

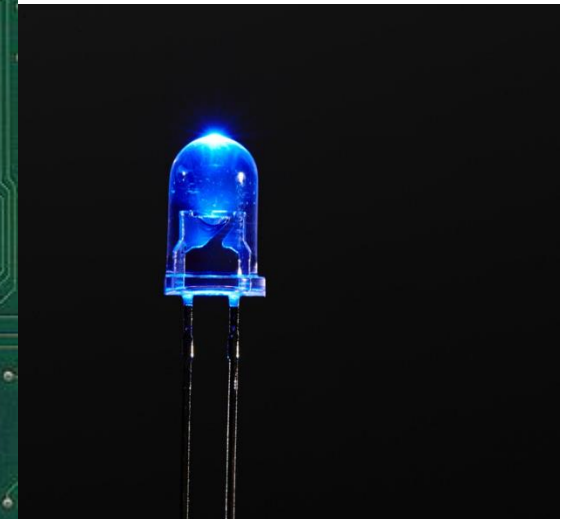


Éléments de Physique : Électromagnétisme

CHAPITRE 9 : SEMI-CONDUCTEURS

Table des matières

- Matériaux semi-conducteurs
- Propriétés de base
- Applications et dispositifs

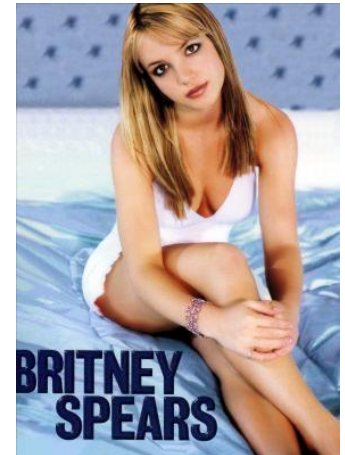


Qu'est-ce qu'un semi-conducteur ?

On distingue plusieurs types de matériaux sur base de leur résistivité électrique (critère qualitatif) :

- Métal : $\rho < 10^{-4} \Omega.m$
- Isolant : $\rho > 10^6 \Omega.m$
- Semi-conducteur : $10^{-4} < \rho < 10^6 \Omega.m$

<http://britneyspears.ac/lasers.htm>



Les propriétés électriques des **semi-conducteurs** ressemblent à celles des isolants, mais la probabilité pour qu'un électron contribue au courant électrique y est suffisamment grande pour les rendre faiblement conducteurs.

Autres critères possibles : mobilité, optique...

Composition chimique

Periodic table of the elements

group 1* Ia**	2 IIa											13 IIIa	14 IVa	15 Va	16 VIa	17 VIIa	18 0
1 H												5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3 Li	4 Be											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
11 Na	12 Mg	3 IIIb	4 IVb	5 Vb	6 VIb	7 VIIb	8 VIIIb	9 VIIIb	10 VIIIb	11 Ib	12 IIb	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	113 *** (Uut)	114 *** (Uuq)	115 *** (Uup)	116 *** (Uuh)		
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cp						118 *** (Uuo)
lanthanide series		6 58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
actinide series		7 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 Lr		

métaux

isolants

* Numbering system adopted by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC).

** Numbering system widely used, especially in the U.S., from the mid-20th century.

*** Discoveries of elements 113–116 and 118 are claimed but not confirmed. Element names and symbols in parentheses are temporarily assigned by IUPAC.

© 2009 Encyclopædia Britannica, Inc.

Semi-conducteurs intrinsèques

Principaux semi-conducteurs intrinsèques : Si, Ge

Periodic table of the elements

group 1* Ia**																		18 0	
1	H																	2	He
2	Li	Be																	
3	Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cp	(Uut)	(Uuq)	(Uup)	(Uuh)			
lanthanide series			58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
actinide series			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	Lr			

* Numbering system adopted by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC).

** Numbering system widely used, especially in the U.S., from the mid-20th century.

*** Discoveries of elements 113–116 and 118 are claimed but not confirmed. Element names and symbols in parentheses are temporarily assigned by IUPAC.

© 2009 Encyclopædia Britannica, Inc.

Semi-conducteurs III-V

Semi-conducteurs III-V : GaAs, InAs, GaP...

Periodic table of the elements

group 1* Ia**																		18 0	
1	2																	2	
1	2																	He	
3	4																	10	
11	12																	Ne	
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	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116		118		
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cp	(Uut)	(Uuq)	(Uup)	(Uuh)		(Uuo)		
lanthanide series		58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71				
		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
actinide series		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	Lr				

* Numbering system adopted by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC).

** Numbering system widely used, especially in the U.S., from the mid-20th century.

*** Discoveries of elements 113–116 and 118 are claimed but not confirmed. Element names and symbols in parentheses are temporarily assigned by IUPAC.

© 2009 Encyclopædia Britannica, Inc.

Semi-conducteurs II-VI

Semi-conducteurs II-VI : CdTe, ZnS, HgTe...

Periodic table of the elements

group 1* Ia**	2 IIa											13 IIIa	14 IVa	15 Va	16 VIa	17 VIIa	18 0
1 H												5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3 Li	4 Be											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
11 Na	12 Mg	3 IIIb	4 IVb	5 Vb	6 VIb	7 VIIb	8 VIIIb	9 VIIIb	10 VIIIb	11 Ib	12 IIb	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	113 *** (Uut)	114 *** (Uuq)	115 *** (Uup)	116 *** (Uuh)		
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cp						118 *** (Uuo)
lanthanide series		6 58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
actinide series		7 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 Lr		

* Numbering system adopted by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC).

** Numbering system widely used, especially in the U.S., from the mid-20th century.

*** Discoveries of elements 113–116 and 118 are claimed but not confirmed. Element names and symbols in parentheses are temporarily assigned by IUPAC.

© 2009 Encyclopædia Britannica, Inc.

Composition chimique

Les semi-conducteurs présentent une ambivalence dans leur structure électronique. Ils ne sont

- ni de bons isolants (oxides, nitrures, fluorures...)
- ni de bons conducteurs (Cu, Al, Au...).

Les électrons de valence jouent un rôle important :

- Le transfert de charge dans la liaison chimique est faible.
- Les liaisons ne sont pas métalliques (dans les métaux, ces électrons sont libres de se déplacer).

Mobilité électronique

Comment caractériser la réponse d'un matériau à un champ E ?

Il ne suffit pas d'avoir des porteurs de charge pour qu'un matériau conduise, il faut également qu'ils puissent se déplacer.

Exemple : Dans un isolant, les électrons ne sont pas libres.

Ainsi, on définit la **mobilité** μ_e en fonction de la vitesse de dérive v_e des porteurs de charge dans un champ électrique E :

$$\mu_e = \frac{v_e}{E}$$

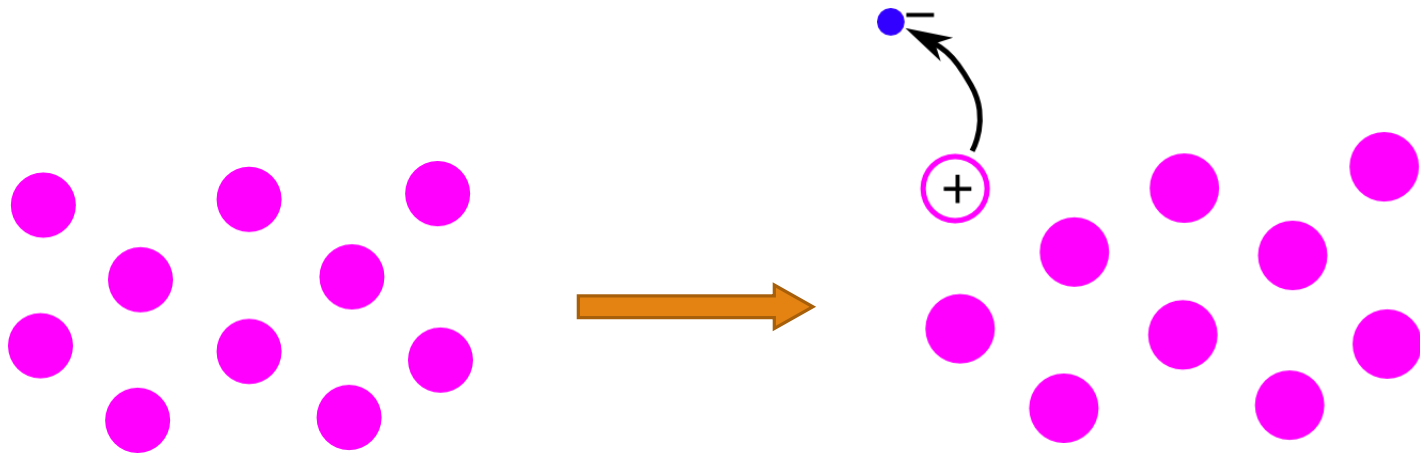
Unités : $\text{m}^2/(\text{V.s})$

La mobilité des électrons est décente dans les semi-conducteurs purs, mais il y a peu de porteurs de charge libre...

Porteurs de charge

Les porteurs de charge dans un semi-conducteur peuvent être de deux types :

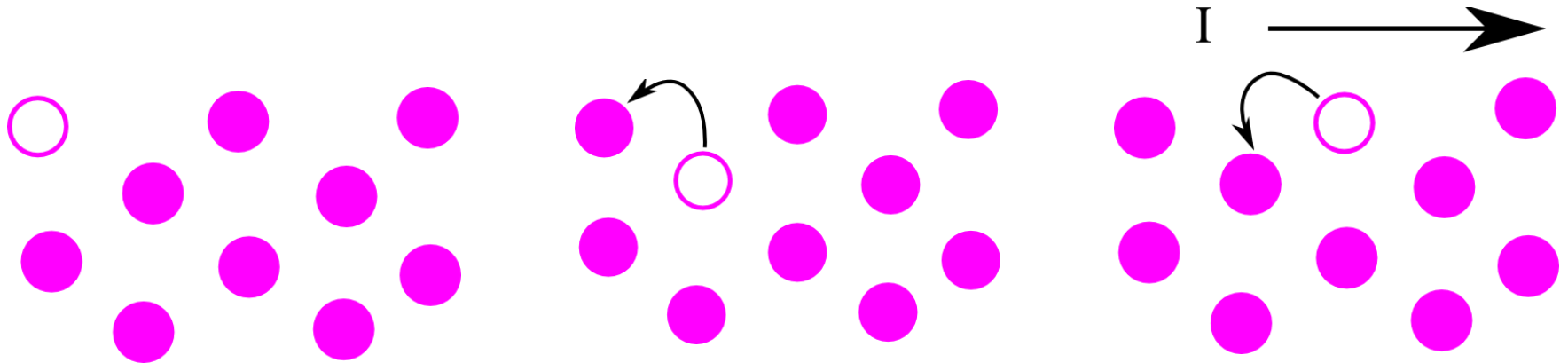
- des **électrons** (chargés $-$)
- des **trous** : lorsqu'un électron a été enlevé au matériau, la lacune (chargée $+$) peut se déplacer en permutant avec les électrons voisins.



Porteurs de charge

Dynamique

- Le courant est dans le même sens que le mouvement du trou (hopping).
- Si un électron supplémentaire et un trou se rencontrent, ils « s'annihilent » et le matériau redevient localement neutre.

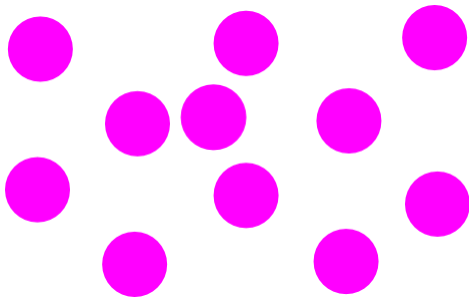


Semi-conducteurs intrinsèques

Comment les porteurs de charge apparaissent-ils ?

- Effet de la **température** : une petite fraction des électrons est excitée dans des « états de conduction », où ils sont libres de se déplacer
→ fraction correspondante de trous.
- **Défauts** « naturels » : dans les semi-conducteurs intrinsèques, les défauts peuvent donner des porteurs de charge.

Exemples : atomes interstitiels, autres espèces atomiques



Dopage

En général, il n'y a pas suffisamment de défauts naturels.

Des **atomes étrangers** peuvent être introduits dans le semi-conducteur pur pour donner ou piéger des électrons, créant ainsi des porteurs de charge. Ce processus s'appelle le **dopage**.

Exemple pour Si : B, N, P, Mg, K, As, Sb...

Les défauts sont introduits de différentes façons :

- présents naturellement
- par implantation
- par alliage

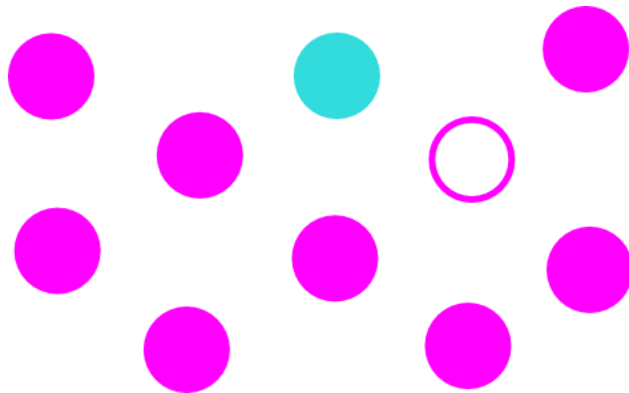
Dopage n ou p

La **valence** de l'atome étranger détermine le type des porteurs injectés, électrons (e^-) ou trous (h^+) :

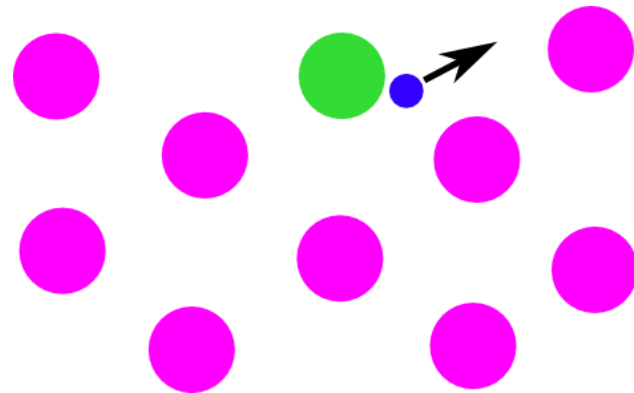
Exemple dans Si :

13 IIIa	14 IVa	15 Va
5 B	6 C	7 N
13 Al	14 Si	15 P
31 Ga	32 Ge	33 As

- B a un e^- en moins, donc il piège un e^- du Si. Le Si est donc dopé avec des trous (positifs) : dopage de **type p**
- N a un e^- en plus, donc il dope le Si négativement : dopage de **type n**



type p



type n

Densité de porteurs

Métaux

- Sodium : 1 e^- libre par atome, densité d'environ 1140 kg/m³
- Poids d'une mole de Na : 26 g

Rappel : Nombre d'Avogadro = $6,02 \times 10^{23}$ atomes/mole

- Densité de porteurs : $2,6 \times 10^{28}$ électrons/m³

Semiconducteurs

- Si pur (non dopé extrinsèquement): $1,3 \times 10^{16} e^-/\text{m}^3$
- Si dopé au P (jusqu'à 1% à haute T) : $\lesssim 10^{27} e^-/\text{m}^3$
- Quel est le signe des porteurs donnés par P ?

Composants électroniques

Que faire avec un semiconducteur ?

- Avec le même matériau de base, on peut fabriquer un isolant ou un conducteur n ou p .
- On peut contrôler la « métallicité » avec le dopage
- On peut introduire des champs électriques internes avec différents dopants.

Intérêt :

- Exécuter des opérations logiques
- Intégrer plusieurs fonctionnalités dans un seul dispositif : composants électroniques

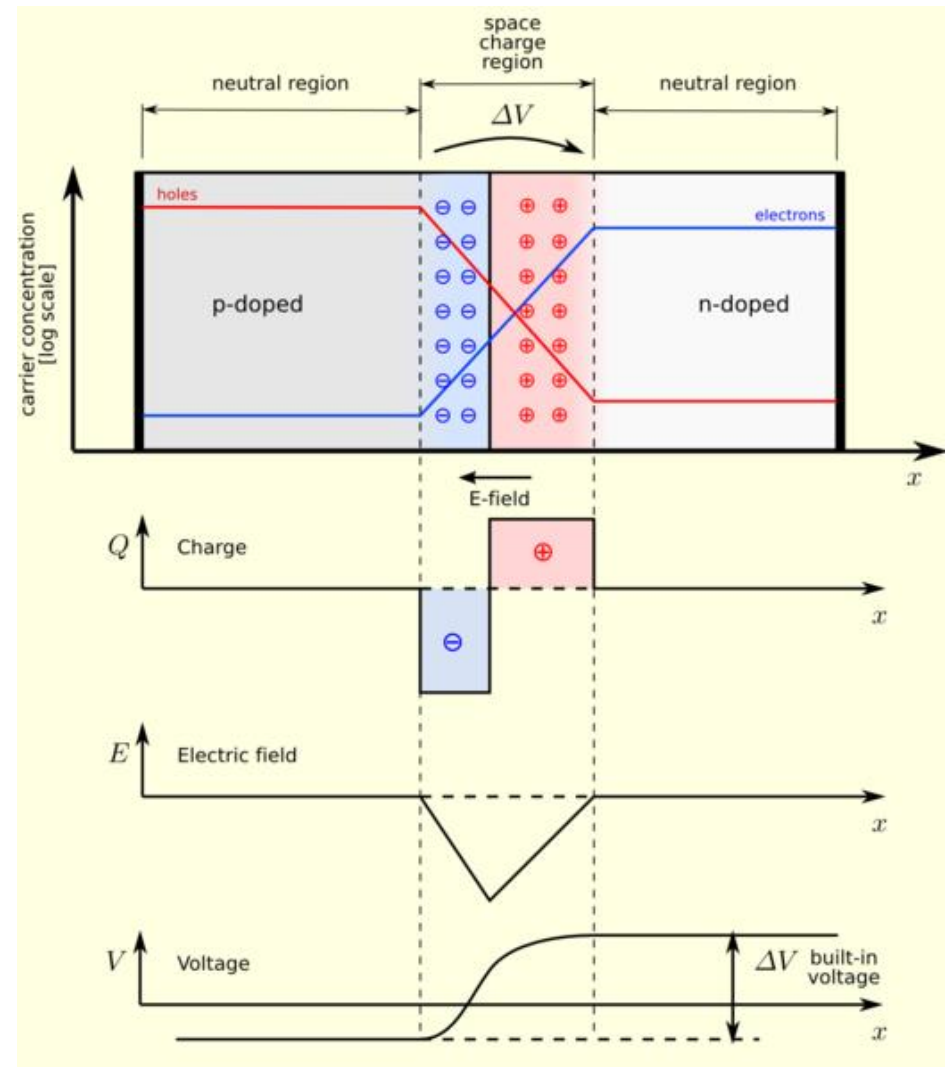
Diode

Une **diode** est un assemblage d'un semi-conducteur de type p avec un type n .

Près de la jonction (**région de déplétion**), les porteurs se neutralisent :

- charge nette locale
- donc champ E
- donc différence de potentiel

La conduction est différente selon le sens de I .



Diode

- Si on applique V dans le sens de la diode (**sens direct**), il faut surmonter $\Delta V = V_d$. Lorsque $V > V_d$, la résistance est faible.
- Dans le **sens inverse**, la diode conduit mais la résistance de la région de déplétion est grande, donc I est faible. Pour $V < V_{br}$: claquage.

Certaines diodes sont conçues pour fonctionner en inverse également : **diodes Zener**.

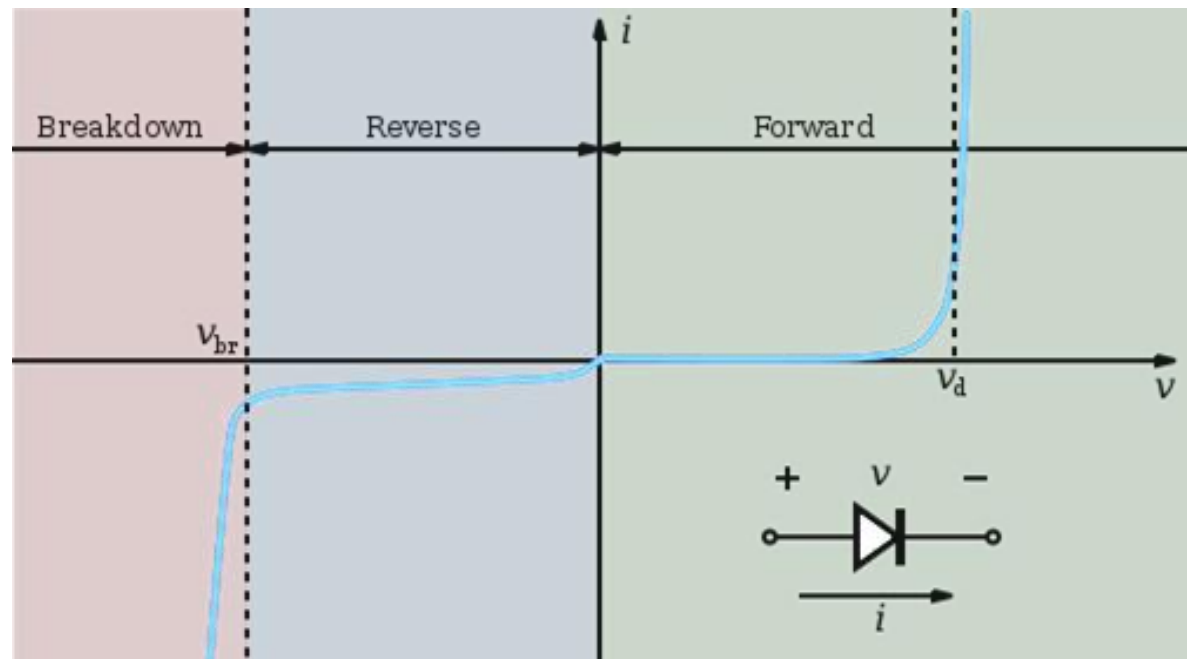
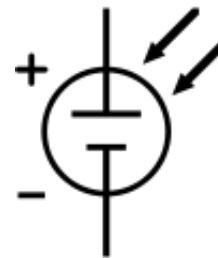
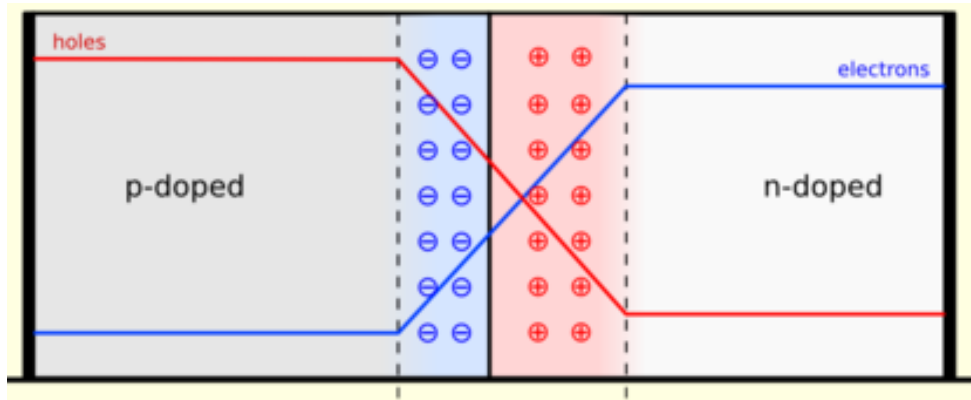


Photo-diode

- Toute charge qui se trouve dans la zone de déplétion subit un champ E .
- E déplace les e^- vers la zone n et h^+ vers la zone p .
- Une lumière suffisamment énergétique peut créer des paires $e^- - h^+$.
- Dans un circuit ouvert, une tension apparaît aux bornes de la jonction : on a fabriqué une **cellule photovoltaïque**.



Transistor

Origine de l'invention du **transistor** :

- Recherche de composants **non-linéaires actifs**, pour contrôler les circuits.
- 1947 : Bardeen, Brattain et Schockley (Bell Labs) remarquent qu'un morceau de Ge contacté amplifie le courant (Prix Nobel).

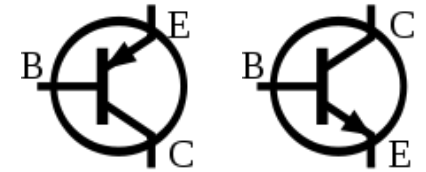
Avant : tube à électrons, valve thermo-ionique

Maintenant, les transistors sont incontournables en électronique : un ordinateur en contient plusieurs milliards.



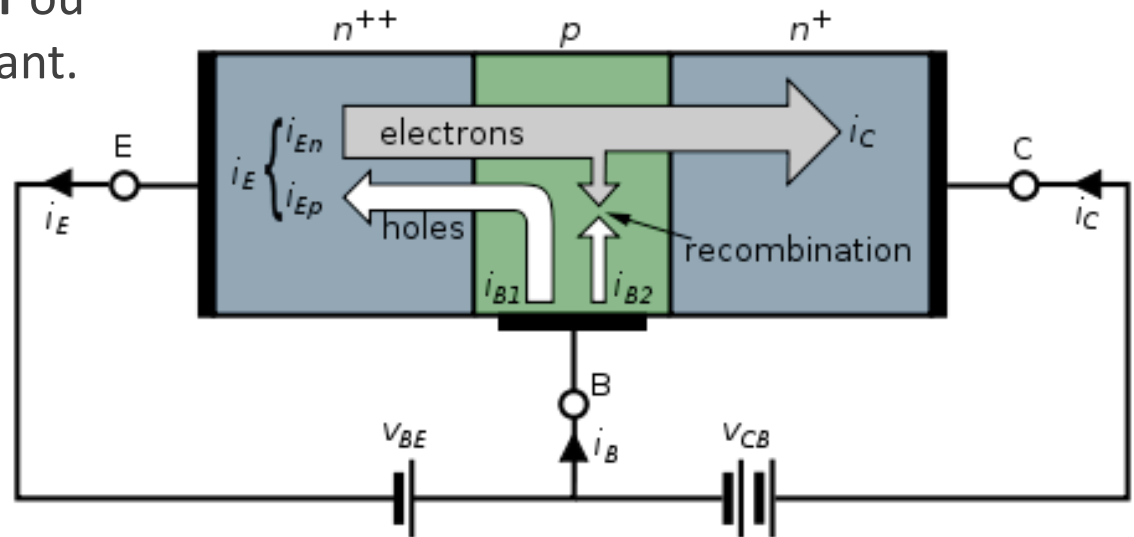
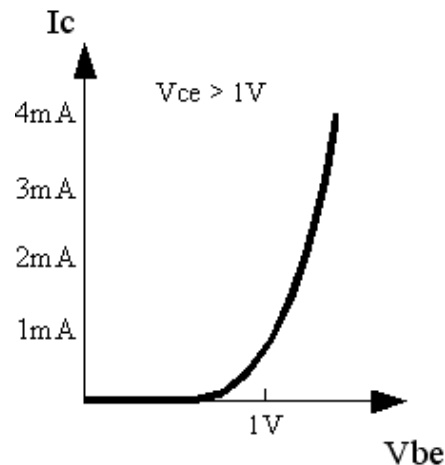
Jonction bipolaire

Cœur du transistor : **double jonction** p - n (pnp ou npn)



- En changeant le potentiel de la base (B), on modifie les barrières des diodes dans les deux sens.
- Ce dispositif permet le passage d'un courant (beaucoup plus grand) entre l'émetteur (E) et le collecteur (C).

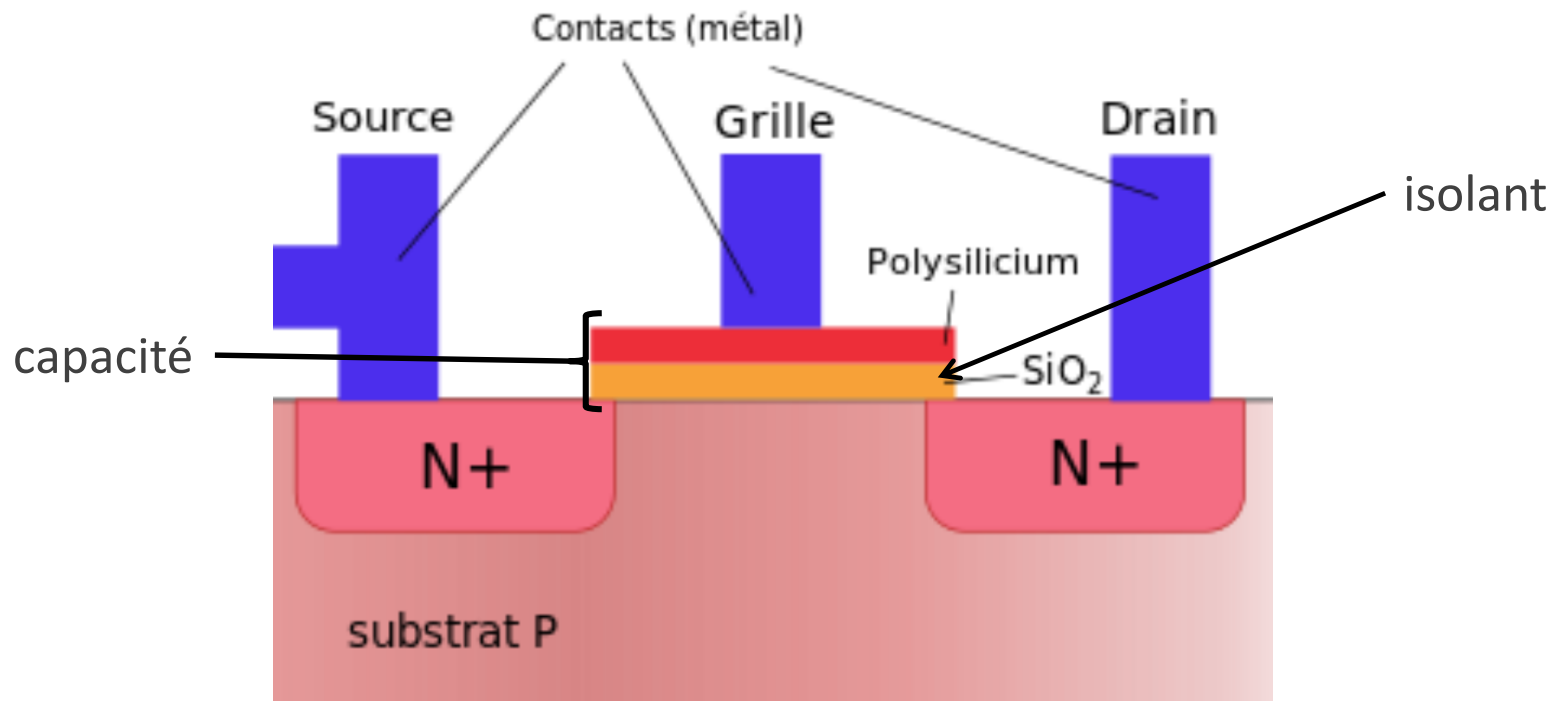
On a créé un **interrupteur** ou un **amplificateur** de courant.



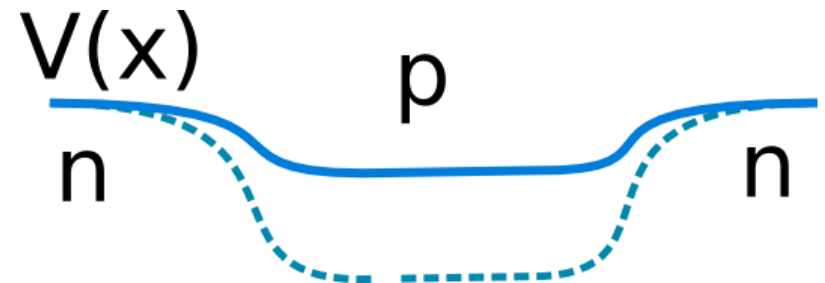
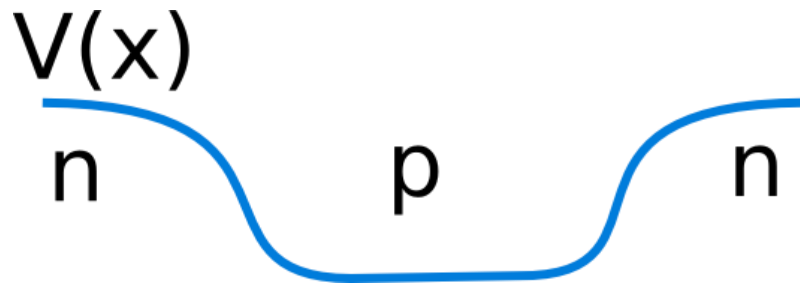
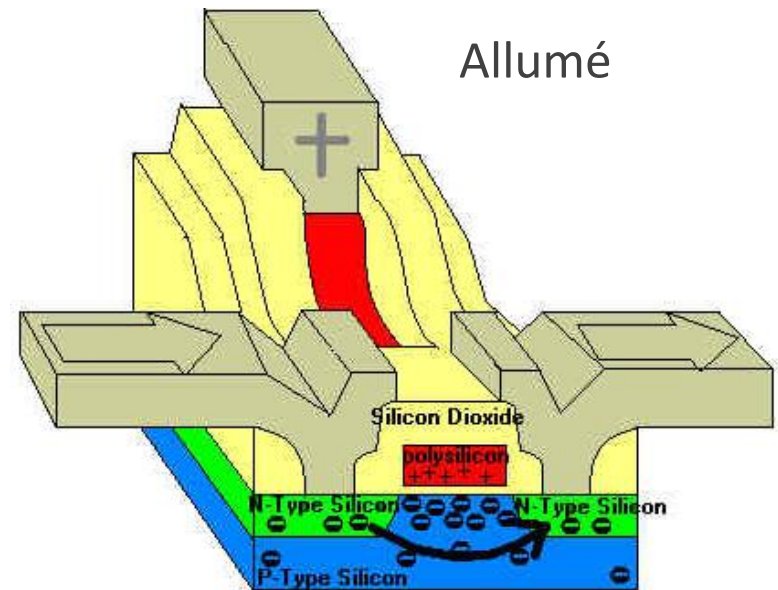
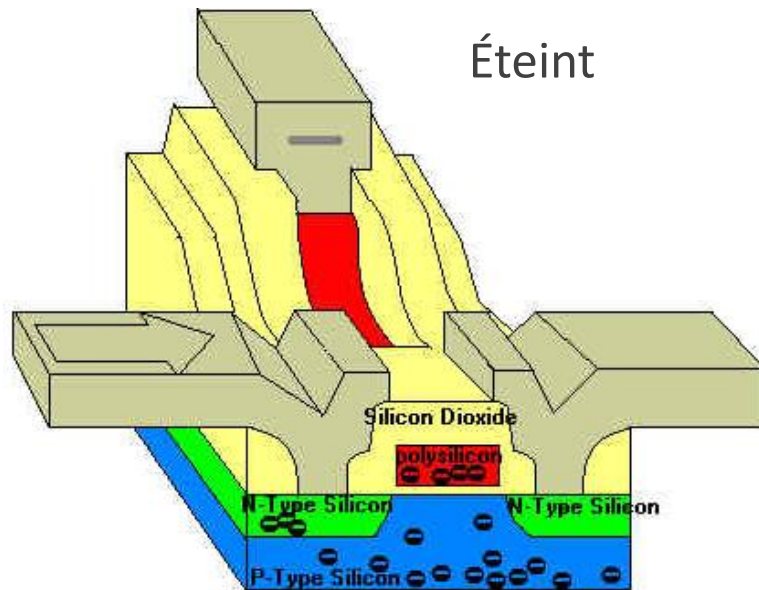
Transistor à effet de champ (FET)

Variante du transistor : **transistor à effet de champ** (FET).

Plutôt qu'un contact direct à la base, on utilise une capacité, qui permettra de créer un champ électrique (field) induit dans la région de déplétion entre la source (émetteur) et le drain (collecteur).



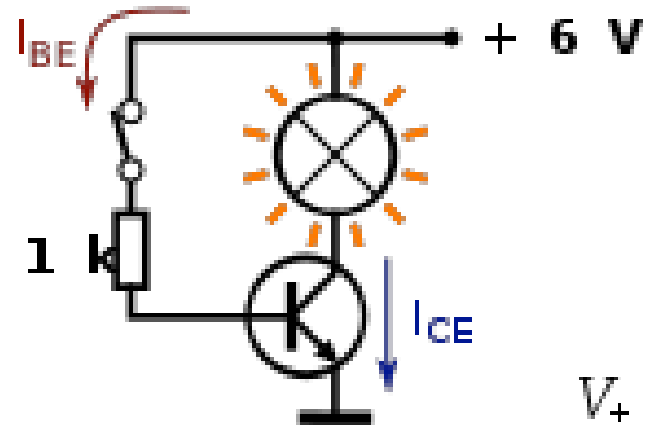
Metal oxide semi-conductor (MOS)



Circuits simples

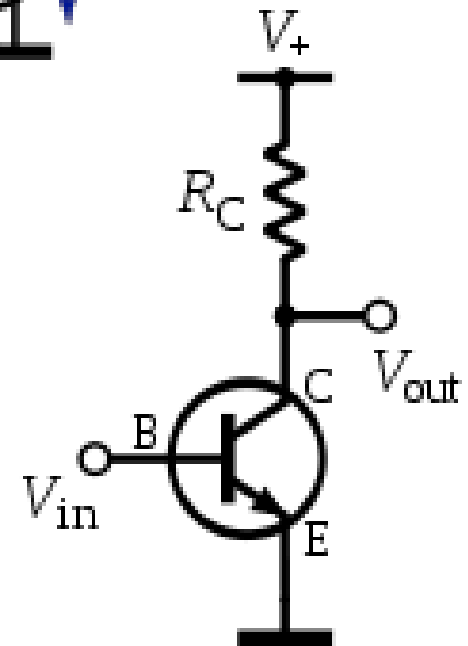
Interrupteur

Avec un courant I_{BE} très faible, on peut commander un courant I_{CE} beaucoup plus grand, pour allumer une lampe par exemple.



Amplificateur

Faible tension variable en entrée, tension amplifiée aux bornes de V_{out} .



Circuits plus complexes

Amplificateur

Faible tension variable en entrée, tension amplifiée aux bornes de R_L .

Objectif :

Améliorer la linéarité, éviter les retours de courant, effets parasites, matching d'impédance...

