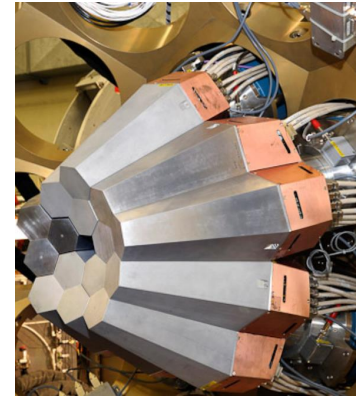
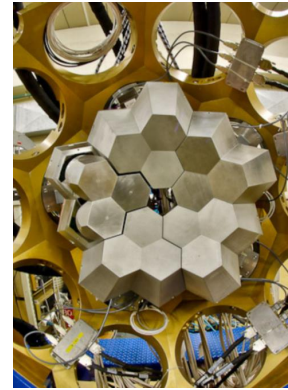
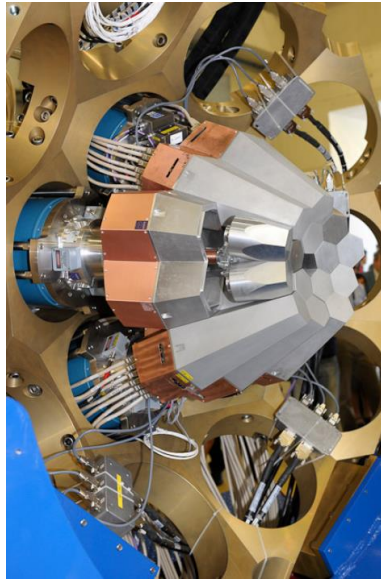


# Détecteurs à semi-conducteurs

Jean Peyré

*CSNSM (Centre de Sciences Nucléaires et de Sciences de la Matière)  
CNRS-IN2P3-Université Paris Sud (Paris-Saclay)*

91405 Orsay, France  
Tél. : +33 1 69 15 52 43  
Fax : +33 1 69 15 50 08  
<http://www.csnsm.in2p3.fr>



# Détecteurs à semi-conducteurs

---

## Sommaire

*I - Caractéristiques de base des semi-conducteurs*

*II - Les semi-conducteurs dopés*

*III - La jonction PN*

*IV - Comment fonctionne un détecteur à semi-conducteurs ?*

*V - Caractéristiques des jonctions PN*

*VI - Détecteurs à diode silicium*

*VII - Détecteurs germanium*

*VII\_a - Les détecteurs "planaires"*

*VII\_b - Les détecteurs "coaxiaux"*

*VII\_c - "Anti-compton"*

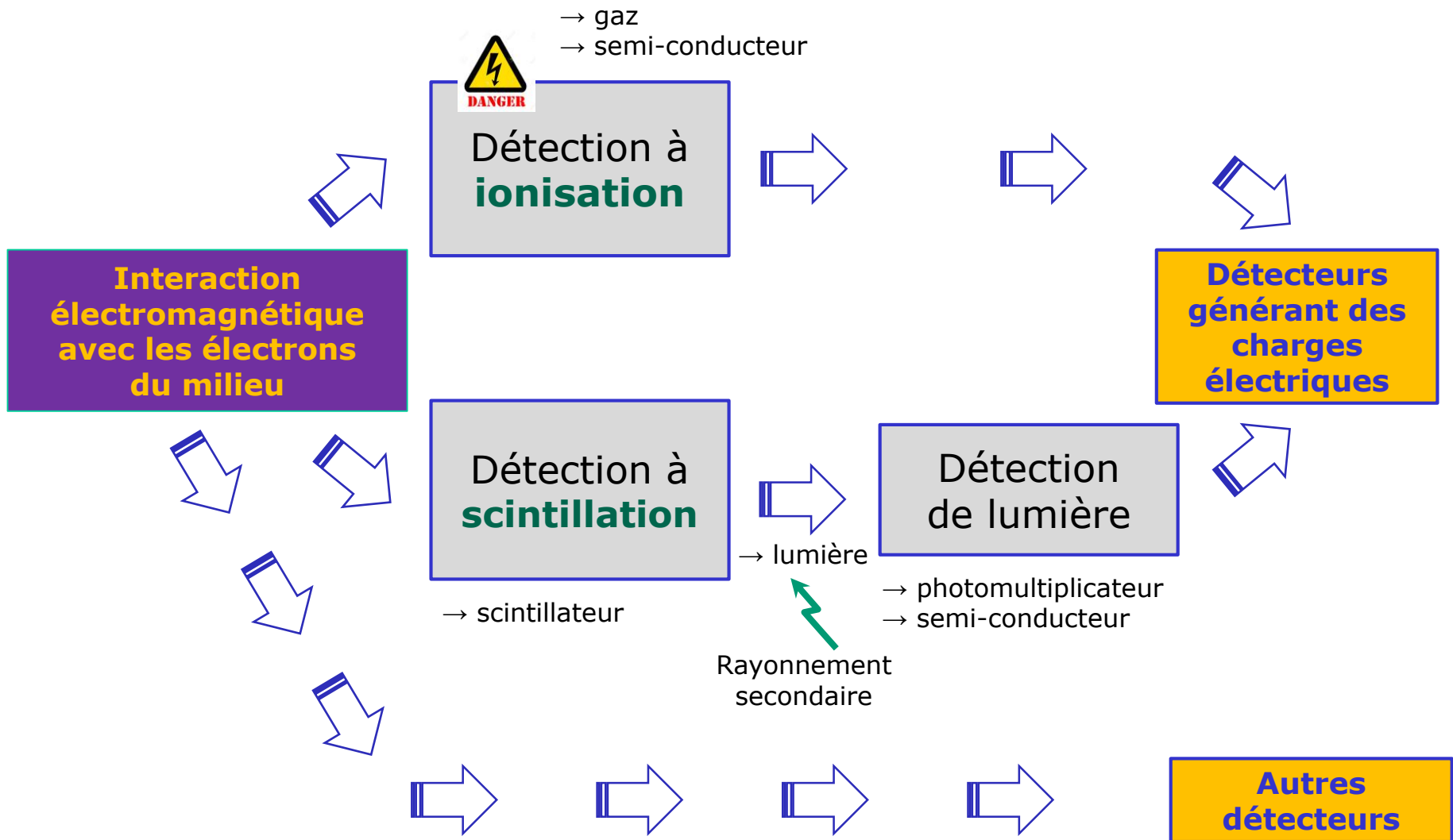
*VII\_d - "Le projet AGATA"*

*VIII - autres matériaux*

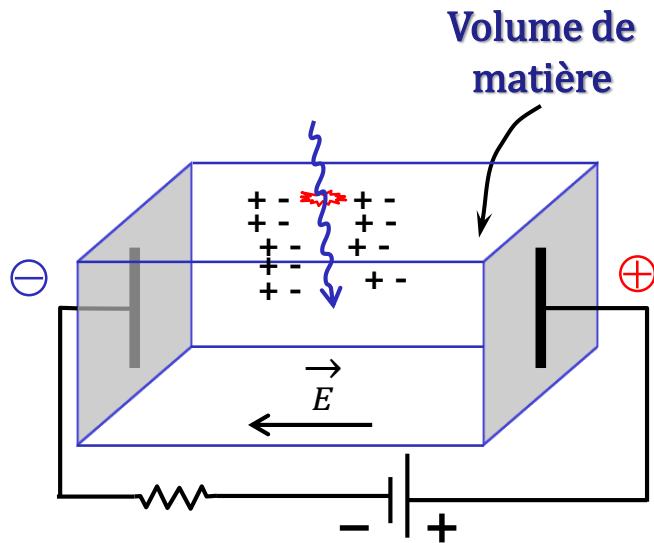
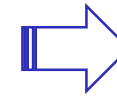
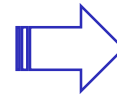


# I - Caractéristiques de base des semi-conducteurs

# Ionisation & scintillation



# Fonctionnement de la détection à ionisation



## Fonctionnement

- 1-Absorption du rayonnement
- 2-Conversion en charges par ionisation
- 3-Mouvement des charges grâce à la présence d'un champ électrique

# Table périodique des éléments

## PERIODIC TABLE Atomic Properties of the Elements

**NIST**  
National Institute of  
Standards and Technology  
U.S. Department of Commerce

**Frequently used fundamental physical constants**  
For the most accurate values of these and other constants, visit [physics.nist.gov/constants](http://physics.nist.gov/constants)  
1 second = 9 192 631 770 periods of radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of <sup>133</sup>Cs

speed of light in vacuum	<i>c</i>	299 792 458 m s <sup>-1</sup>	(exact)
Planck constant	<i>h</i>	6.6261 x 10 <sup>-34</sup> J s	( $\hbar = h/2\pi$ )
elementary charge	<i>e</i>	1.6022 x 10 <sup>-19</sup> C	
electron mass	<i>m<sub>e</sub></i>	9.1094 x 10 <sup>-31</sup> kg	
	<i>m<sub>e</sub>c<sup>2</sup></i>	0.5110 MeV	
proton mass	<i>m<sub>p</sub></i>	1.6726 x 10 <sup>-27</sup> kg	
fine-structure constant	<i>α</i>	1/137.036	
Rydberg constant	<i>R<sub>∞</sub></i>	10 973 732 m <sup>-1</sup>	
	<i>R<sub>∞</sub>c</i>	3,289 842 x 10 <sup>15</sup> Hz	
	<i>R<sub>∞</sub>hc</i>	13.6057 eV	
Boltzmann constant	<i>k</i>	1.3807 x 10 <sup>-23</sup> J K <sup>-1</sup>	

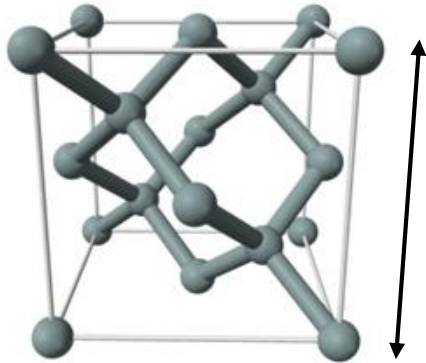
- Solids
- Liquids
- Gases
- Artificially Prepared

Physcis Laboratory <a href="http://physics.nist.gov">physics.nist.gov</a>		Standard Reference Data <a href="http://www.nist.gov/srd">www.nist.gov/srd</a>			
13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIIIA
5 <b>B</b> Boron 10,811 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p 8.2980	6 <b>C</b> Carbon 12,0107 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> 11,2603	7 <b>N</b> Nitrogen 14,0067 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup> 14,5341	8 <b>O</b> Oxygen 15,9994 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup> 13,6181	9 <b>F</b> Fluorine 18,9984032 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup> 17,4228	10 <b>Ne</b> Neon 20,1797 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 21,5645
13 <b>Al</b> Aluminum 26,9815386 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p 5,9858	14 <b>Si</b> Silicon 28,0855 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup> 8,1517	15 <b>P</b> Phosphorus 30,973762 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup> 10,4867	16 <b>S</b> Sulfur 32,065 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup> 10,3600	17 <b>Cl</b> Chlorine 35,453 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup> 12,9676	18 <b>Ar</b> Argon 39,948 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup> 15,7596
31 <b>Ga</b> Gallium 69,723 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p 5,9993	32 <b>Ge</b> Germanium 72,64 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup> 7,8994	33 <b>As</b> Arsenic 74,92160 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup> 9,7886	34 <b>Se</b> Selenium 78,96 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup> 9,7524	35 <b>Br</b> Bromine 79,904 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup> 11,8138	36 <b>Kr</b> Krypton 83,798 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup> 13,9996
49 <b>In</b> Indium 114,818 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p 5,7864	50 <b>Sn</b> Tin 118,710 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup> 7,3439	51 <b>Sb</b> Antimony 121,760 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup> 8,6084	52 <b>Te</b> Tellurium 127,60 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>4</sup> 9,0096	53 <b>I</b> Iodine 126,90447 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>5</sup> 10,4513	54 <b>Xe</b> Xenon 131,293 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> 12,1298
81 <b>Tl</b> Thallium 204,3833 [Hg]6p 6,1082	82 <b>Pb</b> Lead 207,2 [Hg]6p <sup>2</sup> 7,4167	83 <b>Bi</b> Bismuth 208,98040 [Hg]6p <sup>3</sup> 7,2855	84 <b>Po</b> Polonium (209) [Hg]6p <sup>4</sup> 8,414	85 <b>At</b> Astatine (210) [Hg]6p <sup>5</sup>	86 <b>Rn</b> Radon (222) [Hg]6p <sup>6</sup> 10,7485
113 <b>Uut</b> Ununtrium (284)	114 <b>Uuq</b> Ununquadium (289)	115 <b>Uup</b> Ununpentium (288)	116 <b>Uuh</b> Ununhexium (293)	117 <b>Uus</b> Ununseptium (294)	118 <b>Uuo</b> Ununoctium (294)

Group	1 IA	2 IIA	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIII	9 VIII	10 VIII	11 IB	12 IIB
1	1 <b>H</b> Hydrogen 1,00794 1s 13,5984											
2	3 <b>Li</b> Lithium 6,941 1s <sup>2</sup> 2s 5,3917	4 <b>Be</b> Beryllium 9,012182 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 9,3227										
3	11 <b>Na</b> Sodium 22,98976928 [Ne]3s 5,1391	12 <b>Mg</b> Magnesium 24,3050 [Ne]3s <sup>2</sup> 7,6462										
4	19 <b>K</b> Potassium 39,0983 [Ar]4s 4,3407	20 <b>Ca</b> Calcium 40,078 [Ar]4s <sup>2</sup> 6,1132	21 <b>Sc</b> Scandium 44,955912 [Ar]3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup> 6,5615	22 <b>Ti</b> Titanium 47,867 [Ar]3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup> 6,8281	23 <b>V</b> Vanadium 50,9415 [Ar]3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup> 6,7462	24 <b>Cr</b> Chromium 51,9961 [Ar]3d <sup>5</sup> 4s 6,7665	25 <b>Mn</b> Manganese 54,938045 [Ar]3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup> 7,4340	26 <b>Fe</b> Iron 55,845 [Ar]3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup> 7,9024	27 <b>Co</b> Cobalt 58,933195 [Ar]3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup> 7,8810	28 <b>Ni</b> Nickel 58,6934 [Ar]3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup> 7,6399	29 <b>Cu</b> Copper 63,546 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s 7,7264	30 <b>Zn</b> Zinc 65,38 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 9,3942
5	37 <b>Rb</b> Rubidium 85,4678 [Kr]5s 4,1771	38 <b>Sr</b> Strontium 87,62 [Kr]5s <sup>2</sup> 5,6949	39 <b>Y</b> Yttrium 88,90585 [Kr]4d <sup>1</sup> 5s <sup>2</sup> 6,2173	40 <b>Zr</b> Zirconium 91,224 [Kr]4d <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup> 6,6339	41 <b>Nb</b> Niobium 92,90638 [Kr]4d <sup>4</sup> 5s 6,7589	42 <b>Mo</b> Molybdenum 95,96 [Kr]4d <sup>5</sup> 5s 7,0924	43 <b>Tc</b> Technetium (98) [Kr]4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup> 7,28	44 <b>Ru</b> Ruthenium 101,07 [Kr]4d <sup>7</sup> 5s 7,3605	45 <b>Rh</b> Rhodium 102,90550 [Kr]4d <sup>8</sup> 5s 7,4589	46 <b>Pd</b> Palladium 106,42 [Kr]4d <sup>10</sup> 7,5762	47 <b>Ag</b> Silver 107,8682 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s 8,3369	48 <b>Cd</b> Cadmium 112,411 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 8,9938
6	55 <b>Cs</b> Cesium 132,9054519 [Xe]6s 3,8939	56 <b>Ba</b> Barium 137,327 [Xe]6s <sup>2</sup> 5,2117		72 <b>Hf</b> Hafnium 178,49 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup> 6,8251	73 <b>Ta</b> Tantalum 180,94788 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup> 7,5496	74 <b>W</b> Tungsten 183,84 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup> 7,8640	75 <b>Re</b> Rhenium 186,207 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup> 7,8335	76 <b>Os</b> Osmium 190,23 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup> 8,4382	77 <b>Ir</b> Iridium 192,217 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup> 8,9670	78 <b>Pt</b> Platinum 195,084 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>9</sup> 6s 8,9588	79 <b>Au</b> Gold 196,966569 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s 9,2255	80 <b>Hg</b> Mercury 200,59 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 10,4375
7	87 <b>Fr</b> Francium (223) [Rn]7s 4,0727	88 <b>Ra</b> Radium (226) [Rn]7s <sup>2</sup> 5,2784		104 <b>Rf</b> Rutherfordium (261) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup> 6,07	105 <b>Db</b> Dubnium (268)	106 <b>Sg</b> Seaborgium (271)	107 <b>Bh</b> Bohrium (272)	108 <b>Hs</b> Hassium (277)	109 <b>Mt</b> Meitnerium (276)	110 <b>Ds</b> Darmstadtium (281)	111 <b>Rg</b> Roentgenium (280)	112 <b>Cn</b> Copernicium (285)

# Les semi-conducteurs

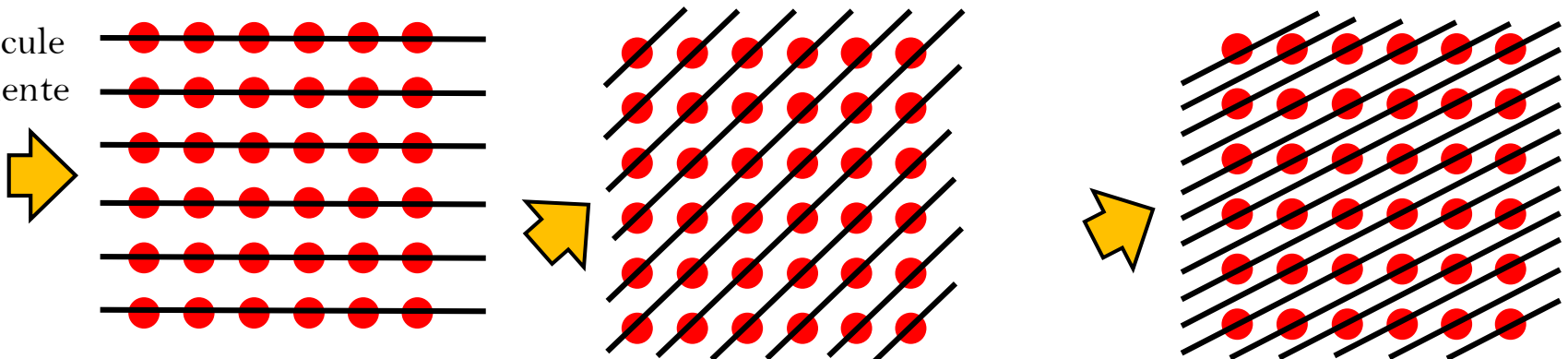
## Cristallographie du Silicium et du Germanium



$$a = 5.43\text{\AA} \text{ (Si)}$$
$$5.66\text{\AA} \text{ (Ge)}$$

*Le silicium a une structure de type diamant –cubique faces centrées (comme le germanium et la forme diamant du carbone)  
-> Impact sur les propriétés des détecteurs*

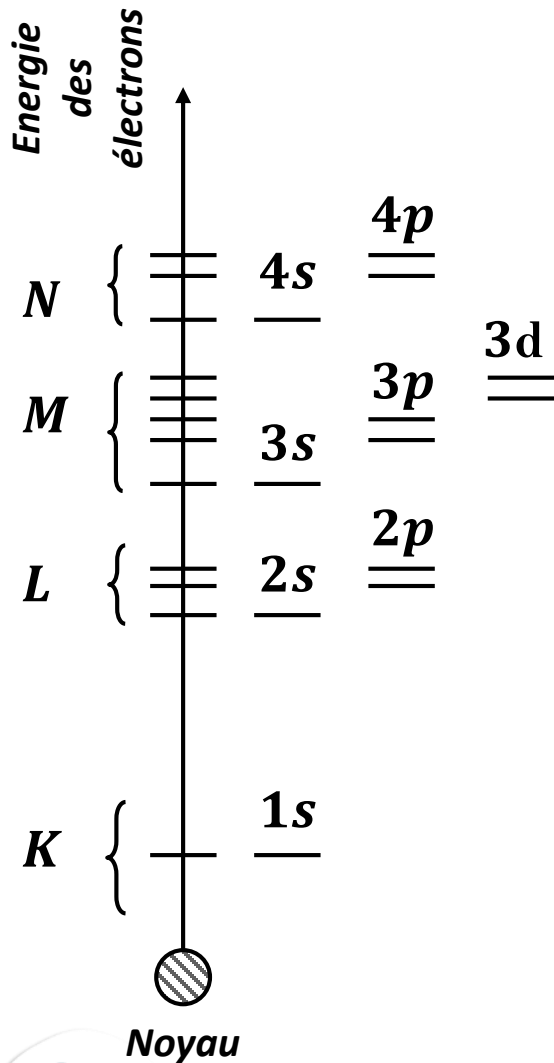
Orientation de la particule incidente



*Il faut donc connaître l'orientation des structures cristallines pour éviter le "channelling"*

# Energie d'un électron

## dans un atome isolé



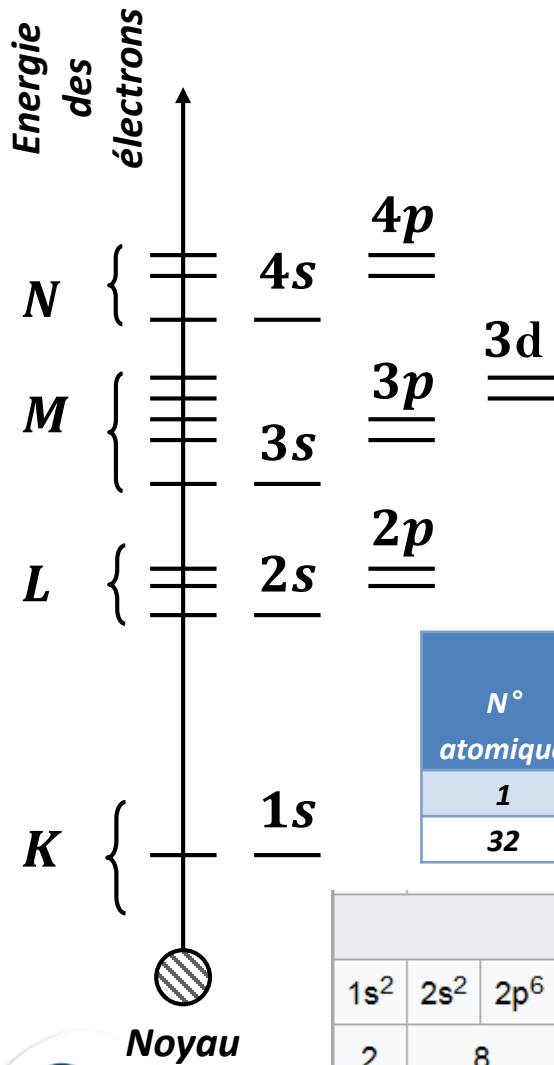
Seules certaines valeurs de l'énergie d'un électron sont possibles. A chaque électron, on associe :

- Nombre quantique principal (définit la couche) :  $n$
- Nombre quantique secondaire (définit la sous-couche) :  $l$
- Nombre quantique tertiaire (caractérise l'orientation spatiale d'une orbitale atomique) :  $m_l$
- Nombre magnétique de spin :  $m_s$

Les électrons de la couche extérieure sont les électrons de valence

# Energie d'un électron

## dans un atome isolé



Exemple pour l'atome de Ge

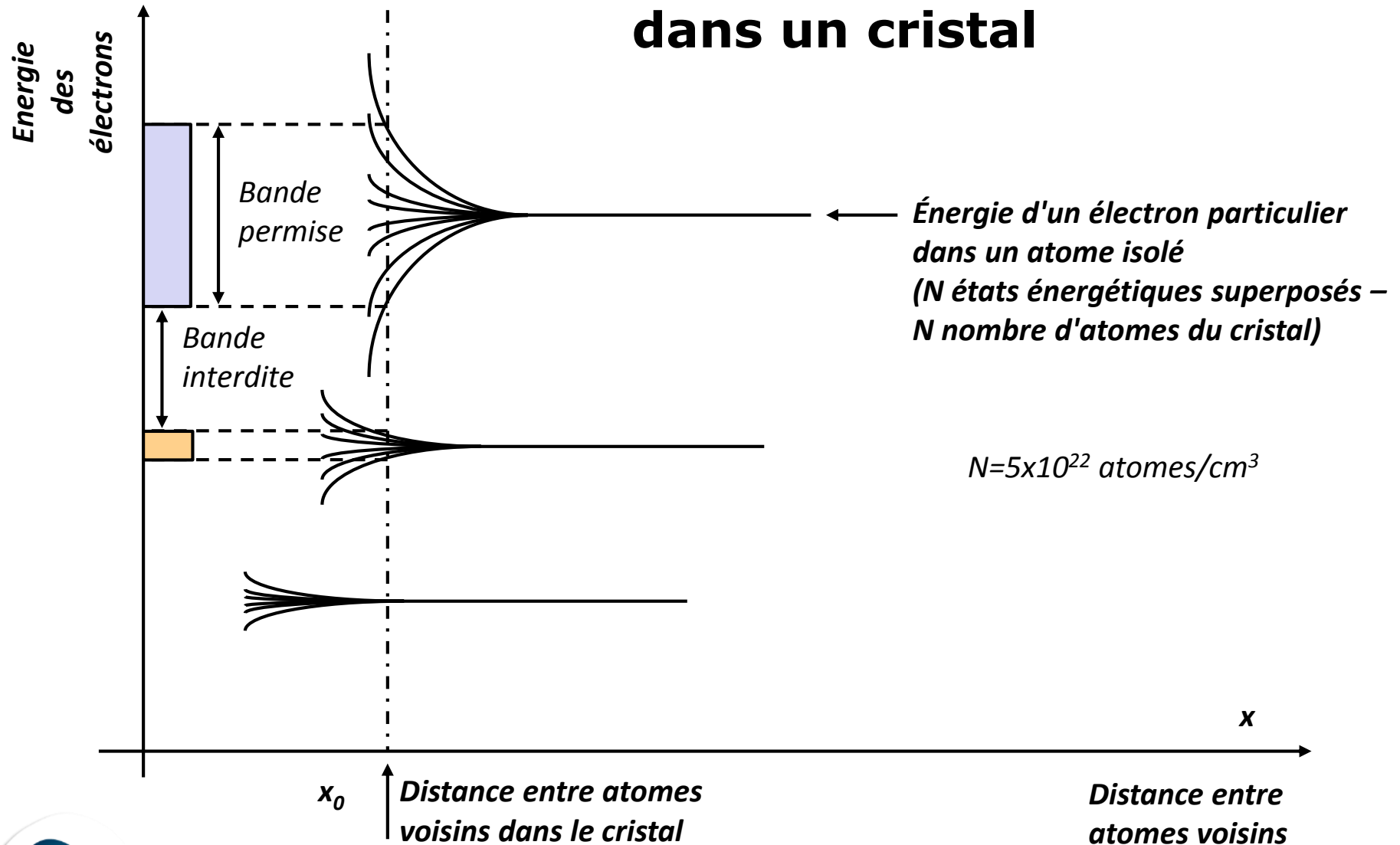
Energie de liaison des électrons en eV  
 (<http://www.jlab.org/~gwyn/ebindene.html>)

N° atomique	Elément	K 1s	L-I 2s	L-II 2p <sub>1/2</sub>	L-III 2p <sub>3/2</sub>	M-I 3s	M-II 3p <sub>1/2</sub>	M-III 3p <sub>3/2</sub>	M-IV 3d <sub>3/2</sub>	M-V 3d <sub>5/2</sub>
1	H	13,6								
32	Ge	11103	1414,6	1248,1	1217	180,1	124,9	120,8	29,8	29,2

32 Ge Germanium : [Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup>										
1s <sup>2</sup>	2s <sup>2</sup>	2p <sup>6</sup>	3s <sup>2</sup>	3p <sup>6</sup>	3d <sup>10</sup>	4s <sup>2</sup>	4p <sup>2</sup>			
2	8	18	4							

# Energie d'un électron

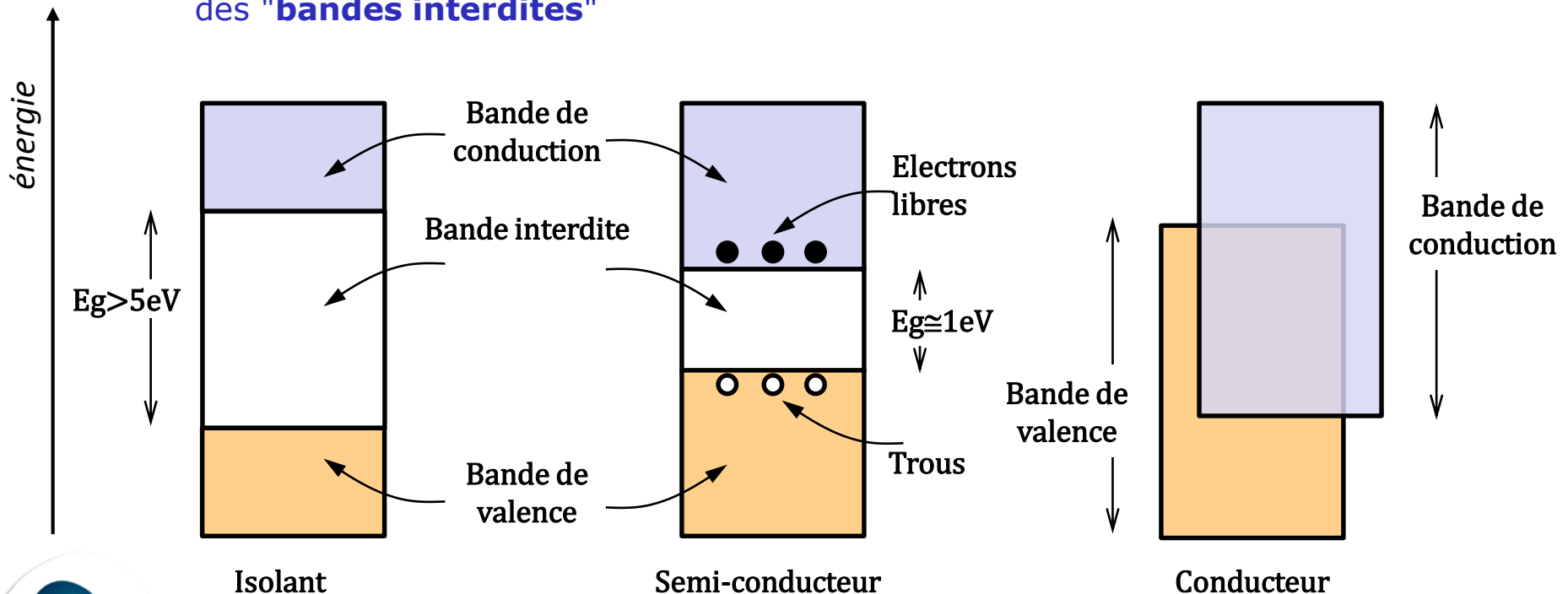
## dans un cristal



# Les semi-conducteurs

## Energies possibles d'un électron dans un cristal

- ❑ Les semi-conducteurs sont des solides dont la structure est périodique et le réseau cristallin.
  - Atome isolé  $\Rightarrow$  niveaux d'énergie **quantifiés** pour les électrons
  - Cristal  $\Rightarrow$  "**bandes d'énergie permises**" pour les électrons sont séparées par des "**bandes interdites**"



# Les semi-conducteurs

## Etat probable occupé d'un électron dans un cristal à l'équilibre thermodynamique

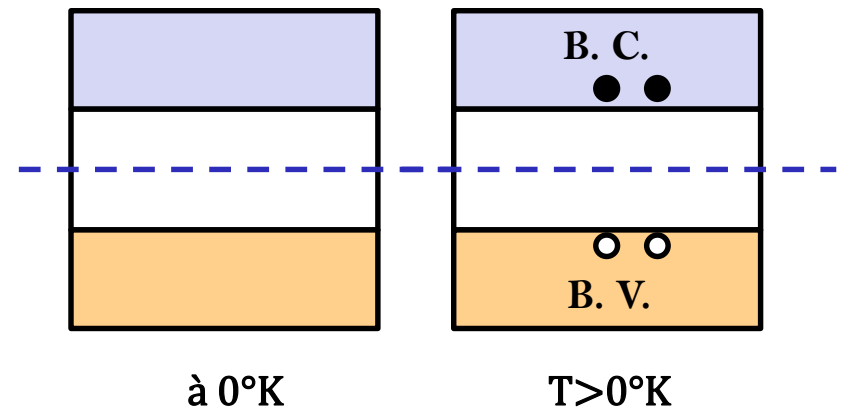
La **conduction électrique** n'est possible que si il existe à l'intérieur d'une bande permise des niveaux vides à côté de niveaux occupés. Dans ce cas, les charges vont pouvoir se déplacer sous l'effet d'un champ électrique.

❑ **A 0°K**, la bande de valence des SC intrinsèque est pleine.

→ **pas de conduction possible**

❑ **A Température > 0°K**

La bande de conduction vide n'étant séparée de la bande de valence pleine que par un intervalle relativement faible (de l'ordre de  $\approx 1$  eV), une excitation thermique suffit aux électrons pour atteindre la bande de conduction créant ainsi des trous dans la bande de valence

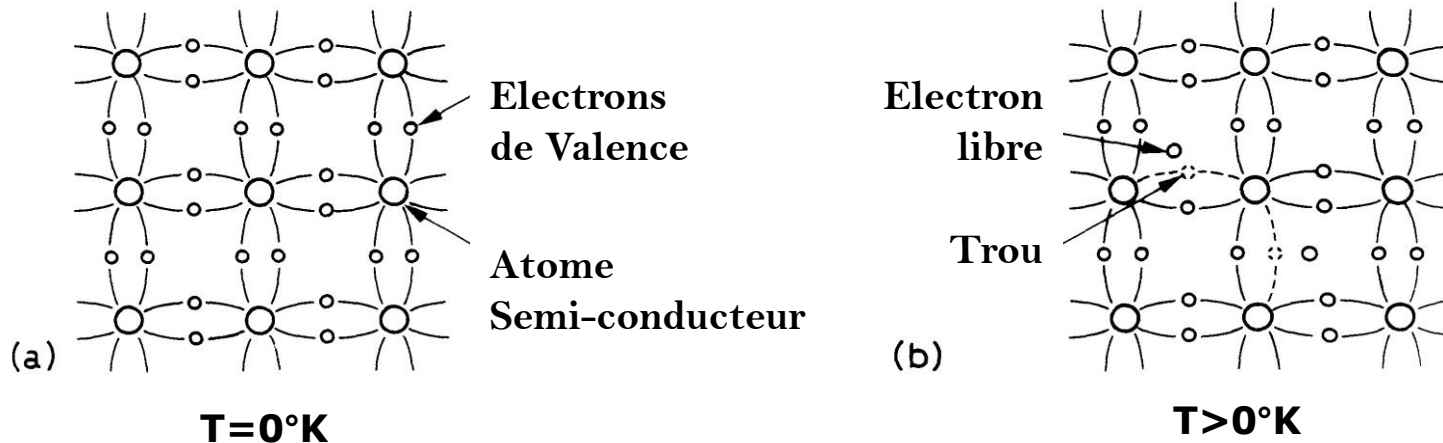


→ **conduction possible**

# Les semi-conducteurs

## Liaisons électroniques & porteurs de charge

- Porteurs de charges: **électrons** de charge  $-q_e$  et les **trous** que l'on peut traiter comme des particules de charge  $+q_e$
- Atomes tétravalents: le **Germanium** et le **Silicium**



Nombre d'Avogadro:  $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

$M(\text{Si}) = 28,08 \text{ g/mol}$  ;  $\rho(\text{Si}) = 2,33 \text{ g/cm}^3 \Rightarrow$  densité d'atomes Si =  $5 \times 10^{22} \text{ atomes/cm}^3$

$M(\text{Ge}) = 72,64 \text{ g/mol}$  ;  $\rho(\text{Ge}) = 5,32 \text{ g/cm}^3 \Rightarrow$  densité d'atomes Ge =  $4,4 \times 10^{22} \text{ atomes/cm}^3$

**Pour le Si et Ge  $\approx 5 \times 10^{22} \text{ atomes/cm}^3$**

# Les semi-conducteurs

## Liaisons électroniques & porteurs de charge

- A température  $> 0^\circ\text{K}$ , formation de paires électron/trou par **excitation thermique**

$$n_i^2 = np = AT^3 e^{\left(\frac{-E_g}{kT}\right)}$$

$n_i = n = p$  pour SC intrinsèque

	Ge	Si	unité
$E_g$ 300°K	0,67	1,11	eV
$E_g$ 77°K	0,74	1,16	eV

	Ge	Si	unité
concentration $n_i$ à 300°K	$\approx 2,4 \times 10^{13}$	$\approx 1,4 \times 10^{10}$	atomes/cm <sup>3</sup>
concentration $n_i$ à 273°K	$\approx 4,7 \times 10^{12}$	$\approx 1,3 \times 10^9$	atomes/cm <sup>3</sup>
concentration $n_i$ à 77°K	$\approx 3,2 \times 10^{-7}$	$\approx 2,3 \times 10^{-20}$	atomes/cm <sup>3</sup>

à  $T=300^\circ\text{K}$ ,  $kT \approx 0,025\text{eV}$

$k$ : cste de Boltzmann

$T$ : Température (°K)

$A$ : Constante caractéristique du matériau

$E_g$ : gap en énergie de la bande interdite

$n$ : concentration (nbre par unité de volume) en électrons de la bande de conduction

$p$ : concentration (nbre par unité de volume) en trous de la bande de valence

$n_i$ : concentration pour le matériau intrinsèque

# II - Les semi-conducteurs dopés

# Table périodique des éléments

**PERIODIC TABLE**  
**Atomic Properties of the Elements**

NIST  
National Institute of Standards and Technology  
U.S. Department of Commerce  
physics.nist.gov    NIST Standard Reference Data    nist.gov/srd

**Frequently used fundamental physical constants**

For the most accurate values of these and other constants, visit [physics.nist.gov/constants](http://physics.nist.gov/constants)

1 second = 9 192 631 770 periods of radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of <sup>133</sup>Cs

speed of light in vacuum	<i>c</i>	299 792 458 m s <sup>-1</sup> (exact)
Planck constant	<i>h</i>	6.626 070 15 × 10 <sup>-34</sup> J s (exact)
elementary charge	<i>e</i>	1.602 176 634 × 10 <sup>-19</sup> C
electron mass	<i>m<sub>e</sub></i>	9.109 383 701 × 10 <sup>-31</sup> kg
proton mass	<i>m<sub>p</sub></i>	1.672 621 637 × 10 <sup>-27</sup> kg
fine-structure constant	<i>α</i>	1/137.035 999 084
Rydberg constant	<i>R<sub>∞</sub></i>	10 973 731.762 53 Hz
<i>R<sub>∞,c</sub></i>		3.289 842 × 10 <sup>15</sup> Hz
<i>R<sub>∞,hc</sub></i>		13.6057 eV
Boltzmann constant	<i>k</i>	1.380 658 × 10 <sup>-23</sup> J K <sup>-1</sup>

- Solids
- Liquids
- Gases
- Artificially Prepared

Group	PERIODIC TABLE																18 VIIIA														
	1 IA	2 IIA		3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIII		9 VIII	10 VIII	11 IB	12 IIB	13 IIIA	14 IVA		15 VA	16 VIA	17 VIIA											
1	<b>H</b> Hydrogen 1,00794 1s <sup>1</sup> 13,59844																	<b>P</b> Phosphorus 30,973762 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup>	<b>N</b> Nitrogen 14,00643 [He]2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup>		<b>He</b> Helium 4,002602 1s <sup>2</sup> 24,3874										
2	<b>Li</b> Lithium 6,941 1s <sup>2</sup> 2s <sup>1</sup> 5,3917	<b>Be</b> Beryllium 9,012182 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 9,3227															<b>B</b> Boron 10,811 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup> 8,2980	<b>C</b> Carbon 12,0107 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> 8,2980	<b>N</b> Nitrogen 14,0067 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup> 11,2603	<b>O</b> Oxygen 15,9994 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup> 14,5314	<b>F</b> Fluorine 18,9984032 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup> 17,4228	<b>Ne</b> Neon 20,1797 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 21,5645									
3	<b>Na</b> Sodium 22,98976928 [Ne]3s <sup>1</sup> 5,1391	<b>Mg</b> Magnesium 24,30506 [Ne]3s <sup>2</sup> 7,6462															<b>Al</b> Aluminium 26,9815386 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup> 6,9959	<b>Si</b> Silicon 28,0855836 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup> 7,865	<b>P</b> Phosphorus 30,973762 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup> 10,4467	<b>S</b> Sulfur 32,065 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup> 10,3600	<b>Cl</b> Chlorine 35,453 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup> 12,9676	<b>Ar</b> Argon 39,948 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup> 15,7596									
4	<b>K</b> Potassium 39,0983 [Ar]4s <sup>1</sup> 4,3407	<b>Ca</b> Calcium 40,078 [Ar]4s <sup>2</sup> 6,1132	<b>Sc</b> Scandium 44,955912 [Ar]3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup> 6,5615	<b>Ti</b> Titanium 47,867 [Ar]3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup> 6,8281	<b>V</b> Vanadium 50,9415 [Ar]3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup> 6,7462	<b>Cr</b> Chromium 51,9961 [Ar]3d <sup>5</sup> 4s <sup>1</sup> 6,7665	<b>Mn</b> Manganese 54,938045 [Ar]3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup> 7,4340	<b>Fe</b> Iron 55,845 [Ar]3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup> 7,9024	<b>Co</b> Cobalt 58,933195 [Ar]3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup> 7,8810	<b>Ni</b> Nickel 58,6934 [Ar]3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup> 7,6399	<b>Cu</b> Copper 63,546 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup> 7,7264	<b>Zn</b> Zinc 65,38 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 9,3942	<b>Ga</b> Gallium 69,723 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup> 5,9993	<b>Ge</b> Germanium 72,64 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup> 7,8994	<b>As</b> Arsenic 74,92160 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup> 9,7886	<b>Se</b> Selenium 78,96 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup> 9,7524	<b>Br</b> Bromine 79,904 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup> 11,8138	<b>Kr</b> Krypton 83,798 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup> 13,9996													
5	<b>Rb</b> Rubidium 85,4678 [Kr]5s <sup>1</sup> 4,1771	<b>Sr</b> Strontium 87,62 [Kr]5s <sup>2</sup> 5,6949	<b>Y</b> Yttrium 88,90585 [Kr]4d <sup>1</sup> 5s <sup>2</sup> 6,2173	<b>Zr</b> Zirconium 91,224 [Kr]4d <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup> 6,6339	<b>Nb</b> Niobium 92,90638 [Kr]4d <sup>4</sup> 5s <sup>1</sup> 6,7589	<b>Mo</b> Molybdenum 95,96 [Kr]4d <sup>5</sup> 5s <sup>1</sup> 7,0924	<b>Tc</b> Technetium (98) [Kr]4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup> 7,28	<b>Ru</b> Ruthenium 101,07 [Kr]4d <sup>7</sup> 5s <sup>1</sup> 7,3605	<b>Rh</b> Rhodium 102,90550 [Kr]4d <sup>8</sup> 5s <sup>1</sup> 7,4589	<b>Pd</b> Palladium 106,42 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>0</sup> 8,3369	<b>Ag</b> Silver 107,8682 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup> 7,5762	<b>Cd</b> Cadmium 112,411 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 8,9938	<b>In</b> Indium 114,818 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>1</sup> 5,7854	<b>Sn</b> Tin 118,710 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup> 7,3439	<b>Sb</b> Antimony 121,757 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup> 8,6084	<b>Te</b> Tellurium 127,60 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>4</sup> 9,0086	<b>I</b> Iodine 126,90447 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>5</sup> 10,4513	<b>Xe</b> Xenon 131,293 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> 12,1298													
6	<b>Cs</b> Cesium 132,9054519 [Xe]6s <sup>1</sup> 3,8939	<b>Ba</b> Barium 137,327 [Xe]6s <sup>2</sup> 5,2117															<b>Hf</b> Hafnium 178,49 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup> 6,8251	<b>Ta</b> Tantalum 180,94788 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup> 7,5496	<b>W</b> Tungsten 183,84 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup> 7,8640	<b>Re</b> Rhenium 186,207 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup> 7,8335	<b>Os</b> Osmium 190,23 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup> 8,4382	<b>Ir</b> Iridium 192,222 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup> 8,9670	<b>Pt</b> Platinum 195,084 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>9</sup> 6s <sup>1</sup> 8,9588	<b>Au</b> Gold 196,966569 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>1</sup> 9,2255	<b>Hg</b> Mercury 200,59 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 10,4375	<b>Tl</b> Thallium 204,3833 [Hg]6p <sup>1</sup> 6,1082	<b>Pb</b> Lead 207,2 [Hg]6p <sup>2</sup> 7,4167	<b>Bi</b> Bismuth 208,98040 [Hg]6p <sup>3</sup> 7,2855	<b>Po</b> Polonium (209) [Hg]6p <sup>4</sup> 8,414	<b>At</b> Astatine (210) [Hg]6p <sup>5</sup>	<b>Rn</b> Radon (222) [Hg]6p <sup>6</sup> 10,7485
7	<b>Fr</b> Francium (223) [Rn]7s <sup>1</sup> 4,0727	<b>Ra</b> Radium (226) [Rn]7s <sup>2</sup> 5,2784															<b>Rf</b> Rutherfordium (261) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup> 6,07	<b>Db</b> Dubnium (268)	<b>Sg</b> Seaborgium (271)	<b>Bh</b> Bohrium (272)	<b>Hs</b> Hassium (277)	<b>Mt</b> Meitnerium (276)	<b>Ds</b> Darmstadtium (281)	<b>Rg</b> Roentgenium (280)	<b>Cn</b> Copernicium (285)	<b>Uut</b> Ununtrium (284)	<b>Uuq</b> Ununquadium (289)	<b>Uup</b> Ununpentium (288)	<b>Uuh</b> Ununhexium (293)	<b>Uus</b> Ununseptium (294)	<b>Uuo</b> Ununoctium (294)

**N**  
Phosphore  
Arsenic  
Antimoine

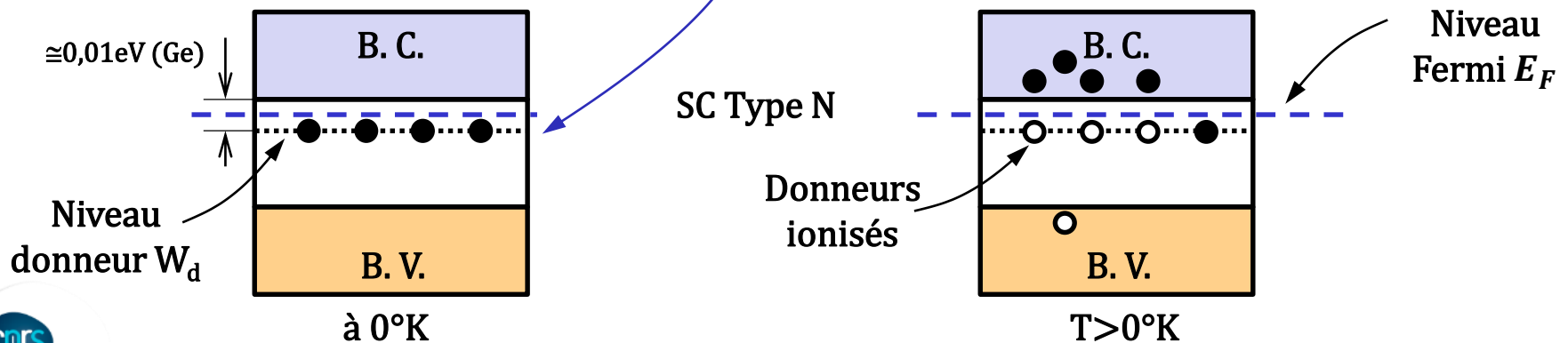
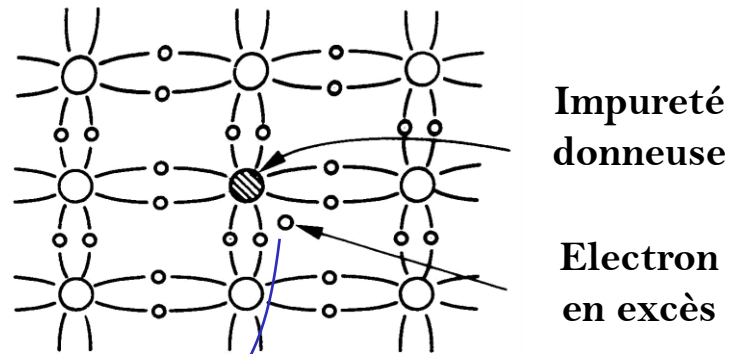
**P**  
Bore  
Aluminium  
Gallium  
Indium

En pratique il est difficile d'obtenir des matériaux purs. Il subsiste toujours des impuretés (10<sup>9</sup> at/cm<sup>3</sup>).  
Par contre, il est facile de doper les cristaux avec des impuretés déterminées. On a alors des **semi-conducteurs extrinsèques**.

# Les semi-conducteurs

## Dopage de type N

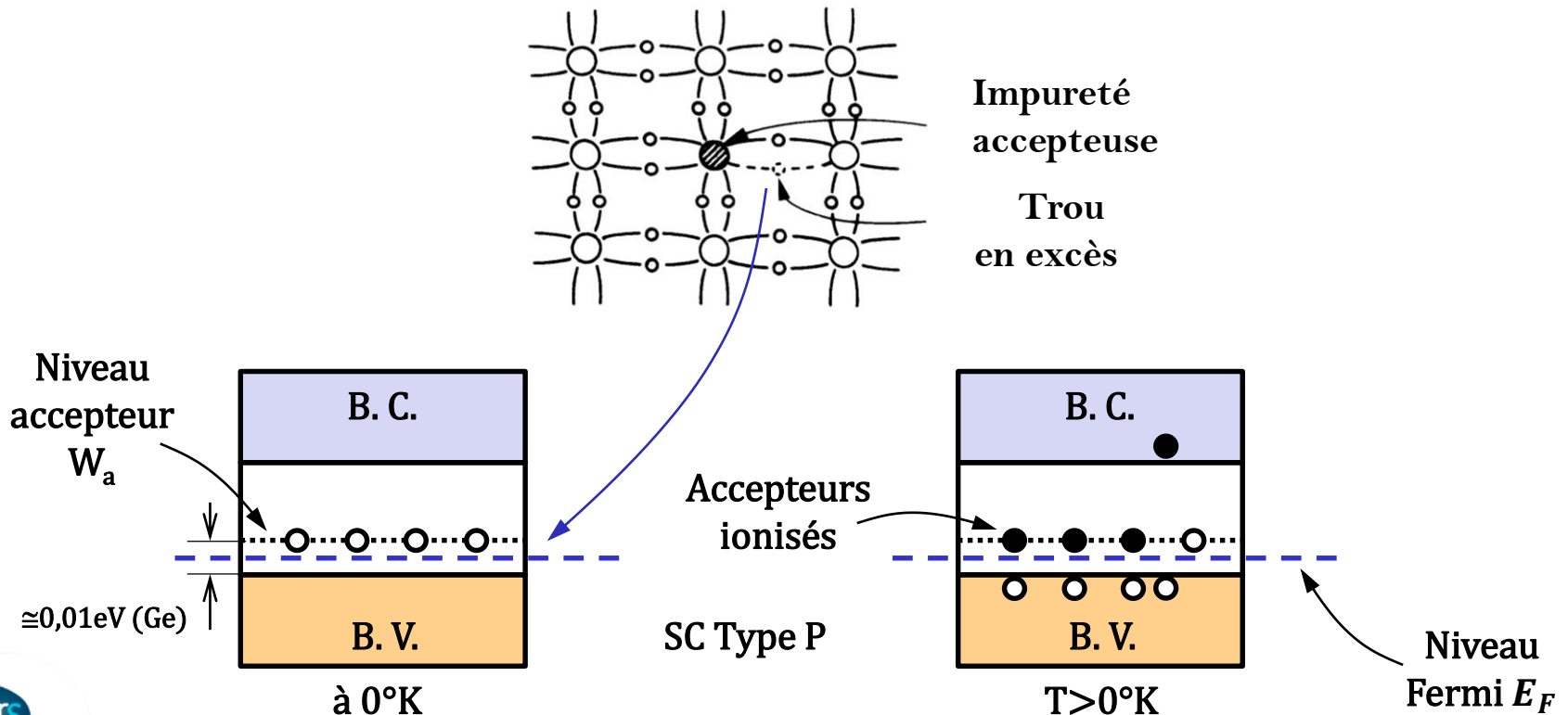
- ❑ Les atomes **donneurs** créent un **niveau donneur ( $W_d$ )** dans la bande interdite très légèrement sous le bas de la bande de conduction (à environ 0,01 eV pour le Germanium):
  - **l'électron du donneur peut être excité facilement ( $T > 0^\circ\text{K}$ ) dans la bande de conduction**



# Les semi-conducteurs

## Dopage de type P

- ❑ Les atomes **accepteurs** créent un **niveau accepteur ( $W_a$ )** dans la bande interdite légèrement au dessus de la bande de valence (à environ 0,01 eV pour le Germanium).
  - **Un électron de la bande de valence peut peupler ce niveau en laissant un trou dans la bande de valence ( $T > 0^\circ\text{K}$ ).**



# Les semi-conducteurs

## Porteurs de charge

□ Dopage:  $10^{13}$  a  $10^{16}$  at/cm<sup>3</sup> pour  $5 \times 10^{22}$  at /cm<sup>3</sup>

□ **Semi-conducteur de type N** à 300°K:

- $n \cong N_D$ , n nombre d'électrons de conduction (porteurs majoritaires),  $N_D$  (at/cm<sup>3</sup>) nombre d'atomes donneurs
- résistivité  $\rho \cong 1 / q_e \cdot N_D \cdot \mu_e$  (Ω.cm)

□ **Semi-conducteur de type P** à 300°K :

- $p \cong N_A$ , p nombre de porteurs majoritaires,  $N_A$  (at/cm<sup>3</sup>) nombre d'atomes accepteurs
- résistivité  $\rho \cong 1 / q_e \cdot N_A \cdot \mu_h$  (Ω.cm)

□ **Dans un semi-conducteur QUELCONQUE**,  $n_i^2 = np$ ,  $n_i$  est une caractéristique du matériau intrinsèque.

$$n_i^2 = np = AT^3 e^{\left(\frac{-E_g}{kT}\right)}$$

	Ge	Si	unité
Numéro atomique Z	32	14	
Masse atomique A	72,6	28,1	
Densité	5,32	2,33	g/cm <sup>2</sup>
largeur bande interdite $E_g$	~0,7	~1,1	eV
Résistivité intrinsèque à 300°K	~ 45	~ 230000	Ω.cm
Résistivité type N à 300°K		~500	Ω.cm

Rappel:

excitation thermique intrinsèque

Si:  $n_i = 1,4 \times 10^{10} / \text{cm}^3$  à 300 °K

# Les semi-conducteurs

## Déplacement des électrons et des trous

- Sous l'action d'un champ électrique, les électrons et les trous ont une vitesse de dérive dans un semi-conducteur:

$$v_e = \mu_e E$$

$$v_h = \mu_h E$$

$v_e, v_h =$  vitesse de dérive des électrons & des trous ( $cm.s^{-1}$ )

$\mu_e, \mu_h =$  mobilité ( $cm^2.V^{-1}.s^{-1}$ )

$E =$  champ électrique ( $V.cm^{-1}$ )

- A 300°K, pour le silicium,  $\mu_e = 1350 cm^2.V^{-1}.s^{-1}$  et  $\mu_h = 480 cm^2.V^{-1}.s^{-1}$
- A 300°K, pour le germanium,  $\mu_e = 3900 cm^2.V^{-1}.s^{-1}$  et  $\mu_h = 1900 cm^2.V^{-1}.s^{-1}$

Facteur ~1000 fois supérieur comparé  
au déplacement des ions dans les gaz...

**GAZ**

**ions:**

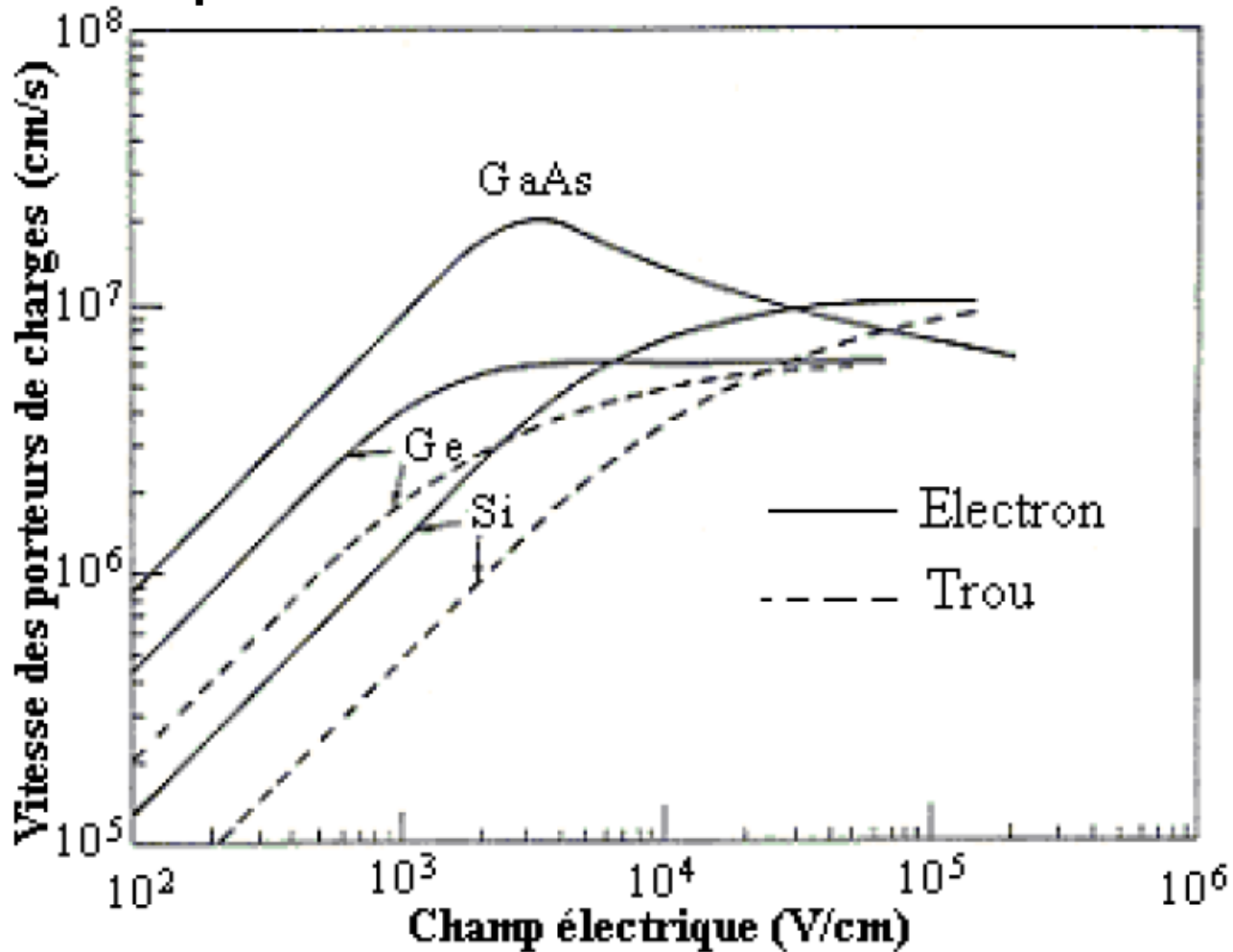
$\approx 1 cm^2.atm.V^{-1}.s^{-1}$

**électrons:**

$\approx 1000 cm^2.atm.V^{-1}.s^{-1}$

# Les semi-conducteurs

## Déplacement des électrons et des trous

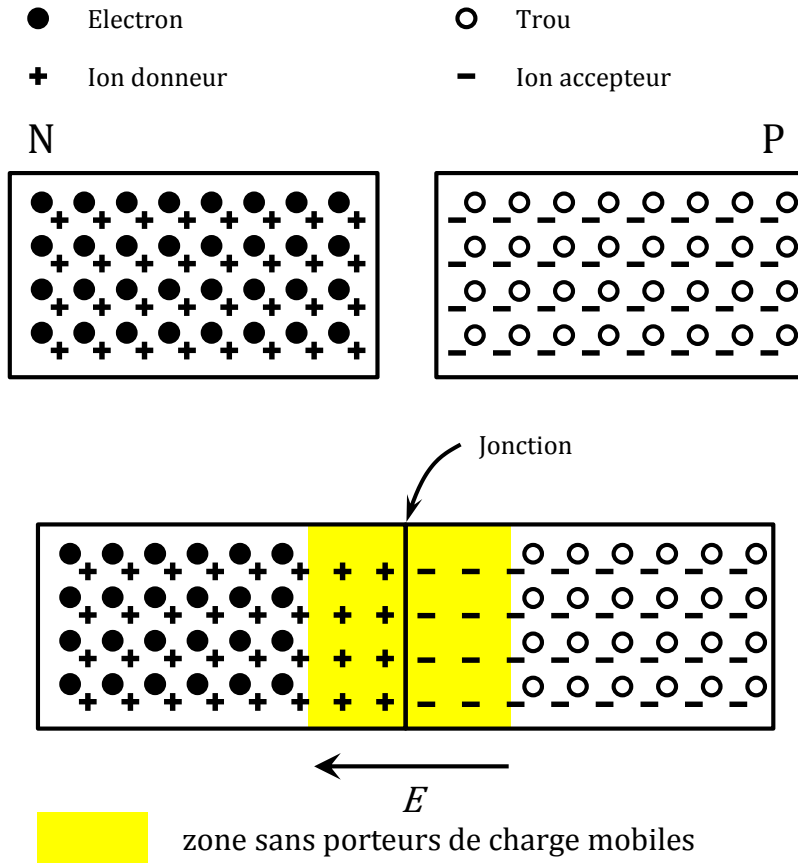


Il y a saturation de la vitesse au dessus de  $10^3$  V/cm

# III - La jonction PN

# Les semi-conducteurs

## La jonction PN



Le **semi-conducteur de type N** contient bien plus **d'électrons libres** que le matériaux de **type P**.

Lorsqu'on met en **contact** un semi-conducteur de **type P** et un semi-conducteur de **type N**, par **diffusion**, les **électrons du type N vont combler les trous du type P jusqu'à l'équilibre**.

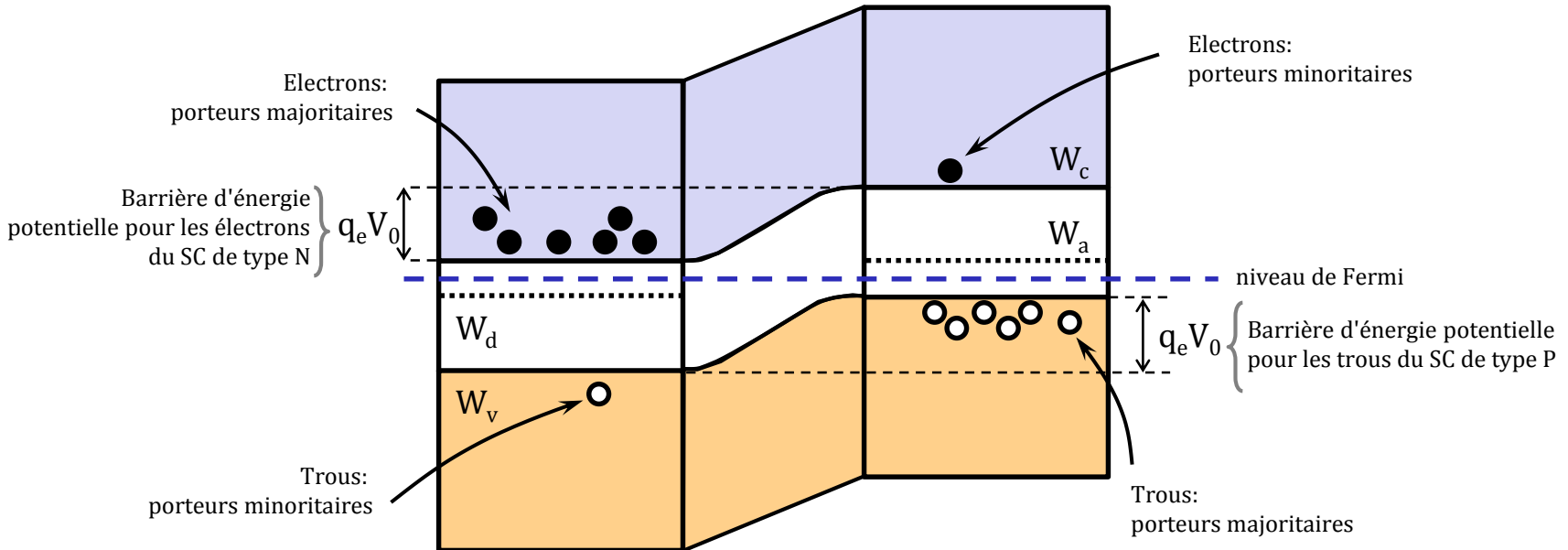
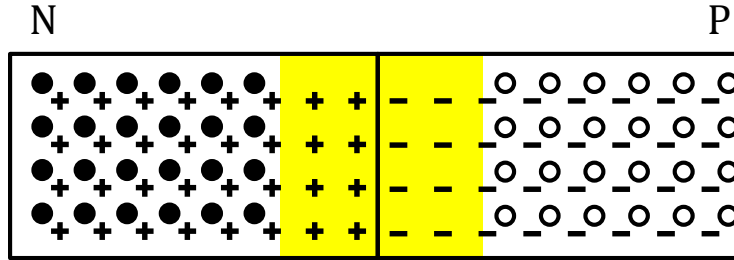
Ce déplacement laisse **localement une charge nette** due aux dopants fixes ionisés des deux matériaux.


Cette charge nette **induit un champ électrique** qui va limiter la diffusion des charges jusqu'à équilibre.

La **ZONE SANS PORTEUR DE CHARGE MOBILE** est dite **ZONE DE CHARGE D'ESPACE**, **ZONE DE DÉPLÉTION** ou **ZONE DÉPEUPLÉE**. Elle constitue une **barrière de potentiel pour les électrons et les trous**.

# Les semi-conducteurs

## La jonction PN - Barrière de potentiel $V_0$



 zone sans porteurs de charge mobiles (zone déplétée)

# Les semi-conducteurs

En 1 seule dimension:

## La jonction PN

- En résolvant l'équation de Poisson:

$$\frac{d^2V}{dx^2} + \frac{\rho(x)}{\epsilon} = 0$$

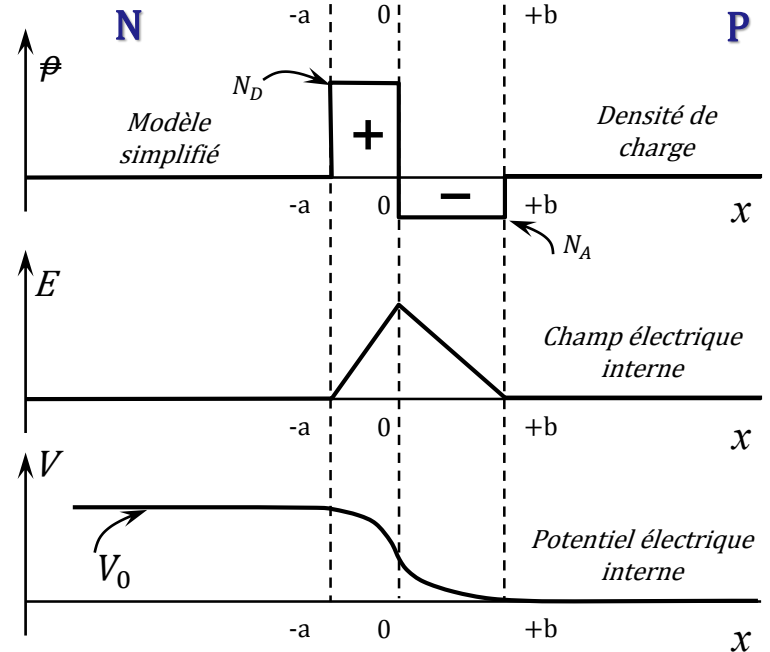
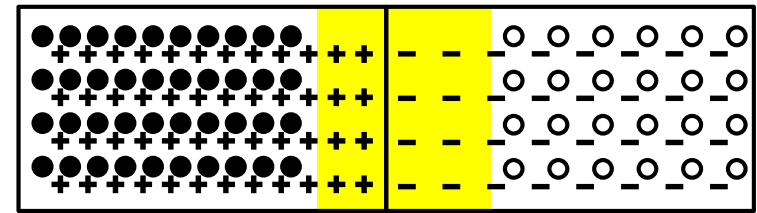
$\rho$ : densité volumique de charge

$\epsilon$ : constante diélectrique du matériau

$$\begin{aligned} -a < x \leq 0 & \quad V(x) = -\frac{q_e N_D}{2\epsilon} (x + a)^2 + V_0 \\ 0 < x \leq b & \quad V(x) = +\frac{q_e N_A}{2\epsilon} (x - b)^2 \end{aligned}$$

- Continuité du potentiel électrique à la jonction

- Neutralité électrique :  $aN_D = bN_A$



$\epsilon$ : permittivité du matériau  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$

$$\epsilon_0 = 8,85 \text{ pF/m}$$

$$\epsilon_r = 11,9 \text{ (Si) ou } 16 \text{ (Ge)}$$

# Les semi-conducteurs

## La jonction PN

□ Profondeur de la **zone déplétée**  $d$

$$d = a + b = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0 (N_A + N_D)}{q_e N_A N_D}}$$

si  $N_D \gg N_A$  (N<sup>+</sup>P)

$$d \cong b \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{q_e N_A}}$$

si  $N_A \gg N_D$  (P<sup>+</sup>N)

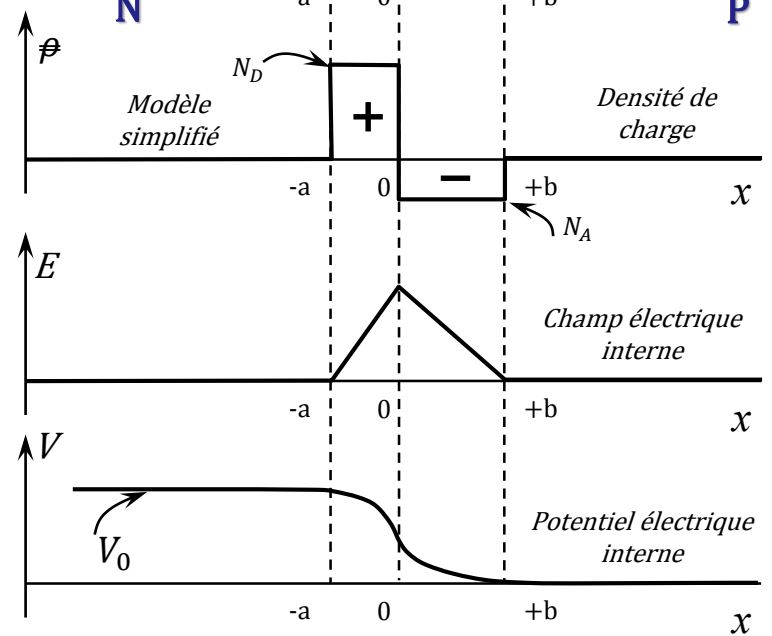
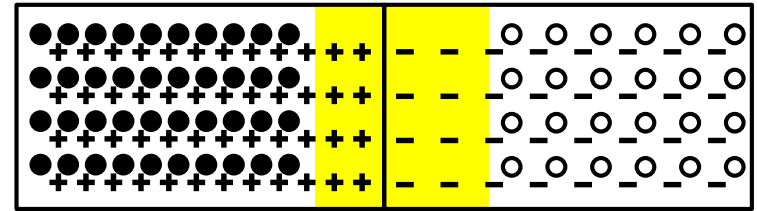
$$d \cong a \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{q_e N_D}}$$

Cas général:

$$N = N_A \text{ si } N_D \gg N_A$$

$$N = N_D \text{ si } N_A \gg N_D$$

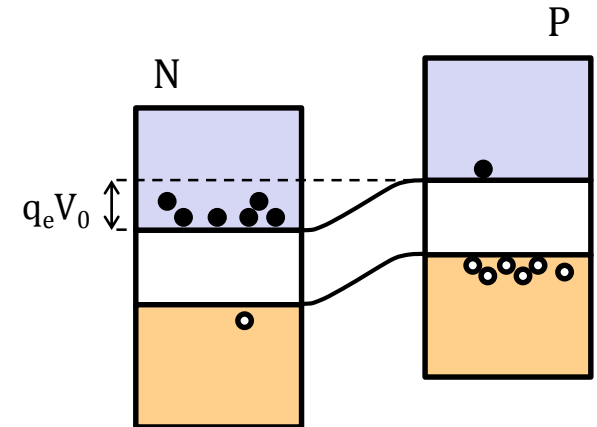
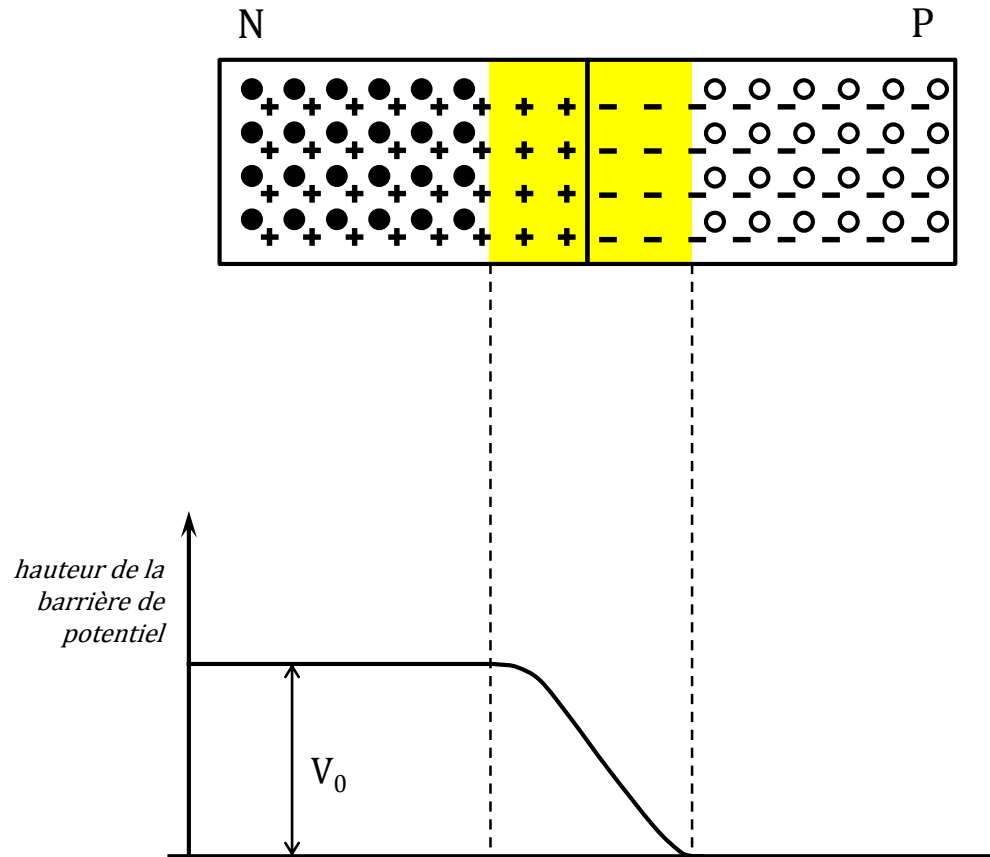
$$d \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{q_e N}} = \sqrt{2\varepsilon \rho_d \mu V_0}$$



$\rho_d \cong 1 / q_e \cdot N \cdot \mu$   $\rho_d$ : résistivité du matériau dopé  
 $\mu$ : mobilité des porteurs majoritaires

# Les semi-conducteurs

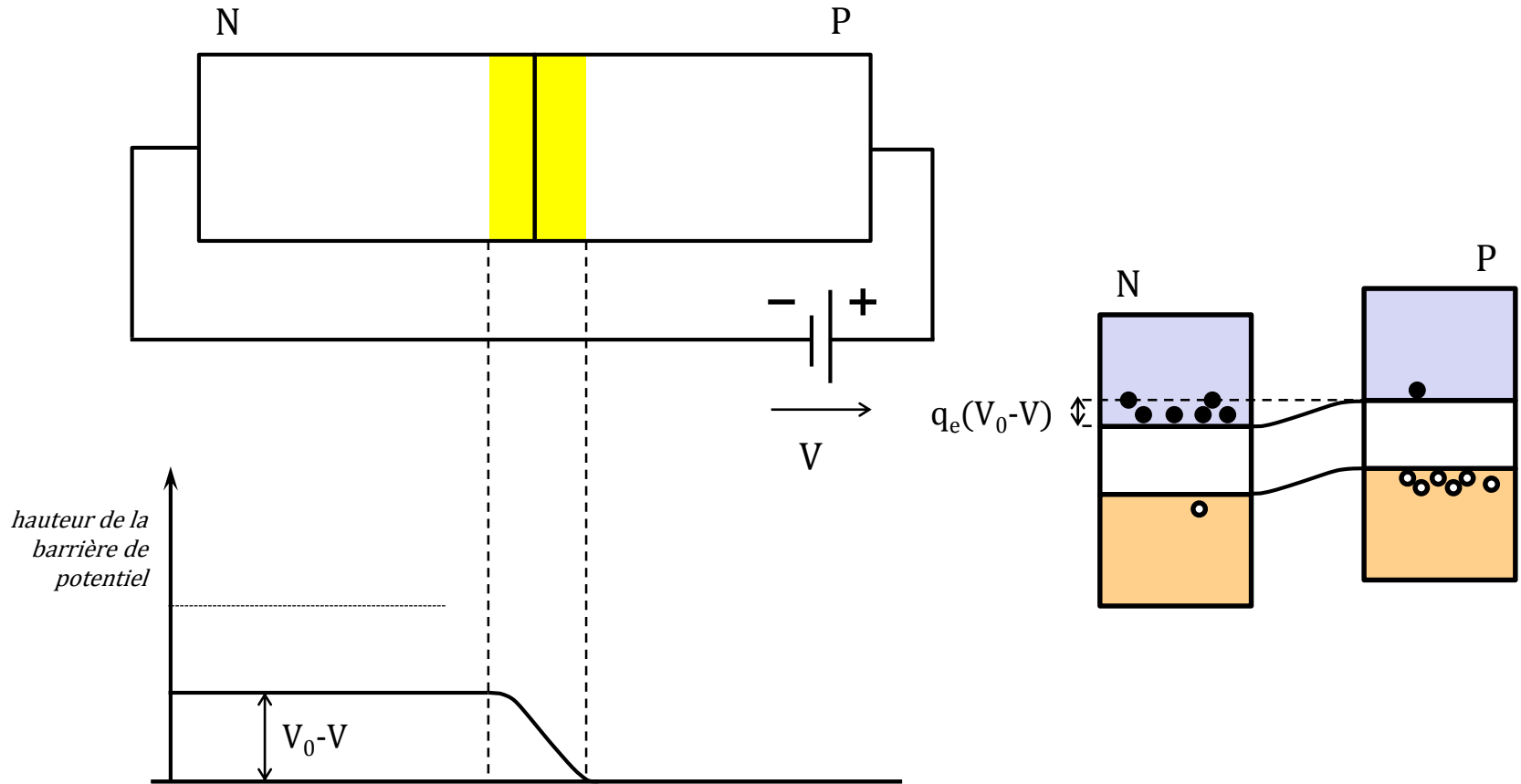
## La jonction PN - aucune polarisation



zone sans porteurs de charge mobiles (zone déplétée)

# Les semi-conducteurs

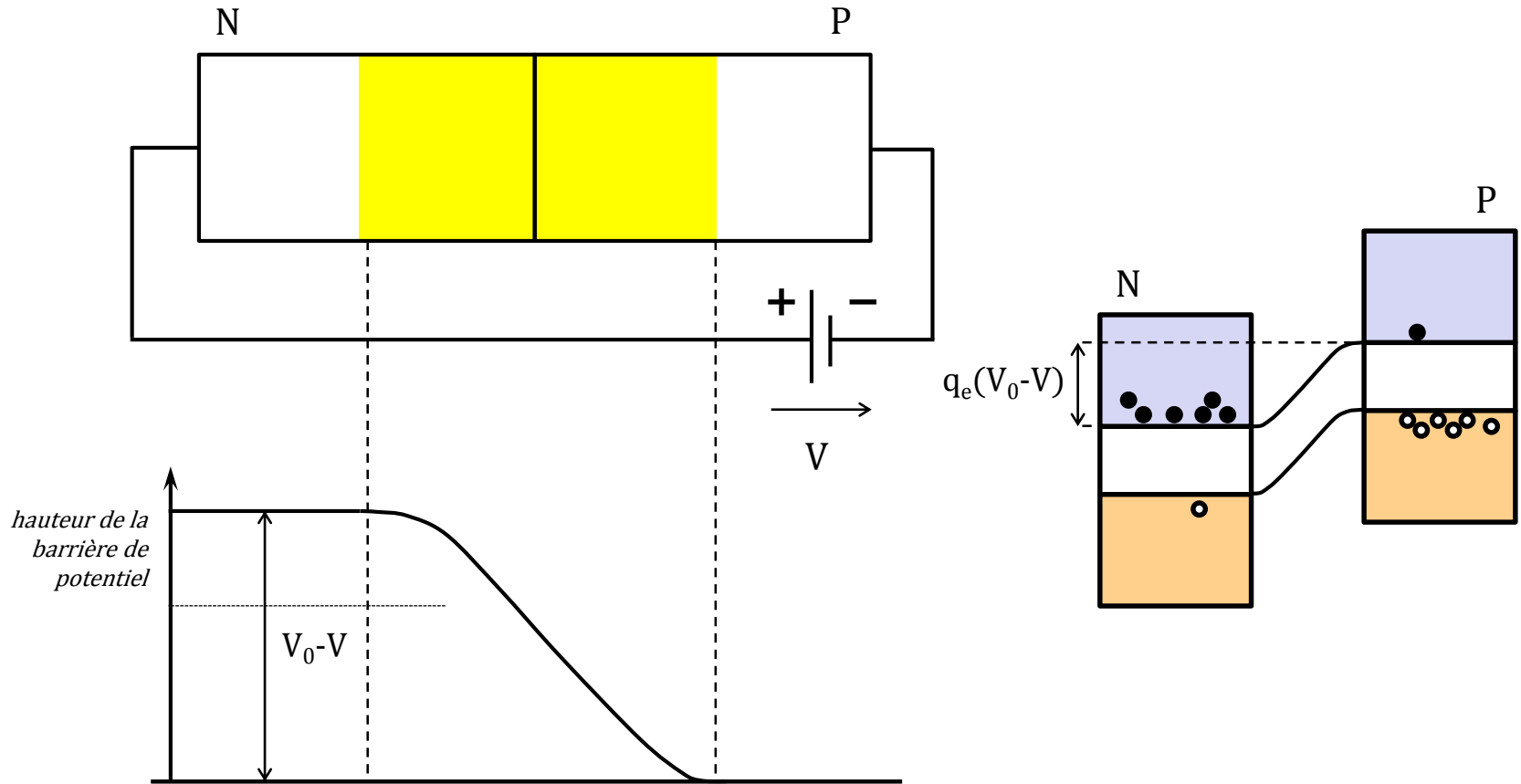
## La jonction PN - polarisation directe



zone sans porteurs de charge mobiles - la largeur de la zone déplétée diminue

# Les semi-conducteurs

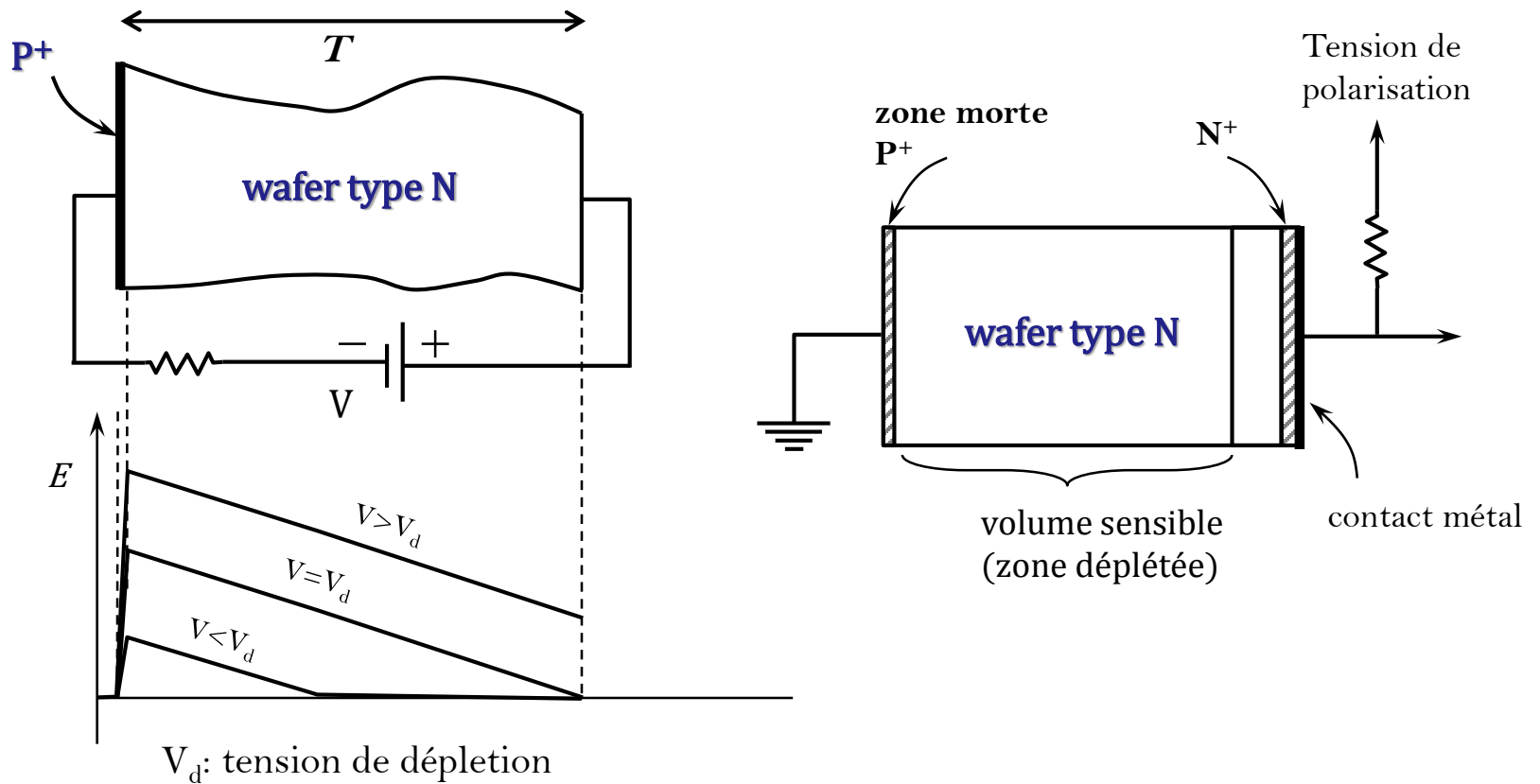
## La jonction PN - polarisation inverse



zone sans porteurs de charge mobiles - la largeur de la zone déplétée augmente

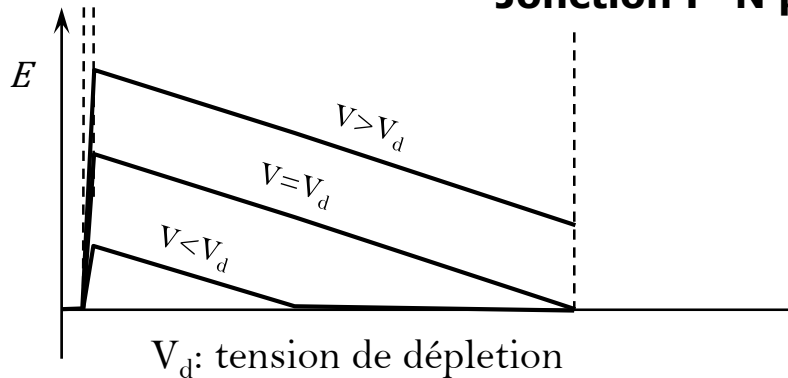
# Les semi-conducteurs

## Jonction P+N polarisée en inverse



# Les semi-conducteurs

## Jonction P+N polarisée en inverse



$V_d$ : tension de dépletion  
 $V_d \gg V_0$   
 $V_0 + V_d \cong V_d$ ;  $V_0$  négligeable

□  $V < V_d$

$$d \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon(V_0+V)}{q_e N_D}} \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon V}{q_e N_D}}$$

□  $V \geq V_d$

$$\left\{ \begin{aligned} d = T &\cong \sqrt{\frac{2\varepsilon V_d}{q_e N_D}} \\ \Rightarrow V_d &\cong \frac{q_e N_D T^2}{2\varepsilon} \end{aligned} \right.$$

"d" correspond à la profondeur de déplétion. "T" correspond à l'épaisseur du wafer et est aussi la profondeur de détection (zone déplétée) pour  $V_d$

### Cas général:

Jonction P+N:  $N=N_D$   
 ou N+P :  $N=N_A$

□  $V < V_d$

$$d \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon V}{q_e N}} = \sqrt{2\varepsilon \rho_d \mu V}$$

$\rho_d \cong 1 / q_e \cdot N \cdot \mu$

□  $V \geq V_d$

$$T \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon V_d}{q_e N}}$$

$$V_d \cong \frac{q_e N \cdot T^2}{2\varepsilon}$$

# Les semi-conducteurs

## La jonction PN "planaire" - formules pratiques

□ Profondeur de la **zone déplétée**  $d$

$\rho_d \rightarrow \Omega.cm$ ,  $V \rightarrow V$  et  $d \rightarrow \mu m$

$$d \cong \sqrt{2\varepsilon\rho_d\mu V}$$

$\rho_d$ : résistivité du matériau dopé  
 $\mu$ : mobilité des porteurs majoritaires

### Silicium à 300°K

type N  $d = 0,533\sqrt{\rho_d V}$

type P  $d = 0,318\sqrt{\rho_d V}$

### Silicium à 77°K

type N  $d = 2,103\sqrt{\rho_d V}$

type P  $d = 1,522\sqrt{\rho_d V}$

### Germanium à 300°K

type N  $d = 1,051\sqrt{\rho_d V}$

type P  $d = 0,733\sqrt{\rho_d V}$

### Germanium à 77°K

type N  $d = 3,193\sqrt{\rho_d V}$

type P  $d = 3,449\sqrt{\rho_d V}$

□ Capacité par unité de surface

$$C = \frac{\varepsilon}{d}$$

$\varepsilon$ : permittivité du matériau  
 $d$ : profondeur de la zone déplétée

$\varepsilon_0 = 8,85 \text{ pF/m}$   
 $\varepsilon_r = 11,9 \text{ (Si) ou } 16 \text{ (Ge)}$

**Silicium**  $C(\text{pF}/\text{mm}^2) = \frac{105}{d(\mu\text{m})}$

**Germanium**  $C(\text{pF}/\text{mm}^2) = \frac{142}{d(\mu\text{m})}$

# Les semi-conducteurs

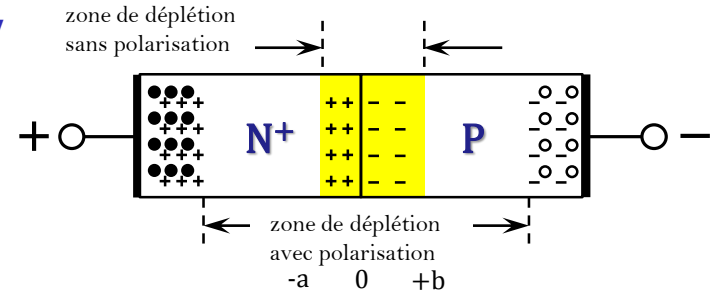
## La jonction PN - exemple

### ➤ Jonction polarisée en inverse à 300 V

#### Silicium

type N  $d \cong 0,53\sqrt{\rho_n V} = 1,3\text{mm}$

type P  $d \cong 0,32\sqrt{\rho_p V} = 0,8\text{mm}$



avec  $\rho = 20000 \Omega \cdot \text{cm}$  et  $V = 300\text{V}$

Si  $N_D \gg N_A$  (at/cm<sup>3</sup>), cela signifie que:

$$b \gg a$$

La zone déplétée se trouve presque complètement du côté P (zone sensible de détection). On parle alors de jonction PN<sup>+</sup>

# Les semi-conducteurs

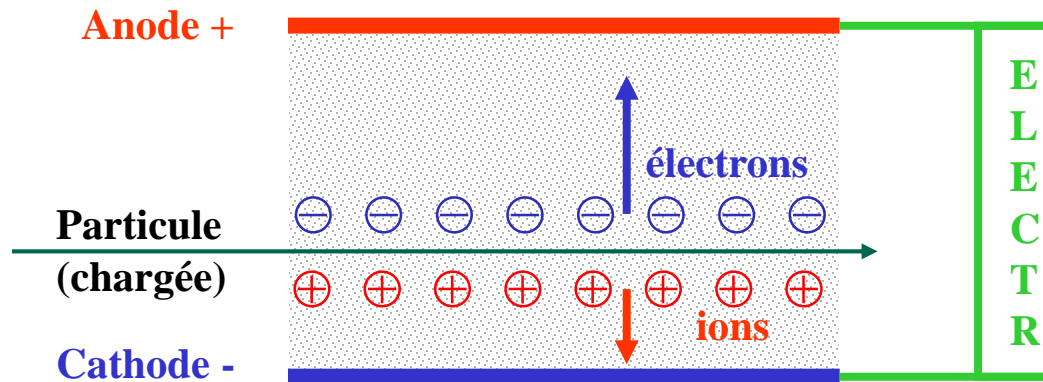
## Principales caractéristiques

	Ge	Si	unité
Numéro atomique Z	32	14	
Masse atomique A	72,6	28,1	
Densité	5,32	2,33	g/cm <sup>3</sup>
largeur bande interdite E <sub>g</sub>	0,74 @77°K	1,1@300°K	eV
Permittivité relative ε <sub>r</sub>	16	11,9	
Mobilité électrons @300°K	3900	1350	cm <sup>2</sup> /Vs
Mobilité trous @300°K	1900	480	cm <sup>2</sup> /Vs
Mobilité électrons @77°K	36000	21000	cm <sup>2</sup> /Vs
Mobilité trous @77°K	42000	11000	cm <sup>2</sup> /Vs
n <sub>i</sub> @300°K	2,4 x 10 <sup>13</sup>	1,45 x 10 <sup>10</sup>	cm <sup>-3</sup>
Résistivité intrinsèque à 300°K	~ 45	~ 230000	Ω.cm

$$\epsilon_0 = 8,85 \text{ pF/m}$$

# **IV - Comment fonctionne un détecteur à semi-conducteurs ?**

# Les détecteurs gazeux à ionisation



## 1. Ionisation

→ Création de paires électrons / ions

## 2. Mouvement des électrons et des ions

→ Déplacement dans le champ électrique

## 3. Multiplication

→ Avalanche dans le gaz (si champ fort)

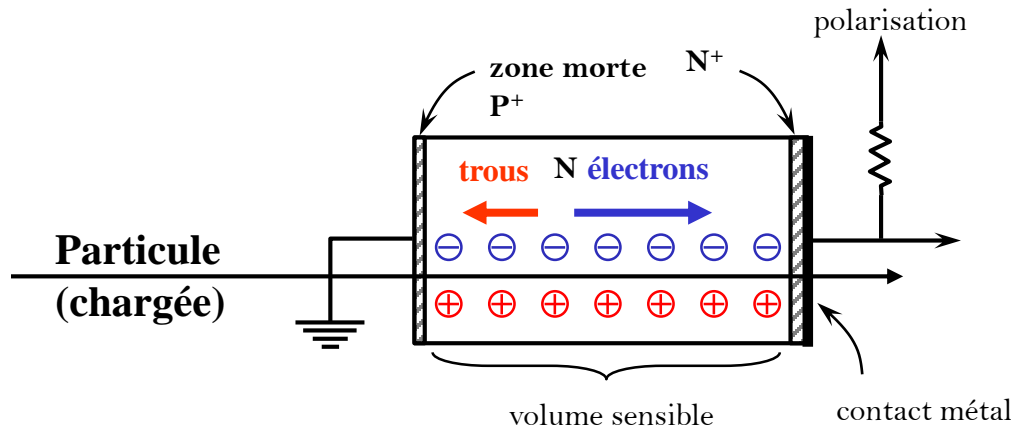
## 4. Influence sur les électrodes

→ Création du signal

## 5. Electronique de lecture

→ Traitement du signal

# Les détecteurs à semi-conducteurs



## 1. Ionisation

→ Création de paires ~~électrons / ions~~

**électrons / trous**

## 2. Mouvement des électrons et des ~~ions~~

**trous**

→ Déplacement dans le champ électrique

## ~~3. Multiplication~~

~~→ Avalanche dans le gaz (si champ fort)~~

## 4. Influence sur les électrodes

→ Création du signal

## 5. Electronique de lecture

→ Traitement du signal

# Fonctionnement d'un détecteur SC

Création d'une zone sans porteur de charge



Interaction rayonnement matière dans cette zone désertée (déplétée)



Création de paires électrons-trous



Collection des paires par application d'un champ électrique.



**La jonction PN**  
(Si & Ge):

- mise en contact de 2 semi-conducteurs d'un même matériau de dopages P et N.



**Détecteur homogène**  
(C, CdTe, CdZnTe, HgI<sub>2</sub>,...):

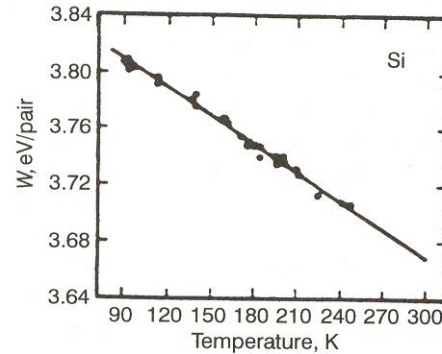
- semi-conducteur de très haute résistivité.
- deux faces opposées sont munies d'électrodes.

# V - Caractéristiques de détection des jonctions PN

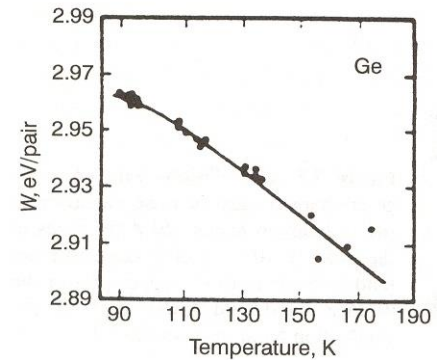
# Les semi-conducteurs

## Energie moyenne pour créer une paire é-trou

	Ge	Si	unité
w @77°K	2,96	3,81	eV/paire
w @300°K		3,62	eV/paire



Silicium



Germanium

$$n_0 = \frac{E}{w}$$

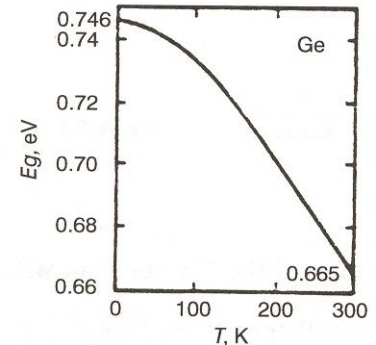
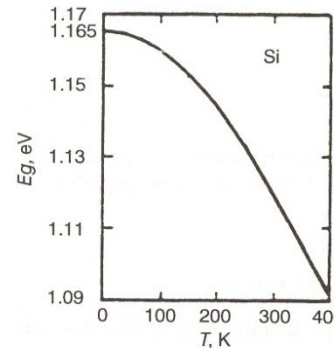
$n_0$ : nombre de paires primaires créées

$E$ : énergie moyenne déposée par évènement (eV)

$w$ : Energie moyenne pour produire une paire chargée (eV/paire)

## Bande interdite en fonction de la température

	Ge	Si	unité
$E_g$	0,74	1,1	eV
	@77°K	@300°K	



# Les semi-conducteurs

## Déplacement des électrons et des trous

- Sous l'action d'un champ électrique, les électrons et les trous ont une vitesse de dérive dans un semi-conducteur:

$$v_e = \mu_e E$$

$$v_h = \mu_h E$$

$v_e, v_h =$  vitesse de dérive des électrons & des trous ( $cm.s^{-1}$ )

$\mu_e, \mu_h =$  mobilité ( $cm^2.V^{-1}.s^{-1}$ )

$E =$  champ électrique ( $V.cm^{-1}$ )

- A 300°K, pour le silicium,  $\mu_e = 1350 cm^2.V^{-1}.s^{-1}$  et  $\mu_h = 480 cm^2.V^{-1}.s^{-1}$
- A 300°K, pour le germanium,  $\mu_e = 3900 cm^2.V^{-1}.s^{-1}$  et  $\mu_h = 1900 cm^2.V^{-1}.s^{-1}$

Facteur ~1000 fois supérieur comparé au déplacement des ions dans les gaz...

**GAZ**

**ions:**

$\approx 1 cm^2.atm.V^{-1}.s^{-1}$

**électrons:**

$\approx 1000 cm^2.atm.V^{-1}.s^{-1}$

# Les semi-conducteurs

## Principales caractéristiques

	Ge	Si	unité
Numéro atomique Z	32	14	
Masse atomique A	72,6	28,1	
Densité	5,32	2,33	g/cm <sup>3</sup>
largeur bande interdite E <sub>g</sub>	0,74 @77°K	1,1@300°K	eV
Permittivité relative ε <sub>r</sub>	16	11,9	
Mobilité électrons @300°K	3900	1350	cm <sup>2</sup> /Vs
Mobilité trous @300°K	1900	480	cm <sup>2</sup> /Vs
Mobilité électrons @77°K	36000	21000	cm <sup>2</sup> /Vs
Mobilité trous @77°K	42000	11000	cm <sup>2</sup> /Vs
n <sub>i</sub> @300°K	2,4 x 10 <sup>13</sup>	1,45 x 10 <sup>10</sup>	cm <sup>-3</sup>
Résistivité intrinsèque à 300°K	~ 45	~ 230000	Ω.cm

$$\epsilon_0 = 8,85 \text{ pF/m}$$

# Influence sur les électrodes

et non pas "collection des charges"

## Théorème de Shockley-Ramo

Le théorème de Shockley-Ramo permet de calculer facilement le courant instantané induit par une charge en mouvement entre 2 électrodes. Elle est basée sur la notion que le **courant induit** dans l'électrode est dû au **mouvement des charges**, et non à la quantité de charge reçue par l'électrode par seconde.

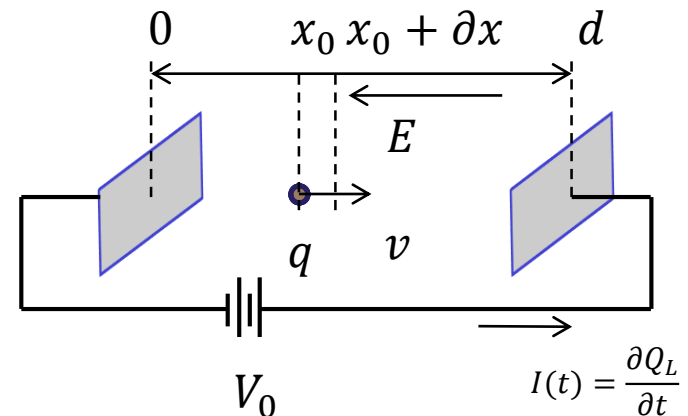
$$\partial Q_L = \frac{\partial x}{d} q$$

$I$  et  $Q_L$ : courant et charge induit dans le circuit extérieur

$q$ : charge en mouvement

$L$ : distance entre les électrodes

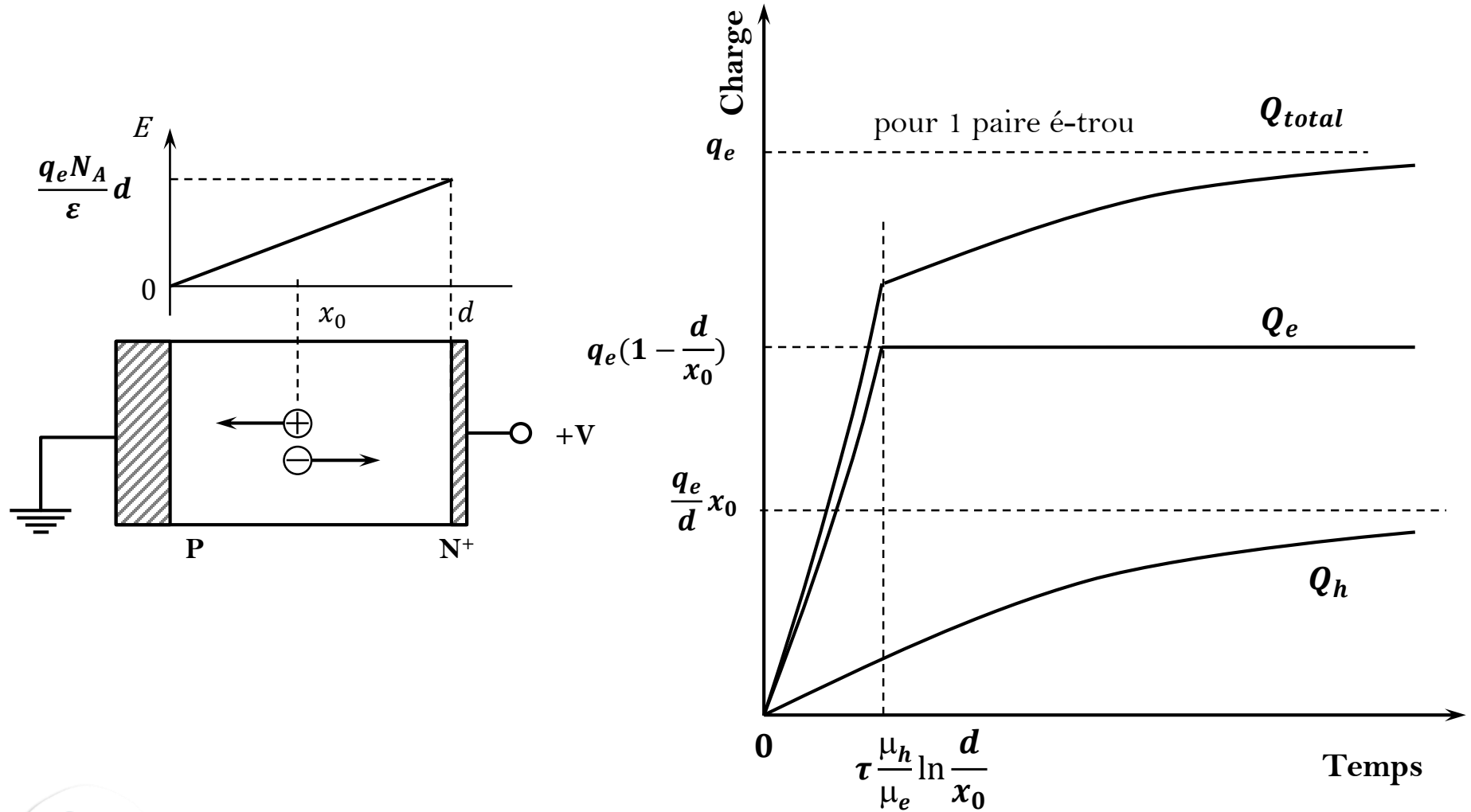
$\partial x$ : distance parcourue par la charge



Ces équations sont normalement valable pour un volume vide entre électrodes. On montre que cela est également valable en présence de charges d'espace (SC).

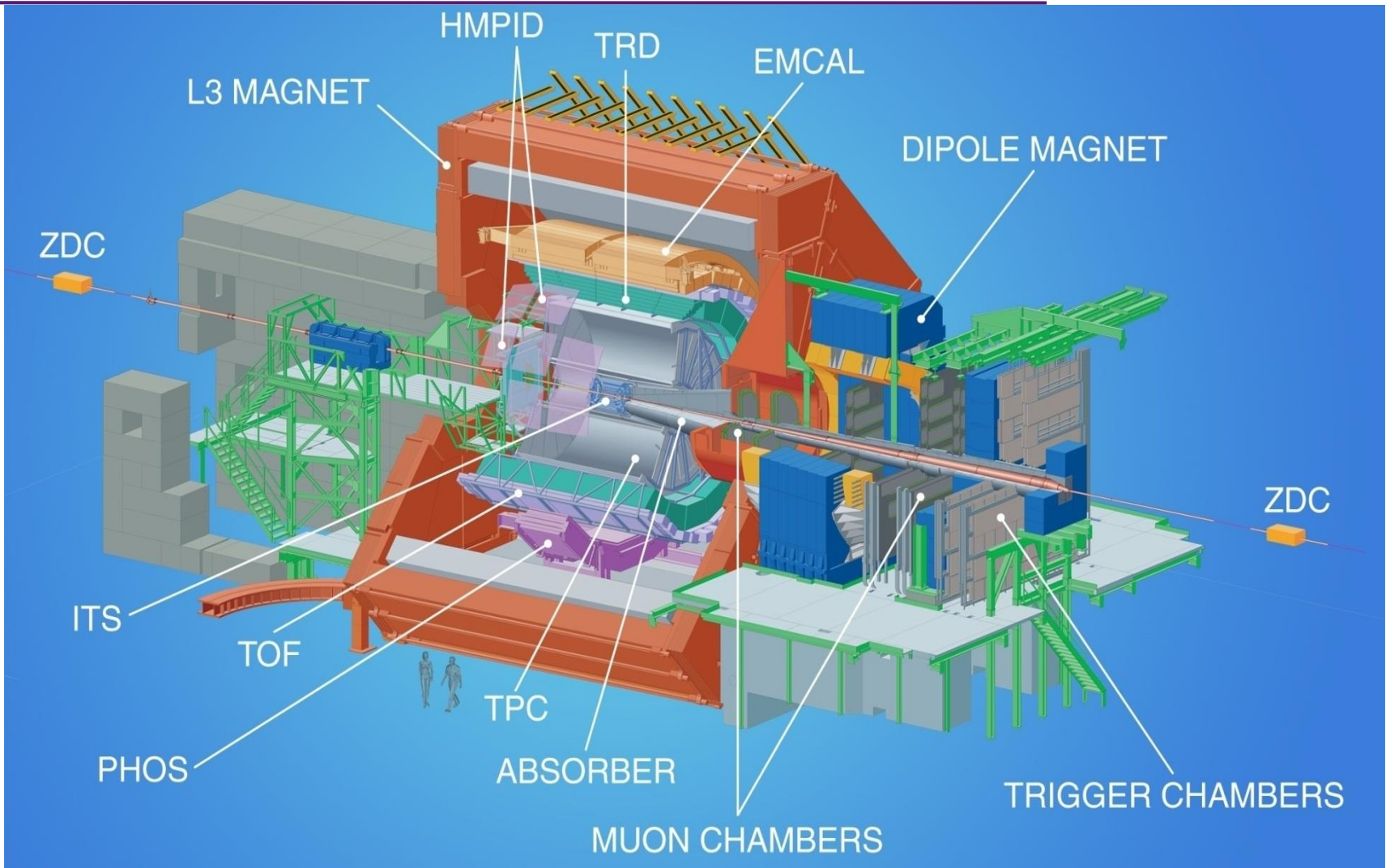
# Les semi-conducteurs

## Influence sur les électrodes



# VI - Détecteurs à diode silicium

# Le détecteur ALICE

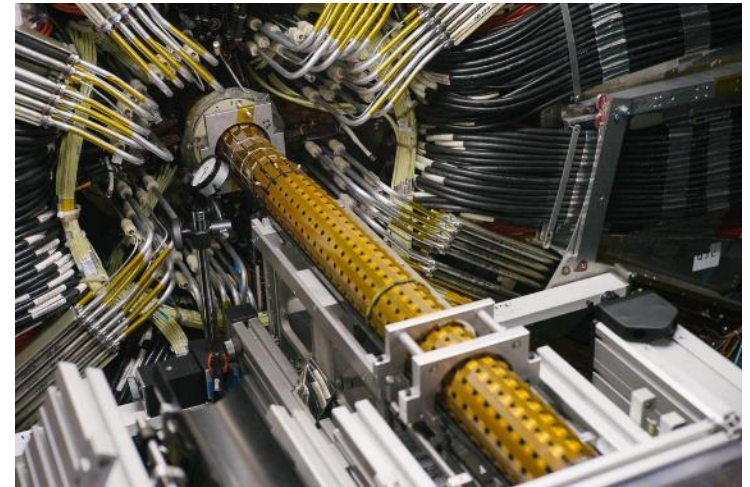


16m x 26m ; 10.000 tonnes

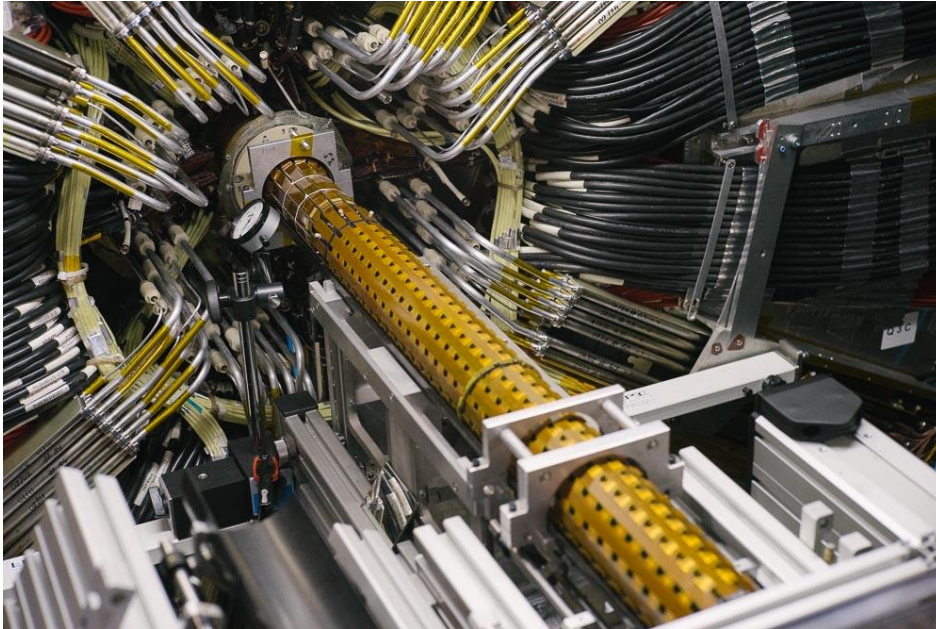
- ❖ **Framework** : ATLAS Upgrade for HL-LHC
- ❖ The ATLAS upgrade plans full replacement of Inner Tracker
- ❖ All silicon tracker (Pixel & Microstrip)

- ❖ Requirements for Pixel detector

- Pixel Size : 50um x 50um
- Radiation @
  - for low radius area (<5 cm radius): 1500 Mrad ; severe irradiation damage
  - For higher radius (25 cm) :100 Mrad
- Several m<sup>2</sup> of silicon
- Thickness : 100 or 150um
- Low noise (<100e) → 600e stable threshold
- High Readout Rate : 5.2Gbps (or 4x1.28Gbps)



Source : Abdenour Lounis



Source : Abdenour Lounis

# Utilisation en physique de hautes énergies

## Mesure de la position

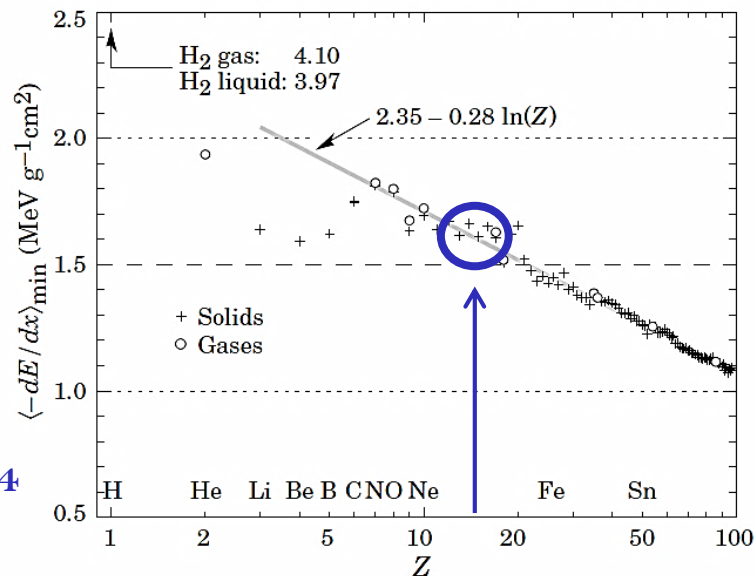
### Détecteurs de « Vertex » ou de « Traces »

Stopping power at minimum ionization for the chemical elements. The straight line is fitted for  $Z > 6$ .

Silicium de  $300 \mu\text{m}$

Particule au Minimum d'ionisation (mip) :

Si:  $Z=14$



Dans une zone déplétée de  $300 \mu\text{m}$ , un mip dépose une énergie :

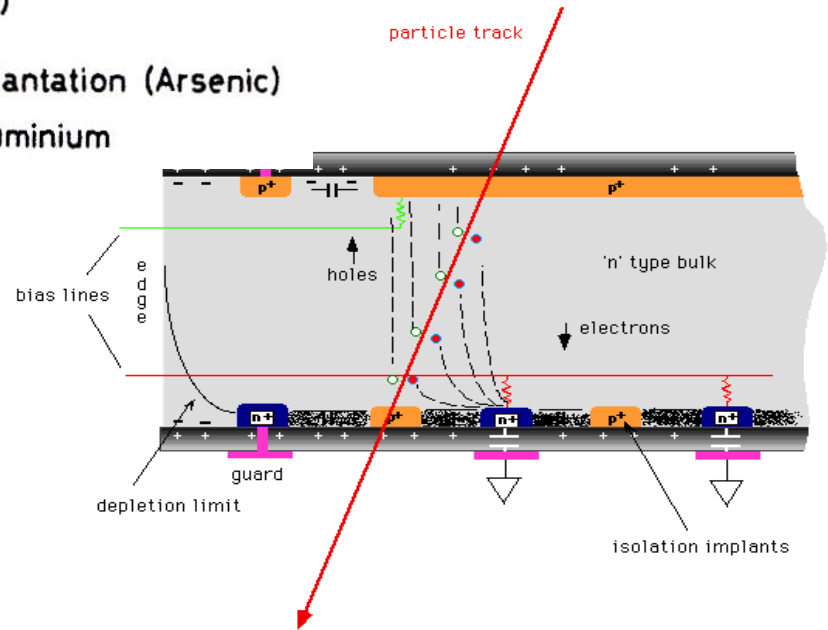
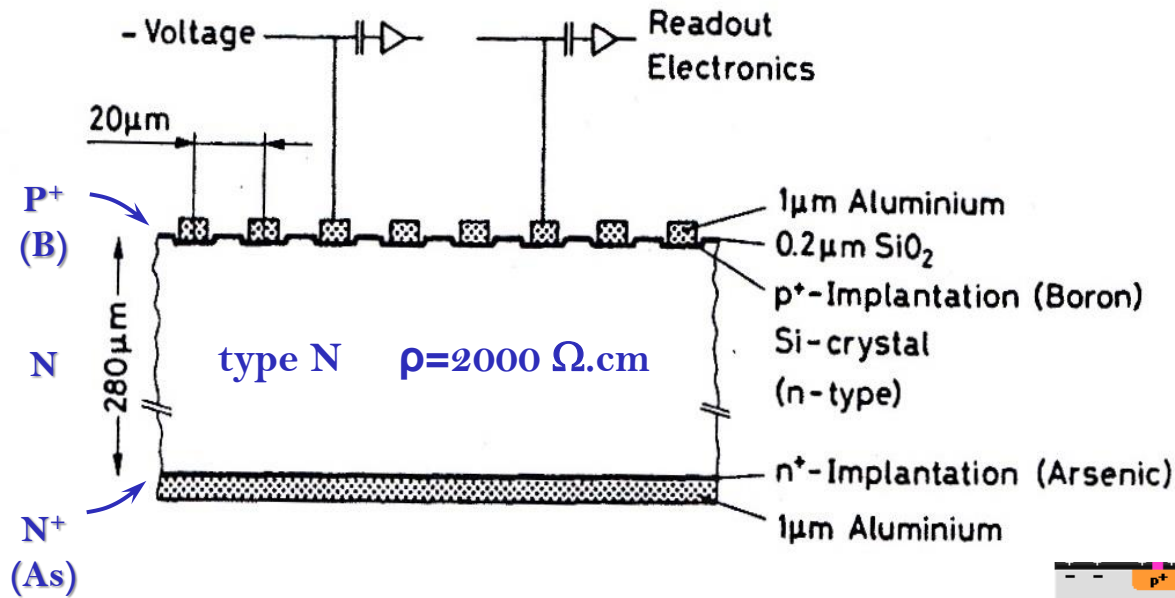
$$E = 0.03 \text{ cm} \times (1.6 \text{ MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)) \times (2.33 \text{ g}/\text{cm}^3) = 100 \text{ keV}$$

Sachant qu'il faut  $3.6 \text{ eV}$  pour libérer une paire électron-trou dans le silicium, le nombre de paires créées est de :

$$100 \text{ keV} / 3.6 \text{ eV} = 25000 \text{ paires.}$$

(80 paires par micron pour un mip)

# Les détecteurs microstrips



## Détecteur de Vertex Atlas - LHC



# Détecteur au Silicium dans Atlas

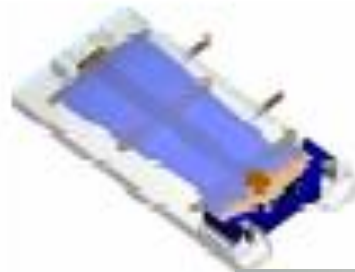
## STC d'ATLAS

Plaquette 6 cm x 6 cm

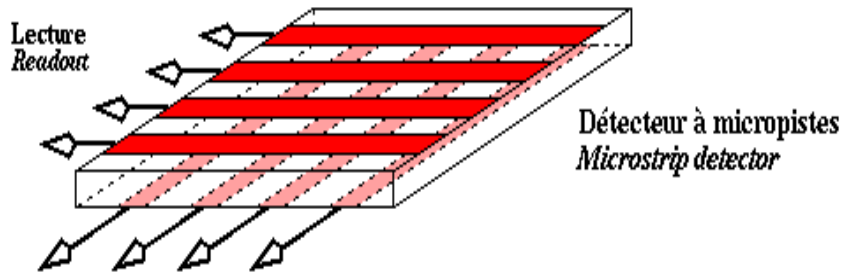
768 micropistes de 20  $\mu\text{m}$  de large

Lecture tous les 80  $\mu\text{m}$

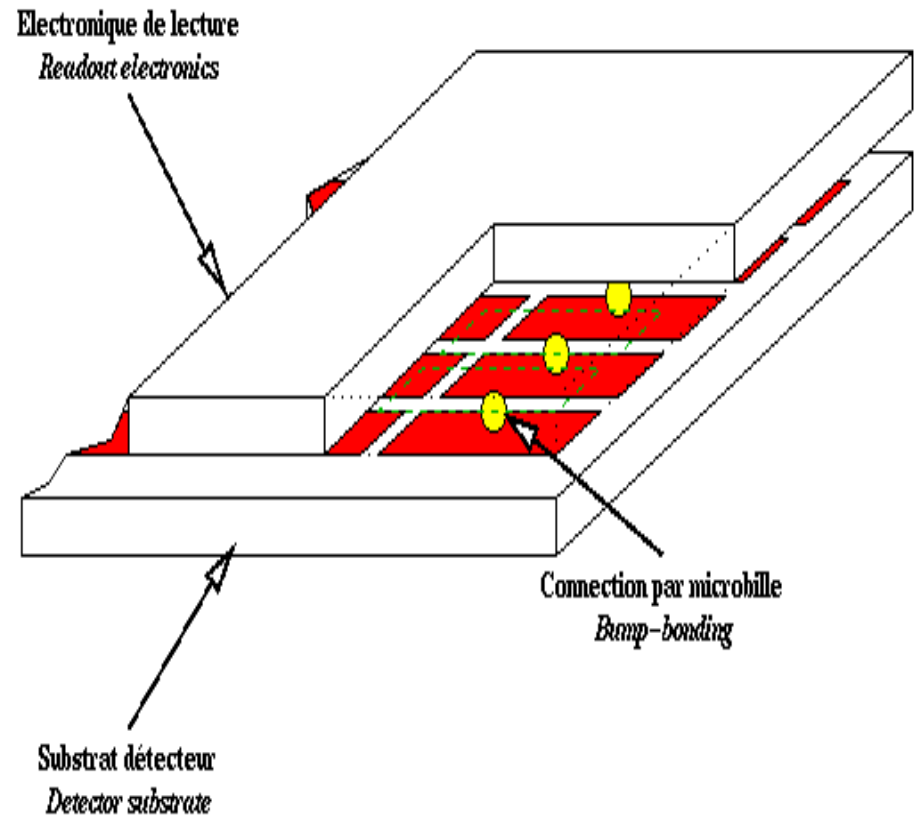
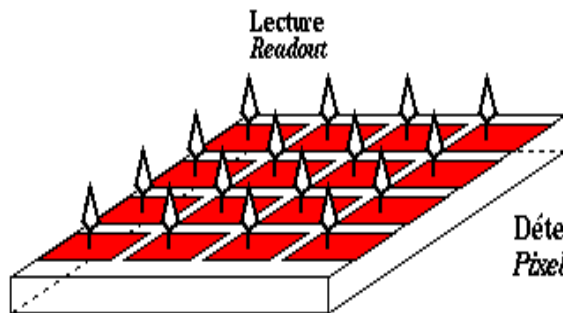
Épaisseur 300  $\mu\text{m}$



# Les détecteurs à Pixels



Lecture  
*Readout*



# Détecteurs au Silicium

## Utilisation en physique nucléaire

---

**Mesures d'énergie**  
(Grande dynamique)

**Mesures de temps**

**Mesures de position**  
(Segmentation en pistes)

**Identification de noyaux**

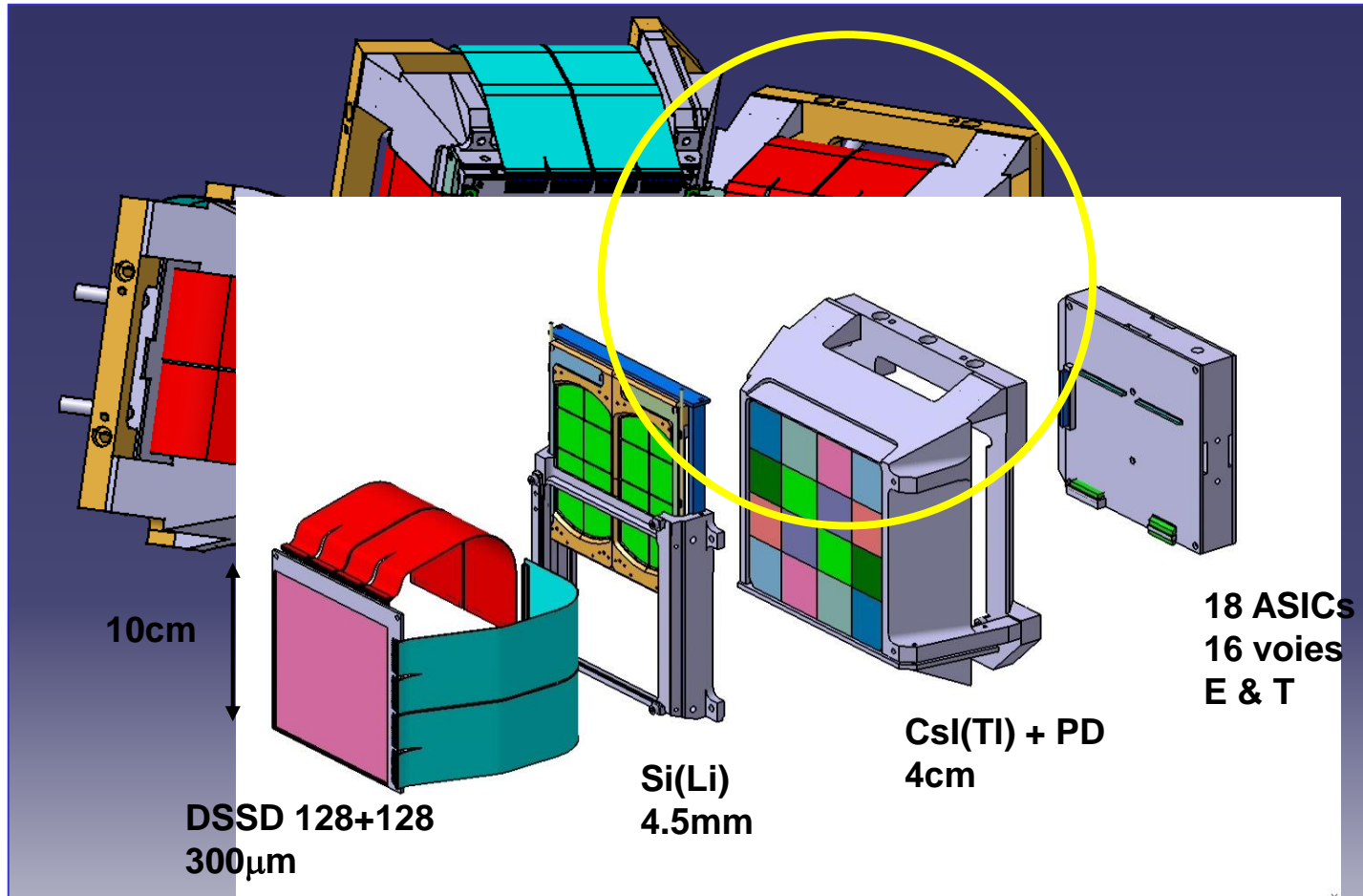
Perte Energie / Energie

Energie / Temps de vol

Forme d'impulsion

# The MUST2 Array

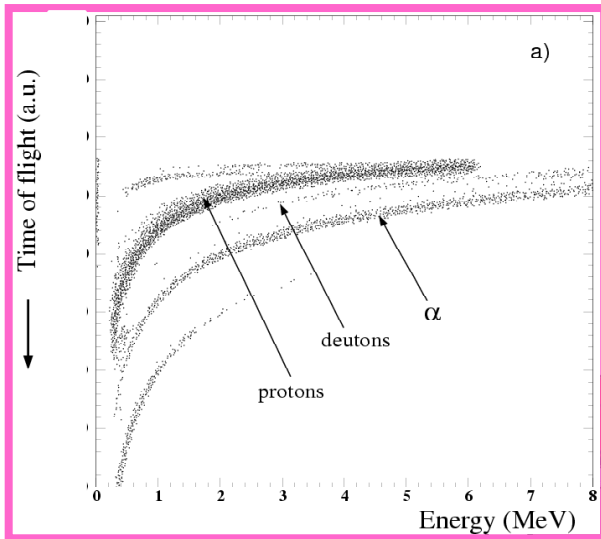
Collaboration: IPNO, SPhN/Saclay, GANIL



# The MUST2 Array

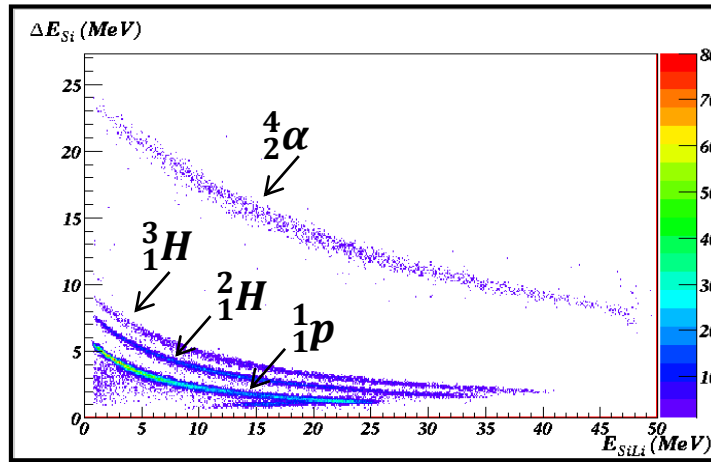
Collaboration: IPNO, SPhN/Saclay, GANIL

Temps de Vol  
Energie



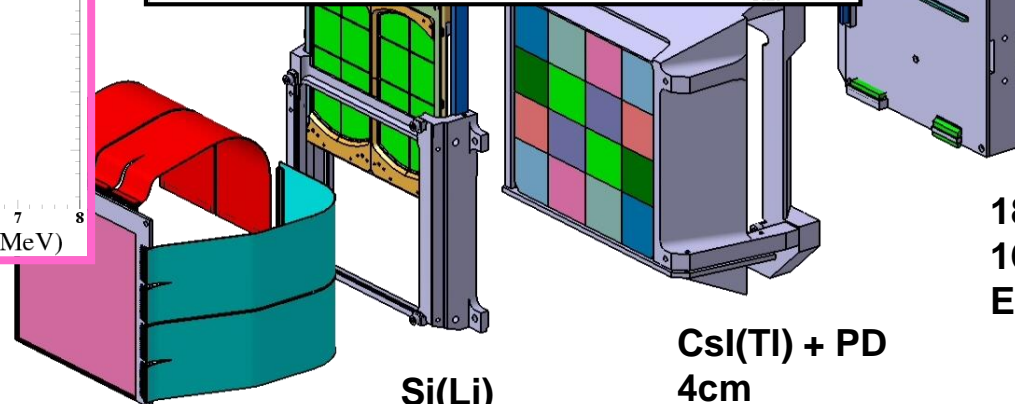
Stopping power  
 1MeV electrons: 2 mm Si  
 6MeV protons: 300  $\mu$ m Si  
 5MeV  $\alpha$ : 30  $\mu$ m Si

**DSSD 128+128**  
**300 $\mu$ m**

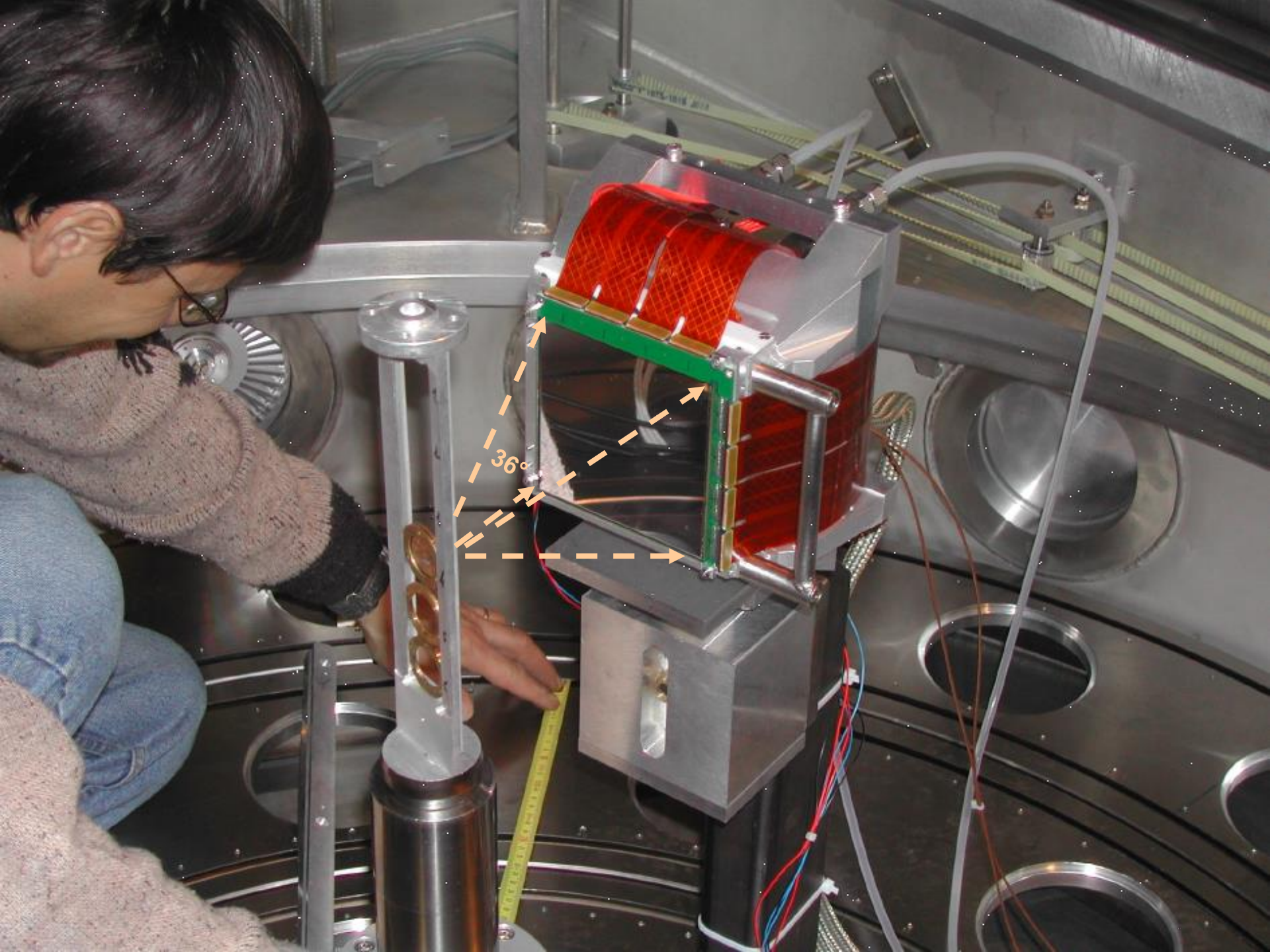


Perte d'énergie  
Energie

$$\Delta E \propto \frac{AZ^2}{E}$$



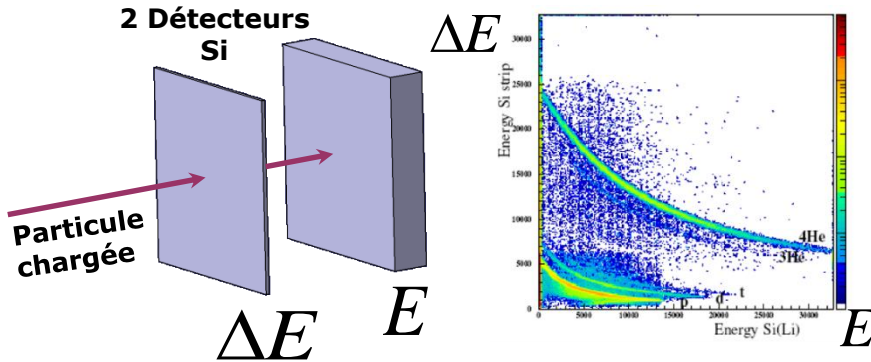
**18 ASICs**  
**16 voies**  
**E & T**



36°

# Identification de Particules par utilisation de l'analyse par discrimination de forme (PSD)

## 1) Méthode actuelle



$$\Delta E \propto \frac{AZ^2}{E}$$

$Z$  = Charge particule incidente

$$A = \frac{2E}{(d/t)^2}$$

$A$  = Masse atomique

Particule touche 2 étages :

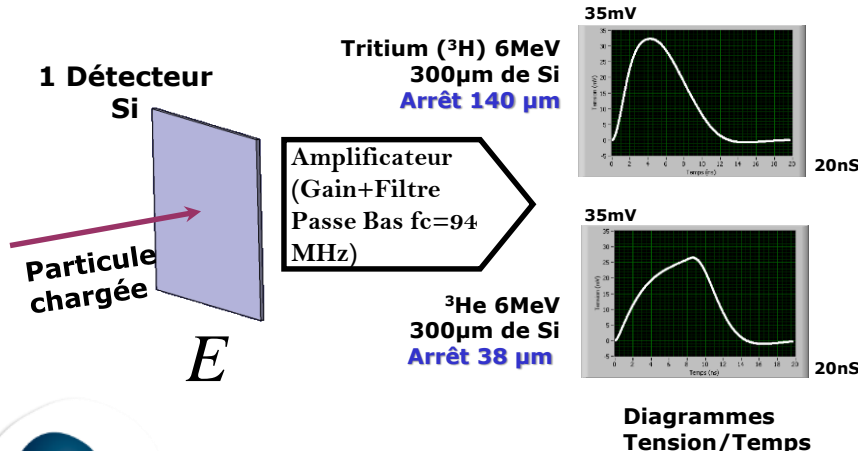
- Dépôt énergie → 2 étages
- **très bonne** identification par  $\Delta E/E$

Particule s'arrête dans 1er étage :

- Dépôt énergie → 1 étage
- Identification **médiocre** par TOF/E (donne A et pas Z)
- Ex: pb d'identification Tritium et  $^3\text{He}$

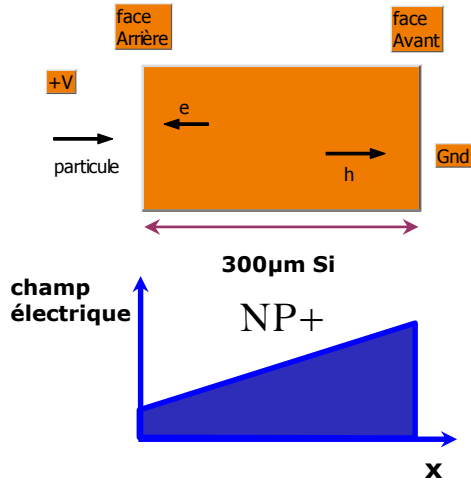
⇒ Discrimination par la forme

## 2) La solution: analyse par discrimination de forme

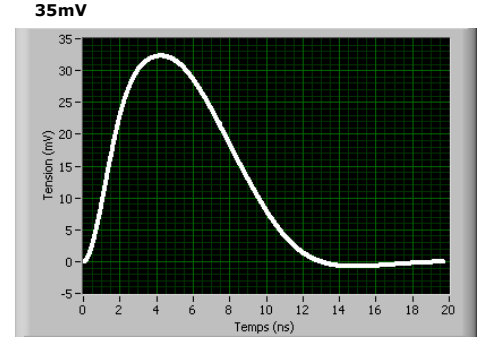
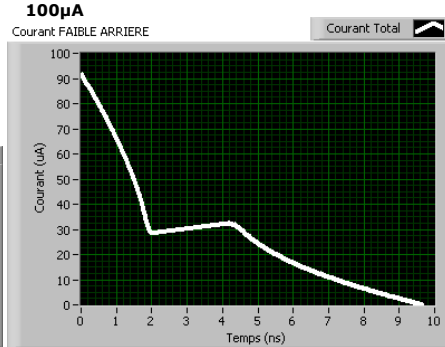
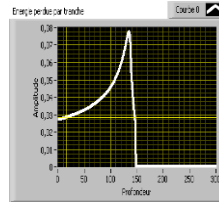


Diagrammes Tension/Temps

# Identification de Particules par utilisation de l'analyse par discrimination de forme (PSD)

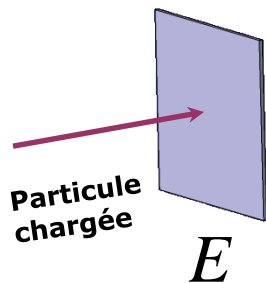


**Tritium 6MeV**  
300µm de Si  
Arrêt 140 µm

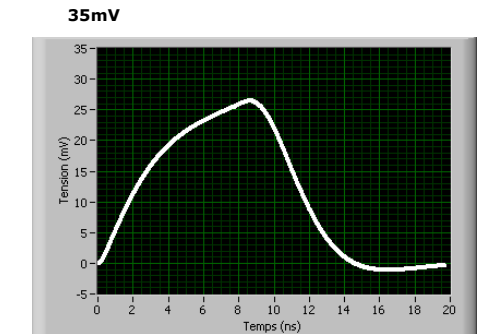
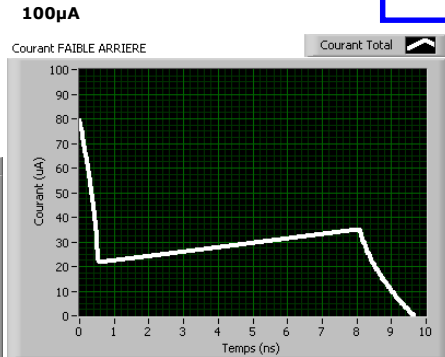
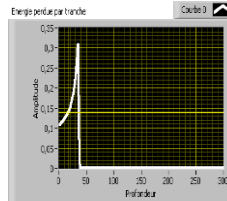


**Courbe de Bragg**

**Amplificateur**  
(Gain+Filtre  
Passe Bas  $f_c=94$   
MHz)



**<sup>3</sup>He 6MeV**  
300µm de Si  
Arrêt 38 µm



- La forme du signal dépend des effets du champ électrique et du Plasma créé
- Etudes en mono-voie puis multi-voies

⇒ **TRAITEMENT DU SIGNAL**

# VII - Détecteurs germanium

# Les semi-conducteurs

- Germanium

	Ge	Si	unité
concentration $n_i$ à 300°K	$\approx 2,4 \times 10^{13}$	$\approx 1,4 \times 10^{10}$	atomes/cm <sup>3</sup>
concentration $n_i$ à 77°K	$\approx 3,2 \times 10^{-7}$	$\approx 2,3 \times 10^{-20}$	atomes/cm <sup>3</sup>

- Densité :  $5,32 \text{g.cm}^{-3}$
- Mobilité des trous :  $42000 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  à 77°K
- Mobilité des électrons :  $36000 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  à 77°K
- Utilisation à des températures cryogéniques (77°K-azote liquide) afin de limiter la génération thermique de porteurs (faible gap  $E_g = 0,67 \text{ eV}$ )
- $w = 2,96 \text{ eV}$  à 77°K

$$d \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon V}{q_e N}}$$

$d$ : profondeur zone déplétée

$V$ : tension de polarisation inverse

$\varepsilon$ : constante diélectrique du matériau

$q_e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

$N$ : taux d'impureté dans le Semi Conducteur

(souvent noté  $N = |N_A - N_D|$  pour les détecteurs Ge)

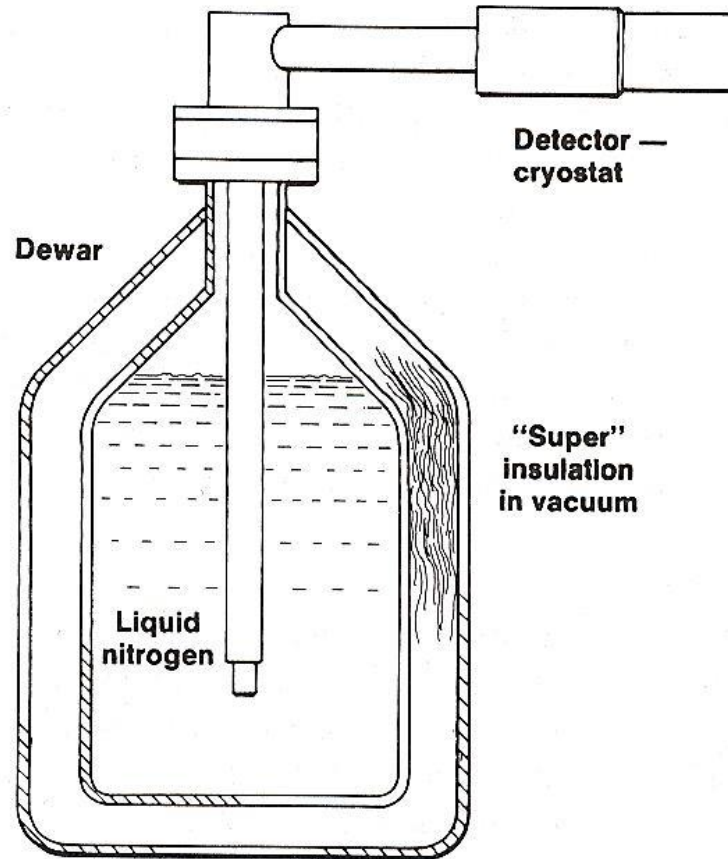
A une tension donnée, pour augmenter  $d$  il faut diminuer  $N$ :

→ (HPGe)  $d \gg 1 \text{ cm}$   $10^9 \text{ a } 10^{10} \text{ at/cm}^3$  pour  $10^{22} \text{ at/cm}^3$

→ avoir une zone intrinsèque (compensation Ge(Li)) -- haute résistivité ( $100\,000 \Omega \cdot \text{cm}$ )

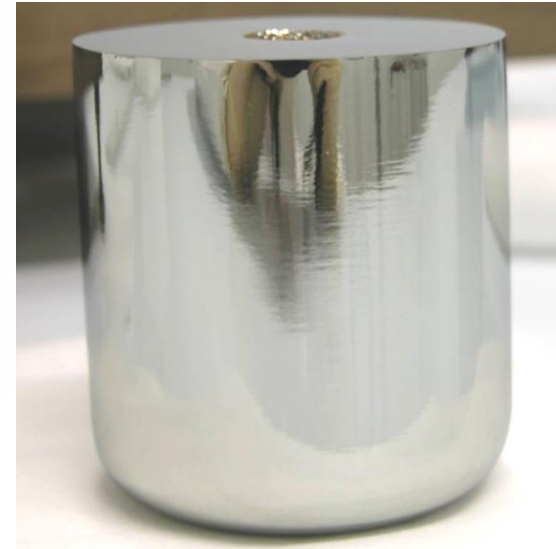
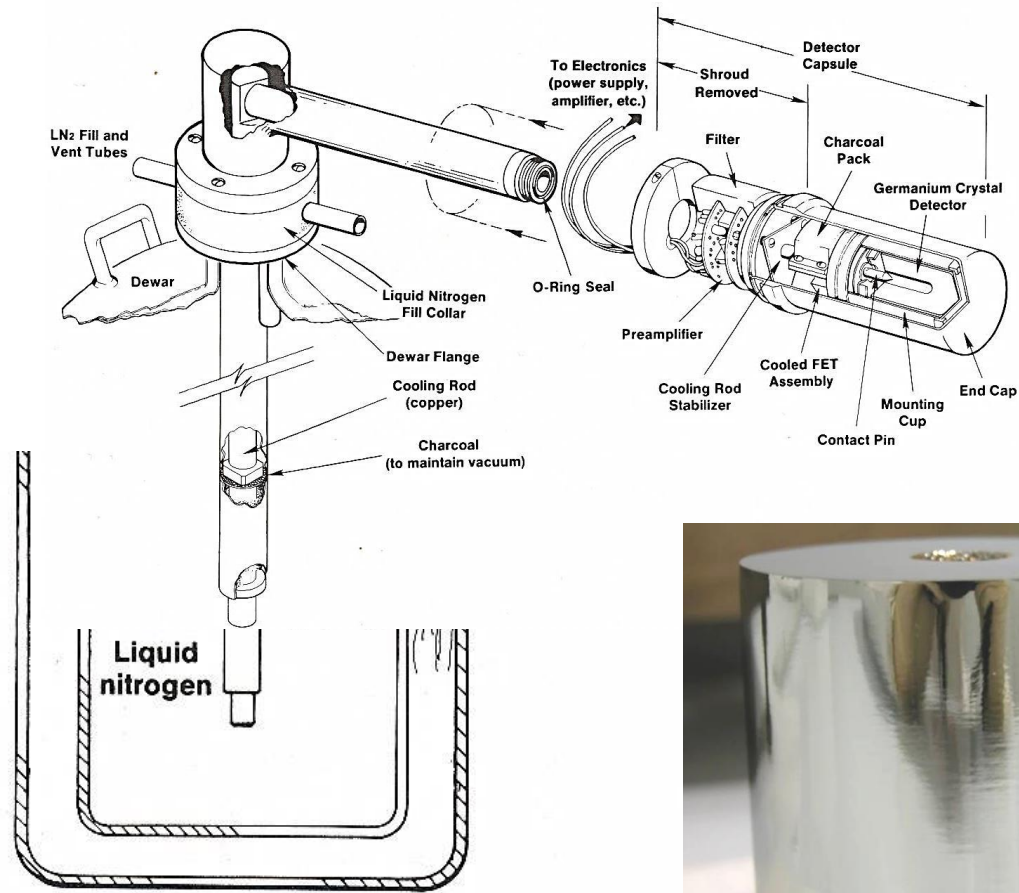
# Détecteurs au Germanium

## Détection de photons



# Détecteurs au Germanium

## Détection de photons

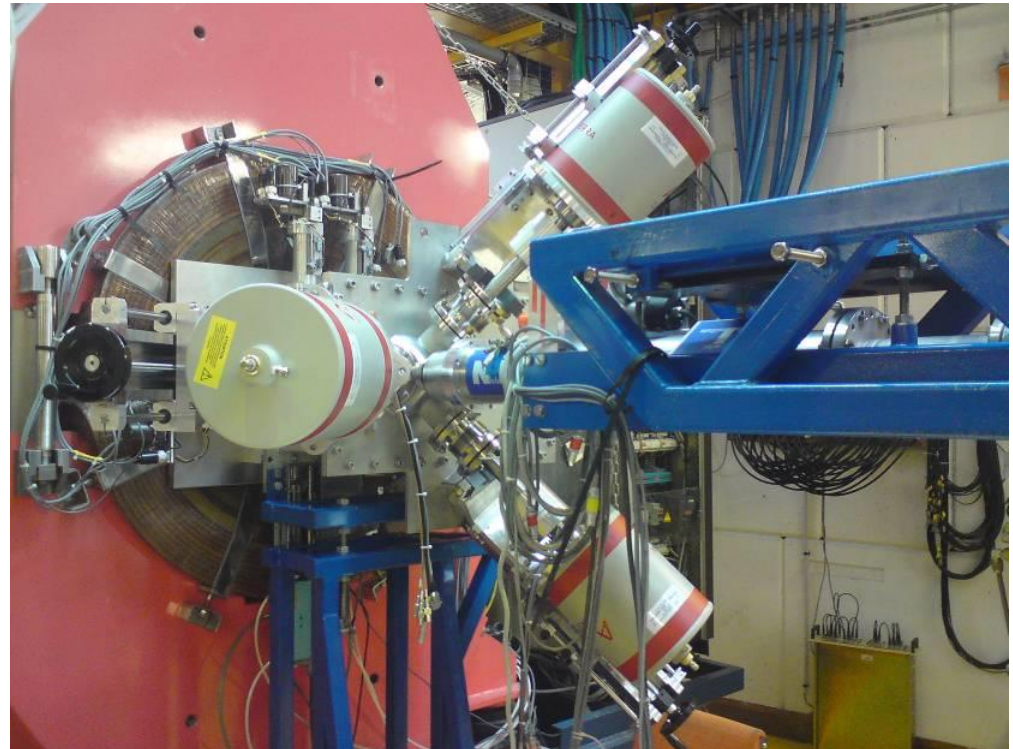


# projet FLUO-X @ GANIL



Montage de la  
mécanique support  
d'un détecteur  
Germanium

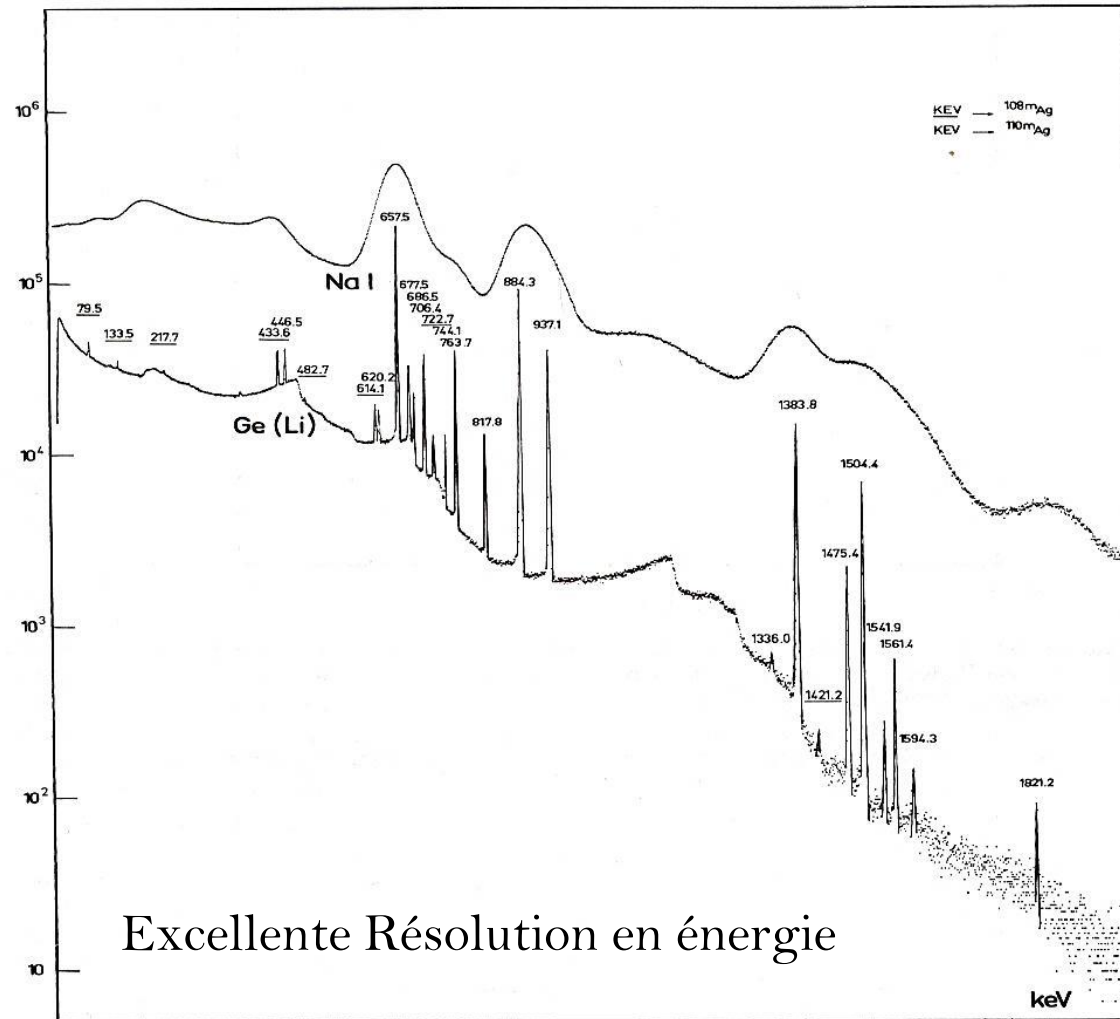
Réglage et  
alignement



3 détecteurs Germanium  
Vis a billes pour réglage de la focale  
Plaque demi-sphère à 3 piquages pour chambre à vide

# Détecteurs au Germanium

## Détection de photons

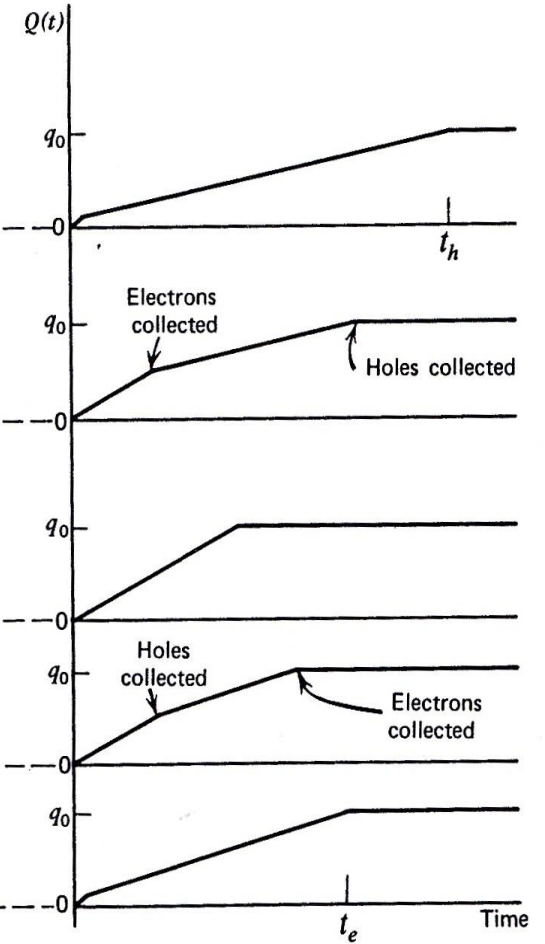
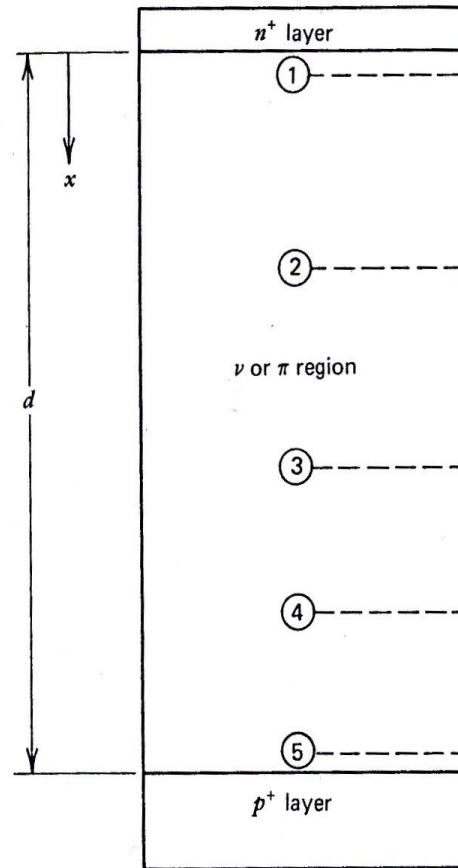
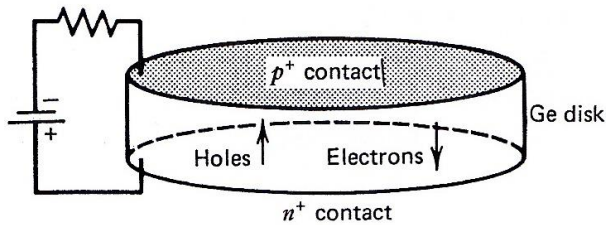


# VII\_a - Les détecteurs "planaires"

# Détecteurs au Germanium

Forme d'impulsion (en charge) pour différents points d'interaction

## Détecteur planaire



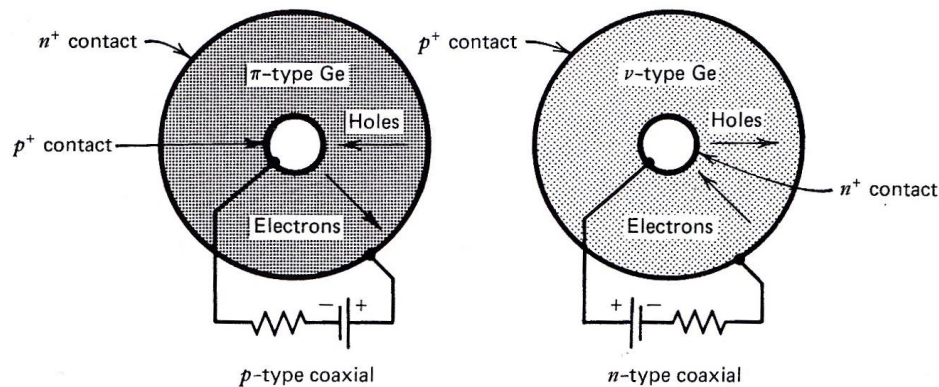
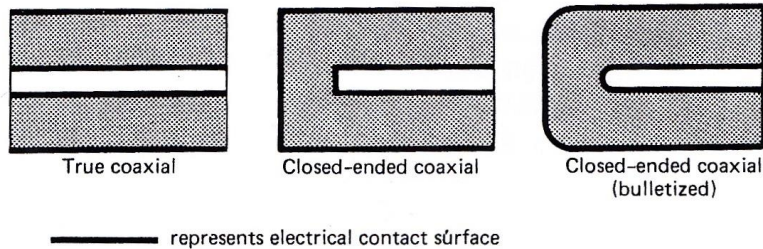
Extrait du livre de Knoll  
(Modèle simplifié)

# VII\_b - Les détecteurs "coaxiaux"

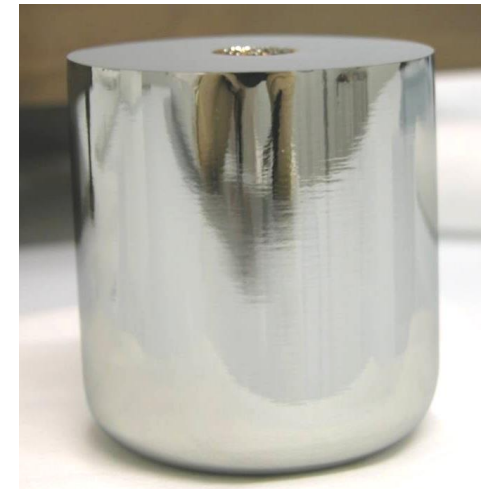
# Détecteurs au Germanium

## Détecteur coaxial

### Détecteur coaxial



Détecteur de forte épaisseur  
⇒ mesures  $\gamma$  sur une grande  
gamme énergies



Cristal de Germanium

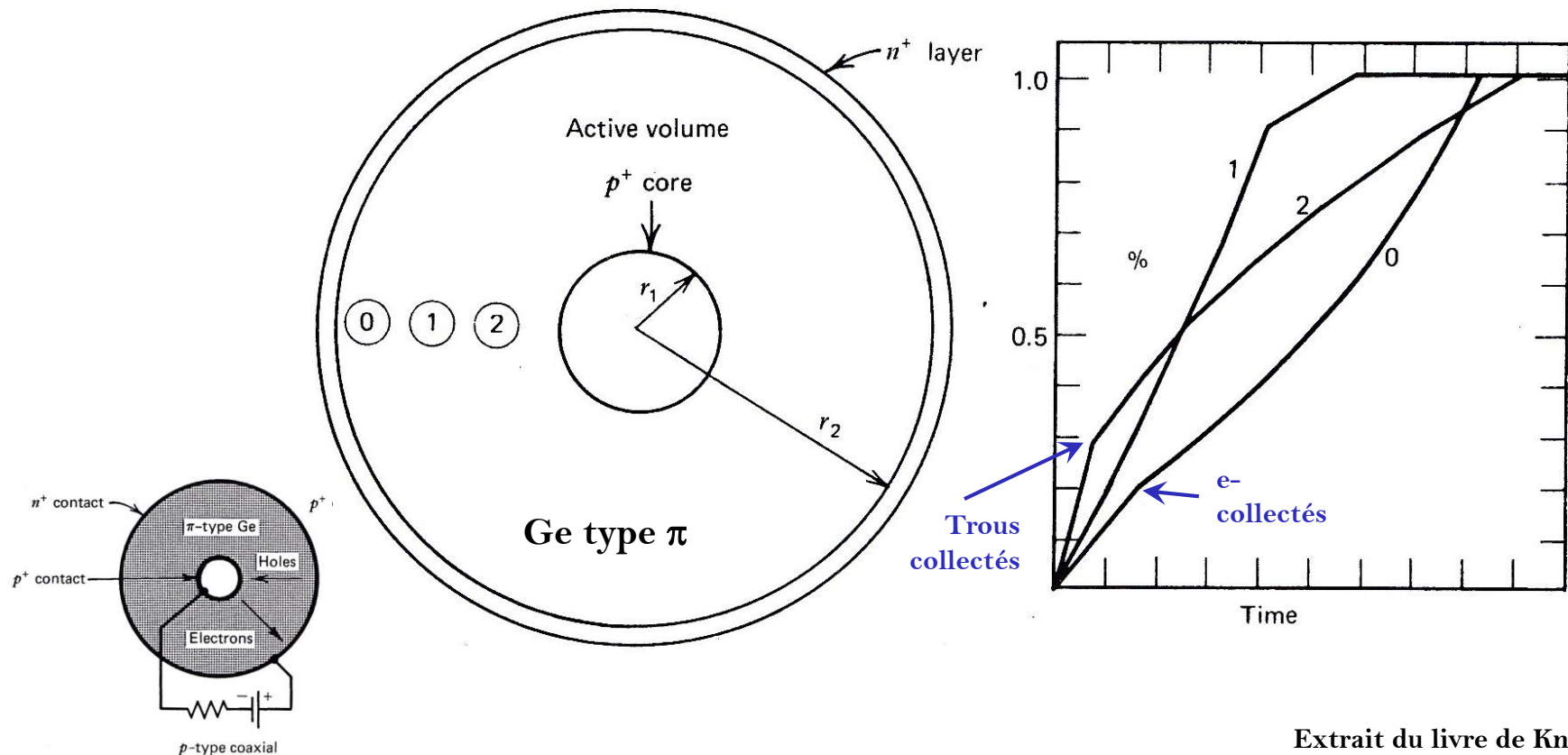
**Figure 12-2** At the top are shown the three common shapes of large-volume coaxial detectors. Each represents a cross-sectional view through the axis of a cylindrical crystal. The outer electrode is extended over the flat front (left) surface in both closed-ended cases. Cross sections perpendicular to the cylindrical axis of the crystal are shown at the bottom. The HPGe material may be either high-purity  $p$  or  $n$  type. The corresponding electrode configurations are shown for each type.

Extrait du livre de Knoll  
(Modèle simplifié)

# Détecteurs au Germanium

Forme d'impulsion (en charge) pour différents points d'interaction

## Détecteur coaxial

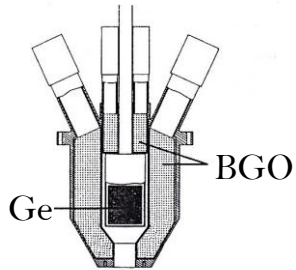


Extrait du livre de Knoll  
(Modèle simplifié)

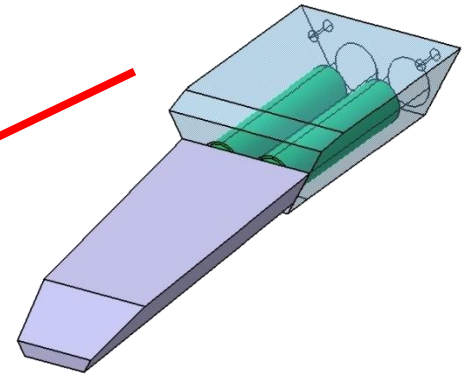
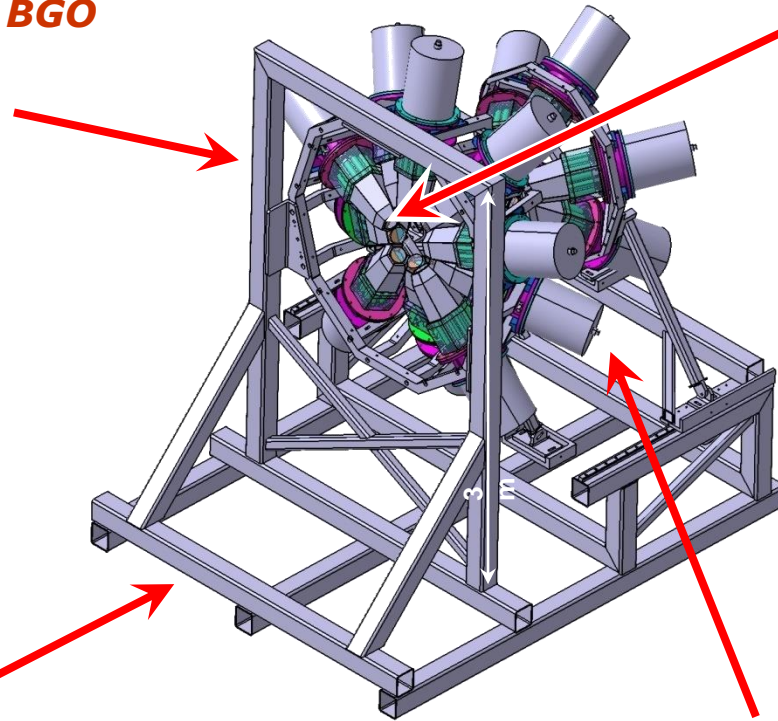
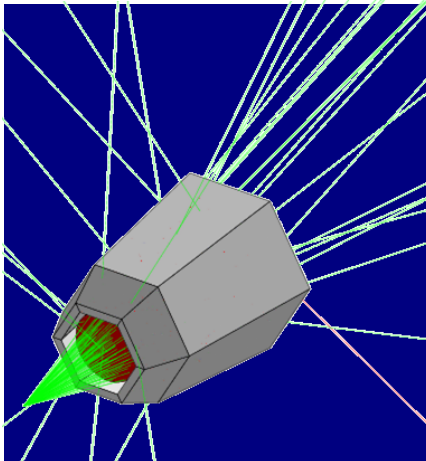
# VII\_c - "Anti-compton"

# Détecteurs Ge et leurs "anti-compton"

## Projet ORGAM



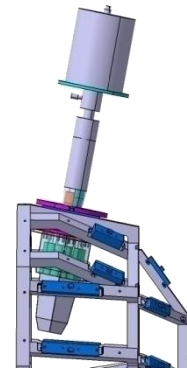
- Simulations Geant4 Ge+BGO
- Optimisation taille et position BGO



- Simulations Litrani (collection de lumière)
- Choix PMT
- Réalisation bases & tests

- Mécanique (utilisation d'alvéoles de carbone)
- Calculs de structure
- Intégration

- Maintenance des détecteurs Ge



EUROBALL



dépasser les frontières

Jean Peyré

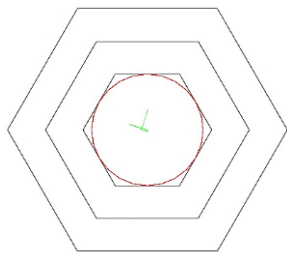
P.81

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2019

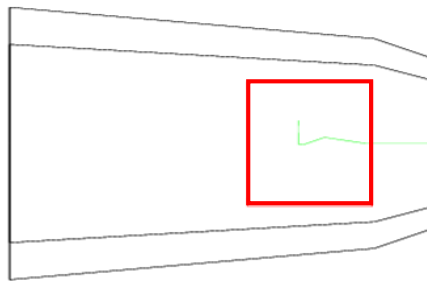
# Détecteurs Ge et leurs "anti-compton"

- Simulation GEANT4 de la réponse d'un ensemble de détection Germanium + BGO à des photons gamma d'énergie comprise entre 100 keV et 5 MeV.

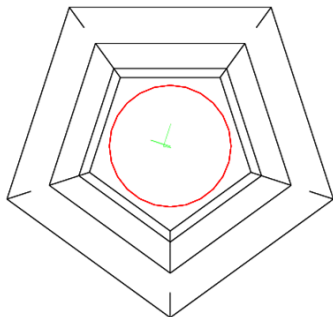
$\gamma$  2 MeV



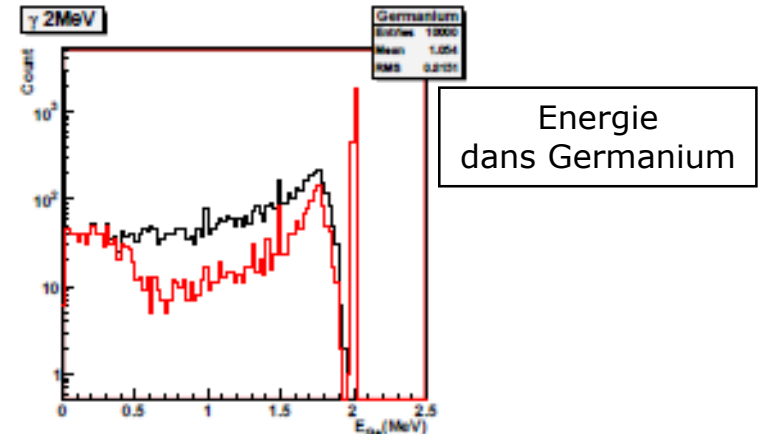
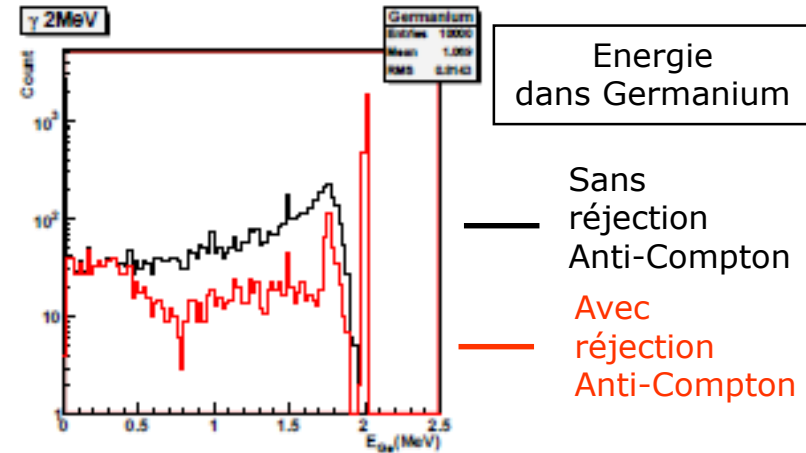
BGO hexagonal



$\gamma$  2 MeV

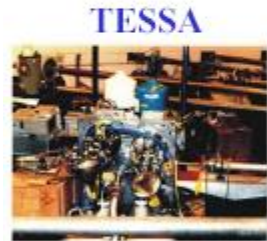


BGO pentagonal



# VII\_d - "Le projet AGATA"

## Arrays from TESSA0 to AGATA



John Simpson , Nuclear Physics Group

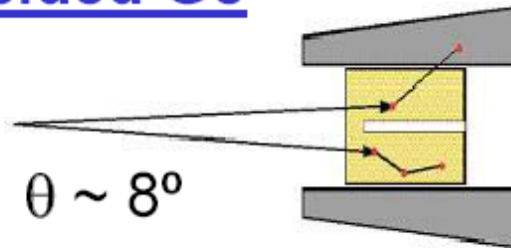
## Idea of $\gamma$ -ray tracking

### Compton Shielded Ge

$$\epsilon_{ph} \sim 10\%$$

$$N_{det} \sim 100$$

$$\Omega \sim 40\%$$

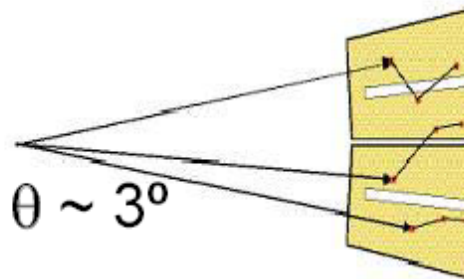


large opening angle  
means poor energy  
resolution at high  
recoil velocity

### Ge Sphere

$$\epsilon_{ph} \sim 50\%$$

$$N_{det} \sim 1000$$



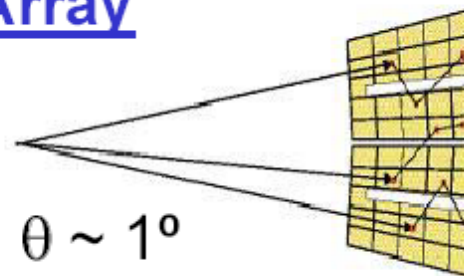
too many detectors  
are needed to avoid  
summing effects

### Ge Tracking Array

$$\epsilon_{ph} \sim 50\%$$

$$N_{det} \sim 100$$

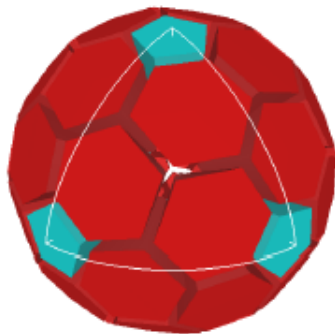
$$\Omega \sim 80\%$$



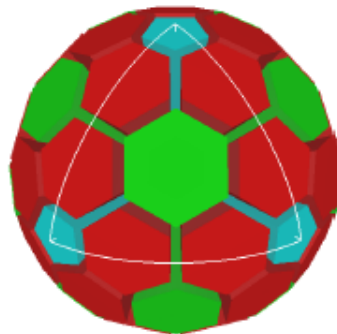
Combination of:

- segmented detectors
- digital electronics
- pulse processing
- tracking the  $\gamma$ -rays

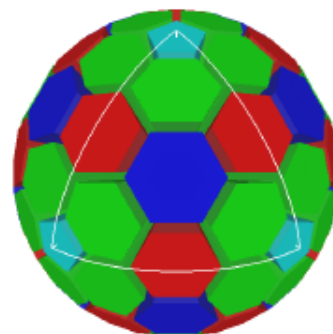
## Geodesic Tiling of Sphere using 60–240 hexagons and 12 pentagons



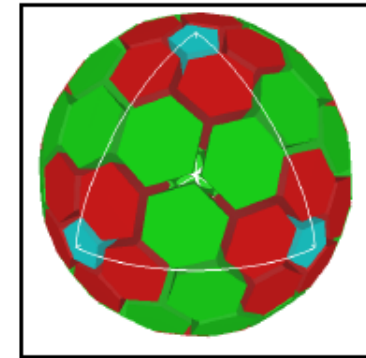
60



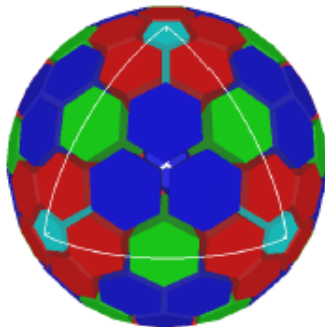
80



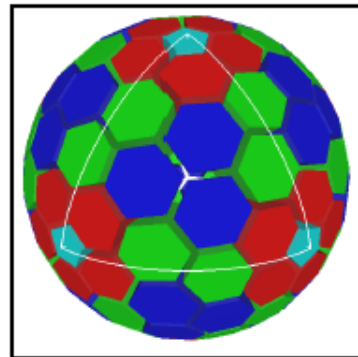
110



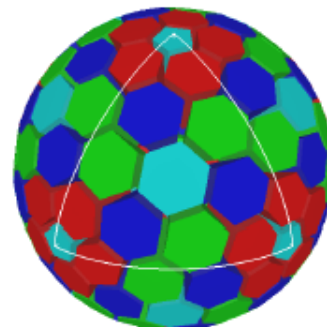
120



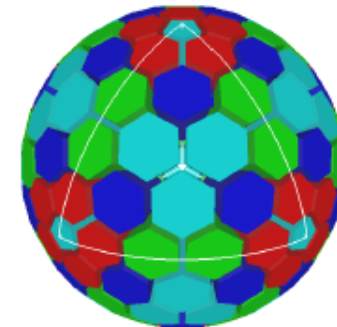
150



180



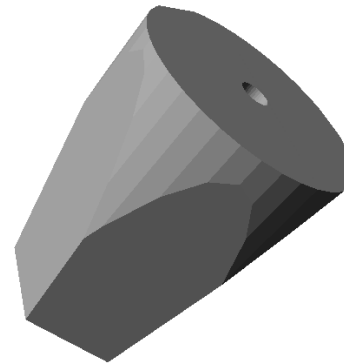
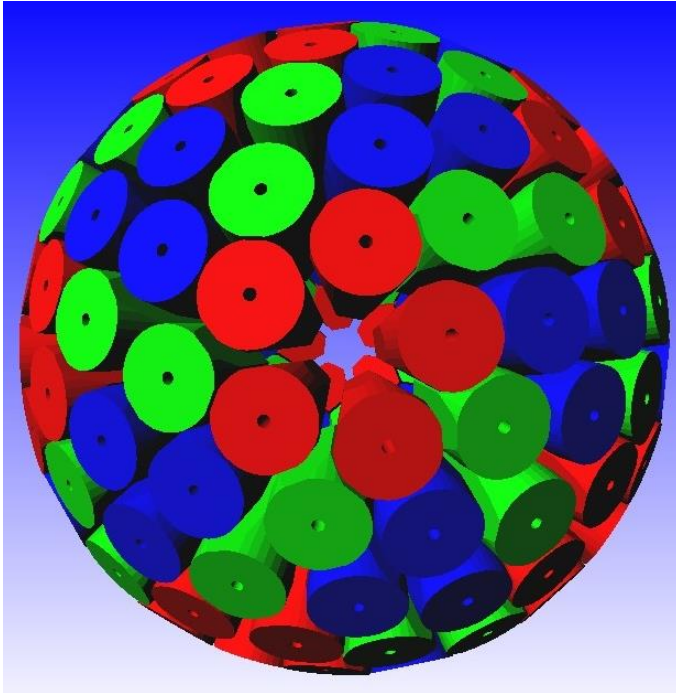
200



240

# AGATA

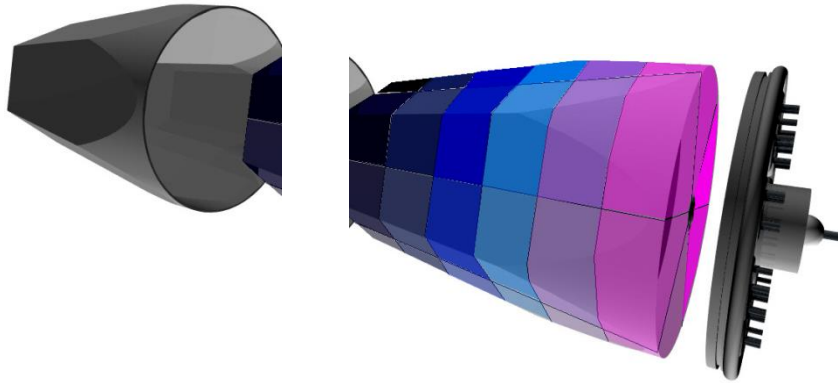
## The $4\pi$ 180 detector Configuration



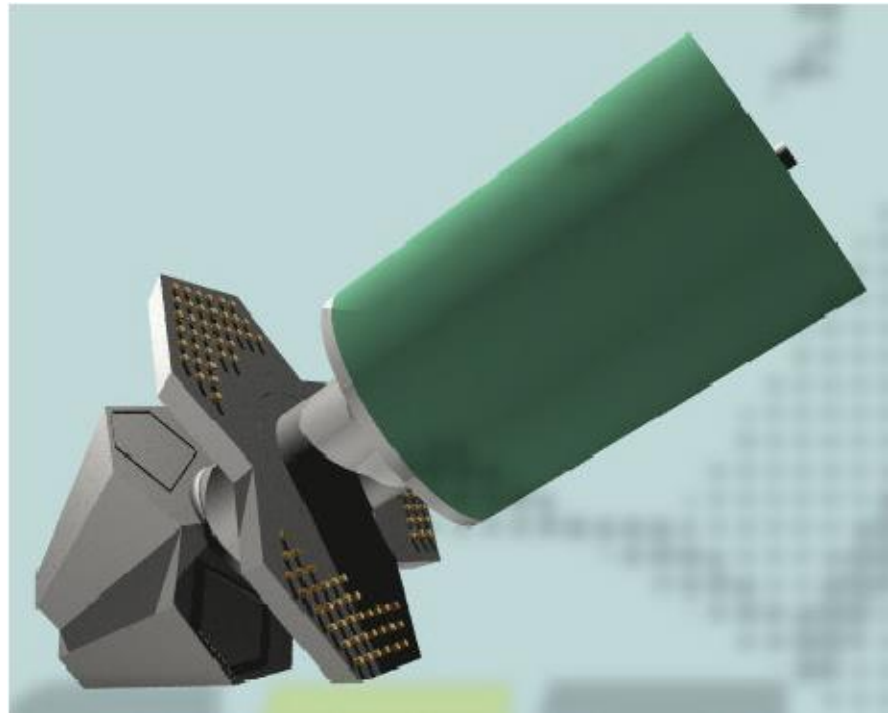
Ge crystals size:  
length 90 mm  
diameter 80 mm

180 hexagonal crystals	3 shapes
60 triple-clusters	all equal
Inner radius (Ge)	23.1 cm
Amount of germanium	362 kg
Solid angle coverage	82 %
Singles rate	~50 kHz
6480 segments	
Efficiency:	43% ( $M_\gamma=1$ )    28% ( $M_\gamma=30$ )
Peak/Total:	58% ( $M_\gamma=1$ )    49% ( $M_\gamma=30$ )

# AGATA Detectors



Hexaconical Ge crystals  
90 mm long  
80 mm max diameter  
36 segments



3 encapsulated crystals  
111 preamplifiers with cold FET



# AGATA: Advanced GAMMA Tracking Array



Spectromètre gamma 4 $\pi$  constitué  
uniquement de détecteurs Germanium.  
**DEMONSTRATEUR**

