

Maquette interaction lumière-matière

Réf. EHNU

OBJECTIF

Ce dispositif a été conçu spécialement pour illustrer une partie importante du programme de 1^{ère} S concernant les sources de lumières colorées.

Extrait du bulletin officiel n° 9 du 30 septembre 2010 :

Sources de lumière colorée

« Interpréter les échanges d'énergie entre lumière et matière à l'aide du modèle corpusculaire de la lumière. »

« Connaître les relations $\lambda=c/v$ et $\Delta E=hv$ et les utiliser pour exploiter un diagramme de niveaux d'énergie. »

En cette période de chasse aux dépenses énergétiques, on voit apparaître de plus en plus de lampes à DEL sur le marché. Ces petits composants sont devenus des éléments incontournables aujourd'hui, d'où l'importance de bien comprendre comment fonctionnent les mécanismes d'émission de celles-ci.

Cette expérience unique permet en effet aux élèves d'utiliser leurs connaissances transversales (caractéristique d'une DEL : $I=f(U)$ vu dans le programme d'électricité en 4^{ème}) tout en mettant directement en application les relations fondamentales qu'ils devront connaître en fin de 1^{ère} S ($\lambda=c/v$ et $\Delta E=hv$).

Le produit réf. EHNU permet également aux élèves de faire le lien entre la longueur d'onde, la couleur, et l'énergie correspondante : en effet, plus la lumière est bleutée, plus elle est énergétique et inversement, plus la lumière tend vers le rouge, moins elle est énergétique.

DESCRIPTIF ET PRINCIPE

Le dispositif est composé d'un boîtier dans lequel se trouvent six DELs (1) de longueurs d'onde différentes balayant l'ensemble du spectre visible, du violet au rouge.

Chaque DEL possède une longueur d'onde d'émission indiquée sur le boîtier qu'il est possible de déterminer avec précision à l'aide d'un spectromètre à fibre (réf. SPEC1 ou SPEC2 par exemple) connecté à un PC ou de manière plus approximative à partir d'un spectroscopie avec échelle de longueur d'onde en recherchant la longueur d'onde pour laquelle on a le maximum d'intensité (réf. P/SPEC3).

Un sélecteur rotatif (2) permet de sélectionner la DEL que l'on désire étudier.

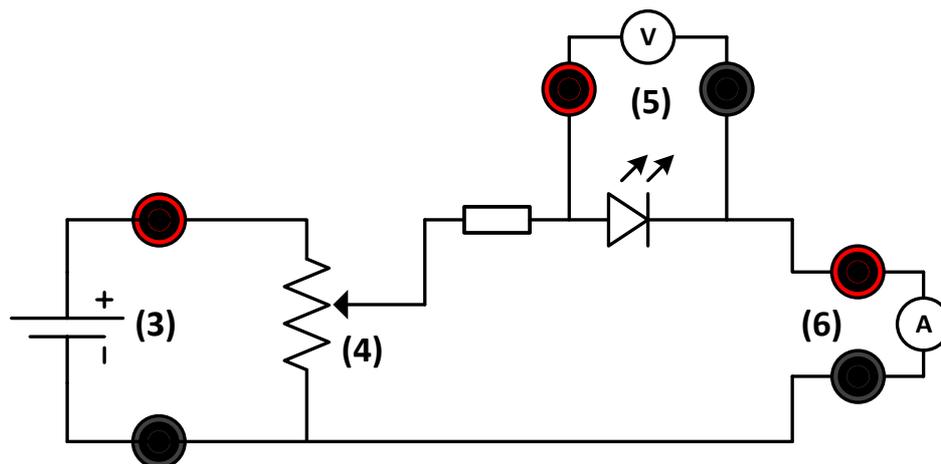
Deux douilles banane sur le côté gauche du boîtier (3) permettent d'alimenter le dispositif en 12 V continu.

Un potentiomètre (4) permet ensuite de faire varier la tension d'entrée pour alimenter la DEL sélectionnée entre 0 et 12 V.

Deux douilles banane Ø 4 mm sur le dessus de l'appareil (5) permettent de connecter un voltmètre aux bornes de la DEL et de mesurer ainsi la tension appliquée à ses bornes.

Deux douilles banane Ø 4 mm sur le côté droit (6) permettent de brancher un ampèremètre en série avec la DEL et de mesurer ainsi le courant la traversant.

Le branchement final correspond au schéma très simple ci-dessous :



Pour l'expérience, on détermine expérimentalement la tension seuil U_0 de chaque DEL indépendamment en traçant sa caractéristique $I=f(U)$.

Comme expliqué en annexe, cette tension seuil est proportionnelle à l'énergie **DE** (en Joules) donnée aux électrons pour franchir la jonction. Cette énergie électrostatique pour un électron est donnée par la relation :

$$DE = e.U_0$$

où **e** est la charge d'un électron ($1,6 \times 10^{-19}$ C) et **U_0** la tension seuil de la DEL déterminée graphiquement.

Lorsque l'électron (charge -) se recombine avec un trou (charge +) il libère ainsi l'énergie emmagasinée pour passer la jonction sous forme d'un photon d'énergie **DE**. La fréquence du photon ainsi émis est donnée par la relation suivante :

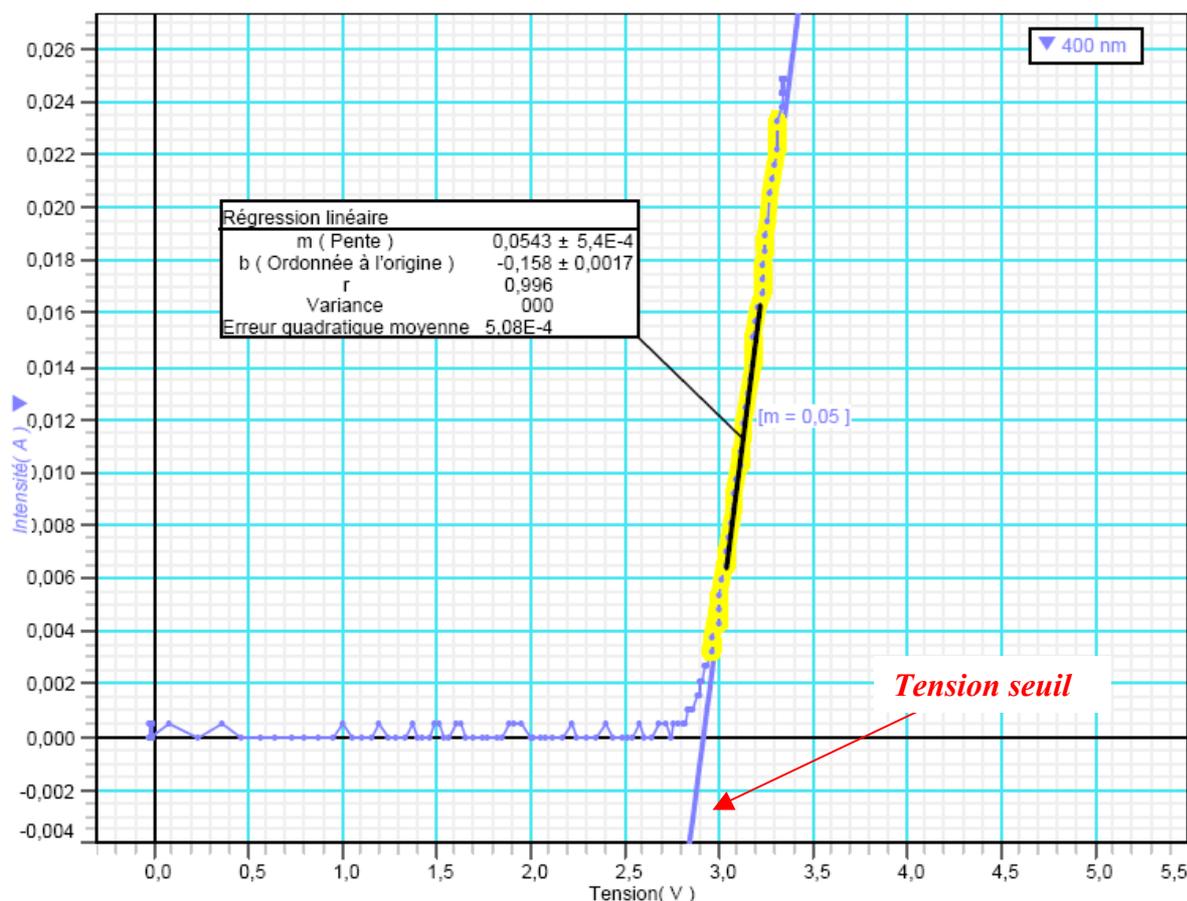
$$DE = h.n$$

où **h** est la constante de Planck et **n** la fréquence du photon en Hz.

PROTOCOLE EXPERIMENTAL

- 1 – Brancher la maquette sur une alimentation continue 12 V maximum.
- 2 – Brancher l'ampèremètre et le voltmètre comme inscrit sur l'appareil.
- 3 – Tourner le sélecteur rotatif à fond vers la gauche pour sélectionner la première DEL de longueur d'onde 400 nm.
- 4 – Tourner le potentiomètre en dessous du sélecteur de DEL à fond vers la gauche.
- 5 – Allumer l'alimentation pour alimenter le dispositif. La DEL est normalement éteinte et les appareils de mesure affichent « 0 » (aux fluctuations près).
- 6 – Tourner progressivement le potentiomètre dans le sens des aiguilles d'une montre et relever les valeurs d'intensité et de tension manuellement dans le cas d'une utilisation avec des multimètres ou automatiquement dans le cas d'une utilisation avec un système ExAO. Reporter ces valeurs dans un graphique.

7 – Ajuster une droite sur la partie linéaire de la diode comme illustré dans le graphique ci-dessous. Déterminer la tension seuil de la DEL : il s'agit de la tension à l'intersection de la droite et de l'axe des abscisses.



8 – Tourner à fond le potentiomètre vers la droite pour éteindre la DEL et tourner le sélecteur de DEL d'un cran vers la droite pour passer à la DEL suivante.

9 – Procéder de la même manière que pour les points 6 à 8 pour réaliser les caractéristiques des 6 DELs et déterminer ainsi les 6 tensions seuils correspondant aux 6 longueurs d'onde.

10 – Reporter les valeurs dans un tableau puis un graphique après avoir converti les longueurs d'ondes l en fréquence n (Hz) et les tensions seuil U_0 en énergie DE à partir des relations suivantes :

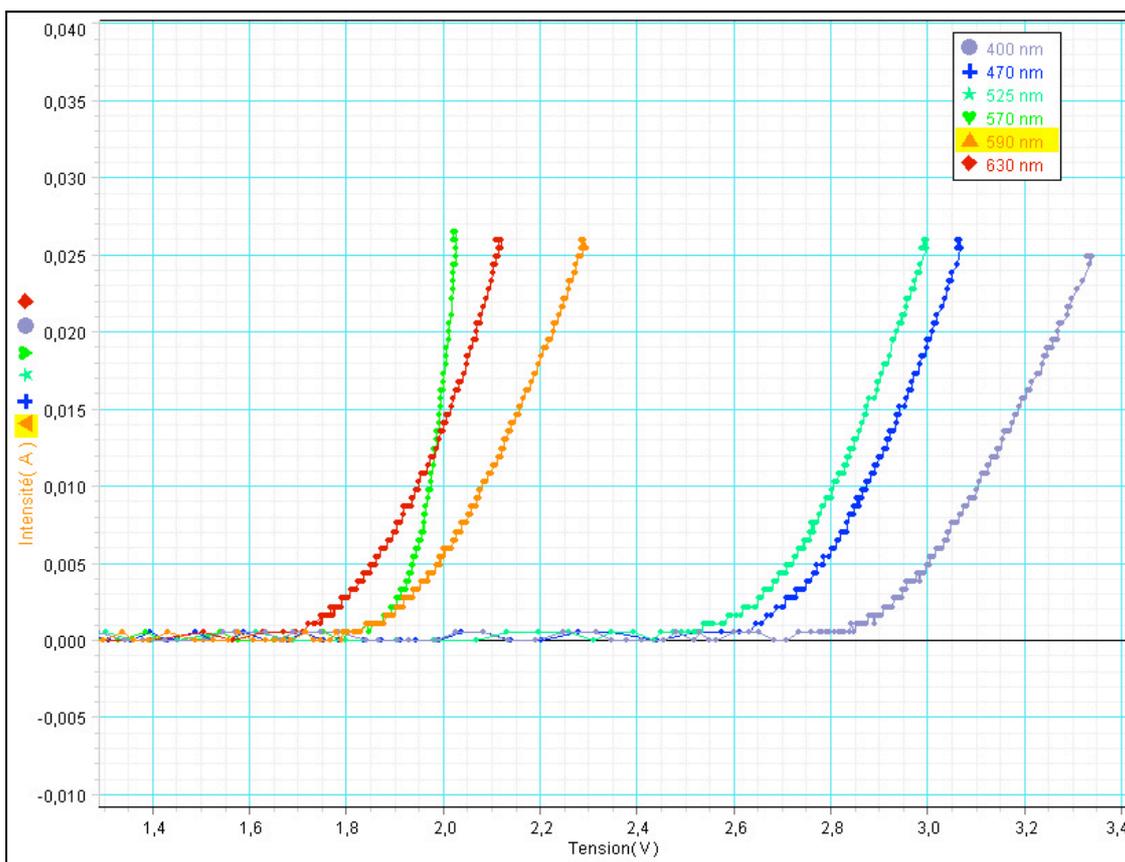
$n = c/l$ où c est la vitesse de la lumière dans le vide (3×10^8 m/s)

$DE = e \cdot U_0$ où e est la charge de l'électron ($1,6 \times 10^{-19}$ C)

l	U_0	$n = c/l$	$DE = e.U_0$
400			
470			
525			
570			
590			
630			

RESULTATS OBTENUS

Nous avons testé le dispositif à l'aide d'une interface ExAO PASCO à l'aide de 2 capteurs tension et intensité. Les résultats obtenus figurent ci-dessous.



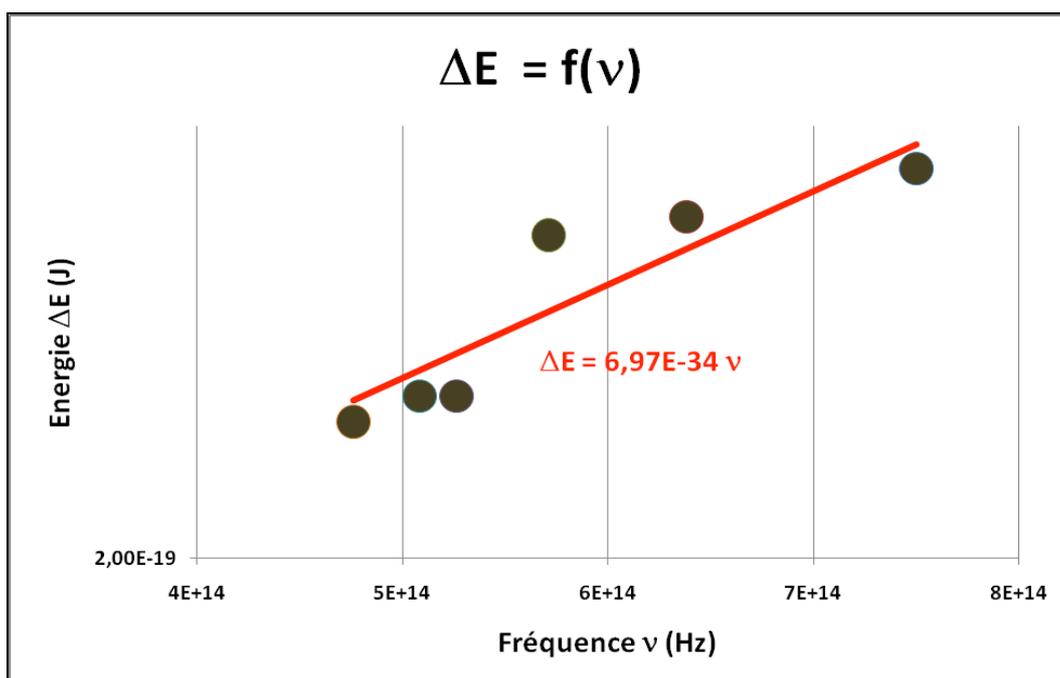
Par la méthode des tangentes, nous avons déterminé la tension seuil correspondante à chaque caractéristique $I=f(U)$.

Comme on peut le voir dans le tableau-ci-dessous, les valeurs expérimentales s'écartent des valeurs théoriques de quelques pourcents à une dizaine de pourcents. Ceci vient de la très forte subjectivité dans le tracé des tangentes. L'idéal serait de prendre les tangentes extrêmes et de relever l'intervalle de tensions seuils acceptables puis de prendre la valeur centrale.

Dans la dernière colonne, on exprime l'énergie DE en eV. Cela peut être un très bon moyen d'introduire cette notion aux élèves.

l (nm)	U ₀ (V) expérimental	U ₀ (V) théorique	Ecart Th/ Exp (%)	n = c/l (Hz)	DE = e.U ₀ (J)	DE = e.U ₀ (eV)
400	2,94	3,11	-5 %	7,5E+14	4,70E-19	2,94
470	2,73	2,64	+3 %	6,38298E+14	4,37E-19	2,73
525	2,65	2,37	+12 %	5,71429E+14	4,24E-19	2,65
570	1,95	2,18	-10 %	5,26316E+14	3,12E-19	1,95
590	1,95	2,11	-7 %	5,08475E+14	3,12E-19	1,95
630	1,84	1,97	-6 %	4,7619E+14	2,94E-19	1,84

A partir de ce tableau, on trace DE = f(n). On ajuste ensuite une droite au 6 points tracés. Le coefficient directeur de cette droite est égal à la constante de Planck h.



On trouve une valeur pour la constante de Planck une valeur approchée de $6,97 \times 10^{-34} \text{ m}^2.\text{kg}.\text{s}^{-1}$, soit un écart d'environ 5 % par rapport à la valeur théorique ci-dessous, ce qui est très satisfaisant compte tenu de la détermination graphique des tensions de seuil des différentes DEL étudiées.

Constante de Planck : $h = 6,626068 \times 10^{-34} \text{ m}^2.\text{kg}.\text{s}^{-1}$

NB : Il faut de plus préciser qu'une DEL a des tolérances sur ses caractéristiques intrinsèques : la longueur d'onde peut être légèrement différente (+/- 10 nm) et sa tension seuil peut par conséquent varier en conséquence. De même ses caractéristiques d'émission peuvent varier en fonction de la température, etc.

ANNEXE – THEORIE SUR LES DEL

1. Bandes de conduction, bande de valence et zone interdite

Il ne s'agit pas ici de rentrer dans les détails de la théorie des bandes mais de donner les éléments pour comprendre le principe d'émission d'une DEL.

Dans un atome isolé, les électrons sont répartis sur différentes couches correspondant à des niveaux d'énergie quantifiés (programme de seconde : couches K, L, M).

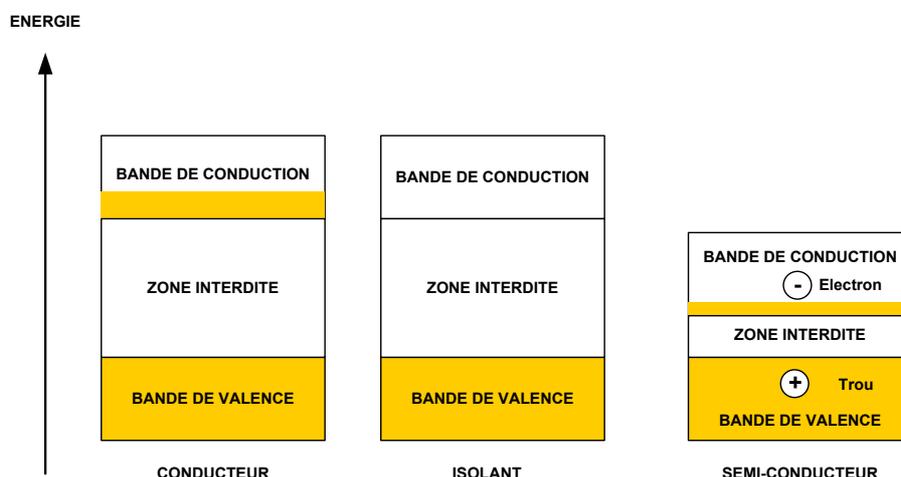
Dans un cristal, les niveaux d'énergie des atomes le constituant « se chevauchent » et se mélangent de sorte que les niveaux d'énergie accessibles aux électrons sont beaucoup plus larges et constituent ce qu'on appelle des « bandes » d'énergie (chaque bande est en fait constituée de multiples niveaux d'énergie discrets autorisés).

Dans le cas présents, on s'intéresse à 3 bandes :

- **La bande de valence** dans laquelle les électrons ne font que participer aux liaisons inter atomiques conférant au cristal sa solidité.
- **La bande de conduction** dans laquelle les électrons sont libres de se mouvoir et de conduire ainsi un courant électrique.
- **La bande interdite** séparant les bandes de valence et de conduction dans laquelle on ne trouve aucun électron (pas de niveau d'énergie).

Un matériau est conducteur, isolant ou semi-conducteur selon le remplissage de ces bandes :

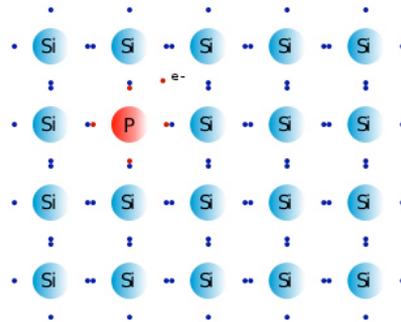
- **Conducteur** : la bande de conduction est partiellement remplie et ces électrons peuvent en présence d'un champ électrique (tension aux bornes du conducteur) acquérir une énergie supplémentaire et peupler des niveaux d'énergie supérieures disponibles dans la bande de conduction. Un courant électrique peut donc passer.
- **Isolant** : aucun électron ne se trouve dans la bande de conduction et la bande interdite est trop large pour permettre à des électrons de passer de la bande de valence à la bande de conduction, même en présence d'un champ électrique. Aucun courant ne peut passer.
- **Semi-conducteur** : dans ces matériaux, la bande interdite est moins large et un électron peut acquérir grâce à l'agitation thermique (liée à la température ambiante) une énergie suffisante pour « sauter » de la bande de valence à la bande de conduction, laissant un trou (charge +) dans la bande de valence. Sous l'action d'un champ électrique, les électrons situés dans la bande de conduction et les trous situés dans la bande de valence peuvent acquérir un mouvement collectif : le solide devient conducteur.



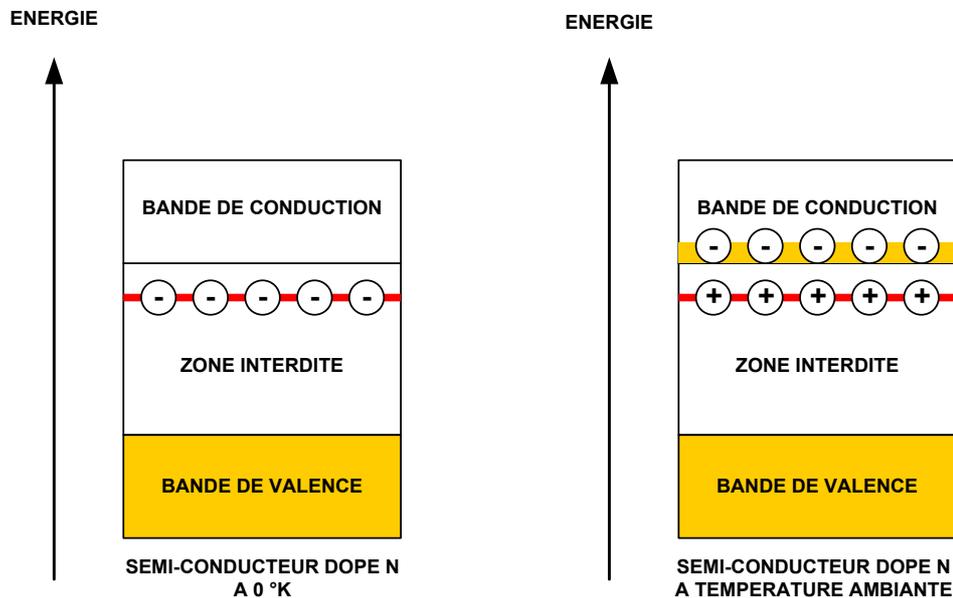
2. Dopage « P » et « N »

a. Dopage N :

Dans un cristal de Silicium (Si) ayant 4 électrons de valence on ajoute quelques atomes de Phosphore (P) ayant 5 électrons de valence ; on a donc un excès d'électrons par rapport au cristal initial et on parle de dopage « N ».



Le dopage N se traduit par l'apparition d'un nouveau niveau d'énergie juste en dessous de la bande de conduction. A température ambiante, les électrons de ce niveau peuvent facilement passer dans la bande de conduction et conduire ainsi le courant.

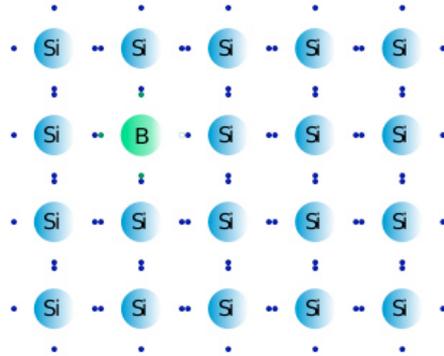


Le dopage N crée un niveau supplémentaire (en rouge) dans la zone interdite juste en dessous de la bande de conduction. Ce niveau contient tous les électrons libres des impuretés introduites dans le cristal : on parle de « niveau donneur » d'électrons.

Les électrons se trouvant sur le niveau donneur peuvent facilement migrer dans la bande de conduction sous l'action de l'agitation thermique (à température ambiante). On a alors des électrons dans la bande de conduction et des trous dans le niveau d'énergie donneur. Ce sont ces électrons de la bande de conduction qui vont conduire le courant en présence d'un champ électrique. On parle de conductivité de type N.

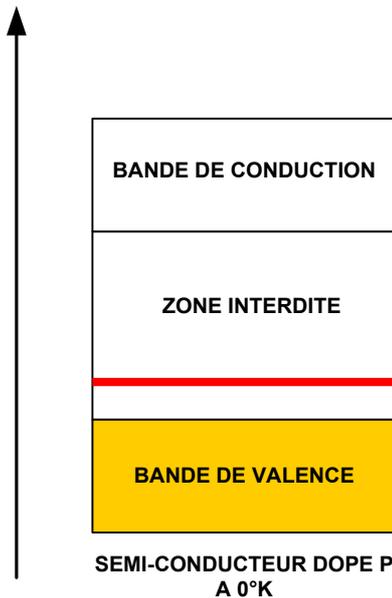
b. Dopage P :

Dans un cristal de Silicium (Si) ayant 4 électrons de valence on ajoute substitue quelques atomes de Bore (B) ayant 3 électrons de valence ; on a donc un déficit d'électrons (excès de trous) par rapport au cristal initial et on parle de dopage « P ».



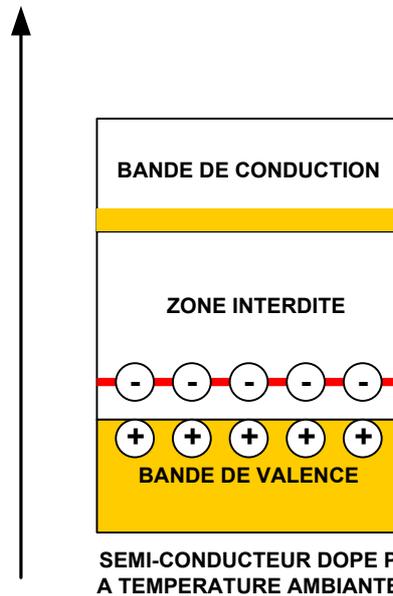
Le dopage P se traduit par l'apparition d'un nouveau niveau d'énergie juste au-dessus de la bande de valence. A température ambiante, les électrons de la bande de valence peuvent facilement passer dans ce niveau d'énergie et « créer » ainsi des trous (+) dans le haut de la bande valence. La conduction est ainsi possible par le déplacement de ces charges positives.

ENERGIE



Le dopage P crée un niveau supplémentaire (en rouge) dans la zone interdite juste au-dessus de la bande de valence. A 0°K, ce niveau est vide : on parle de niveau accepteur.

ENERGIE



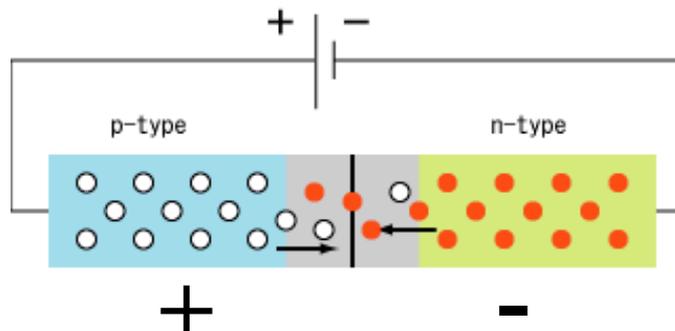
A température ambiante, les électrons se trouvant dans le haut de la bande de valence peuvent facilement migrer dans le niveau donneur sous l'action de l'agitation thermique. On a alors des électrons dans le niveau accepteur et des trous dans le haut de la bande de valence.

Ce sont ces trous de la bande de valence qui vont conduire le courant. On parle alors de conductivité de type P.

a. Diode : jonction PN

Lorsqu'on juxtapose un semi conducteur dopé P et un semi conducteur dopé N, on obtient ce que l'on appelle une jonction PN. Une diode électroluminescente est une jonction PN qui doit être polarisée en sens direct comme indiqué dans le schéma ci-dessous pour pouvoir émettre de la lumière.

Au contact des 2 semi-conducteurs se trouvent une zone de transition. Les porteurs de charge majoritaires (électrons pour le semi-conducteur dopé N et trous pour celui dopé P) de part et d'autre de la zone de contact s'attirent et se recombinent, diminuant ainsi le nombre de porteurs libres sur une zone que l'on appelle « zone de déplétion » (en gris sur le schéma).



En appliquant une tension aux bornes de la jonction comme illustré ci-dessus, la borne « + » repousse les trous majoritaires dans le semi-conducteur dopé P vers la zone de déplétion, et la borne « - » repousse les électrons majoritaires dans le semi-conducteur dopé N vers la zone de déplétion. Lorsque cette tension ΔV est suffisamment importante pour qu'un électron et un trou acquièrent suffisamment d'énergie pour pouvoir se rencontrer et se recombiner, il y a émission d'un photon d'énergie DE .

Selon la nature des semi-conducteurs utilisés et le dopage réalisé, on obtient des jonctions PN différentes et des tensions seuils pour les DEL différentes, ceci se traduisant par des longueurs d'onde d'émission distinctes.

Couleur	Longueur d'onde	Tension seuil (V)	Semi-conducteur utilisé
Infra rouge	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1,63$	arséniure de gallium-aluminium (AlGaAs)
Rouge	$610 < \lambda < 760$	$1,63 < \Delta V < 2,03$	arséniure de gallium-aluminium (AlGaAs) phospho-arséniure de gallium (GaAsP)
Orange	$590 < \lambda < 610$	$2,03 < \Delta V < 2,10$	phospho-arséniure de gallium (GaAsP)
Jaune	$570 < \lambda < 590$	$2,10 < \Delta V < 2,18$	phospho-arséniure de gallium (GaAsP)
Vert	$500 < \lambda < 570$	$2,18 < \Delta V < 2,48$	nitride de gallium (GaN) phosphure de gallium (GaP)
Bleu	$450 < \lambda < 500$	$2,48 < \Delta V < 2,76$	séléniure de zinc (ZnSe) nitride de gallium/indium (InGaN) carbure de silicium (SiC)
Violet	$400 < \lambda < 450$	$2,76 < \Delta V < 3,1$	
UV	$\lambda < 400$	$\Delta V > 3,1$	diamant (C) nitride d'aluminium (AlN) nitride d'aluminium/gallium (AlGaN)
Blanc	Chaude à froide	$\Delta V = 3,5$	