

Les semi-conducteurs : de l'Atome à la Puce



Benoît PIRO, MCF Université Paris -Diderot

Introduction

I. Structure des atomes, des molécules et des cristaux

- A. L'atome
- B. Le cristal
- C. Les électrons dans les molécules ou les cristaux

II. Le dopage

- A. Généralités
- B. Semi-conducteurs intrinsèques
- C. Semi-conducteurs extrinsèques. Dopages n et p

III. Le déplacement des charges

- A. Phénomènes de Conduction
- B. Phénomènes de Diffusion

IV. La jonction (jonction PN, diodes et transistors)

V. Le C-MOS et la puce. Intégration

VI. Quelques dispositifs récents

- A. Transistor à 1 électron
- B. Transistor à blocage de coulomb
- C. Electronique moléculaire et nanotubes de carbones

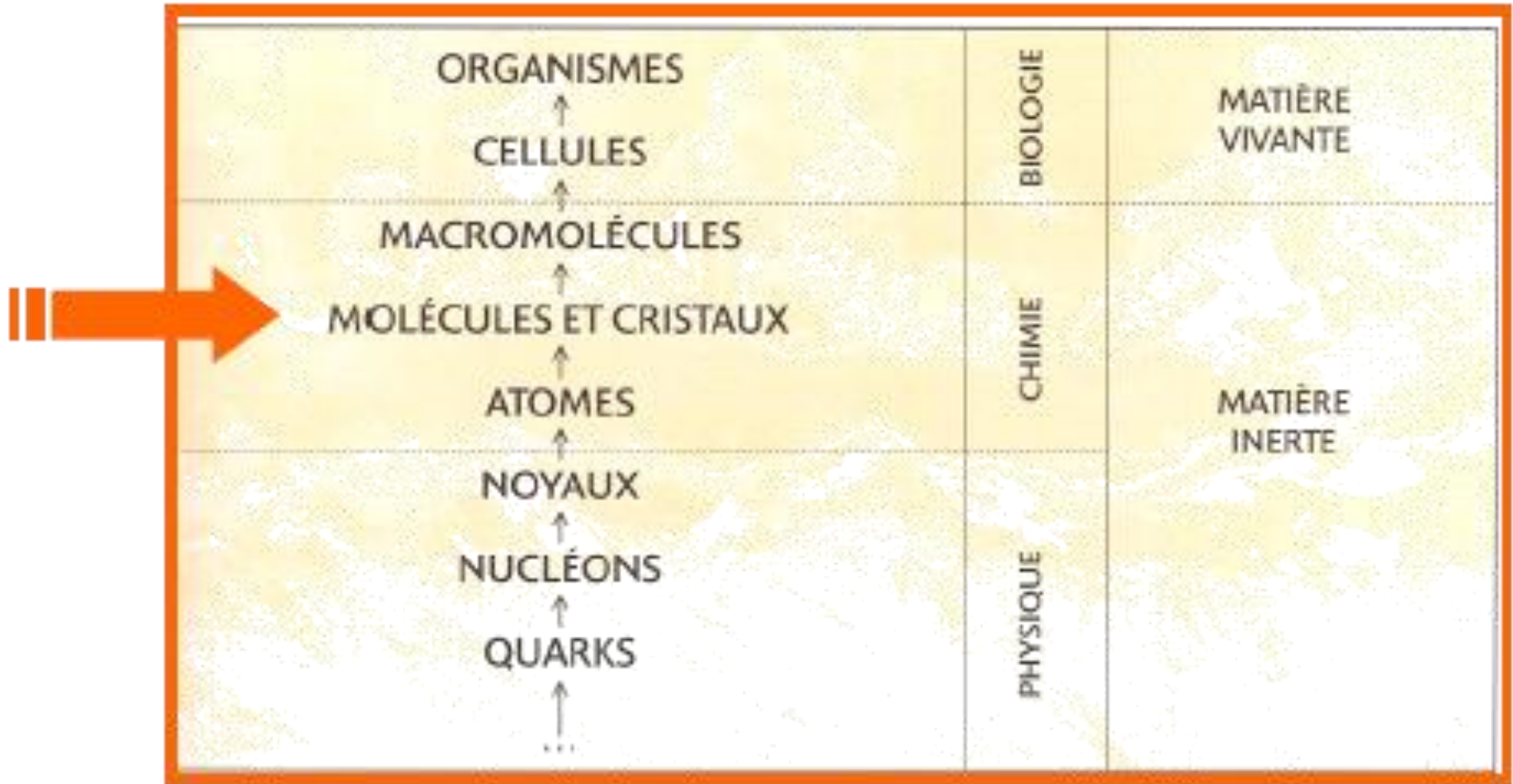


Déroulement et Modalités d'évaluation

- Tout au long du semestre : **12h de cours et 18h de TD**
 - **3h½ d'enseignement par semaine** par groupe
- **4h de TAI** . 1 compte-rendu écrit, et 1 soutenance
- Evaluation par **DE (devoir écrit)**, mi-décembre

Introduction

Dimensions des objets constituant la matière



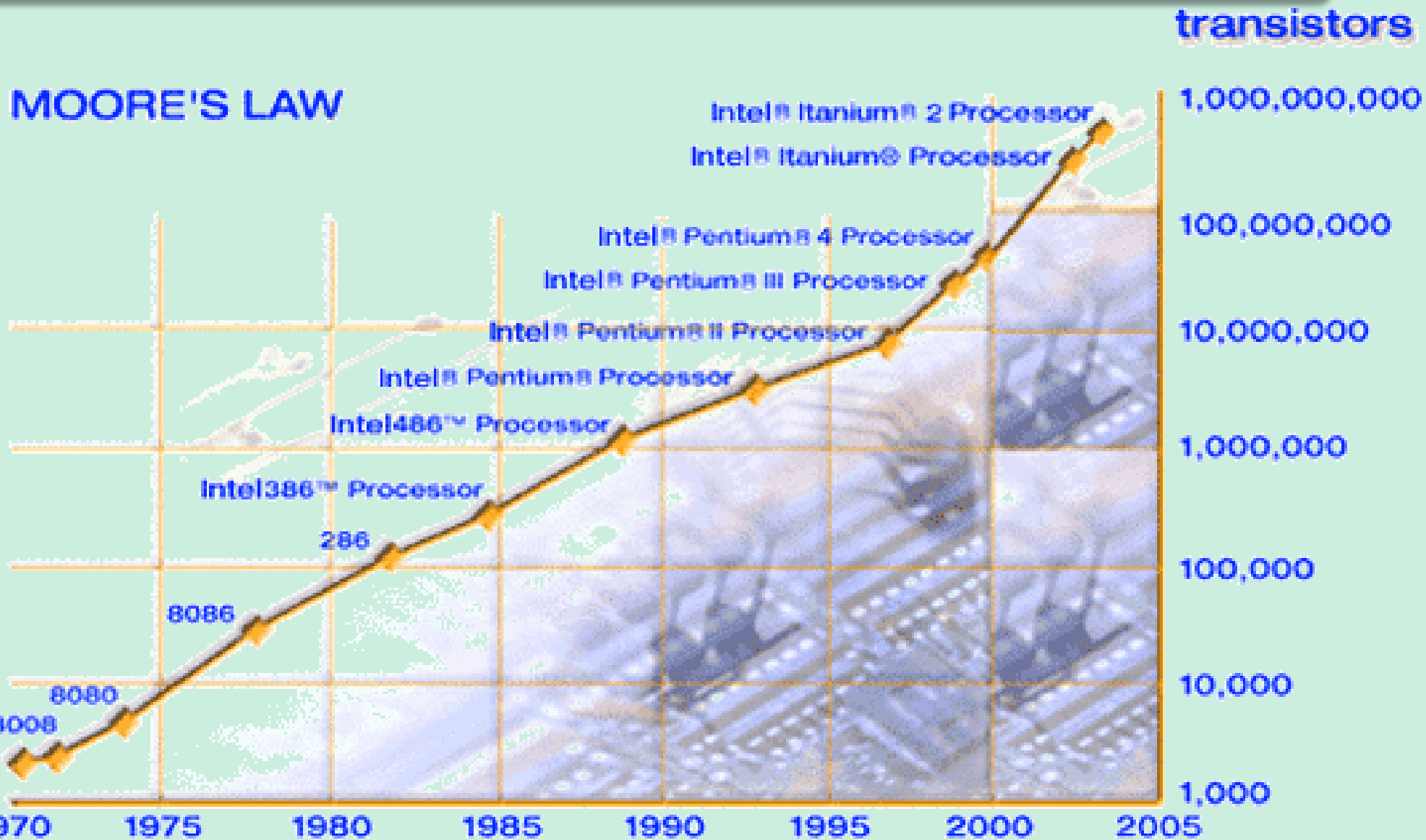
Niveau nucléaire	
Diamètre des noyaux atomiques	$2 \cdot 10^{-6}$ à $1 \cdot 10^{-5}$ nm
Niveau atomique et moléculaire	
Diamètre des atomes (sphère d'encombrement)	0,2 à 0,5 nm
Plus grande dimension de la molécule H_2	0,31 nm
Plus grande dimension de la molécule Cl_2	0,56 nm
Niveau cellulaire	
Plus grande dimension d'une bactérie	2 à 5 μm
Diamètre d'un globule rouge	7,5 μm

Où situez-vous un transistor, sur cette échelle ?

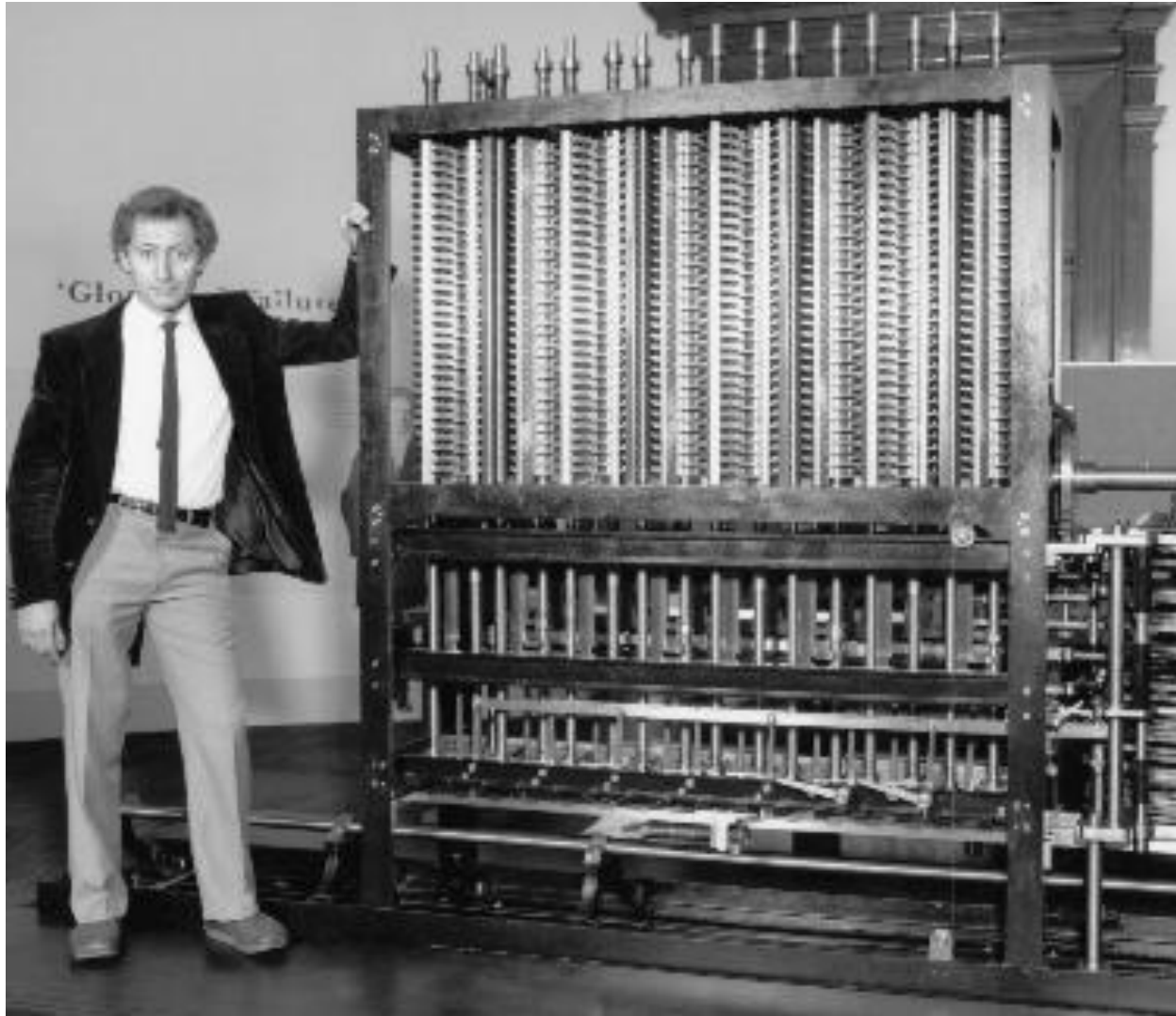
(article de presse sur Intel.com)

According to Moore's Law, « the number of transistors on a chip roughly doubles every two years »

Le nombre de transistor sur une puce double tous les 2 ans

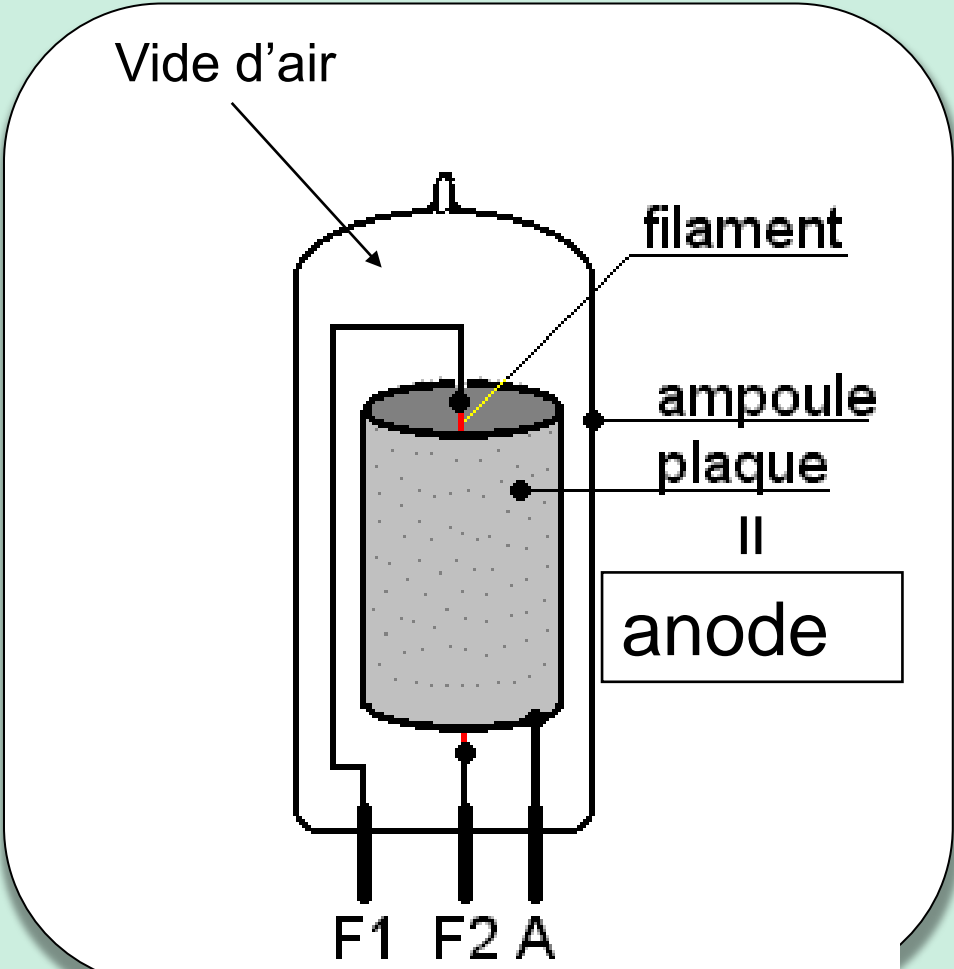


Historique : Evolution des dimensions des « calculateurs »

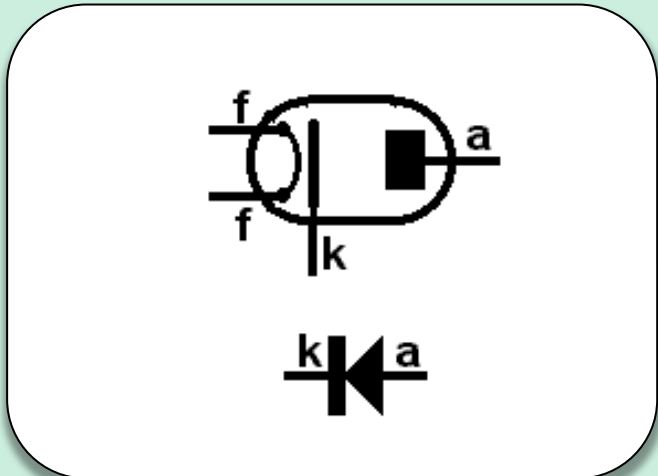


Machine (mécanique) différentielle de Babbage (1822)

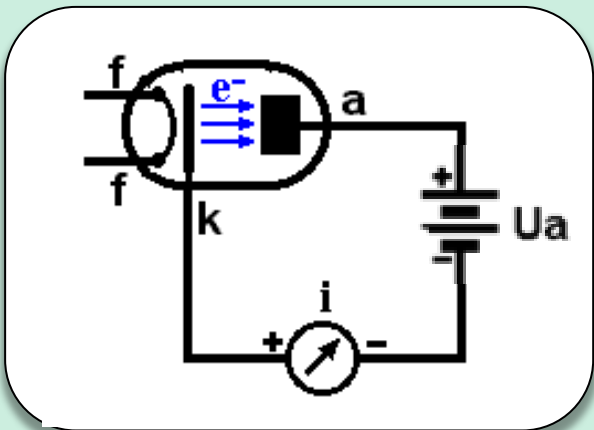
La diode à vide (« the valve ») de J.A. Fleming, 1904



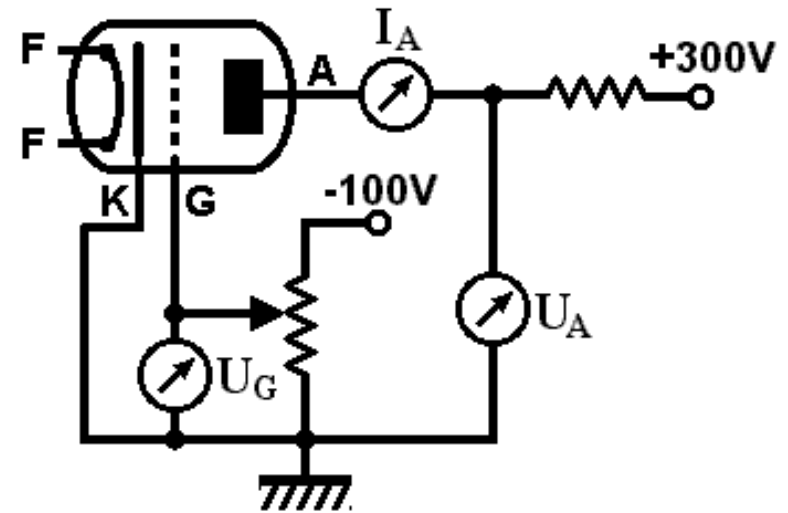
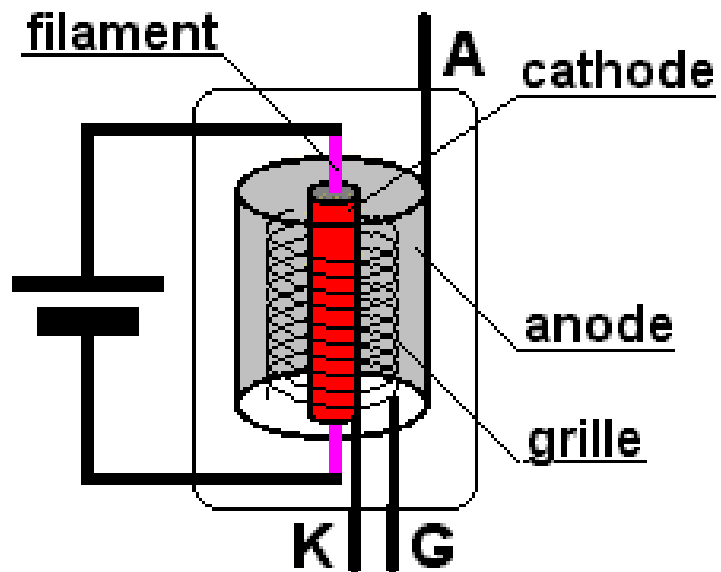
Ampoule à vide (effet Edison, 1883)
Effet thermoélectronique



L'effet thermique du filament (chauffe) permet un flux d'électrons, dans le vide, entre anode et cathode



Triode, Lee de Forest, 1907



« Lampe », 1915

On voit un peu pourquoi le terme de « grille » est utilisé.

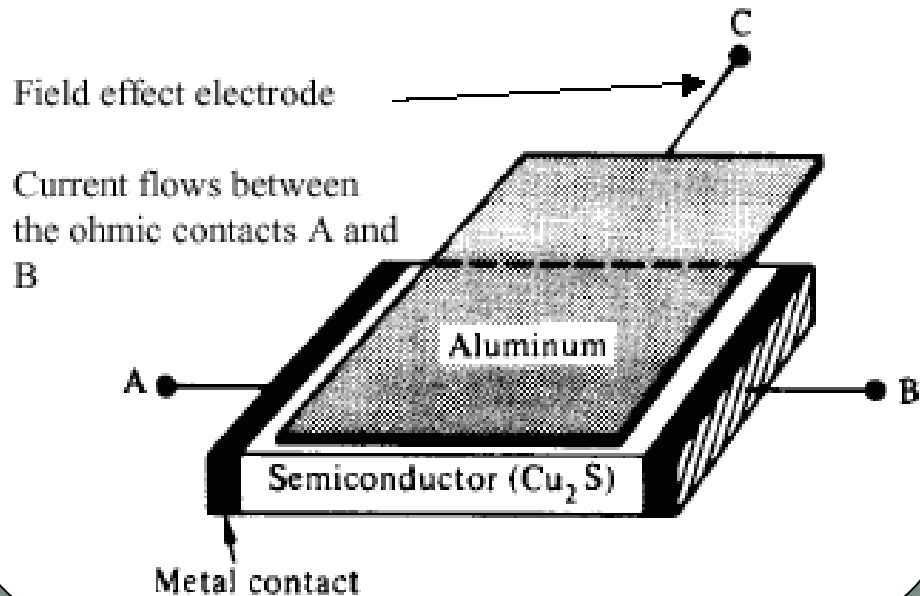
Le potentiel de « grille » contrôle le flux d'électrons entre cathode (K) et anode (A).

La « lampe » apparaît un peu + tard.



Transistor à effet de champ (FET), Lilienfeld 1930

Lilienfeld transistor (1930s)



Jan. 28, 1930.

J. E. LILIENFELD

1,745,175

METHOD AND APPARATUS FOR CONTROLLING ELECTRIC CURRENTS

Filed Oct. 8, 1926

Fig. 1.

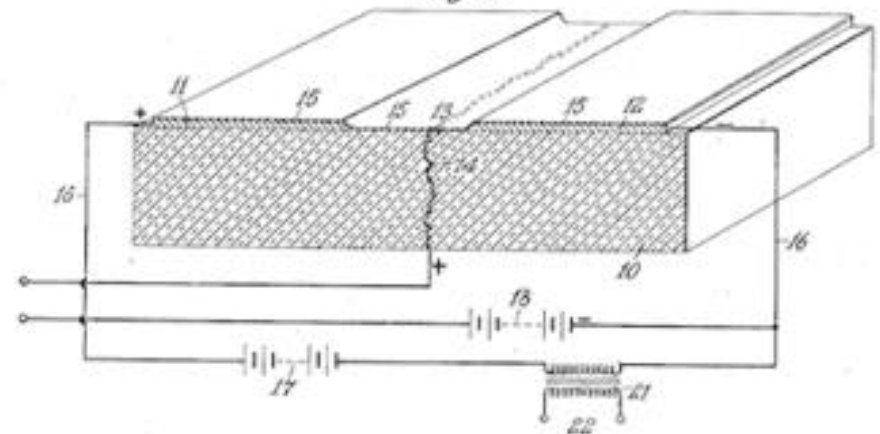
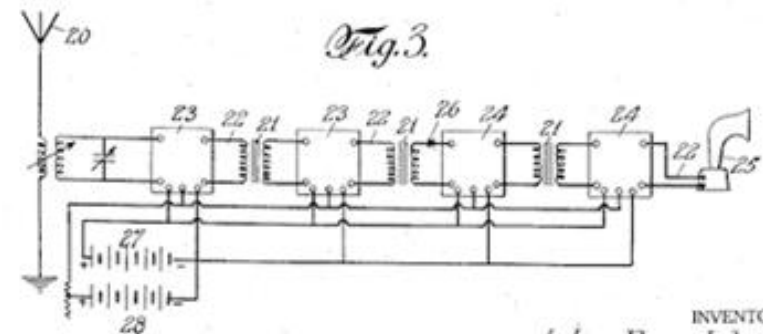


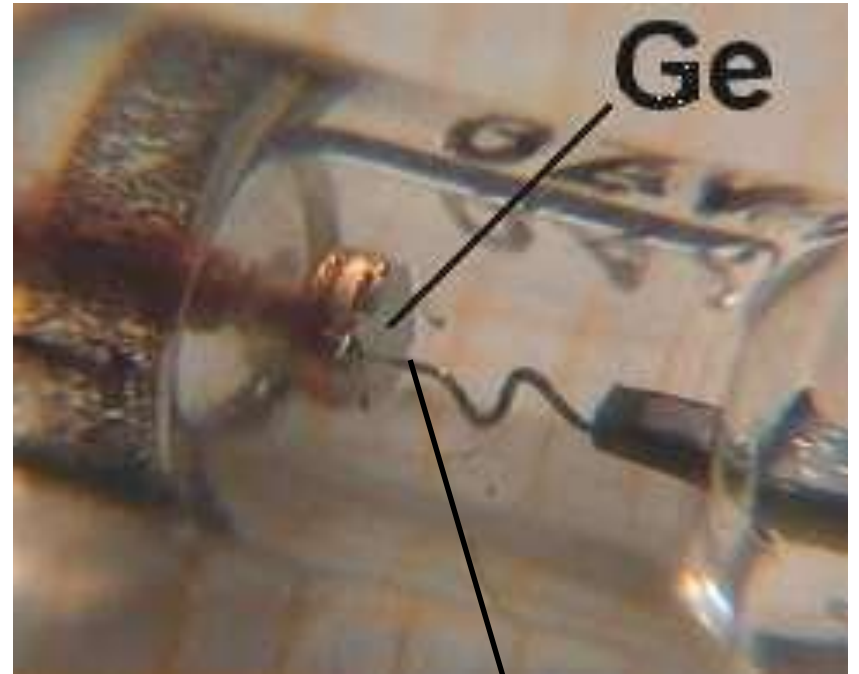
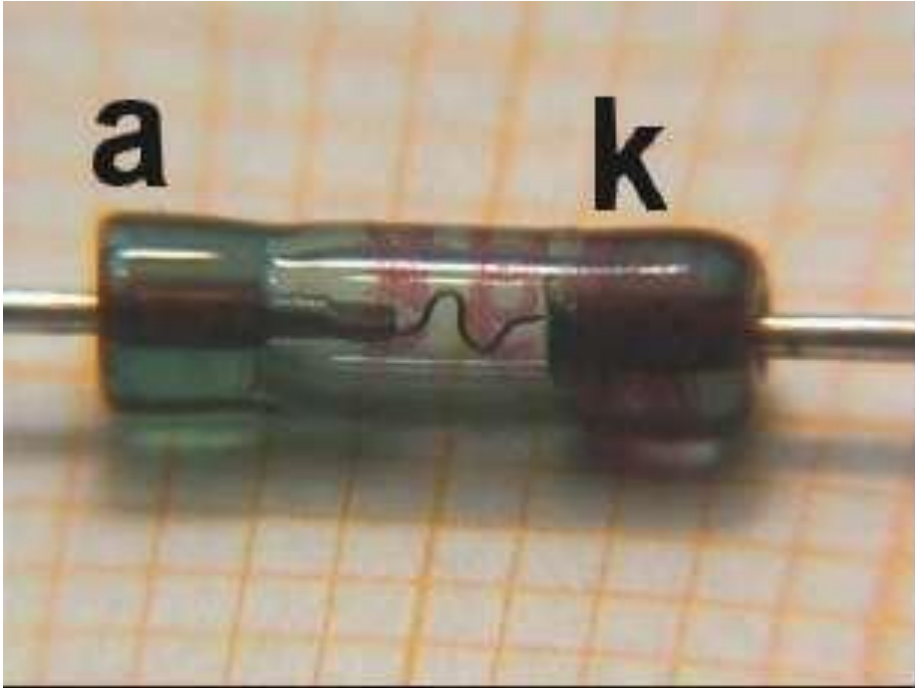
Fig. 3.



INVENTOR
Julius Edgar Lilienfeld
BY *Frederick Schmidt*
ATTORNEY

Découverte très en avance sur son temps !
Aujourd'hui, les FET sont toujours extrêmement
utilisés (microproc., clés USB par ex.)

Diode à pointe, 1942



Pointe en W ou Au :
anode

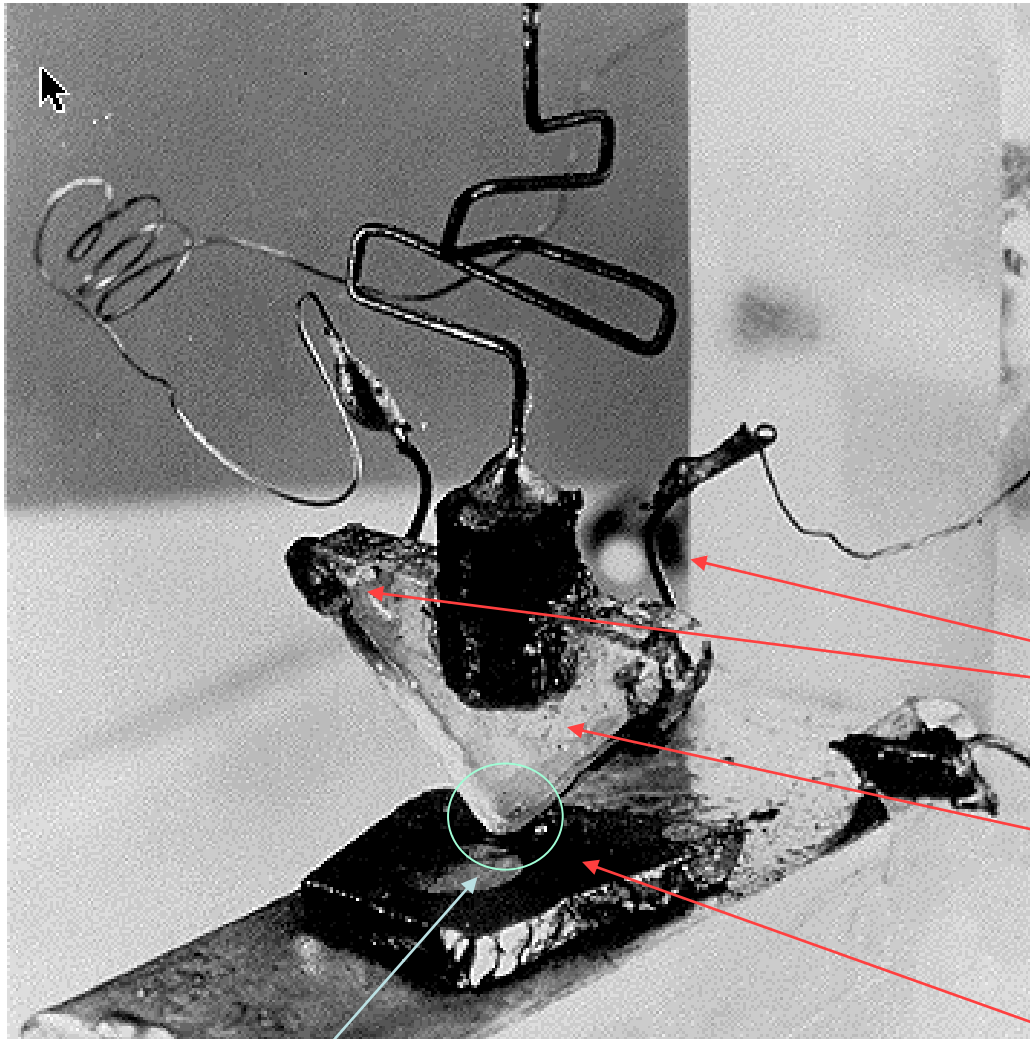
1943 : ASCC-Mark1



1947 : premier transistor



Par les américains John Bardeen, William Shocley et Walter Brattain, chercheurs de la compagnie Bell Téléphone. Ils ont reçu le Prix Nobel de Physique en 1956



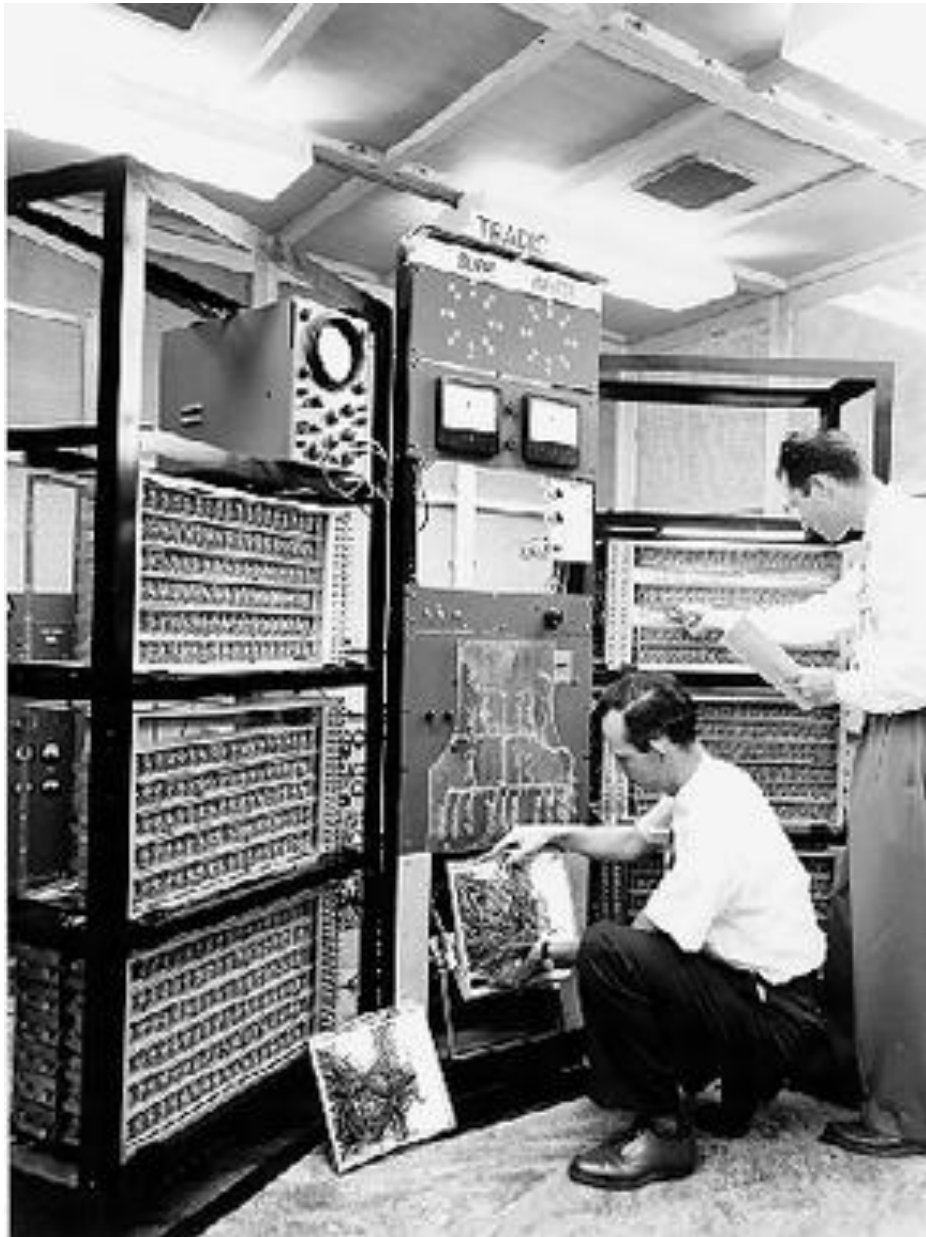
Contacts d'or

Isolant (plastique)

Cristal de germanium

Zone de contact

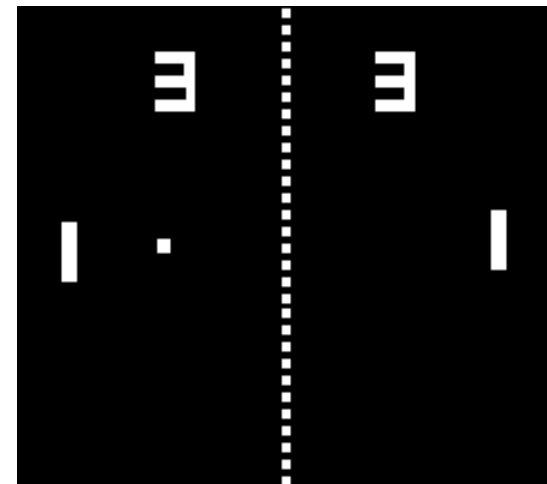
1955 : TRADIC



1959 : premier Circuit Intégré



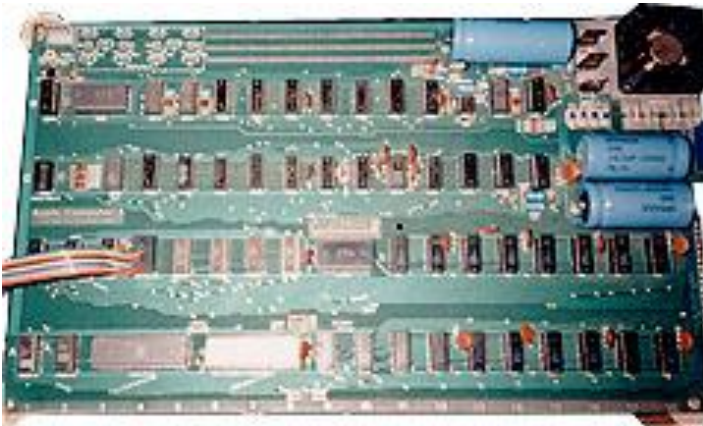
1972 : premier jeu
d'arcade, PONG



Apple I, 1976



Création du BASIC, 1977



8 kB de RAM...

Aujourd'hui (2007) :

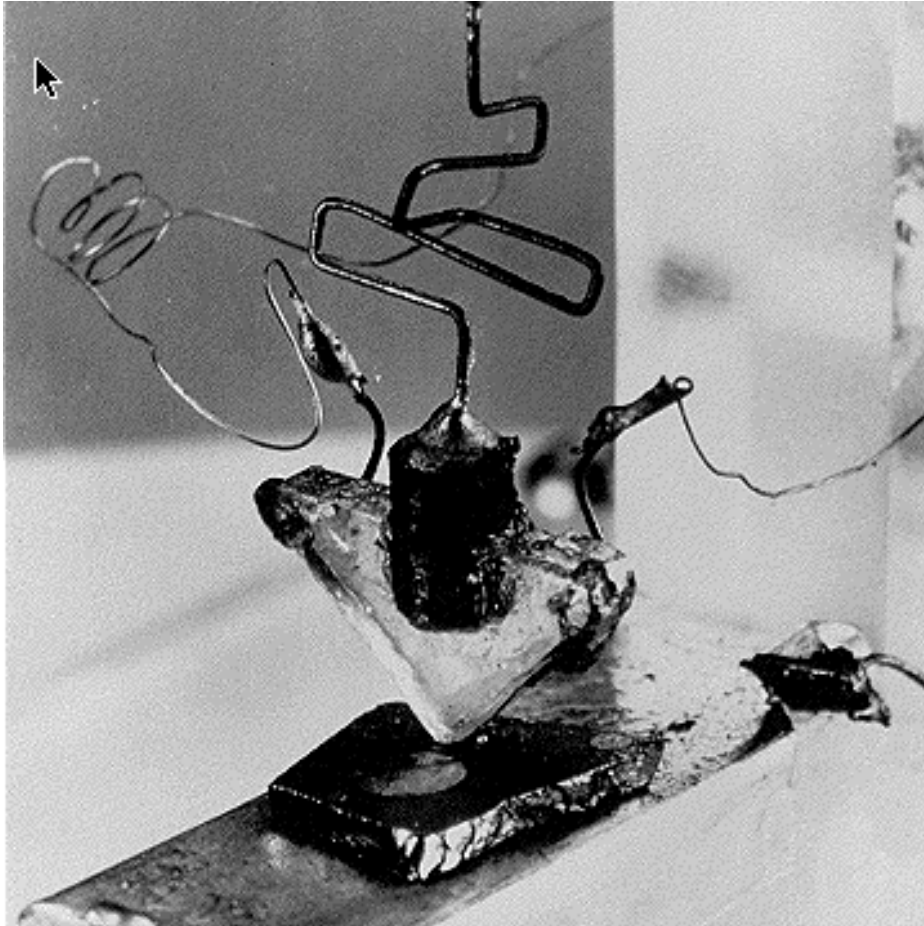


AMD – K6

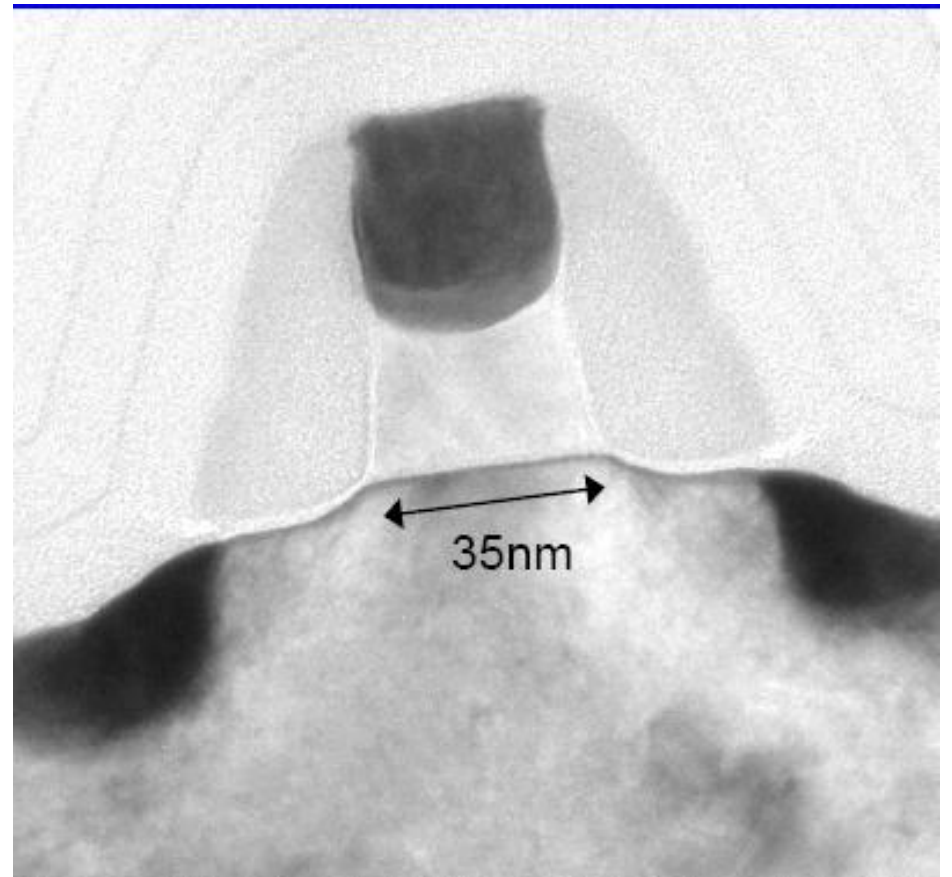


Intel – Core 2

Comment est-on passé d'un **transistor unique de plusieurs cm** en 1947, à **1 milliard de transistors** sur la même surface en 2007 ?



Transistor 1947



Transistor 2007

Intel has reached a significant milestone in developing next-generation chip manufacturing technology by building fully functional 70-megabit static random access memory (SRAM) chips with more than half a billion transistors. The new chips were manufactured using the world's most advanced 65-nanometer (nm) process technology. The achievement extends Intel's efforts to develop new manufacturing process technology every two years, in accordance with [Moore's Law](#).

The transistors in the new 65-nm (a nanometer is one-billionth of a meter) technology have gates (the switch that turns a transistor on and off) measuring 35 nm, approximately 30 percent smaller than the gate lengths on the earlier 90-nm technology. About 100 of these gates could fit inside the diameter of a human red blood cell.

Innovating with new materials, processes and device structures, said Sunlin Chou, senior vice president and general manager of Intel's Technology and Manufacturing Group. "Intel's 65-nm process technology has industry-leading density, performance and power reduction features that will enable future chips with increased capabilities and performance. Intel's 65-nm technology is on track for delivery in 2005 to extend the benefits of Moore's Law."

Vu sur « Intel.com »

As transistors get smaller, more power and heat dissipation issues develop

Integrating power-saving features into the 65-nm process technology. These features are critical to delivering power-efficient computing and communications products in the future. Intel's leading [strained silicon](#) technology, first implemented in our 90-nm process technology, is further enhanced in the 65-nm technology. The second generation of Intel strained silicon increases transistor performance by 10 to 15 percent without increasing leakage. Conversely, these transistors can cut leakage by four times at constant performance compared to 90-nm transistors. As a result, the transistors on Intel's 65-nm process have improved performance without significant increases in leakage (greater electrical current leakage results in greater heat generation).

**Le transistor, dans cette échelle, se situe là !
(intermédiaire)**

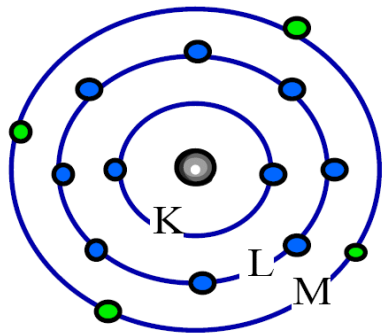
Niveau nucléaire Diamètre des noyaux atomiques	$2 \cdot 10^{-6}$ à $1 \cdot 10^{-5}$ nm
Niveau atomique et moléculaire Diamètre des atomes (sphère d'encombrement) Plus grande dimension de la molécule H_2 Plus grande dimension de la molécule Cl_2	0,2 à 0,5 nm 0,31 nm 0,56 nm
Niveau cellulaire Plus grande dimension d'une bactérie Diamètre d'un globule rouge	2 à 5 μm 7,5 μm

La démarche du cours :

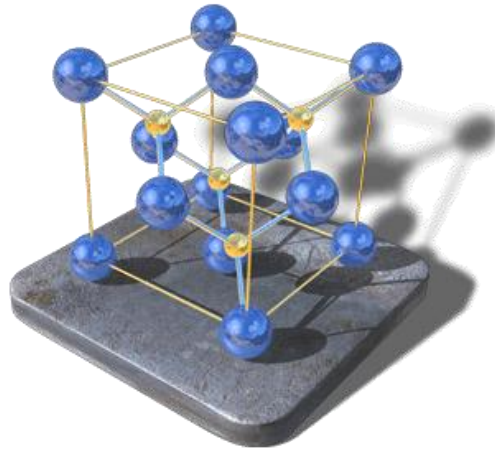


Approche « **bottom-up** »

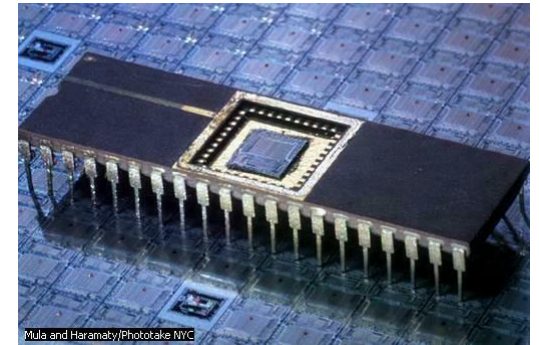
On va partir des constituants de la matière, pour arriver aux dispositifs



Atome de silicium



cristal de silicium



« puce »

C'est le contraire de « **top-down** »

(partir des propriétés macroscopiques pour le design des constituants à l'échelle atomique)

0. Unités, Dimensions, Notations

A. Unités & Dimensions

Grandeur	Nom de l'unité	Symbole de l'unité	Unité SI	Dimensions
intensité lumineuse	candela	cd	cd	
charge électrique	coulomb	C	A.s	I.T
angle	degré	°	rad	
température	degré Celsius	°C	K	
énergie	électron-volt	eV	kg.m ² .s ⁻²	M.L ² .T ⁻²
fréquence	hertz	Hz	s ⁻¹	T ⁻¹
énergie	joule	J	kg.m ² .s ⁻²	M.L ² .T ⁻²
température	kelvin	K	K	
masse	kilogramme	kg	kg	M
volume	litre	L	m ³	L ³
longueur	mètre	m	m	L
force	newton	N	kg.m.s ⁻²	M.L.T ⁻²
champ magnétique	tesla	T	kg.s ⁻² .A ⁻¹	M.T ⁻² .I ⁻¹
temps	seconde	s	s	T
potentiel électrique	volt	V	kg.m ² .s ⁻³ .A ⁻¹	M.L ² .T ⁻³ .I ⁻¹
puissance	watt	W	kg.m ² .s ⁻³	M.L ² .T ⁻³

B. Notations en puissances

Puissance de dix négatives ou nulle		Préfixe	Puissance de dix positives ou nulle		Préfixe
$10^0 = 1$	-		$10^0 = 1$	-	
$10^{-1} = 0,1$	d (déci-)		$10^1 = 10$	da (déca-)	
$10^{-2} = 0,01$	c (centi-)		$10^2 = 100$	h (hecto-)	
$10^{-3} = 0,001$	m (milli-)		$10^3 = 1\ 000$	k (kilo-)	
$10^{-4} = 0,000\ 1$	-		$10^4 = 10\ 000$	-	
$10^{-5} = 0,000\ 01$	-		$10^5 = 100\ 000$	-	
$10^{-6} = 0,000\ 001$	μ (micro-)		$10^6 = 1\ 000\ 000$	M (méga-)	
Pars pas de 10^{-3}			Pars pas de 10^3		
$10^{-3} = 0,001$	m (milli-)		$10^3 = 1\ 000$	k (kilo-)	
$10^{-6} = 0,000\ 001$	μ (micro-)		$10^6 = 1\ 000\ 000$	M (méga-)	
$10^{-9} = 0,000\ 000\ 001$	n (nano-)		$10^9 = 1\ 000\ 000\ 000$	G (giga-)	
$10^{-12} = 0,000\ 000\ 000\ 001$	p (pico-)		$10^{12} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000$	T (téra-)	

C. Chiffres significatifs

1. Quels sont les chiffres significatifs ?

a. Cas du 0

- Lorsque un 0 est le premier chiffre (donc placé à gauche), il **n'est pas significatif** :
 - 0,8 a **un** chiffre significatif
 - 0,0052 a **deux** chiffres significatifs
 - **deux** chiffres significatifs
- Lorsque le 0 est le dernier chiffre (donc placé à droite) , il **est significatif** :
 - 1,200 a **quatre** chiffres significatifs
 - 0,0520 a **trois** chiffres significatifs
- Le cas des nombres entiers tels : 400, 1000, 10 peut prêter à confusion.
 - Si le résultat d'une mesure donne **400** et qu'**un seul chiffre** est significatif alors le résultat final **doit** être écrit **$4 \cdot 10^2$** ou encore **$0,4 \cdot 10^3$**
 - Si **deux chiffres** sont significatifs alors le résultat final **doit** être écrit **$4,0 \cdot 10^2$** ou encore **$0,40 \cdot 10^3$**
 - Si **trois chiffres** sont significatifs alors le résultat final **doit** être écrit **$4,00 \cdot 10^2$** ou encore **$0,400 \cdot 10^3$** ou encore **400**
 - Si **quatre chiffres** sont significatifs alors le résultat final peut être écrit **$4,000 \cdot 10^2$** ou encore **$0,4000 \cdot 10^3$** ou encore **400,0**

2. Convention

On rencontre fréquemment dans les tables des valeurs telles que 12,43, avec quatre chiffres significatifs. Par convention il s'agit d'une valeur abrégée pour **$12,43 \pm 0,01$** .

3. Chiffres significatifs et opérations

Lors d'un calcul, les données sont parfois fournies avec des nombres de chiffres significatifs différents. **Le résultat du calcul doit alors être exprimé avec le nombre de chiffres significatifs de la donnée qui en possède le moins.**

a. Addition et soustraction

Après une addition ou une soustraction, le résultat ne doit **pas avoir plus de décimales que le nombre qui en comporte le moins.**

Exemple

Calculer le périmètre d'un rectangle de longueur $L = 143$ cm (donc **trois chiffres significatifs** et connu au centimètre près, pas de décimale) et de largeur $l = 5,7$ cm (donc deux chiffres significatifs et connu au dixième de centimètre près, une décimale).

$$P = 2 \times (5,7 + 143)$$

$$P = 2 \times 148,7$$

$$P = 297,4$$

La valeur du périmètre s'écrit donc $P = 297$ cm (**3 CS**).

b. Multiplication et division

Après une multiplication ou une division, le résultat ne doit pas avoir **plus de chiffres significatifs que la valeur la moins précise.**

I. Structure des atomes, des molécules et des cristaux

A. L'atome

Bloc <i>s</i>														Bloc <i>p</i>					
1	2													13	14	15	16	17	18
1 H																			2 He
3 Li	4 Be	Bloc <i>d</i>												5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar		
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr		
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe		
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn		
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Unq	105 Unp	106 Unh														
				58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tm	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
				90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lw		

1. Structure de l'atome.

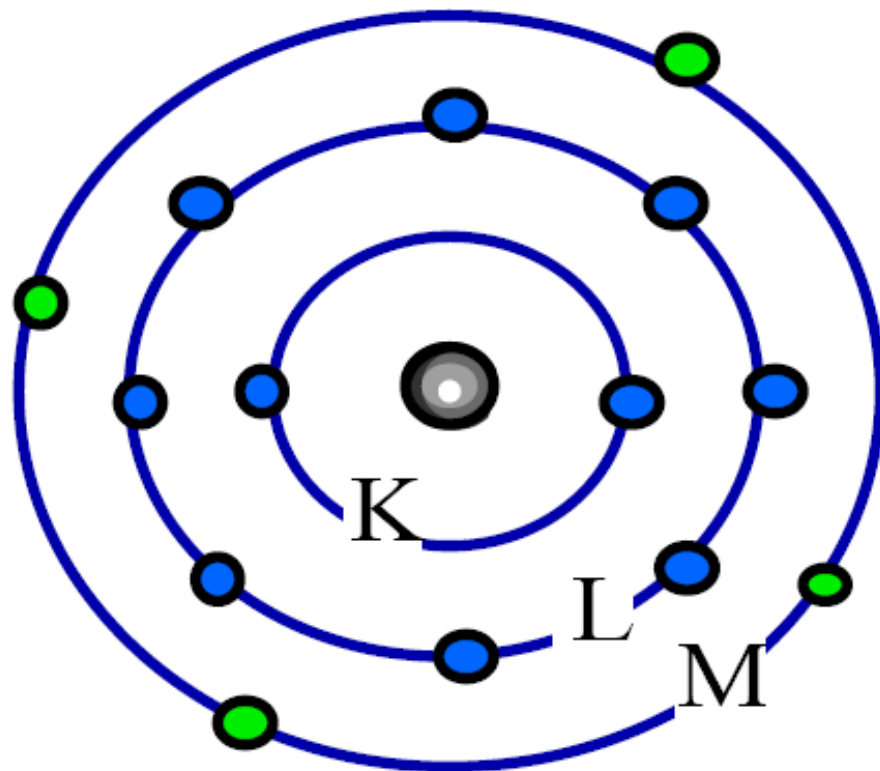
- Le noyau et les électrons.

- Les atomes sont constitués d'un noyau très dense, chargé positivement, entouré d'électrons (charge électrique négative).
- Le noyau est constitué de deux types de particules (protons et neutrons) appelées **nucléons**.

	Charge électrique	Masse
Noyau	Proton : $q = +1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1836 m_e$
	Neutron : 0	$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1839 m_e$
	Electron : $q = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$m_e = 9,1094 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

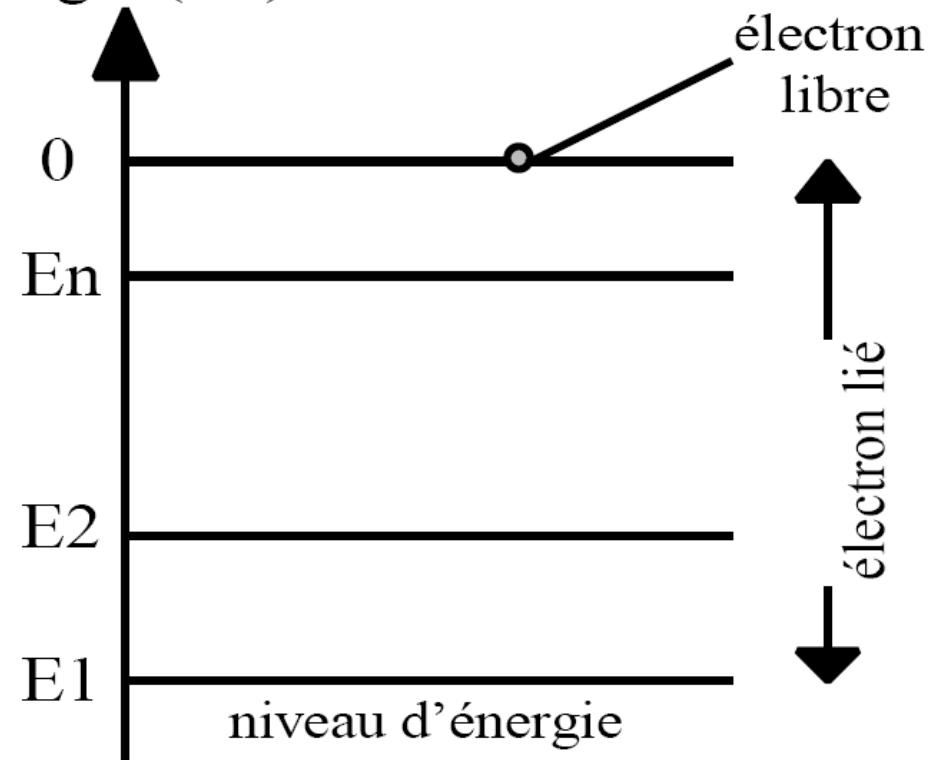
Exemple : atome de silicium. Modèle très simplifié

- Le noyau est très massif, et chargé +
- Les électrons sont chargés – et tournent autour



Atome de silicium

Energie (eV)



2. Modèle de Bohr. Cas de l'atome H.

2.1. Objectif.

Répartition des électrons autour du noyau - Détermination de l'énergie.

2.2. Energie dans un état stationnaire donné.

- L'électron décrit une orbite circulaire centrée sur le noyau immobile.
- L'électron est soumis à la force d'attraction coulombienne →

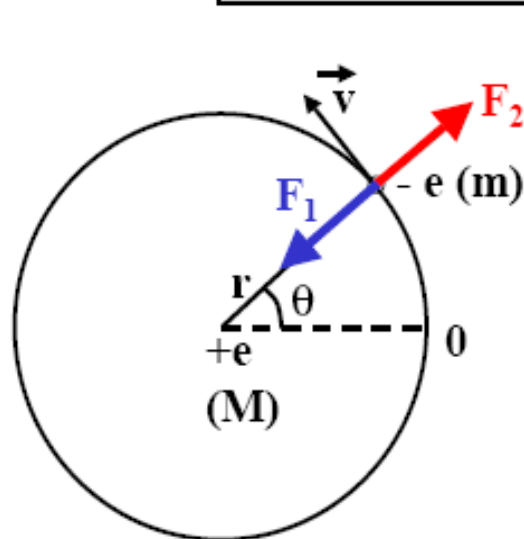
$$F_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (permittivité du vide) ; r = rayon de l'orbite

- L'électron est aussi soumis à la force centrifuge F_2 → $F_2 = m a = mv^2 / r$

- A l'équilibre : $F_1 = F_2$ → $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$ → $r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mv^2}$ (1)

Energie totale = Energie potentielle + Energie cinétique



Energie potentielle : $E_p = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$

Energie cinétique : $E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \right)$

Energie totale : $E = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \right)$ (2) 5

2.3. Hypothèses de Bohr.

- 1) L'électron ne peut se situer que sur certaines orbites bien précises ou **permises**.
- 2) Lorsque l'électron absorbe ou émet de l'énergie, il change d'orbite ou **de niveau d'énergie**.

- Orbites permises \Leftrightarrow orbites stationnaires \Leftrightarrow $2 \pi r = n \lambda$ ($n = 1, 2, 3 \dots$)

- **Louis de Broglie** : A toute particule en mouvement (de masse m et de vitesse v) on associe une radiation de longueur d'onde : $\lambda = \frac{h}{mv}$ (3) (dualité onde-corpuscule)

$$\text{On a alors : } 2 \pi r = \frac{nh}{mv} ; \text{ soit } v = \frac{nh}{2 \pi m r}$$

En remplaçant v par sa valeur dans l'équation (1), on détermine :

- le rayon des orbites : $r_n = n^2 \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} \Rightarrow r_1 = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m} = 0,53 \text{ \AA}$

- l'énergie correspondante (2) : $E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{me^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} = -\frac{1}{n^2} \cdot K = -\frac{1}{n^2} \cdot 13,6 \text{ (eV)}$
 $K = \text{constante}$

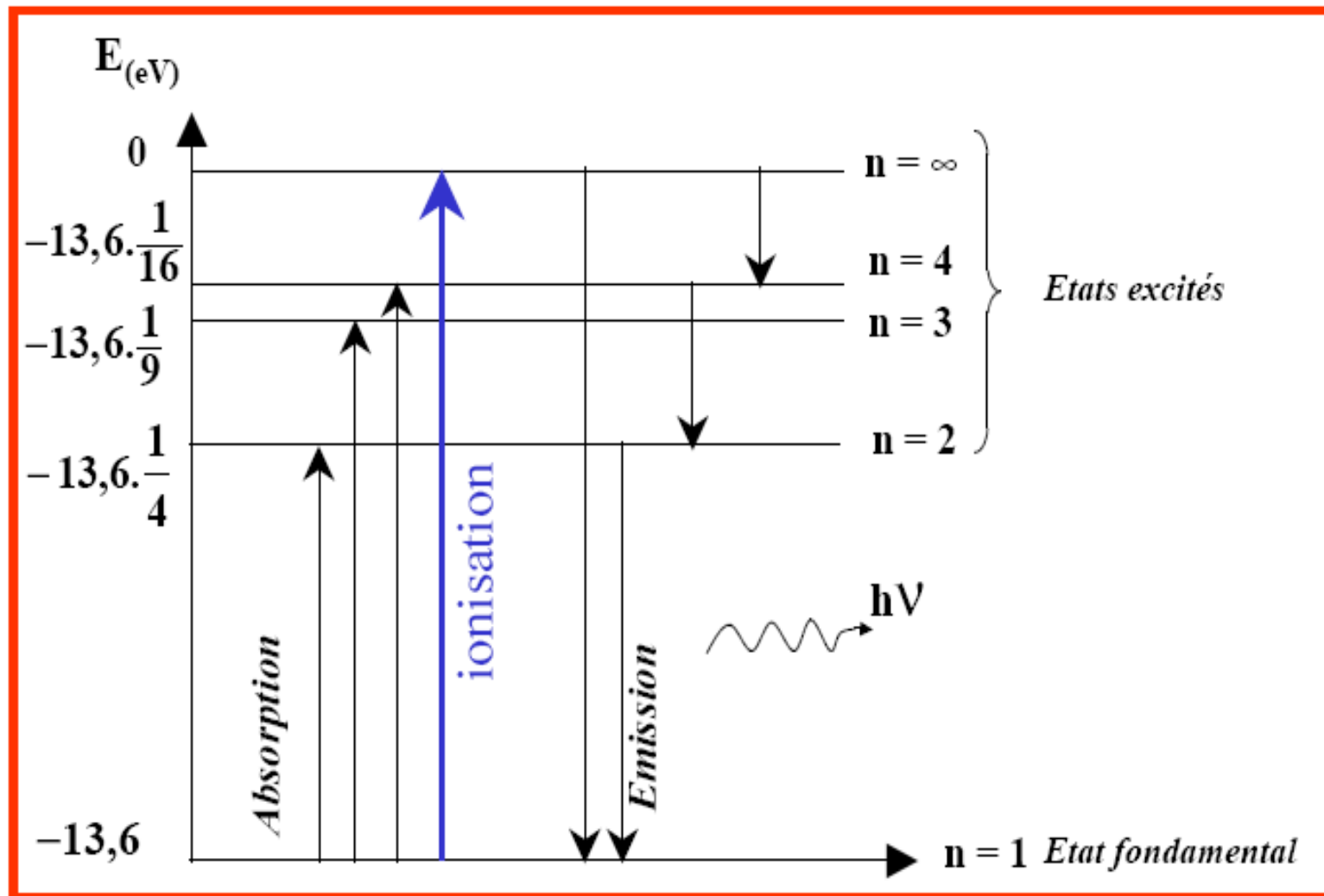
$$K = 2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J, soit en eV : } K = 13,6 \text{ eV (1 eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J)}$$

2.4. Transitions entre niveaux électroniques.

D'après la seconde hypothèse de Bohr, le passage d'un e^- d'une orbite définie par n_i à une orbite définie par n_f , se fait par un échange d'un quantum d'énergie :

$$|\Delta E| = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

ν : fréquence de la radiation; λ : longueur d'onde; c : vitesse de la lumière : $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$; h : constante de Planck : $h = 6,626.10^{-34} \text{ J.s}$



3. Structure électronique des atomes (nombres quantiques)

Présenter ici les 4 nombres quantiques de l'électron

4. Classification périodique des éléments

La « classification périodique » permet de retrouver facilement le nombre d'électrons dans la couche externe (**de valence**) des atomes.

Bloc s																		Bloc p					
1	2													13	14	15	16	17	18				
1 H																				2 He			
3	4	Bloc d										5	6	7	8	9	10						
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne						
11	12	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18						
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar						
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36						
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54						
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86						
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
87	88	89	104	105	106																		
Fr	Ra	Ac	Unq	Unp	Unh																		
				58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71						
				Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Td	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu						
				90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103						
				Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw						

Exercices en TD