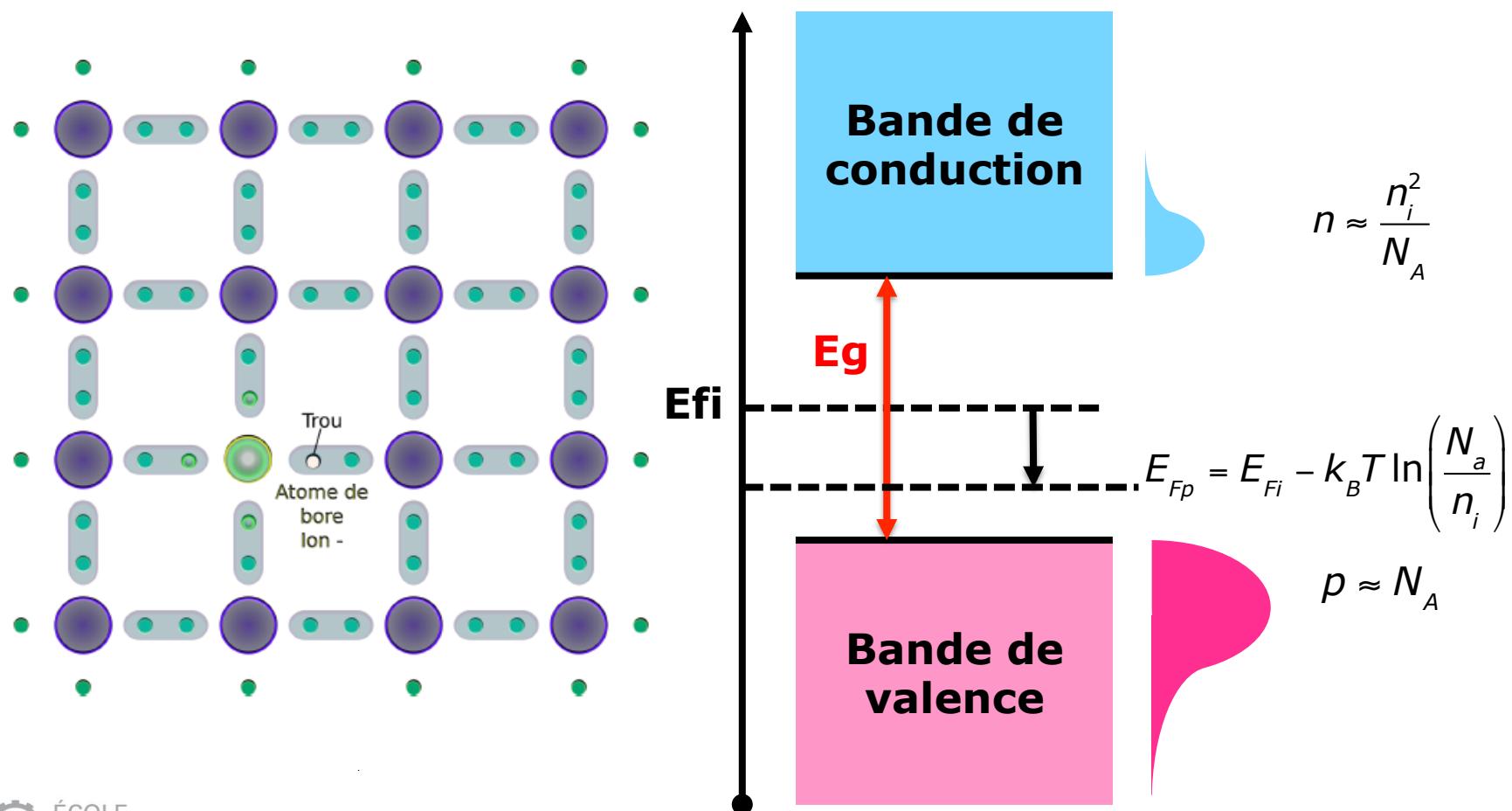
Silicium extrinsèque dopé N

- Substitution d'atome : Si par P (élément du groupe V du tableau périodique, 1 e⁻ de plus au dernier niveau électronique)



Silicium extrinsèque dopé P

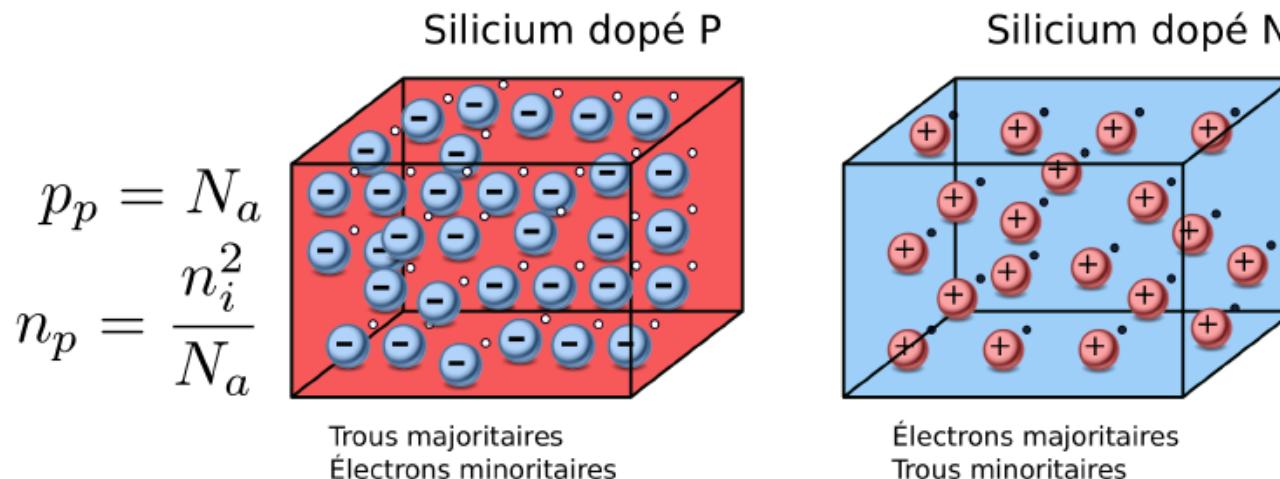
- Substitution d'atome : Si par B (élément du groupe III du tableau périodique, 1 e⁻ de moins au dernier niveau électronique)



La jonction PN

- Une jonction PN est un matériau semi-conducteur qui n'est pas dopé de manière uniforme, constitué d'une partie dopée P et d'une partie dopée N
- La jonction PN est à la base de tout composant actif (diode, transistor ...)

$$N_a > N_d$$



Pour résumer : quelques formules

• Formules générales :

- Loi d'action de masse :

$$p \cdot n = n_i^2 = N_c N_v e^{-E_g/kT}$$
$$n + N_a = p + N_d$$

et

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$$
$$p = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{kT}\right)$$

• SC intrinsèque

- pas d'impuretés →

$$p = n = n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-E_g/2kT}$$

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* k T}{h^2} \right)^{3/2}$$

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* k T}{h^2} \right)^{3/2}$$

• SC extrinsèque

- Dans la pratique, N_a , N_d et $N_a - N_d \gg n_i$
- SC de type N (e⁻ majoritaires, h⁺ minoritaires)

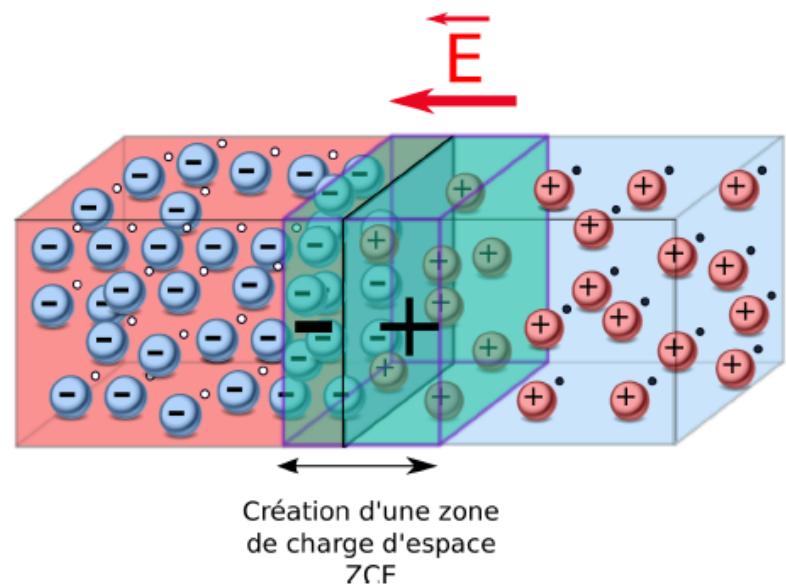
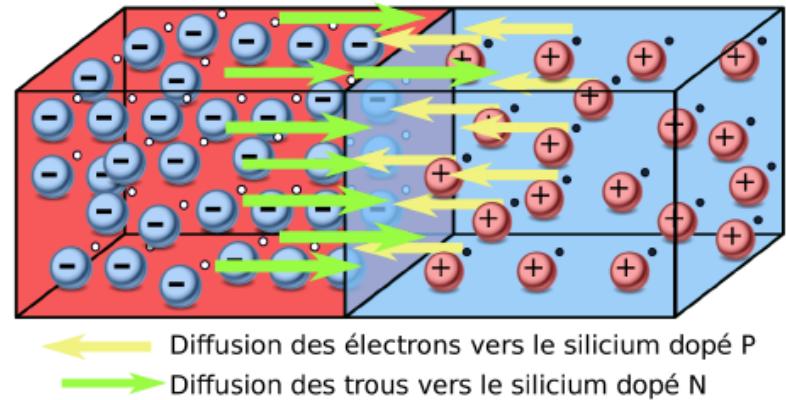
$$n \approx N_d - N_a \quad \text{et} \quad p \approx \frac{n_i^2}{(N_d - N_a)} \quad \text{Et } N_d \gg N_a$$

- SC de type P (h⁺ majoritaires, e⁻ minoritaires)

$$p \approx N_a - N_d \quad \text{et} \quad n \approx \frac{n_i^2}{(N_a - N_d)} \quad \text{Et } N_a \gg N_d$$

La jonction PN à l'équilibre

- Les porteurs majoritaires de chaque côté vont diffuser vers le côté adjacent et se recombiner
 - les électrons diffusent vers le silicium dopé P et se recombinent avec les trous présents
 - les trous diffusent vers le silicium dopé N et se recombinent avec les électrons présents



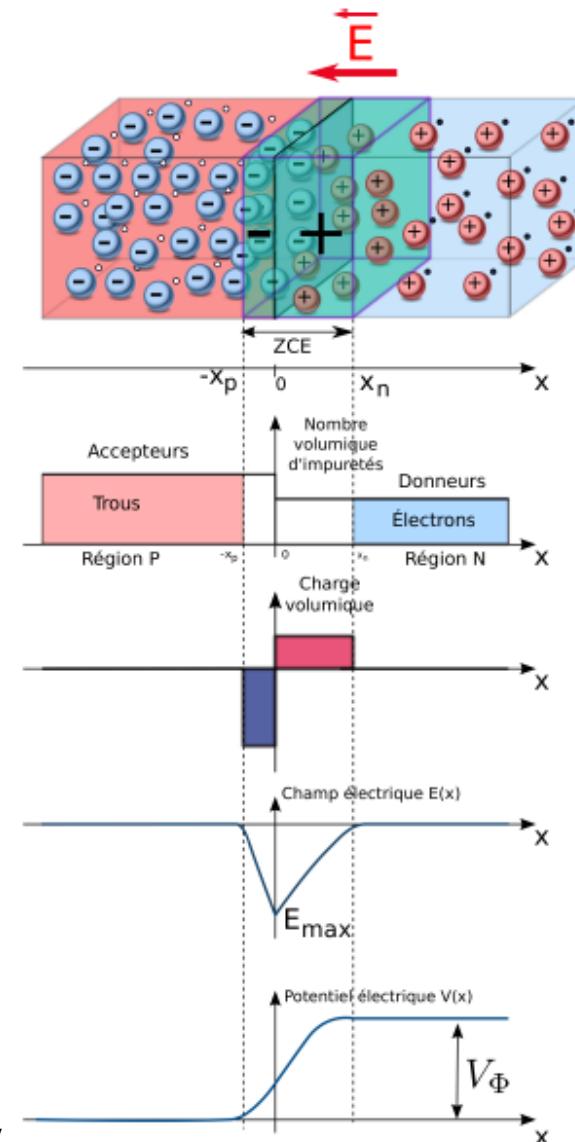
Zone de charge d'espace (ZCE)

- ZCE = zone de déplétion (sans trou ni électron) autour de la jonction
 - côté N de la zone est positif puisque les électrons sont partis
 - côté P de la zone est négatif puisque les trous ont été comblés

$$V_\Phi = \int_{-x_p}^{x_n} E(x) dx = U_T \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right)$$

$$U_T = kT/q$$

V_Φ = tension de seuil des diodes $\approx 0.7V$



ÉCOLE

CENTRALE LYON

Systèmes Electroniques

STI tc1

Méthodologie de calcul, jonction PN

- Égalité des charges de part et d'autre de la jonction

$$Q_n = Q_p = N_d X_n = N_a X_p$$

- Champ dans la ZCE : équation de Poisson

$$\frac{dE}{dx} = \frac{qN}{\epsilon_0 \epsilon_r} = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

N : concentration en porteurs
 ρ : densité de charges

- On intègre dans chaque région de la jonction :

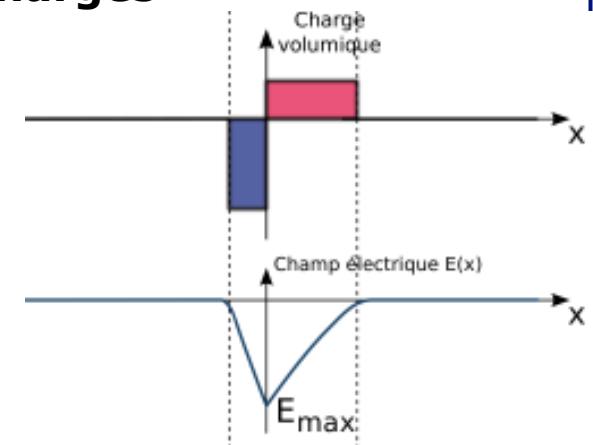
$$E(x) = \frac{q N_D}{\epsilon} (x - x_n) \quad \text{Côté n}$$

$$E(x) = -\frac{q N_A}{\epsilon} (x + x_p) \quad \text{Côté p}$$

$$W = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} V_d} \quad \text{si } N_A \gg N_D \text{ (par exemple)} : W \approx x_N \approx \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \frac{1}{N_D} V_d}$$

- En $x=0$ (jonction), continuité du champ :

$$\frac{q N_D x_n}{\epsilon} = \frac{q N_A x_p}{\epsilon} \quad \Rightarrow \quad |E_{MAX}| = q \frac{W}{\epsilon} \left(\frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right)$$

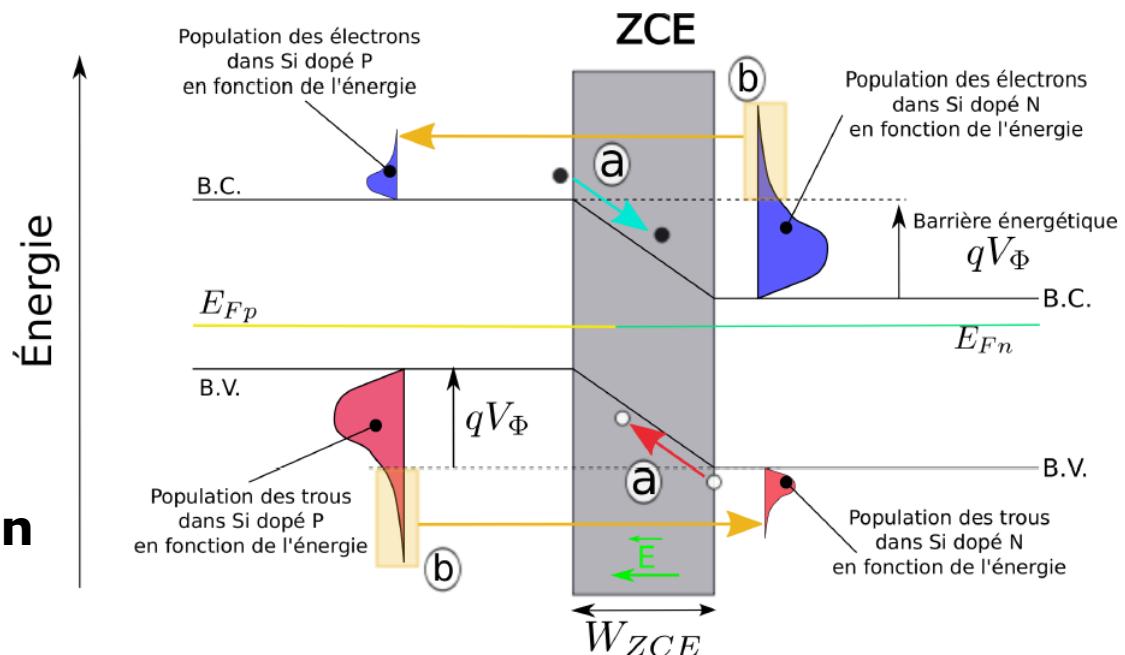


Jonction PN et diagramme des bandes

- Pour un cristal semi-conducteur, quel que soit son dopage P ou N, les niveaux de Fermi (E_{Fp} et E_{fn}) restent alignés dans le schéma de bandes si le cristal est
 - En court-circuit (pas de différence de potentiel)
 - À l'équilibre thermique

$$I_s = I_0 \exp\left(-\frac{V_\Phi}{U_T}\right)$$

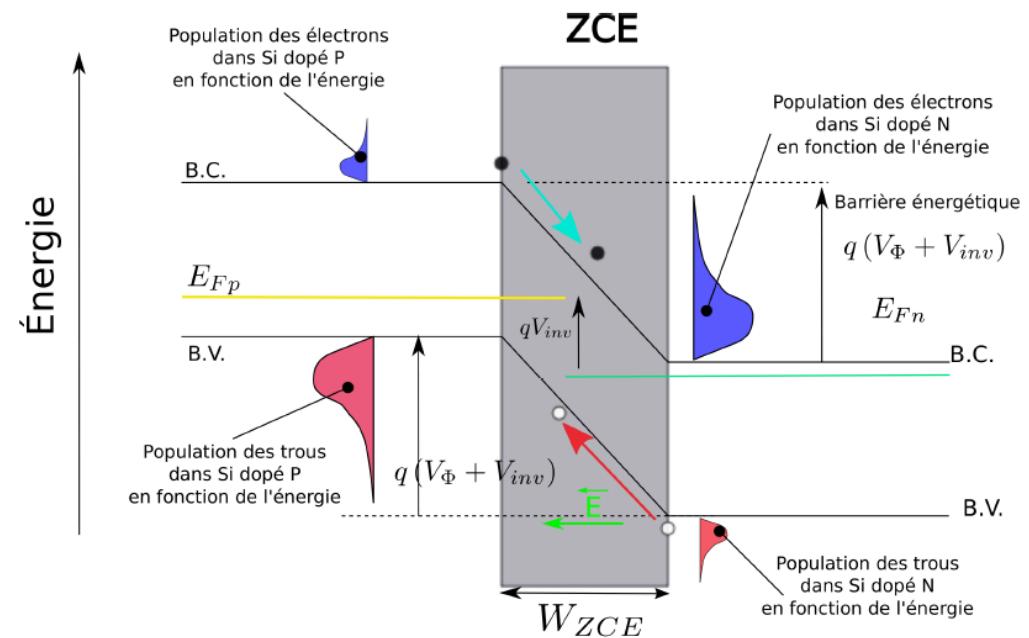
a : courant de conduction
b : courant de diffusion



Jonction PN polarisée en inverse

- $U = V_{inv} < 0$; V_{inv} s'ajoute à la barrière de potentiel qui devient égale à $V_{inv} + V$
- ZCE augmente ainsi que le champ électrique
- Le courant de diffusion des porteurs majoritaires devient quasiment nul

$$I_s = A \cdot T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

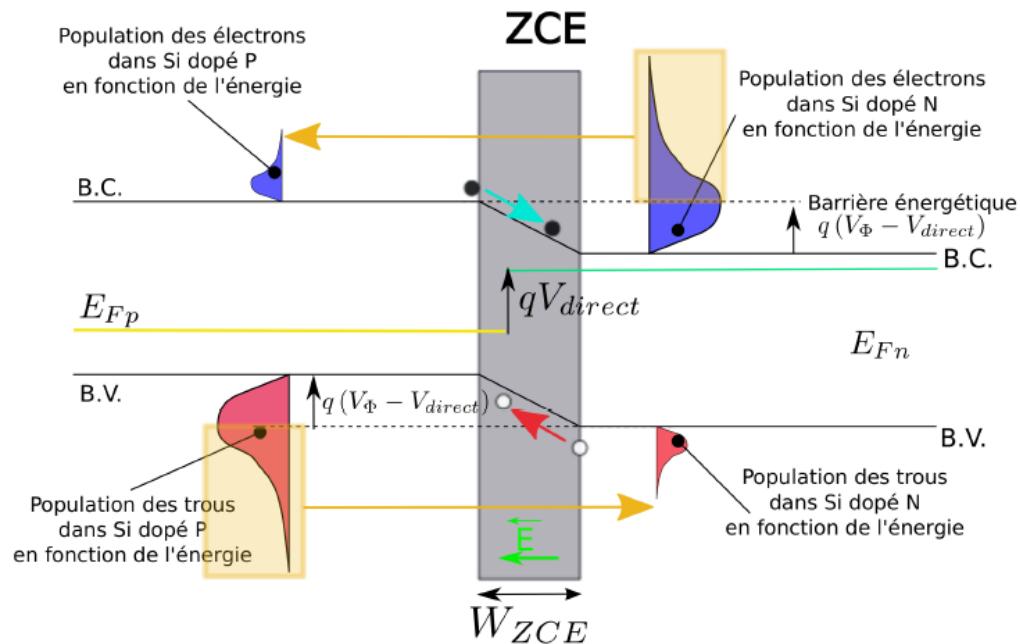


Jonction PN polarisée en direct

- $U = V_{\text{direct}} > 0$; V_{direct} affaiblit la barrière de potentiel
 - rendant plus aisée la diffusion des porteurs majoritaires
 - réduisant la ZCE et donc le champ électrique et les phénomènes de conduction

$$I_A = I_s \left[\exp\left(-\frac{V_{\text{direct}}}{U_T}\right) - 1 \right]$$

courant de diffusion prédominant, courant de conduction réduit



Application numérique

- Montrer que le courant I_s d'une jonction pn est proportionnel à n_i^2 . Quelles grandeurs interviennent sur sa valeur, pour une jonction donnée ?
 - I_s est un courant de minoritaires. Il est proportionnel à leur concentration, soit n_i^2/N_A côté P, et n_i^2/N_D côté N

$$n \approx \frac{n_i^2}{(N_a - N_d)} \text{ et } N_a \gg N_d \text{ dans P}$$

$$p \approx \frac{n_i^2}{(N_d - N_a)} \quad N_d \gg N_a \text{ dans N}$$

- Donc I_S est proportionnel à n_i^2 , qui varie uniquement avec T (terme exponentiel du gap, terme pré-exponentiel en T^3).

$$p.n = n_i^2 = N_c N_v e^{-E_g/kT}$$

- Il y a un facteur 2.6×10^6 pour n_i^2 entre Si et Ge, ce qui explique l'abandon du Ge pour l'électronique classique, malgré une meilleure mobilité ($3900 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ contre $1450 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ pour les électrons, $1900 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ contre $450 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ pour les trous)



ÉCOLE

CENTRALE LYON

Systèmes Electroniques

STI tc1