

# Cours d'Électronique : Les semi-conducteurs et la diode

A. Arciniegas  
F. Boucher  
V. Gauthier  
N. Wilkie-Chancellor  
A. Bouzzit

IUT Cergy-Pontoise, Dep GElI, site de Neuville



- 1 Physique des semi-conducteurs
- 2 La théorie de la diode
- 3 Un premier circuit à diode
- 4 Quelques diodes particulières

# Physique des semi-conducteurs

Group Period →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	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
5	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
6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	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
7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			* 57 La	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		
			* 89 Ac	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		

Tableau périodique des éléments

Un *élément chimique*, communément appelé atome, est constitué de 3 types de particules élémentaires qui lui confèrent ses propriétés :

Group Period →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	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
5	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
6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	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
7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			* 57 La	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		
			* 89 Ac	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		

Tableau périodique des éléments

Un *élément chimique*, communément appelé atome, est constitué de 3 types de particules élémentaires qui lui confèrent ses propriétés :

- physiques, le noyau (protons et neutrons)  $\approx 99\%$  de la masse des atomes

Group Period →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	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
5	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
6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	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
7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			* 57 La	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		
			* 89 Ac	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		

Tableau périodique des éléments

Un *élément chimique*, communément appelé atome, est constitué de 3 types de particules élémentaires qui lui confèrent ses propriétés :

- physiques, le noyau (protons et neutrons)  $\approx 99\%$  de la masse des atomes
- chimiques, le nuage électronique ou "orbites d'électrons"  $\approx 99\%$  du volume des atomes

Group Period →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	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
5	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
6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	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
7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			* 57 La	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		
			* 89 Ac	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		

Tableau périodique des éléments

Un *élément chimique*, communément appelé atome, est constitué de 3 types de particules élémentaires qui lui confèrent ses propriétés :

- physiques, le noyau (protons et neutrons)  $\approx 99\%$  de la masse des atomes
- chimiques, le nuage électronique ou "orbites d'électrons"  $\approx 99\%$  du volume des atomes

Dans le tableau périodique, les éléments sont classés par valeur croissante de nombre de protons (Z, numéro atomique).

# Les conducteurs

Group Period →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	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
5	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
6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	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
7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			* 57 La	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		
			* 89 Ac	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		

Tableau périodique des éléments chimiques

Le block "d" (bleu), correspond aux métaux de transition ; certains éléments comme l'argent, le cuivre, ou l'or, ont une répartition du nuage électronique pour laquelle un électron mobile est en périphérie (*bande de valence*).

# Les conducteurs

Group Period →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	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
5	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
6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	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
7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			* 57 La	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		
			* 89 Ac	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		

Tableau périodique des éléments chimiques

Le block "d" (bleu), correspond aux métaux de transition ; certains éléments comme l'argent, le cuivre, ou l'or, ont une répartition du nuage électronique pour laquelle un électron mobile est en périphérie (*bande de valence*).

**Conducteur** : matériau pour lequel une force extérieure due à une différence de potentiel peut très facilement arracher l'électron mobile en périphérie (**électron de valence**) lorsque l'attraction entre celui-ci et le reste de l'atome est très faible. Les meilleurs conducteurs ont un électron de valence.

# Les semi-conducteurs

Group Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	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	
5	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	
6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	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	
7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og	
			* 57 La	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			
			* 89 Ac	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			

Tableau périodique des éléments chimiques

**Isolant** : matériau pour lequel une force extérieure due à une différence de potentiel peut très difficilement arracher les électrons de valence (les meilleurs en ont huit).

# Les semi-conducteurs

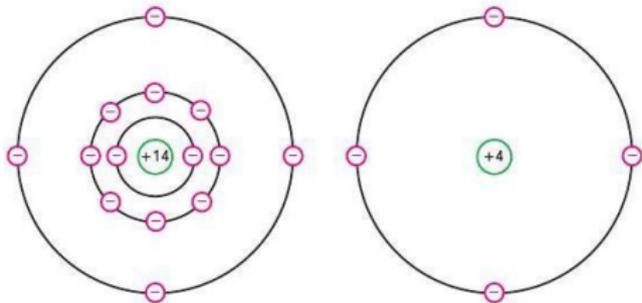
Group Period →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	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
6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	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
7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			* 57 La	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		
			* 89 Ac	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		

Tableau périodique des éléments chimiques

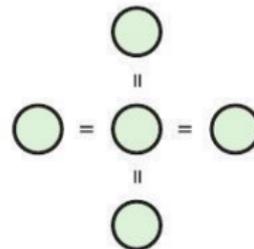
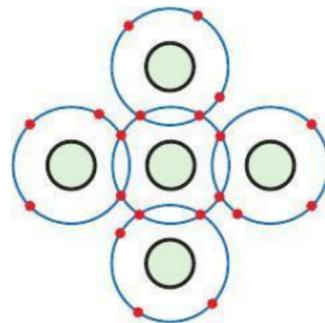
**Isolant** : matériau pour lequel une force extérieure due à une différence de potentiel peut très difficilement arracher les électrons de valence (les meilleurs en ont huit).

**Semi-conducteur** : matériau dont les propriétés électriques sont à mi-chemin entre les conducteurs et les isolants. Les meilleurs semi-conducteurs ont quatre électrons de valence (cas du germanium et du silicium).

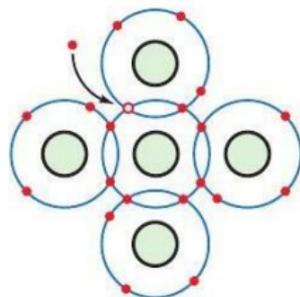
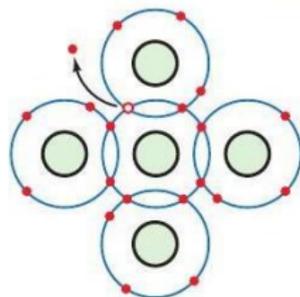
# Le cristal de silicium



Représentation de l'atome de silicium selon le modèle de Bohr (d'après A. Malvino).

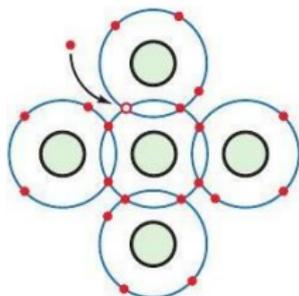
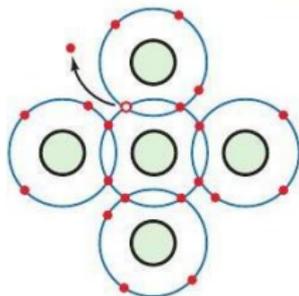


Atomes dans un cristal et liaisons covalentes (d'après A. Malvino).



Des électrons et des trous (d'après A. Malvino).

- L'agitation thermique entraîne la création des paires *électrons libres-trous*.



Des électrons et des trous (d'après A. Malvino).

- L'agitation thermique entraîne la création des paires *électrons libres-trous*.
- Les électrons libres et les trous se recombinent.

**Semi-conducteur intrinsèque** = semi-conducteur pur.

**Semi-conducteur intrinsèque** = semi-conducteur pur.

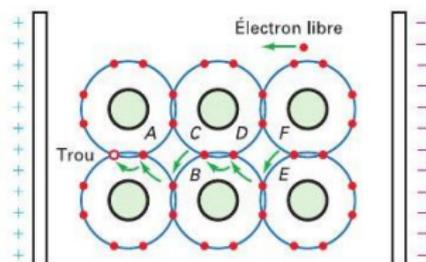
- Un cristal de silicium (Si) est intrinsèque si tous les atomes qui le composent sont des atomes de Si.

**Semi-conducteur intrinsèque** = semi-conducteur pur.

- Un cristal de silicium (Si) est intrinsèque si tous les atomes qui le composent sont des atomes de Si.
- À température ambiante, un cristal de Si se comporte comme un isolant car il y a peu d'électrons libres et de trous créés par l'agitation thermique.

**Semi-conducteur intrinsèque** = semi-conducteur pur.

- Un cristal de silicium (Si) est intrinsèque si tous les atomes qui le composent sont des atomes de Si.
- À température ambiante, un cristal de Si se comporte comme un isolant car il y a peu d'électrons libres et de trous créés par l'agitation thermique.

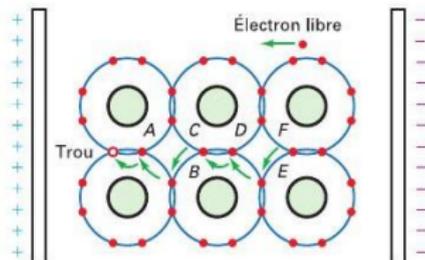


Déplacement des électrons libres et des trous  
(d'après A. Malvino).

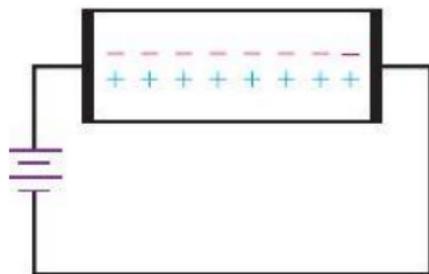
# Les semi-conducteurs intrinsèques et les porteurs de charge

**Semi-conducteur intrinsèque** = semi-conducteur pur.

- Un cristal de silicium (Si) est intrinsèque si tous les atomes qui le composent sont des atomes de Si.
- À température ambiante, un cristal de Si se comporte comme un isolant car il y a peu d'électrons libres et de trous créés par l'agitation thermique.



Déplacement des électrons libres et des trous  
(d'après A. Malvino).



Flux de porteurs (d'après A. Malvino).

Par la suite, on conçoit le courant dans un semi-conducteur comme la somme de deux flux : celui des électrons dans un sens et celui des trous dans l'autre sens.

On appelle souvent **porteurs de charge** les électrons libres et les trous, car ils transportent une charge d'un endroit à un autre.

**Dopage** : est une méthode permettant d'augmenter la conductivité d'un semi-conducteur. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ses propriétés électriques. On parle de semi-conducteur dopé ou extrinsèque.

**Dopage** : est une méthode permettant d'augmenter la conductivité d'un semi-conducteur. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ses propriétés électriques. On parle de semi-conducteur dopé ou extrinsèque.

Pour augmenter,

- le nombre d'électrons libres : ajout des atomes pentavalents (p.e. arsenic ou phosphore) ;

**Dopage** : est une méthode permettant d'augmenter la conductivité d'un semi-conducteur. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ses propriétés électriques. On parle de semi-conducteur dopé ou extrinsèque.

Pour augmenter,

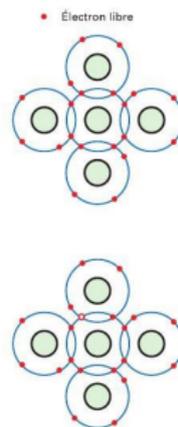
- le nombre d'électrons libres : ajout des atomes pentavalents (p.e. arsenic ou phosphore) ;
- le nombre de trous : ajout des atomes trivalents (p.e. aluminium ou gallium).

# Semi-conducteurs "dopés"

**Dopage** : est une méthode permettant d'augmenter la conductivité d'un semi-conducteur. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ses propriétés électriques. On parle de semi-conducteur dopé ou extrinsèque.

Pour augmenter,

- le nombre d'électrons libres : ajout des atomes pentavalents (p.e. arsenic ou phosphore) ;
- le nombre de trous : ajout des atomes trivalents (p.e. aluminium ou gallium).

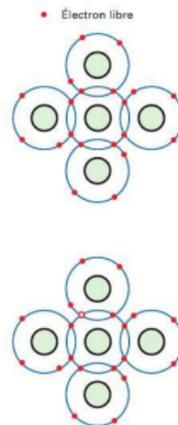


Dopage d'un semi-conducteur  
(d'après A. Malvino).

**Dopage** : est une méthode permettant d'augmenter la conductivité d'un semi-conducteur. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ses propriétés électriques. On parle de semi-conducteur dopé ou extrinsèque.

Pour augmenter,

- le nombre d'électrons libres : ajout des atomes pentavalents (p.e. arsenic ou phosphore) ;
- le nombre de trous : ajout des atomes trivalents (p.e. aluminium ou gallium).

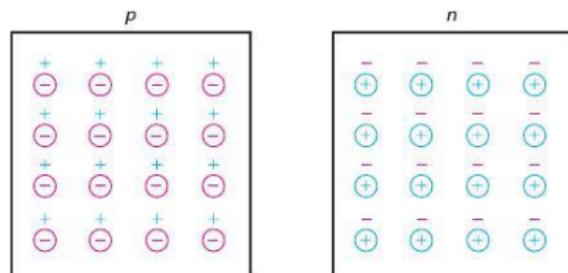


Dopage d'un semi-conducteur (d'après A. Malvino).

## Les deux types de semi-conducteurs

- **semi-conducteur de type N** = Si + atomes pentavalents = excès d'électrons libres
- **semi-conducteur de type P** = Si + atomes trivalents = excès de trous

**Diode** = deux électrodes

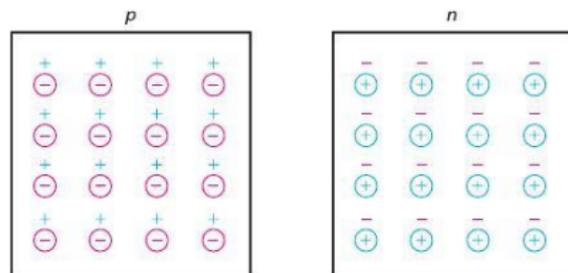


Deux types de semi-conducteurs  
(d'après A. Malvino).

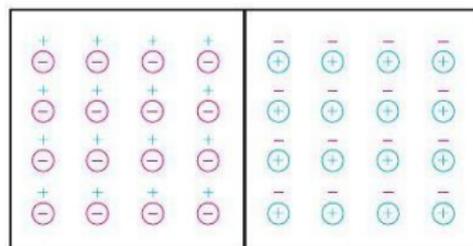
Que se passe-t-il lorsque on fabrique un cristal unique avec un côté P et un côté N ?

# La jonction PN (1/3) : diode

**Diode** = deux électrodes



Deux types de semi-conducteurs  
(d'après A. Malvino).

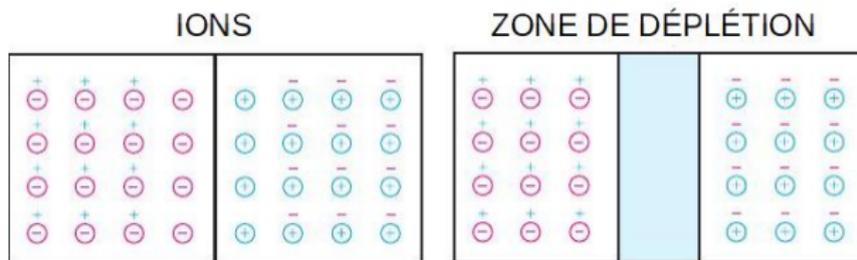


La jonction PN (d'après A. Malvino).

Que se passe-t-il lorsque on fabrique un cristal unique avec un côté P et un côté N ?

On crée une **diode à jonction**, la jonction étant la frontière où le *type P* voisine le *type N*.

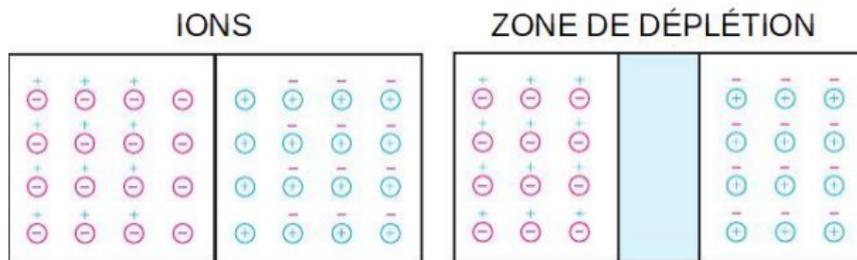
# La jonction PN (2/3) : zone de déplétion et barrière de potentiel



Création des ions et la zone de déplétion (d'après A. Malvino).

À cause de leur répulsion les uns envers les autres, les électrons libres du côté N ont tendance à diffuser (se disperser) dans toutes les directions, y compris autour de la jonction.

# La jonction PN (2/3) : zone de déplétion et barrière de potentiel

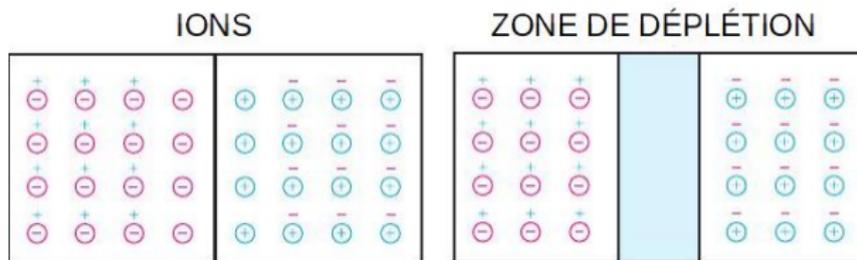


Création des ions et la zone de déplétion (d'après A. Malvino).

À cause de leur répulsion les uns envers les autres, les électrons libres du côté N ont tendance à diffuser (se disperser) dans toutes les directions, y compris autour de la jonction.

Quelques-uns traversent la jonction et entrent dans la région P : ceci entraîne la disparition d'un trou et un électron libre devient un *électron de valence*.

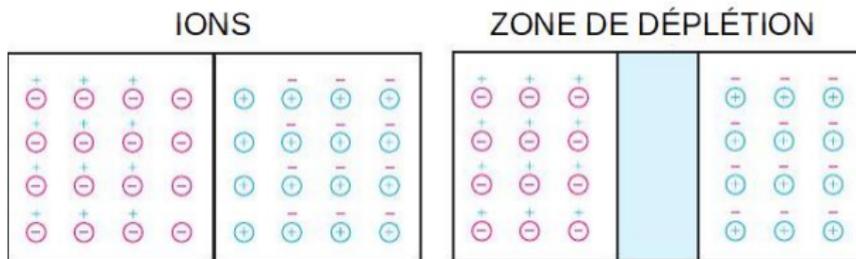
# La jonction PN (2/3) : zone de déplétion et barrière de potentiel



Création des ions et la zone de déplétion (d'après A. Malvino).

Chaque fois qu'un électron diffuse à travers la jonction, il crée une paire d'**ions** ; la neutralité électrique du cristal disparaît dans cette région de l'espace (**zone de déplétion**) où les électrons libres commencent à subir une force qui a tendance à s'opposer à leur diffusion (phénomène de jonction).

# La jonction PN (2/3) : zone de déplétion et barrière de potentiel



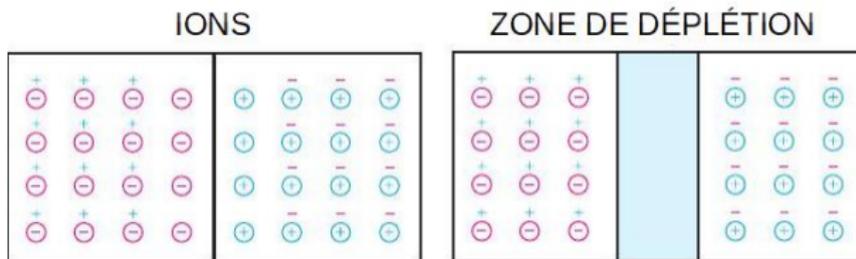
Création des ions et la zone de déplétion (d'après A. Malvino).

Chaque fois qu'un électron diffuse à travers la jonction, il crée une paire d'**ions** ; la neutralité électrique du cristal disparaît dans cette région de l'espace (**zone de déplétion**) où les électrons libres commencent à subir une force qui a tendance à s'opposer à leur diffusion (phénomène de jonction).

## Barrière de potentiel

La diffusion des électrons à travers la jonction s'arrête jusqu'à ce qu'un certain équilibre soit atteint : il en résulte une différence de potentiel appelée **barrière de potentiel**.

# La jonction PN (2/3) : zone de déplétion et barrière de potentiel



Création des ions et la zone de déplétion (d'après A. Malvino).

Chaque fois qu'un électron diffuse à travers la jonction, il crée une paire d'**ions** ; la neutralité électrique du cristal disparaît dans cette région de l'espace (**zone de déplétion**) où les électrons libres commencent à subir une force qui a tendance à s'opposer à leur diffusion (phénomène de jonction).

## Barrière de potentiel

La diffusion des électrons à travers la jonction s'arrête jusqu'à ce qu'un certain équilibre soit atteint : il en résulte une différence de potentiel appelée **barrière de potentiel**.

À 25 °C, elle vaut :

- 0,3 V pour le germanium,
- 0,7 V pour le silicium.

### Polarisation directe

Lorsqu'on applique une source de tension continue sur la diode avec la borne négative sur le côté N et la borne positive sur le côté P.

## Polarisation directe

Lorsqu'on applique une source de tension continue sur la diode avec la borne négative sur le côté N et la borne positive sur le côté P.

Si la tension de la source est supérieure à la *barrière de potentiel*, les électrons libres ont une énergie suffisante pour traverser la zone de déplétion et aller se recombiner avec les trous du côté P.

## Polarisation directe

Lorsqu'on applique une source de tension continue sur la diode avec la borne négative sur le côté N et la borne positive sur le côté P.

Si la tension de la source est supérieure à la *barrière de potentiel*, les électrons libres ont une énergie suffisante pour traverser la zone de déplétion et aller se recombiner avec les trous du côté P.

## Polarisation inverse

Lorsqu'on applique une source de tension continue sur la diode avec la borne négative sur le côté P et la borne positive sur le côté N.

## Polarisation directe

Lorsqu'on applique une source de tension continue sur la diode avec la borne négative sur le côté N et la borne positive sur le côté P.

Si la tension de la source est supérieure à la *barrière de potentiel*, les électrons libres ont une énergie suffisante pour traverser la zone de déplétion et aller se recombiner avec les trous du côté P.

## Polarisation inverse

Lorsqu'on applique une source de tension continue sur la diode avec la borne négative sur le côté P et la borne positive sur le côté N.

Divers phénomènes ont lieu :

- Élargissement de la zone de déplétion
- Apparition d'un courant de saturation
- Apparition d'un courant de fuite superficiel

## Polarisation directe

Lorsqu'on applique une source de tension continue sur la diode avec la borne négative sur le côté N et la borne positive sur le côté P.

Si la tension de la source est supérieure à la *barrière de potentiel*, les électrons libres ont une énergie suffisante pour traverser la zone de déplétion et aller se recombiner avec les trous du côté P.

## Polarisation inverse

Lorsqu'on applique une source de tension continue sur la diode avec la borne négative sur le côté P et la borne positive sur le côté N.

Divers phénomènes ont lieu :

- Élargissement de la zone de déplétion
- Apparition d'un courant de saturation
- Apparition d'un courant de fuite superficiel

## Tension de claquage

Limite de la tension inverse (souvent  $> 50$  V) qu'une diode peut supporter avant d'être détruite en raison de l'augmentation disproportionnée de porteurs minoritaires (phénomène d'avalanche).

# La théorie de la diode

La diode est un composant **non-linéaire** :

- **Équation de Shockley** :

$$i_D = I_S \cdot \left( \exp\left(\frac{u_D}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right)$$

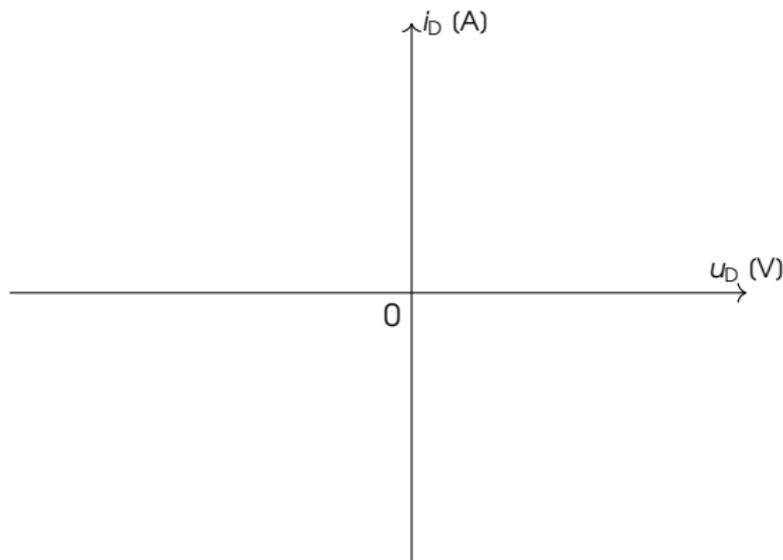
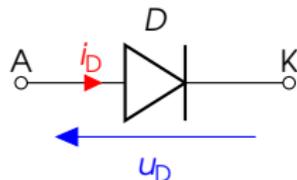
- $I_S$  : Courant de saturation inverse

- $pA \leq I_S \leq nA$
- Exemple: 1N4148,  $I_S \simeq 25 \text{ nA}$  pour  $u_D = -20 \text{ V}$

- $V_T$  : Tension thermique

$$V_T = \frac{kT}{e^-} \simeq 26 \text{ mV à } T = 300 \text{ K}$$

- $n$  : facteur de qualité,  $1 \leq n \leq 2$  idéalement,  $n = 1$ .



# Modèle électrique général de la diode à jonction PN

La diode est un composant **non-linéaire** :

- **Équation de Shockley** :

$$i_D = I_S \cdot \left( \exp\left(\frac{u_D}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right)$$

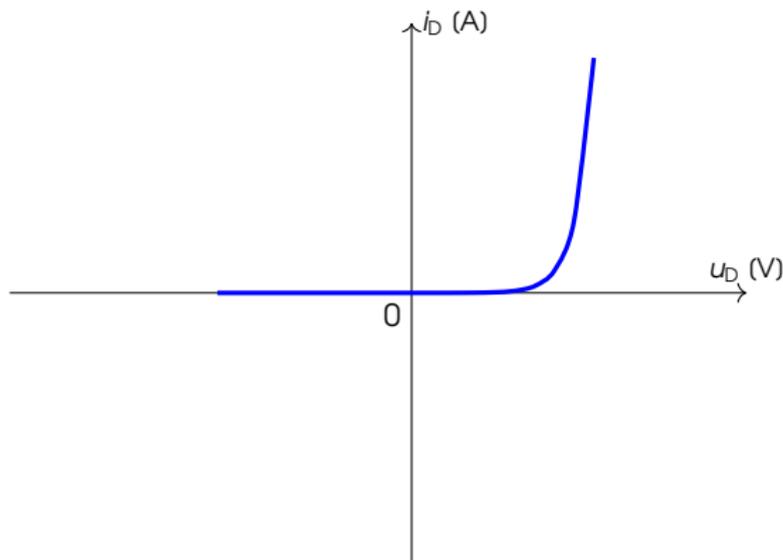
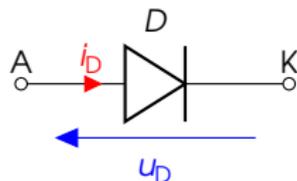
- $I_S$  : Courant de saturation inverse

- $pA \leq I_S \leq nA$
- Exemple: 1N4148,  $I_S \simeq 25 \text{ nA}$  pour  $u_D = -20 \text{ V}$

- $V_T$  : Tension thermique

$$V_T = \frac{kT}{e^-} \simeq 26 \text{ mV à } T = 300 \text{ K}$$

- $n$  : facteur de qualité,  $1 \leq n \leq 2$  idéalement,  $n = 1$ .



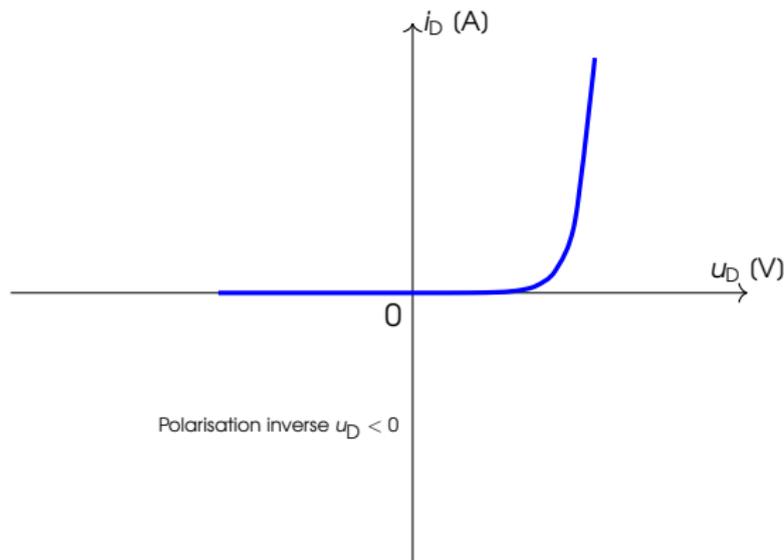
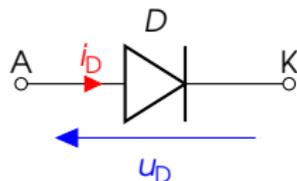
# Modèle électrique général de la diode à jonction PN

La diode est un composant **non-linéaire** :

- Équation de Shockley :

$$i_D = I_S \cdot \left( \exp\left(\frac{u_D}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right)$$

- $u_D < 0$  : polarisation inverse



# Modèle électrique général de la diode à jonction PN

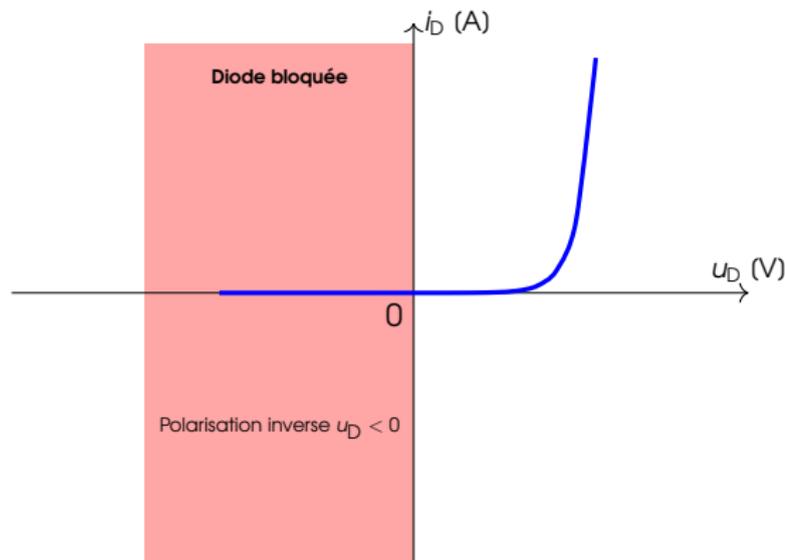
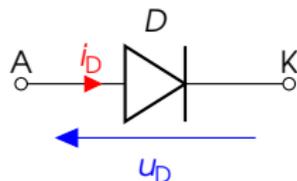
La diode est un composant **non-linéaire** :

- **Équation de Shockley** :

$$i_D = I_S \cdot \left( \exp\left(\frac{u_D}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right)$$

- $u_D < 0$  : polarisation inverse

- Diode "bloquée"



# Modèle électrique général de la diode à jonction PN

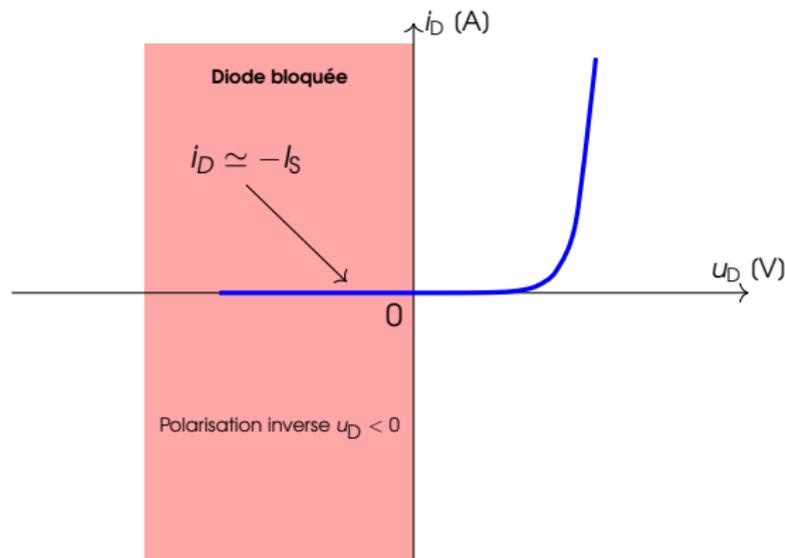
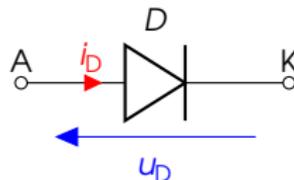
La diode est un composant **non-linéaire** :

- **Équation de Shockley** :

$$i_D = I_S \cdot \left( \exp\left(\frac{u_D}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right)$$

- $u_D < 0$  : **polarisation inverse**

- Diode "**bloquée**"
- $i_D \simeq -I_S$  (Courant de fuite, idéalement  $\rightarrow 0$ )



# Modèle électrique général de la diode à jonction PN

La diode est un composant **non-linéaire** :

- **Équation de Shockley** :

$$i_D = I_S \cdot \left( \exp\left(\frac{u_D}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right)$$

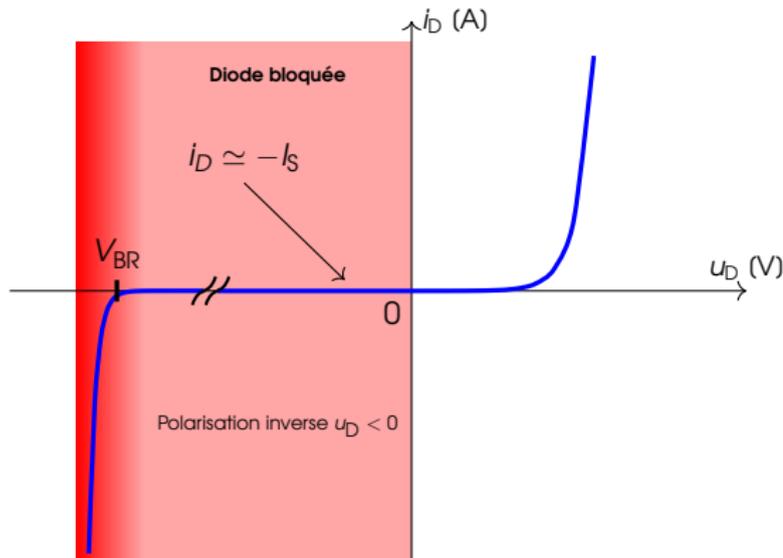
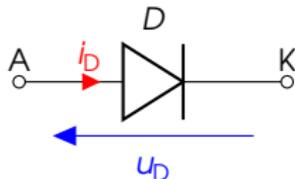
- $u_D < 0$  : **polarisation inverse**

- Diode "**bloquée**"
- $i_D \simeq -I_S$  (Courant de fuite, idéalement  $\rightarrow 0$ )

- **Claquage inverse** :

- tension inversion maximale  $V_{BR}$
- phénomène d'avalanche irréversible
- courant inverse très élevé
- destruction de la diode

Exemple : 1N4148,  
 $V_{BR} \leq -100 \text{ V}$



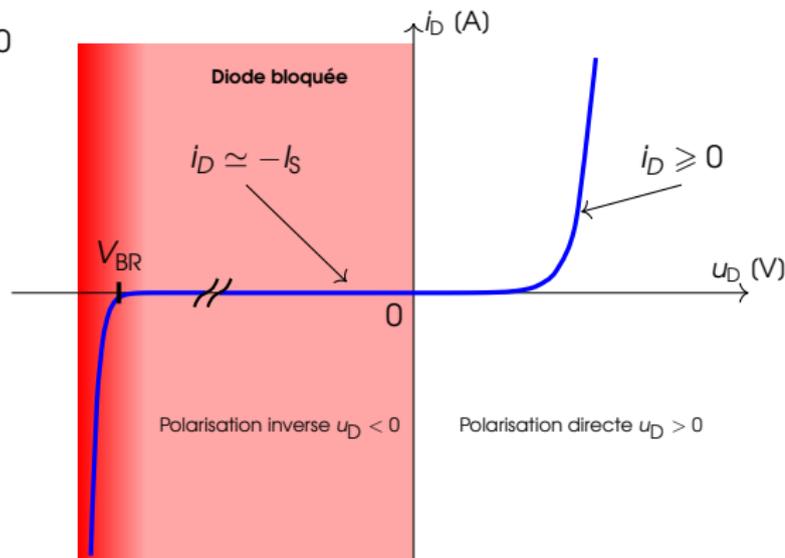
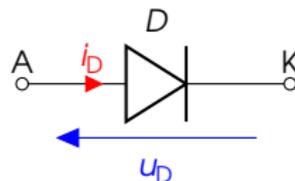
# Modèle électrique général de la diode à jonction PN

La diode est un composant **non-linéaire** :

- Équation de Shockley :

$$i_D = I_S \cdot \left( \exp\left(\frac{u_D}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right)$$

- $u_D \geq 0$  : polarisation directe,  $i_D \geq 0$



# Modèle électrique général de la diode à jonction PN

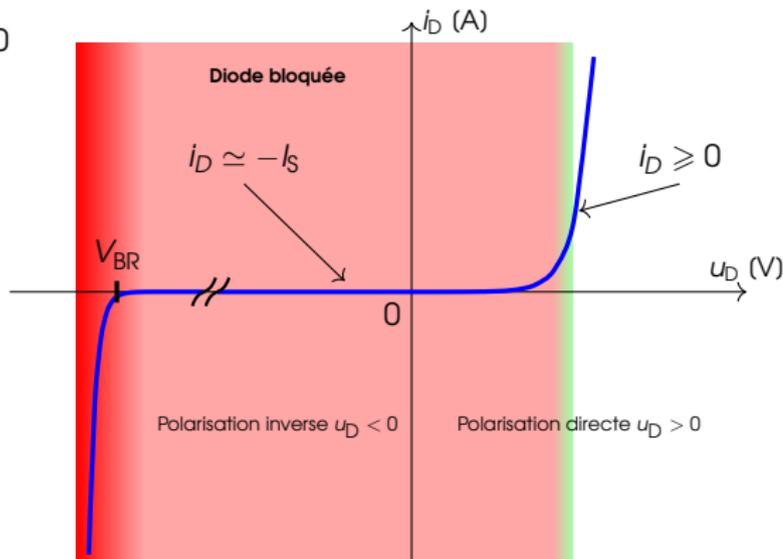
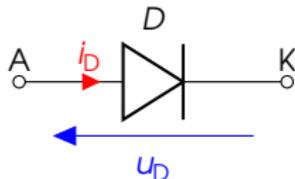
La diode est un composant **non-linéaire** :

- **Équation de Shockley** :

$$i_D = I_S \cdot \left( \exp\left(\frac{u_D}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right)$$

- $u_D \geq 0$  : **polarisation directe**,  $i_D \geq 0$

- $u_D < V_F$  (**seuil**) :  
diode "bloquée"  
(Courant très faible à négligeable)



# Modèle électrique général de la diode à jonction PN

La diode est un composant **non-linéaire** :

- **Équation de Shockley** :

$$i_D = I_S \cdot \left( \exp\left(\frac{u_D}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right)$$

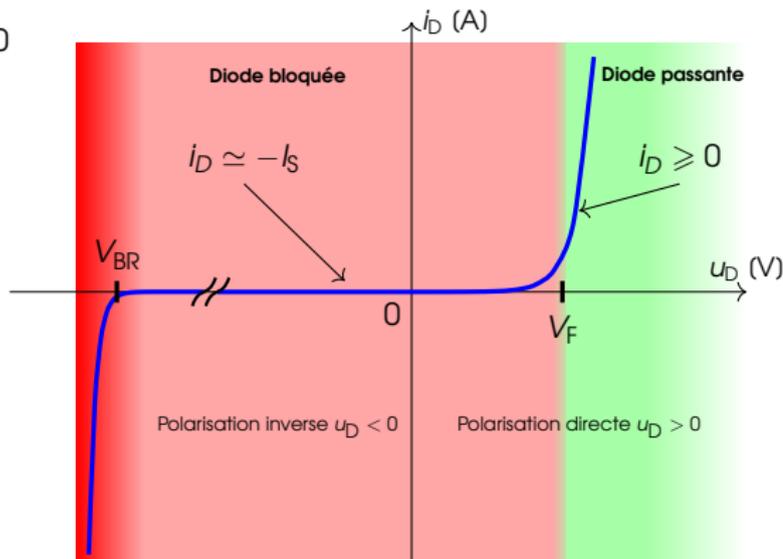
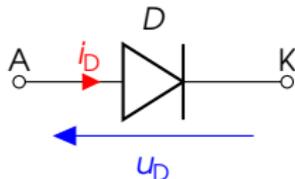
- $u_D \geq 0$  : polarisation directe,  $i_D \geq 0$

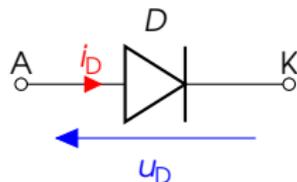
- $u_D < V_F$  (seuil) :  
diode "bloquée"  
(Courant très faible à négligeable)

- $u_D > V_F$  :  
diode "passante"  
(Courant  $i_D > 0$ )

- **Valeurs typiques de seuils:**

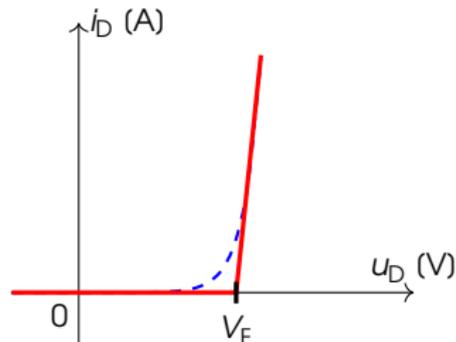
- **Diodes au silicium** :  
 $V_F \simeq 0,7 \text{ V}$
- **Diodes au germanium** :  
 $V_F \simeq 0,3 \text{ V}$   
(moins utilisée car autres défauts)

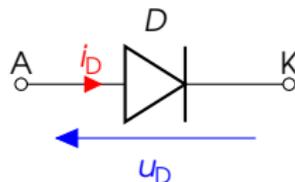




## • Seuil de diode + résistance:

- Simplification et linéarisation de la caractéristique complète
- Définition du seuil de diode



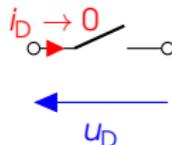
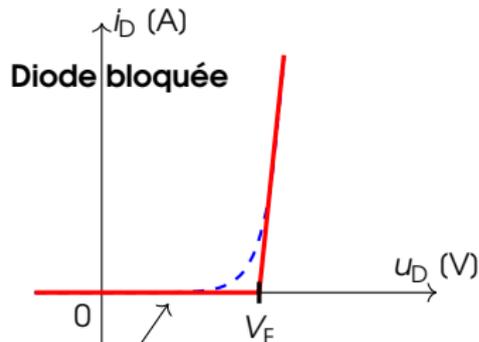


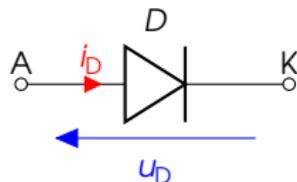
- **Seuil de diode + résistance:**

- Simplification et linéarisation de la caractéristique complète
- Définition du seuil de diode

- $u_D < V_F$  : diode bloquée

- $i_D \rightarrow 0$
- Circuit ouvert





## • Seuil de diode + résistance:

- Simplification et linéarisation de la caractéristique complète
- Définition du seuil de diode

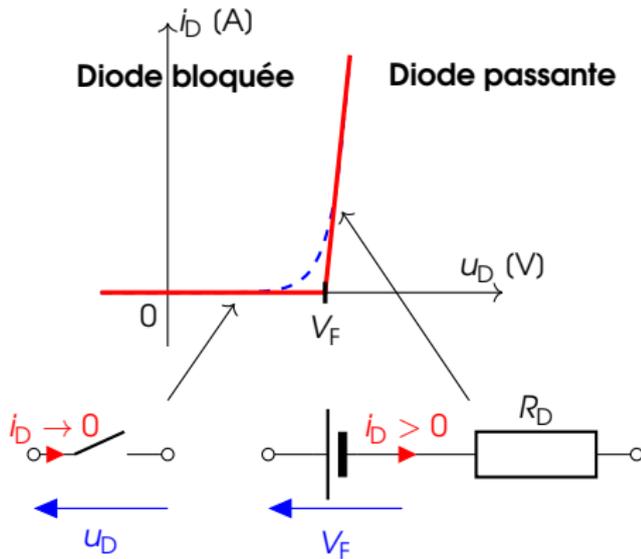
## • $u_D < V_F$ : diode bloquée

- $i_D \rightarrow 0$
- Circuit ouvert

## • $u_D \geq V_F$ : diode passante

- $i_D > 0$
- Circuit "fermé"
- Résistance dynamique

$$R_D = \left. \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \right|_{u_D > V_F}$$



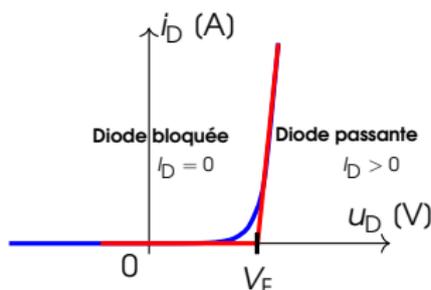
## Modèles électriques simplifiées de la diode à jonction PN (2/2)

- Simplifications / linéarisations de la caractéristique complète en polarisation directe
- 3 caractéristiques simplifiées — dépendent de l'utilisation

## Modèles électriques simplifiées de la diode à jonction PN (2/2)

- Simplifications / linéarisations de la caractéristique complète en polarisation directe
- 3 caractéristiques simplifiées — dépendent de l'utilisation

- **Seuil de diode + résistance**



- $u_D < 0$  :  
**diode bloquée**

- $i_D \rightarrow 0$

- $u_D \geq V_F$  :  
**diode passante**

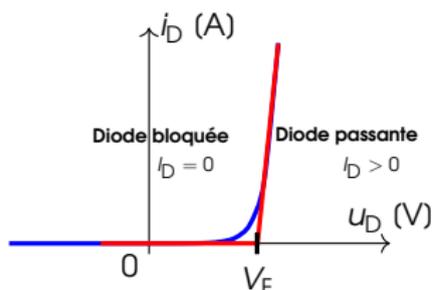
- $i_D > 0$
- Résistance dynamique

$$R_D = \left. \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \right|_{u_D > V_F}$$

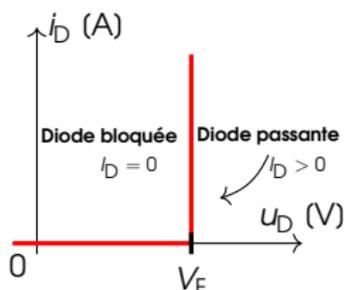
# Modèles électriques simplifiés de la diode à jonction PN (2/2)

- Simplifications / linéarisations de la caractéristique complète en polarisation directe
- 3 caractéristiques simplifiées — dépendent de l'utilisation

## • Seuil de diode + résistance



## • Seuil de diode



## • $u_D < 0$ : diode bloquée

- $i_D \rightarrow 0$

## • $u_D \geq V_F$ : diode passante

- $i_D > 0$
- Résistance dynamique

$$R_D = \left. \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \right|_{u_D > V_F}$$

## • $u_D < 0$ : diode bloquée

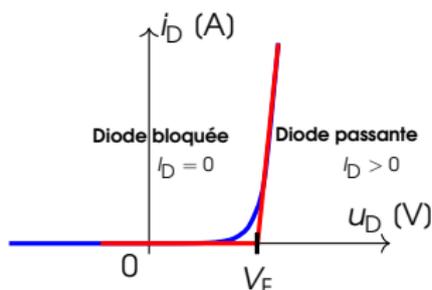
## • $u_D = V_F$ : diode passante

- $u_D \rightarrow \text{constante}$

# Modèles électriques simplifiés de la diode à jonction PN (2/2)

- Simplifications / linéarisations de la caractéristique complète en polarisation directe
- 3 caractéristiques simplifiées — dépendent de l'utilisation

## • Seuil de diode + résistance



### • $u_D < 0$ : diode bloquée

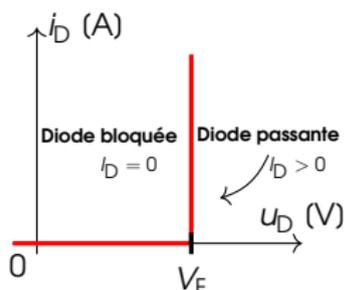
- $i_D \rightarrow 0$

### • $u_D \geq V_F$ : diode passante

- $i_D > 0$
- Résistance dynamique

$$R_D = \left. \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \right|_{u_D > V_F}$$

## • Seuil de diode

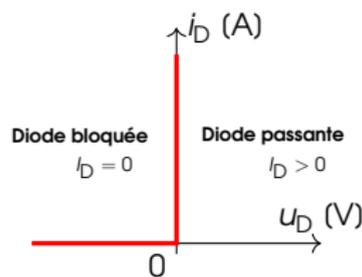


### • $u_D < 0$ : diode bloquée

### • $u_D = V_F$ : diode passante

- $i_D \rightarrow \text{constante}$

## • Seuil nul



### • $u_D < 0$ : diode bloquée

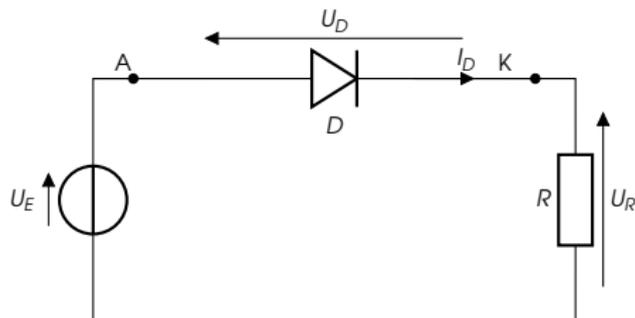
### • $u_D = 0$ : diode passante

- $i_D \rightarrow \text{constante nulle}$

# Un premier circuit à diode

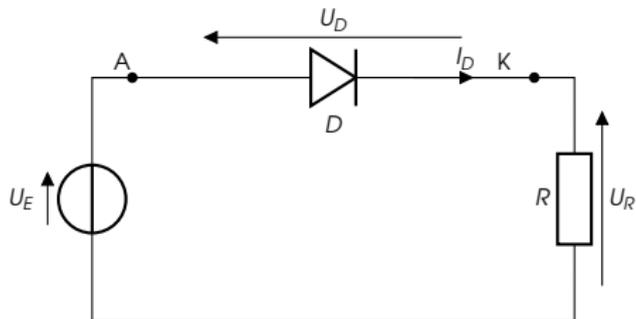
## La droite de charge (1/2)

On s'intéresse tout d'abord à un montage simple réalisé par un circuit diode-résistance. La tension  $U_E$  est une tension continue.



# La droite de charge (1/2)

On s'intéresse tout d'abord à un montage simple réalisé par un circuit diode-résistance. La tension  $U_E$  est une tension continue.

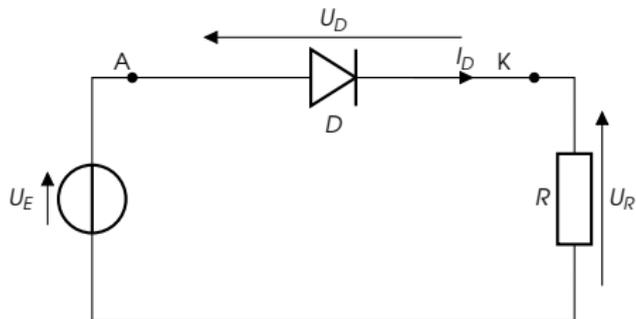


## Méthode

- L'étude des tensions  $U_D$  et  $U_R$  ou du courant  $I_D$  nécessite de remplacer la diode par un schéma équivalent.

# La droite de charge (1/2)

On s'intéresse tout d'abord à un montage simple réalisé par un circuit diode-résistance. La tension  $U_E$  est une tension continue.

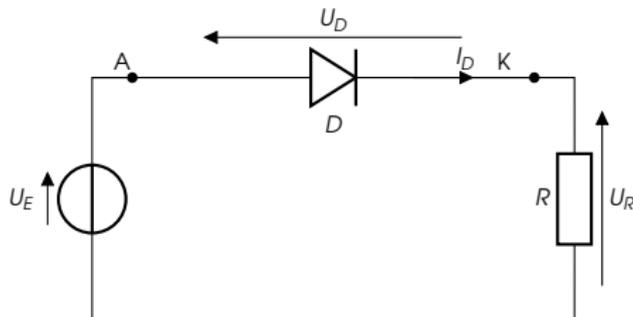


## Méthode

- L'étude des tensions  $U_D$  et  $U_R$  ou du courant  $I_D$  nécessite de remplacer la diode par un schéma équivalent.
- Nous remplaçons **à priori** la diode par son schéma équivalent de diode passante (source de tension et résistance en série).

# La droite de charge (1/2)

On s'intéresse tout d'abord à un montage simple réalisé par un circuit diode-résistance. La tension  $U_E$  est une tension continue.

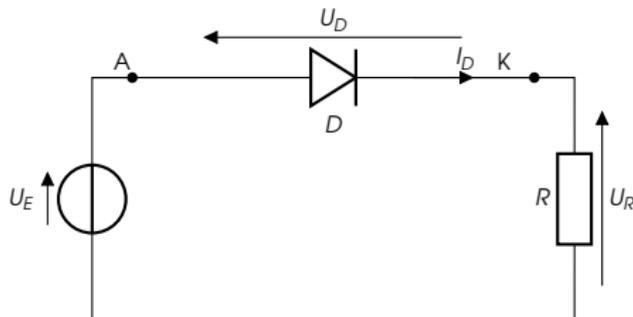


## Méthode

- L'étude des tensions  $U_D$  et  $U_R$  ou du courant  $I_D$  nécessite de remplacer la diode par un schéma équivalent.
- Nous remplaçons **à priori** la diode par son schéma équivalent de diode passante (source de tension et résistance en série).
- Si l'étude montre que le courant circule dans la diode (de l'anode vers la cathode), donc  $I_D > 0$ , et le choix fait à priori est conservé.

# La droite de charge (1/2)

On s'intéresse tout d'abord à un montage simple réalisé par un circuit diode-résistance. La tension  $U_E$  est une tension continue.

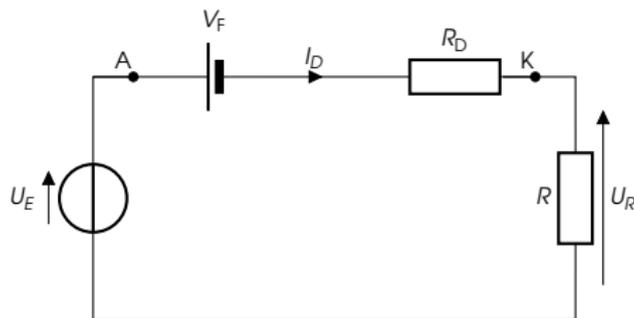


## Méthode

- L'étude des tensions  $U_D$  et  $U_R$  ou du courant  $I_D$  nécessite de remplacer la diode par un schéma équivalent.
- Nous remplaçons **à priori** la diode par son schéma équivalent de diode passante (source de tension et résistance en série).
- Si l'étude montre que le courant circule dans la diode (de l'anode vers la cathode), donc  $I_D > 0$ , et le choix fait à priori est conservé.
- Le cas échéant, l'étude du circuit est effectuée en remplaçant la diode par son schéma équivalent de diode bloquée.

## La droite de charge (1/2)

On s'intéresse tout d'abord à un montage simple réalisé par un circuit diode-résistance. La tension  $U_E$  est une tension continue.

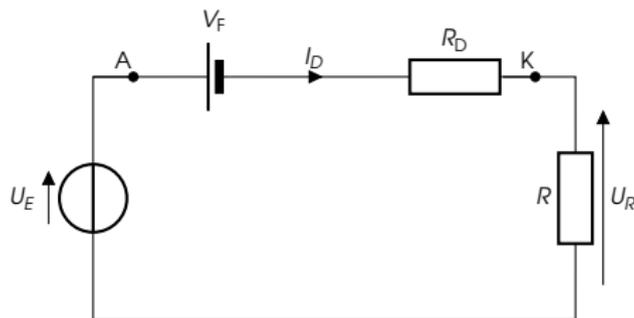


À partir du pont diviseur de tension,

$$U_R = \frac{(U_E - V_F)}{R_D + R} R$$

## La droite de charge (1/2)

On s'intéresse tout d'abord à un montage simple réalisé par un circuit diode-résistance. La tension  $U_E$  est une tension continue.



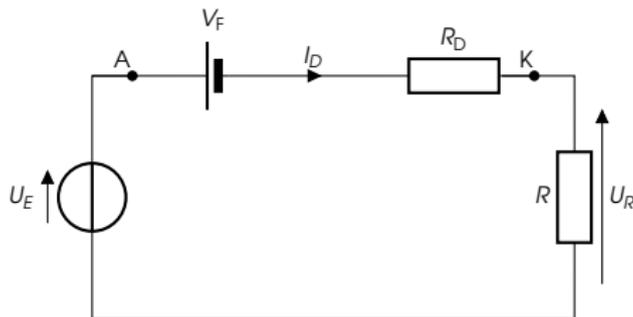
À partir du pont diviseur de tension,

$$U_R = \frac{(U_E - V_F)}{R_D + R} R$$

d'où la condition pour que la diode soit passante :  $U_E - V_F > 0$  ou  $U_E > V_F$ .

# La droite de charge (1/2)

On s'intéresse tout d'abord à un montage simple réalisé par un circuit diode-résistance. La tension  $U_E$  est une tension continue.



À partir du pont diviseur de tension,

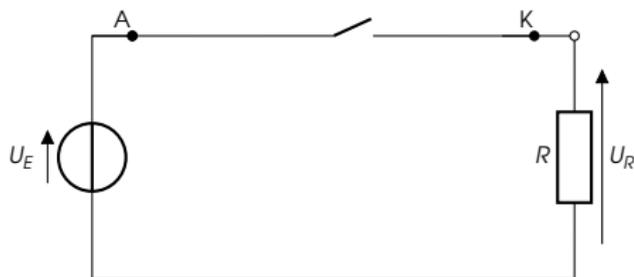
$$U_R = \frac{(U_E - V_F) R}{R_D + R}$$

d'où la condition pour que la diode soit passante :  $U_E - V_F > 0$  ou  $U_E > V_F$ . Ainsi on obtient :

- $I_D = \frac{(U_E - V_F)}{R_D + R}$
- $U_D = V_F + \frac{(U_E - V_F)}{R_D + R} R_D$

## La droite de charge (1/2)

En revanche si on a  $U_E < V_F$ , alors le schéma équivalent devient :



On obtient :

- $I_D = 0$
- $U_D = U_E$
- $U_R = 0$

## La droite de charge (2/2)

Cette étude calculatoire nous permet de connaître le **point de fonctionnement Q** de la diode, noté  $(U_{D0}, I_{D0})$ .

## La droite de charge (2/2)

Cette étude calculatoire nous permet de connaître le **point de fonctionnement Q** de la diode, noté  $(U_{D0}, I_{D0})$ .

D'après l'étude précédente, l'équation de la droite de charge est obtenue à partir de :

- $U_D = U_E - R I_D$ , avec  $U_D = U_E$  si  $I_D = 0$  (blocage)
- $I_D = \frac{U_E - U_D}{R}$ , avec  $I_D = \frac{U_E}{R}$  si  $U_D = 0$  (saturation)

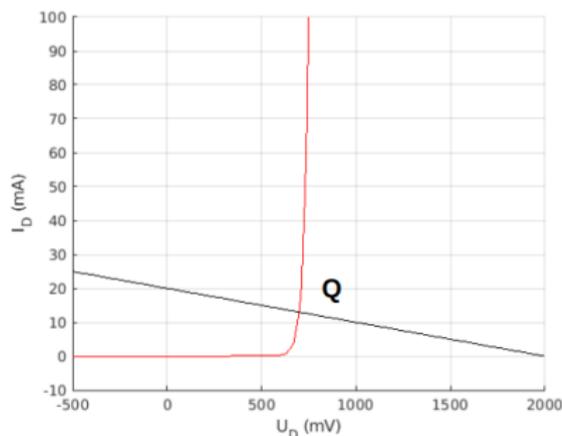
## La droite de charge (2/2)

Cette étude calculatoire nous permet de connaître le **point de fonctionnement Q** de la diode, noté  $(U_{D0}, I_{D0})$ .

D'après l'étude précédente, l'équation de la droite de charge est obtenue à partir de :

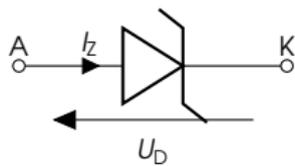
- $U_D = U_E - R I_D$ , avec  $U_D = U_E$  si  $I_D = 0$  (blocage)
- $I_D = \frac{U_E - U_D}{R}$ , avec  $I_D = \frac{U_E}{R}$  si  $U_D = 0$  (saturation)

Le point Q est ainsi situé sur la caractéristique  $I_D = f(U_D)$  de la diode :

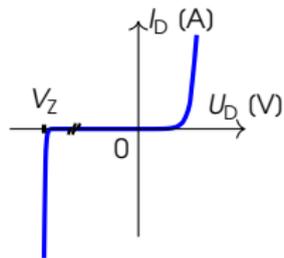
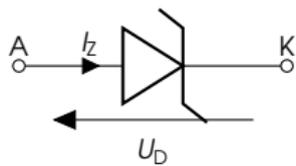


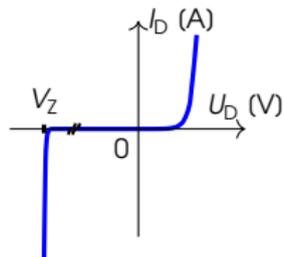
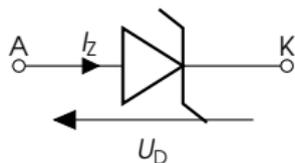
La droite de charge

# Quelques diodes particulières



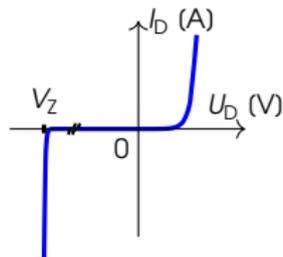
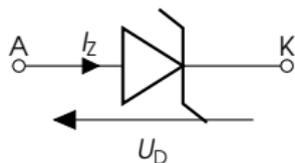
# La diode Zener





## Caractéristiques

C'est une diode au silicium que le constructeur a optimisée pour opérer dans la zone de claquage.

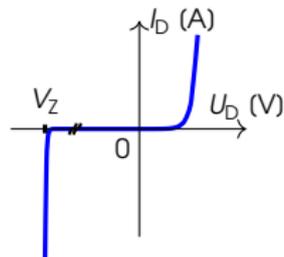
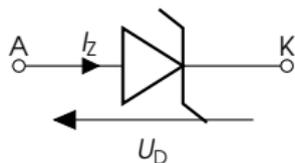


## Caractéristiques

C'est une diode au silicium que le constructeur a optimisée pour opérer dans la zone de claquage.

Dans cette zone :

- Elle présente un coude de tension inverse très net, suivi d'une croissance presque verticale du courant.



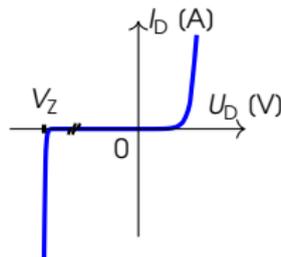
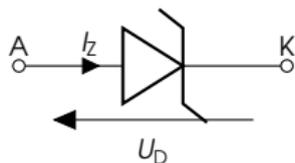
## Caractéristiques

C'est une diode au silicium que le constructeur a optimisée pour opérer dans la zone de claquage.

Dans cette zone :

- Elle présente un coude de tension inverse très net, suivi d'une croissance presque verticale du courant.
- La tension est presque constante, approximativement égale à  $V_z$ .

# La diode Zener



## Caractéristiques

C'est une diode au silicium que le constructeur a optimisée pour opérer dans la zone de claquage.

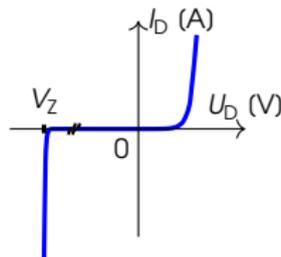
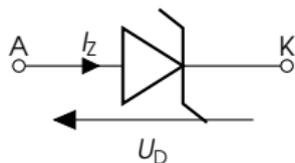
Dans cette zone :

- Elle présente un coude de tension inverse très net, suivi d'une croissance presque verticale du courant.
- La tension est presque constante, approximativement égale à  $V_Z$ .

## Utilisation

Régulation de tension connectée en dérivation (**régulateur** shunt) car elle permet d'obtenir une tension continue fixe inférieure à celle donnée par une alimentation.

# La diode Zener



## Caractéristiques

C'est une diode au silicium que le constructeur a optimisée pour opérer dans la zone de claquage.

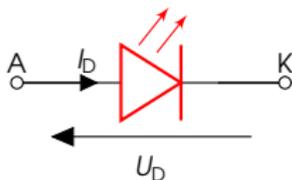
Dans cette zone :

- Elle présente un coude de tension inverse très net, suivi d'une croissance presque verticale du courant.
- La tension est presque constante, approximativement égale à  $V_Z$ .

## Utilisation

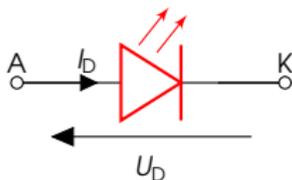
Régulation de tension connectée en dérivation (**régulateur** shunt) car elle permet d'obtenir une tension continue fixe inférieure à celle donnée par une alimentation.

Application : alimentation stabilisée et protection contre les surtensions.



## Caractéristiques

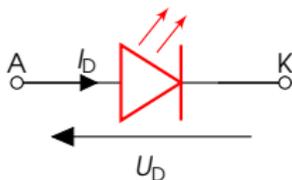
Comme une diode ordinaire, mais lorsqu'elle est passante, l'énergie est rayonnée sous forme de lumière (l'effet est appelé **électroluminescence**).



## Caractéristiques

Comme une diode ordinaire, mais lorsqu'elle est passante, l'énergie est rayonnée sous forme de lumière (l'effet est appelé **électroluminescence**).

- La couleur rayonnée dépend des matériaux semi-conducteurs utilisés dans la fabrication.
- Pour les LED faible puissance les valeurs typiques :  $U_D \approx 2 \text{ V}$  et  $I_D \approx 20 \text{ mA}$ .



## Caractéristiques

Comme une diode ordinaire, mais lorsqu'elle est passante, l'énergie est rayonnée sous forme de lumière (l'effet est appelé **électroluminescence**).

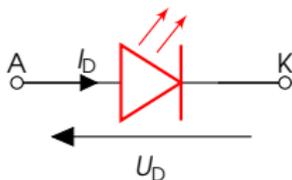
- La couleur rayonnée dépend des matériaux semi-conducteurs utilisés dans la fabrication.
- Pour les LED faible puissance les valeurs typiques :  $U_D \approx 2 \text{ V}$  et  $I_D \approx 20 \text{ mA}$ .

## Utilisation

Principalement le remplacement de lampes incandescentes car elles ont :

- une consommation énergétique plus basse
- une plus petite taille
- une plus longue durée de vie

# Les diodes électroluminescentes (LED)



## Caractéristiques

Comme une diode ordinaire, mais lorsqu'elle est passante, l'énergie est rayonnée sous forme de lumière (l'effet est appelé **électroluminescence**).

- La couleur rayonnée dépend des matériaux semi-conducteurs utilisés dans la fabrication.
- Pour les LED faible puissance les valeurs typiques :  $U_D \approx 2 \text{ V}$  et  $I_D \approx 20 \text{ mA}$ .

## Utilisation

Principalement le remplacement de lampes incandescentes car elles ont :

- une consommation énergétique plus basse
- une plus petite taille
- une plus longue durée de vie

Applications : éclairage (ampoules), affichage électronique (écrans TV et autre), source de lumière quasi-monochromatique (fibres optiques, télécommandes, instrumentation scientifique et industrielle)...