

Optoélectronique

L'optoélectronique s'intéresse aux composants et techniques permettant l'émission ou la réception de signaux lumineux par des systèmes électroniques ; les applications sont nombreuses, nous citerons ici quelques exemples.

La signalisation :

- diodes électroluminescentes,
- afficheurs 7 segments,
- afficheurs à cristaux liquides (afficheurs LCD),
- écrans divers.

La transmission d'information :

- télécommande à infrarouge,
- communication entre cartes électroniques avec isolation galvanique,
- liaisons faibles distances à fibre optiques,
- liaisons transocéaniques à fibre optiques.

La détection et la mesure :

- détection de mouvement et de position par optocoupleur,
- mesure sur des gaz ou liquides,
- mesures de distances et pointages par faisceaux laser ;
- caméra à couplage de charge (caméra CCD).

Comme nous pouvons le voir, le domaine est extrêmement vaste, aussi nous limiterons nous aux idées générales et notions de bases, en essayant de présenter un catalogue des composants disponibles sur le marché. Nous nous intéresserons dans un premier temps aux émetteurs, puis aux récepteur, puis aux blocs comprenant les deux éléments.

1 Emetteurs

1.1 Diodes électroluminescentes (DEL ou LED pour Light Emitting Diode)

Le passage d'un courant dans une jonction PN provoque une dissipation d'énergie, habituellement sous forme thermique ; en choisissant correctement les matériaux, on peut obtenir aussi un rayonnement lumineux, visible ou infrarouge.



1.1.1 Caractéristiques principales

La première caractéristique à prendre en compte pour ces diodes est la longueur d'ondes d'émission : lumière visible (380 nm à 770 nm) ou infrarouge (770 nm à 1100 nm) pour les télécommandes par exemple.

Sur la figure suivante est représenté à gauche la caractéristique d'un LD 271 émettant dans l'infrarouge à 950nm avec une bande passante de 55 nm (mesuré à la moitié de la puissance maximale) et à droite celle d'une TSHA 5203 émettant dans l'infrarouge également mais à 875 nm avec une bande passante de 80 nm.

Relative spectral emission

$I_{rel} = f(\lambda)$

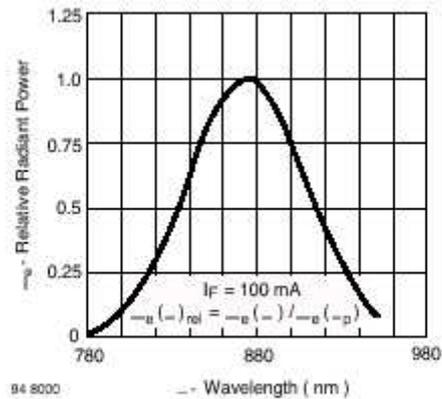
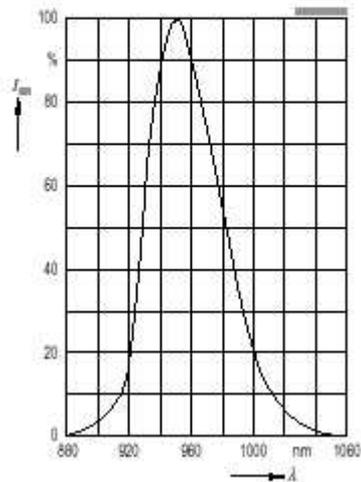


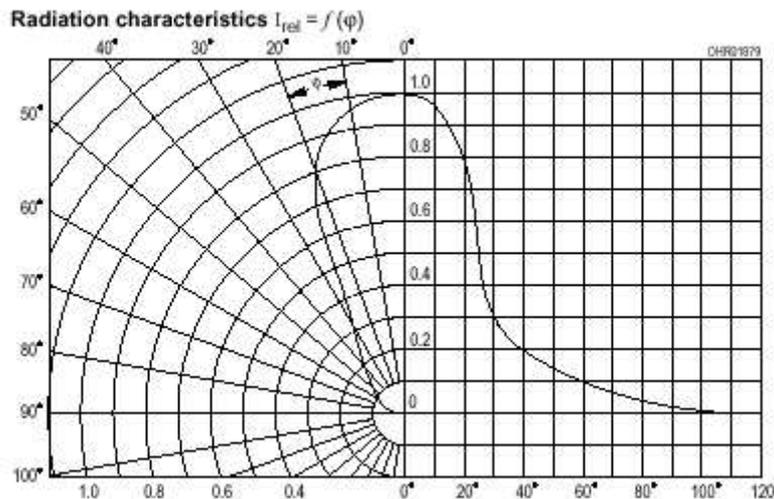
Figure 9. Relative Radiant Power vs. Wavelength

L'éclairage, précisé par l'intensité visuelle en mcd (milli candela) pour les DEL émettant dans le visible, et par la valeur du flux lumineux (en mW) pour les diodes infrarouges, est évidemment une donnée importante, l'objectif étant de produire un rayonnement ;

Si l'objectif est une transmission d'information vers un autre système électronique, les diodes étant généralement commandées en tout ou rien, les temps de commutation nécessaire pour établir et couper le courant dans le composant définira le débit d'information maximal (en bit par secondes).

L'angle d'émission lumineuse est une donnée important pour une télécommande par exemple : l'émetteur vise t-il précisément le récepteur (auquel cas un faible angle d'émission de la DEL permet d'envoyer plus de puissance vers le récepteur pour la même puissance émise) ou la visée est elle approximative, comme dans une télécommande pour téléviseur par exemple.

Le constructeur donne généralement l'angle de rayonnement correspondant à une atténuation par 2 de la puissance maximale (ici +/-25° pour la LD 271 représentée ci-après), puis une courbe représentant l'intensité lumineuse relevée dans les différentes directions (coordonnées polaires à gauche et cartésiennes à droite).



Enfin la tension de seuil de la diode peut être une donnée important pour un système alimenté par batterie d'accumulateur (une tension de seuil de 3,5 V nécessitera un élévateur de tension si l'alimentation est composée de deux accumulateurs de 1,2 V en série). La tension aux bornes de la diode dépend également beaucoup du courant dans la diode.

1.1.2 Différents types de LED émettant dans le domaine visible

Les constructeurs proposent un choix important de LED émettant dans le domaine visible :

- DEL de couleurs différentes, rouge, jaune, verte, orange, bleue et même blanche (c'est à dire à dire émettant suffisamment de couleurs pour faire du blanc). Leur luminosité est de l'ordre de 10 mcd pour un courant de 10 mA. Il est à noter que ces diodes présentent des tensions de seuil différentes, en conséquence de quoi il est déconseillé de les brancher en parallèle ; Voici quelques ordres de grandeurs pour des LED émettant dans le visible, polarisées par un courant de 20 mA : LED rouge 1,6 V ; LED orange 2,0 V ; LED jaune 2,4 V ; LED verte 2,4 V ; LED bleue 3,0 V ; LED blanche 3,5 V ;
- DEL faible consommation, pour les systèmes alimentés sur batterie par exemple, qui présente une luminosité de 2 mcd pour un courant de 2 mA.
- DEL à haute luminosité pour l'éclairage (torche électrique) ou les DEL concurrencent par leur bon rendement les ampoules à incandescence et allogènes ; la luminosité d'une DEL blanche atteint 300 mcd pour un courant de 20 mA ;
- DEL clignotantes (fréquence de l'ordre de 3 Hz), ce qui permet de faire l'économie d'un générateur de signaux carrés ;
- DEL bicolores (3 broches) et arc-en-ciel (6 broches), la commande étant envoyée sur une des broches suivant la couleur désirée ;
- DEL avec résistance intégrée (le constructeur précise alors la tension d'alimentation en fonction de la luminosité désirée).

On trouvera ces composants sous forme ronde ou rectangulaire, en boîtiers de 1,8 à 10 mm et même CMS, avec des angles d'émission variant de 12 à 180°.

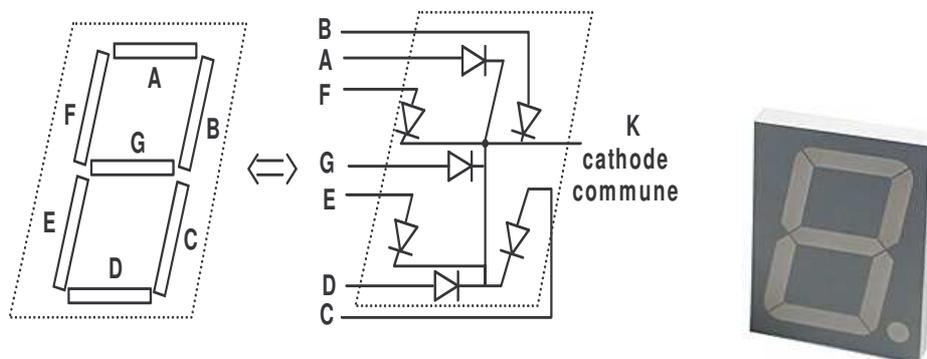
1.1.3 Diodes laser

La lumière est un phénomène ondulatoire, donc caractérisé par sa longueur d'onde (qui définit la couleur dans le spectre visible) et sa phase (par rapport à une référence). Un rayon laser est composé d'une lumière monochromatique (une seule longueur d'onde), dont les rayons sont tous en phase (on parle de lumière cohérente). On obtient ainsi un rayonnement de haute énergie dont les applications sont aussi variable que la découpe de métaux, la télémétrie et la lecture de disques optiques.

Les diodes laser permettent de produire des sources lumineuses de faible puissance dont les applications vont concerner les télécommunications (liaison par fibre optique), la lecture de disque optique, le pointage, la télémétrie etc...

1.1.4 Afficheurs sept segments et pavés lumineux (bargraphes et matrices)

En regroupant 7 DEL dans un même boîtiers, on peut réaliser un afficheur numérique (voire un afficheur hexadécimal succinct) :



Les diodes peuvent être connectées à anode ou cathode (cas de la figure) commune. Une huitième DEL permet d'afficher un point décimal.

De la même manière, il est possible de réaliser des bargraphes, pour la visualisation de niveaux ou des matrices (généralement 5 par 7 ou 5 par 8).



1.1.5 Alimentation de DEL

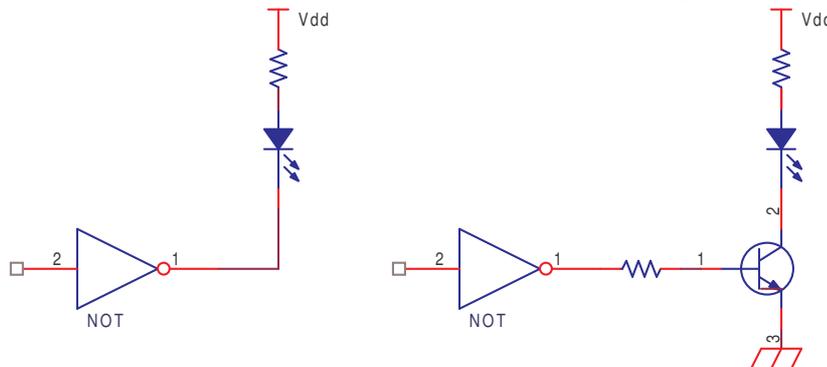
Il est important de noter que quel que soit le mode d'alimentation choisi, une DEL ne supporte qu'une faible tension inverse (3 à 5 V max) ; en conséquence, si la DEL est susceptible d'avoir une tension négative à ses bornes, on placera une diode de signal en antiparallèle.

1.1.5.1 Polarisation continue

L'alimentation la plus simple à mettre en œuvre est une polarisation continue : la DEL se comporte comme une diode classique, qui se polarise en direct pour éclairer, avec un courant de polarisation de 10 mA (valeur classique) à 20 mA suivant les composants, pour une tension de seuils de 1,5 V (valeur classique) à 3,5 V suivant les composants.

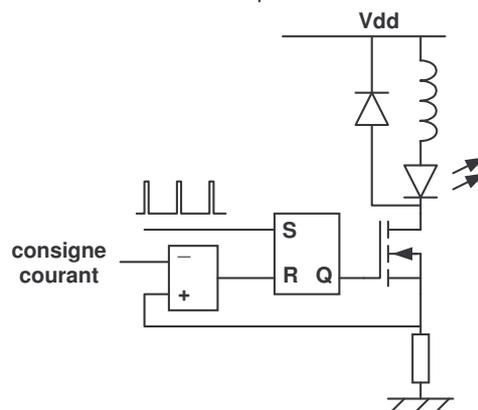
C'est le courant qui impose l'éclairage de la diode. Si on dispose d'une source de tension (ce qui est généralement le cas), deux options sont possibles :

- limiter le courant par une résistance comme le montrent les figures suivantes :



A gauche, on suppose que la sortie du circuit numérique est capable d'absorber le courant nécessaire à la DEL (ce qui est généralement le cas avec les CPLD et FPGA), à droite une adaptation à l'aide d'un transistor est nécessaire.

Dans les deux cas des pertes importantes ont lieu au niveau de la résistance, ce qui peut être pénalisant pour un système alimenté par batterie. Aussi trouvera-t-on souvent les DEL alimentées par un système à découpage, comme le montre l'exemple suivant :



La bascule RS est régulièrement mise au NL1 par le train d'impulsion (à fréquence fixe) sur son entrée S, ce qui met le transistor MOS en conduction et provoque la croissance du courant dans la DEL, croissance limitée par l'inductance. Lorsque le courant, mesuré aux bornes de la résistance atteint la valeur de consigne, la bascule est mise au NL0, bloquant le transistor. L'énergie emmagasinée dans l'inductance est alors restituée dans la DEL, via la diode de roue libre. Le cycle recommence lors de l'apparition d'une nouvelle impulsion sur l'entrée S de la bascule. La résistance de mesure étant de faible valeur, les pertes sont également très faibles. Si l'inductance est de valeur suffisamment importante, le courant est presque continu dans la DEL.

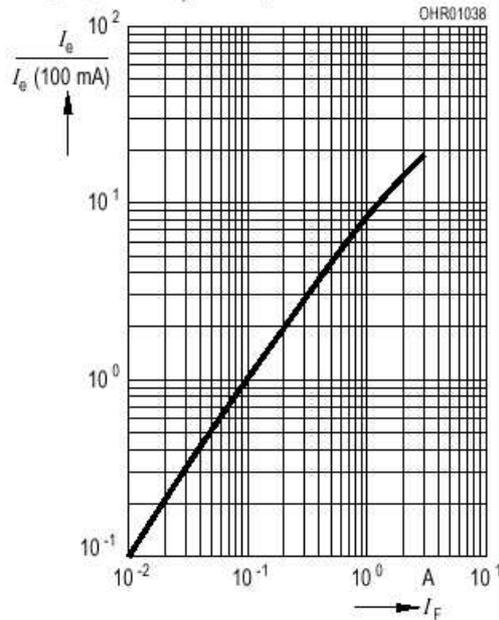
1.1.5.2 Attaque par impulsions de courant

Le courant maximal que peut supporter une DEL est limité par l'échauffement produit par ce courant. L'étude détaillée d'une DEL montre que pour un même courant moyen (celui qui décharge la batterie), on obtient un éclairage plus important pour un courant pulsé.

Le constructeur fournit par exemple la courbe de l'éclairage produit par la diode (en valeur relative par rapport à un courant de 100 mA pendant 20 μs) en fonction du courant traversant la diode, sous forme d'une unique impulsion de 20 μs.

Radiant intensity $\frac{I_e}{I_e \text{ 100 mA}} = f(I_F)$

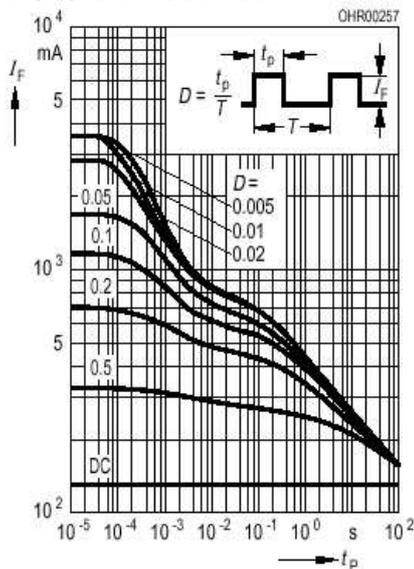
Single pulse, $t_p = 20 \mu\text{s}$



Le constructeur donne également le courant maximal de crête admissible en fonction du temps d'application de ce courant ; ces courbes sont paramétrées par le rapport cyclique (ici à gauche pour une LD 271).

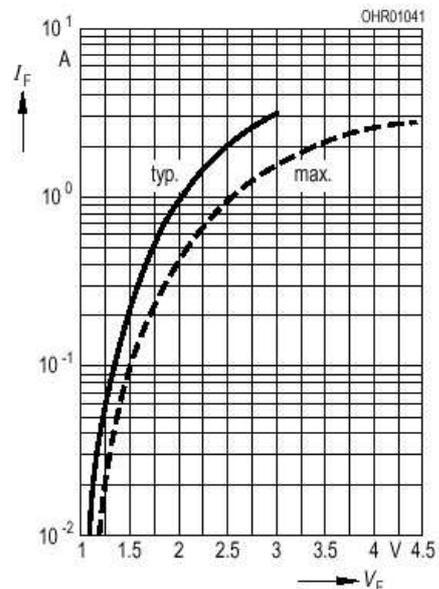
Permissible pulse handling capability

$I_F = f(\tau)$, $T_C = 25^\circ\text{C}$,
duty cycle $D = \text{parameter}$



Forward current

$I_F = f(V_F)$, single pulse, $t_p = 20 \mu\text{s}$

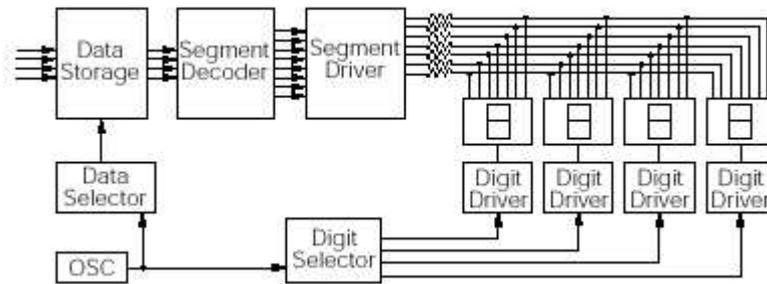


La tension aux bornes de la diode augmentant avec le courant, le constructeur précise aussi la courbe de cette évolution.

1.1.5.3 Affichage multiplexé

Lorsqu'un circuit doit commander plusieurs afficheurs 7 segments, il est souvent avantageux de réaliser un affichage multiplexé.

Le principe est le suivant : au lieu d'attaquer en même temps les n afficheurs par n bus 7 segments, tous les afficheurs sont reliés à un bus unique, sur lequel circule à fréquence suffisamment élevée (200 Hz par exemple), les n nombres à afficher. Seul l'afficheur dont le nombre est présent sur le bus a alors son anode (ou cathode) commune reliée par un transistor au potentiel positif (ou nul). Les afficheurs sont donc éclairés les uns après les autres, la persistance des impressions lumineuses sur la rétine de l'œil donnant l'illusion d'un affichage continu.



On limite ainsi la connectique, éventuellement le nombre de décodeur BCD / 7 segments si cette opération est réalisée par un circuit annexe, ainsi que la consommation globale pour les raisons expliquées au chapitre précédent.

1.2 Afficheurs à cristaux liquides (afficheurs LCD : Liquid Crstal Display)

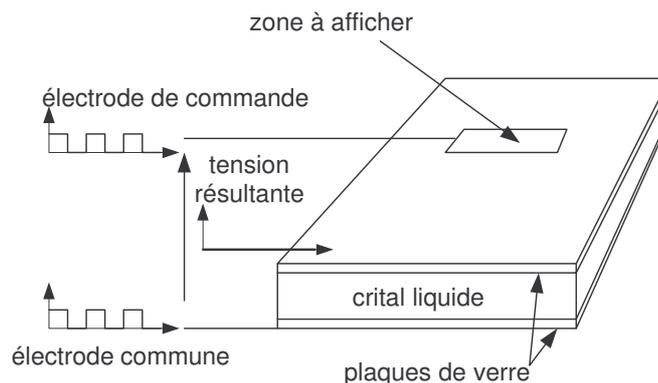
1.2.1 Principe de l'afficheur

Le cœur de l'afficheur est constitué d'un cristal, d'épaisseur 20 μm , dans un état semi-liquide, mis en « sandwich » entre deux plaques de verres.

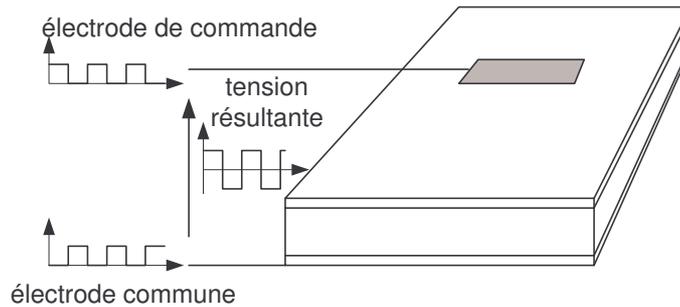
Sur la plaque de verre supérieure, de fines pistes conductrices correspondant aux zones à afficher sont reliées à une électrode de commande.

La plaque de verre inférieure est couverte d'une zone conductrice reliée à une électrode commune.

A l'état de repos l'ensemble est translucide.



Si on applique une différence de potentiel alternative entre une des électrodes de commande et l'électrode commune, la zone concernée devient opaque.



Le cristal ne produisant pas de lumière, pour permettre un affichage, il faut :

- soit renvoyer la lumière ambiante par une surface réfléchissante placée contre la plaque inférieure ;
- soit produire de la lumière à l'arrière de l'afficheur avec une DEL par exemple.

La tension appliquée doit impérativement ne pas présenter de composante continue, sous peine de destruction de l'afficheur. Afin d'éviter d'avoir à générer une tension négative au niveau du composant, on produit deux signaux carrés 0/Vdd, de même fréquence, décalés d'une demi-période.

L'un de ses signaux est appliqué en permanence à l'électrode commune :

- si on applique le même signal à une électrode de commande, la différence de potentiel entre cette électrode et l'électrode commune est nulle, le segment n'est pas « affiché », il reste translucide ;
- si on applique le signal en « opposition de phase » à l'électrode de commande, la différence de potentiel est alternative $\pm V_{dd}$, le segment « s'affiche », il devient opaque.

La fréquence des signaux doit être supérieure à 30 Hz pour éviter le scintillement et inférieure à 1 kHz pour diminuer la consommation électrique.

1.2.2 Afficheurs LCD commercialisés

Deux types d'afficheurs sont classiquement commercialisés :

- les afficheurs laissant accès à toutes les électrodes, sous forme de matrice de points (128 par 64 par exemple) ou de lignes (3 digits ½ ou 4 digits par exemple). L'utilisateur doit produire alors les signaux carrés et les appliquer aux électrodes adéquates.



- les afficheurs « intelligents » ; le composant comprend un microcontrôleurs permettant de gérer l'affichage, la communication se faisant par un bus 8 bits, sur lequel on envoie le code correspondant au caractère à afficher, et celui de l'endroit où l'on souhaite l'afficher. Une phase d'initialisation est nécessaire afin de préciser le mode de communication (format 8 ou 4 bits) et le mode d'affichage (une ligne ou deux lignes, curseur visible ou invisible etc...). Il est possible de définir ses propres caractères.



Ce type d'afficheur est commercialisé en afficheurs de 1 ligne de 8 caractères (de 8 points par 5), à 4 lignes de 40 caractères, ou encore sous forme de matrice.

Par rapport aux afficheurs 7 segments à LED, ils permettent :

- une meilleure résolution avec l'affichage possible d'autres caractères que les chiffres ;
- une densité d'affichage plus grande (plus d'information sur la même surface) ;

- une consommation nettement inférieure, surtout en l'absence de rétro éclairage ;
Ils sont par contre plus complexes à mettre en œuvre et nécessitent d'être pilotés par un microcontrôleur.

2 Récepteurs

Plusieurs composants sont susceptibles de modifier leur comportement s'ils sont éclairés. Là aussi, il faudra veiller à choisir le composant en fonction de la longueur d'onde attendue.

2.1 Photo résistance ou LDR (Light Dependant Resistor)

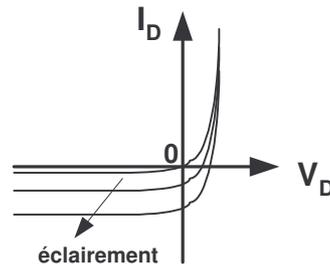
La conductivité d'un matériau semi-conducteur augmente avec l'éclairage (les photons envoient de l'énergie aux électrons du matériau, qui se libère plus facilement) ; cette propriété est utilisée pour réaliser des photorésistances. Dans l'obscurité la valeur de la résistance est supérieure à $10\text{ M}\Omega$ et peut chuter à $75\ \Omega$ pour un éclairage intense.

Le temps de réponse étant relativement important (ordre de grandeur : 20 à 100 ms) ce type de composant est peu intéressant pour des communications.

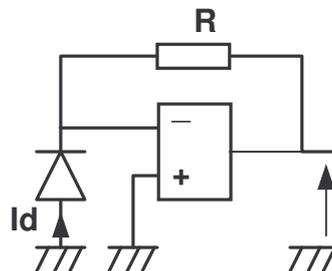


2.2 Photodiode

Une jonction polarisée en inverse est le siège d'un courant inverse faible (en générale quelques nA). Si un apport d'énergie, par éclairage par exemple, est effectué, ce courant augmente.



C'est le principe utilisé pour les photodiodes, qui seront donc polarisées en inverse (ou à tension nulle comme sur la figure suivante) et dont le courant va augmenter avec l'éclairage. Diode non éclairée, le courant, dit d'obscurité est de l'ordre de 10 à 20 nA ; ce courant peut monter à $50\ \mu\text{A}$ pour un éclairage suffisant.



Sur le montage précédent, l'A.O. est polarisé en linéaire, la tension aux bornes de la photodiode est donc celle de la borne « + », soit 0 V, le courant I_d proportionnel à l'éclairage, circulant dans la diode, circule (presque) intégralement dans la résistance. On retrouve donc $V_s = -R \cdot I_d$ (le courant I_d étant négatif).



Une photodiode présente un temps de réponse (ordre de grandeur : de quelques ns à la centaine de ns en fonction de la diode choisie) nettement supérieur à celui d'une photo résistance, sa linéarité est également meilleure. Cependant, le faible courant inverse circulant nécessite une amplification.

2.3 Phototransistor

La jonction base collecteur d'un transistor NPN fonctionnant en linéaire est polarisé en inverse. Si on éclaire cette jonction (qui devient une photodiode), le courant collecteur du transistor devient proportionnel à l'éclairement, tout en intégrant déjà une amplification (qui ne sera pas forcément suffisante). Le temps de réponse (ordre de grandeur : de quelques μs à la centaine de μs) est par contre diminué par rapport à la photodiode. Le courant d'obscurité est aussi plus important dans le collecteur (quelques centaines de nA).

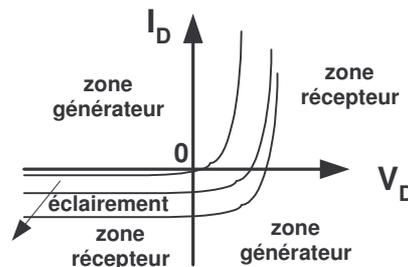
Certains modèles laissent accès à la base du transistor, ce qui permet de fixer le point de polarisation.



2.4 Cellules photovoltaïques (photo piles ou piles solaires)

Le principe de fonctionnement est le même que pour les photodiodes, mais l'application n'est cette fois pas la détection d'un rayon lumineux, mais la transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique.

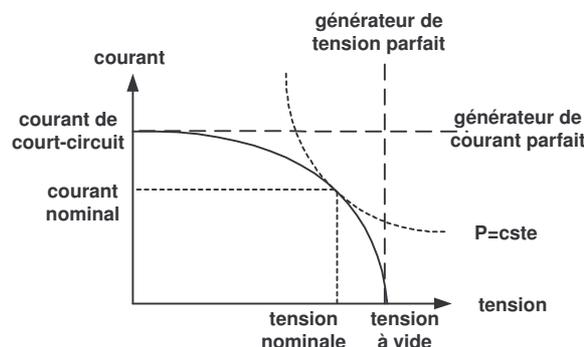
La photodiode est utilisée comme un générateur, donc dans le quadrant où V_D est positif et I_D négatif.



Afin d'augmenter la puissance disponible en sortie, la surface éclairée est beaucoup plus large que pour une photodiode. Le rendement puissance électrique disponible sur puissance lumineuse fournie reste relativement faible, de l'ordre de 10%.

Les principaux critères de choix de tels composants sont la tension à vide, le courant de court-circuit, les courant et tension nominaux.

On représente alors souvent la caractéristique en convention générateur, pour un éclairement donné, ce qui permet de mettre en évidence une tension à vide et un courant de court-circuit.

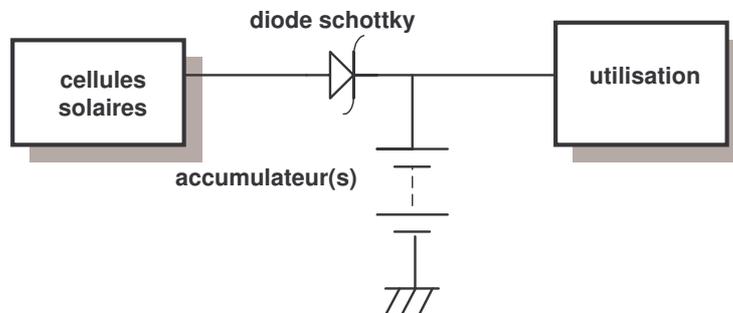


Chaque cellule fournit une tension d'environ 0,7 V à vide (fonction de la technologie). On augmente la tension globale en plaçant plusieurs cellules en série. On augmente le courant de court-circuit (fonction de la technologie et de la surface) en plaçant plusieurs cellules en parallèle.

L'utilisation du photo-générateur est optimale pour la tension et le courant nominal, là où la puissance fournie est maximale.

L'éclairage n'étant pas toujours présent au moment où l'on a besoin de l'électricité, une accumulation sera nécessaire dans de nombreuses applications. Pour de faibles puissances mise en jeu, on peut utiliser comme chargeur une simple diode Schottky (BAT85 par exemple), qui présente une faible tension de seuil (0,3 V).

Les accumulateurs pourront être de type Cd-Ni ou Ni-MH (voir cours sur les alimentations). Dans ce dernier cas, on dimensionnera les éléments de manière à ce que le courant de charge ne dépasse pas 10% de la capacité des accumulateurs.



Il faudra veiller à choisir correctement le nombre d'accumulateurs, tension d'utilisation souhaitée, la tension que peuvent fournir les cellules solaires, tous ces paramètres étant intimement liés. Noter que l'utilisation d'une petite alimentation à découpage ou à pompe de charge permet d'élever la tension des accumulateurs si nécessaire.

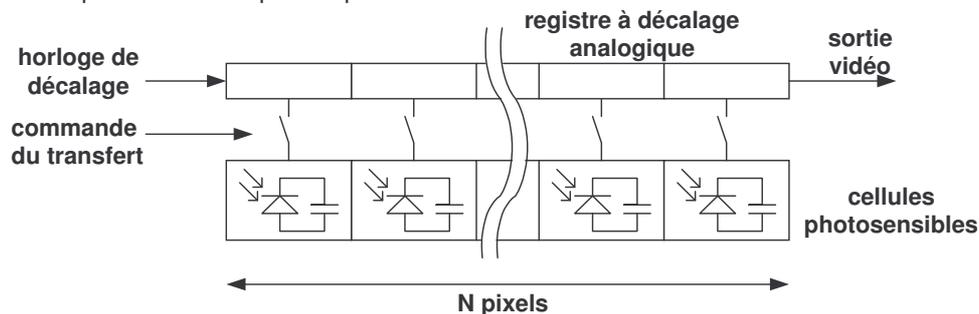
On pourra améliorer la durée de vie des accumulateurs en plaçant un système de surveillance de leur tension de charge, système qui mettra en court circuit les cellules solaires (en saturant un transistor en parallèle par exemple) si cette tension devient trop importante. Il ne serait pas judicieux d'ouvrir le circuit, en bloquant un transistor série par exemple, ce transistor créant une chute de tension supplémentaire en fonctionnement normal.

2.5 Composant à couplage de charges (CCD : Charge Coupled Device)

Le but de ces composants est l'acquisition d'images :

- sur une ligne (image une dimension) comme dans un télécopieur (c'est la feuille qui défile devant le capteur) ;
- soit sur une surface (image deux dimensions) comme dans le cas d'un appareil photo ou caméra numérique.

Dans le cas d'un capteur une dimension, la ligne est décomposée en points ou pixels (256 à 5000 suivant les modèles), chaque point étant associé à une photodiode en parallèle sur un condensateur (le condensateur intrinsèque de la diode). Pendant le temps d'exposition (ordre de grandeur 10 ms), le courant dans la photodiode charge le condensateur. La charge de celui-ci est alors proportionnel à l'éclairage du point et au temps d'exposition.

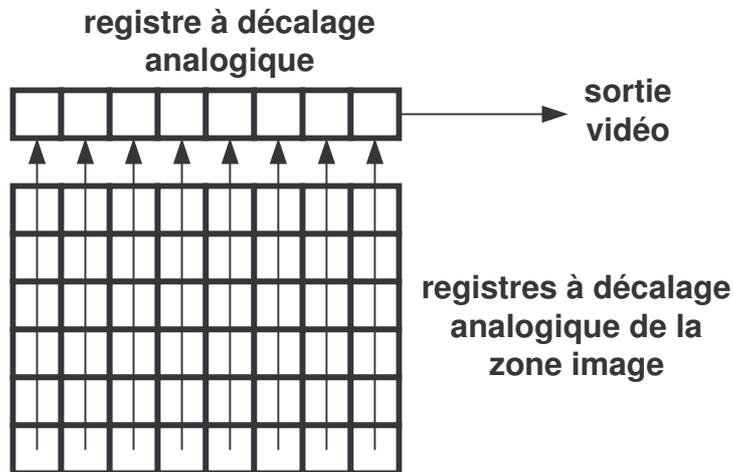


Les charges de tous les condensateurs sont ensuite envoyées, via une porte analogique (un transistor MOS) vers un registre à décalage analogique. Ce composant va permettre de transférer au rythme d'une horloge, vers une borne de sortie, les tensions correspondant à chaque pixel.

On utilise ce temps de transfert pour faire l'acquisition d'une nouvelle image.

Dans le cas d'une image deux dimensions, celle-ci est découpée en L lignes, chaque ligne comprenant elle-même P points. On arrive ainsi à des matrices allant de 500 x 500 à 4096 x 4096

suivant les modèles. Après le temps d'exposition, les charges sont envoyées vers un ensemble de P registres à décalage analogique à L entrées, ces registres étant organisés sur P colonnes. La sortie des P registres alimente un unique registre à décalage analogique à P entrées. A la fin des décalages, toutes les valeurs correspondant à chaque pixel, sont passées sur la borne de sortie.



Le temps de décalage est utilisé pour faire l'acquisition d'une nouvelle image dans le cas d'une caméra.

3 Composants émetteurs récepteurs ou optocoupleurs

Ces composants sont utilisés pour la détection de mouvement d'une pièce, soit pour l'isolation galvanique de la transmission d'une information.

3.1 Détection de mouvement

Il s'agit par exemple de détecter la position d'un axe en rotation associé à une roue dentée.

On peut alors utiliser un optocoupleur à fourche, une des branches de la fourche intègre une DEL, l'autre un phototransistor. Lorsque les dents de la roue interrompent le faisceau émis par la DEL, le phototransistor se bloque, puis se sature de nouveau au passage de l'encoche.



Dans le cas d'un optocoupleur à réflexion, une DEL et un phototransistor sont montés l'un à côté de l'autre. Le passage de la dent réfléchit le rayon émis par la DEL et l'envoie vers le phototransistor qui se sature. Le passage de l'encoche provoque le blocage du phototransistor.



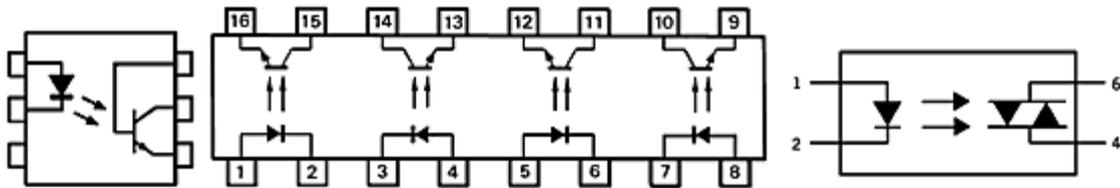
3.2 Transmission d'information avec isolation galvanique

La transmission d'information entre cartes électronique éloignée même faiblement (quelques dizaines de cm) nécessite une isolation galvanique sur la ligne de transmission ; sans cette isolation, les boucles créées par les différents câbles sont le siège de tensions et courants parasites basses fréquences, qu'il est très difficile de différencier du signal.

Pour empêcher ces courants de circuler, il suffit d'ouvrir la boucle à un endroit du circuit. L'optocoupleur qui associe une LED et un récepteur (photo-transistor par exemple) permet de réaliser

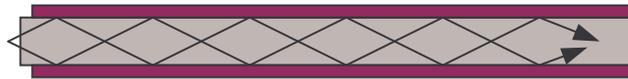
cette isolation galvanique (aucun courant ne circule entre la diode et le transistor) tout en passant l'information par la lumière.

Suivant les besoins, le récepteur peut être une photodiode, un phototransistor, un photothyristor, un phototriac ou une porte logique commandée par la lumière.



4 Fibre optique

Une fibre optique est un conducteur optique en silice, appelé cœur, entourée d'une gaine dont l'indice de réflexion est différent. Si une lumière est émise par une DEL à l'entrée de la fibre, elle se propage dans la silice par réflexions multiples sur la gaine. Un récepteur (photodiode ou phototransistor) placé à la sortie de la fibre permet de convertir la lumière en signal électrique.



On a ainsi la possibilité de transmettre une information, généralement sous forme numérique (les convertisseurs courant-lumière et lumière-courant n'ont pas une bonne linéarité), en s'affranchissant des perturbations extérieures (parasites non-intentionnels et brouillages), le conducteur en silice étant complètement isolé de l'extérieur par la gaine.

De même, il n'est pas possible d'intercepter le message de l'extérieur (à moins de couper la gaine).

Ces deux propriétés rendent la transmission par fibre optique très intéressante dès que l'on souhaite une transmission de grande qualité (insensibilité aux perturbations et / ou confidentialité).

Le principe décrit précédemment fait référence aux fibres optique dites multimodes à saut d'indice : les réflexions multiples de la lumière introduisent un phénomène « d'écho lumineux » qui limite l'intelligibilité du signal dès que le débit d'information ou la distance de transmission augmente. On améliore la transmission en utilisant des fibres dont l'indice de la silice évolue graduellement du centre vers la périphérie : les réflexions deviennent moins anguleuses, atténuant le phénomène d'écho. On parle alors de fibres optiques à gradient d'indice.



Enfin, en diminuant le diamètre du cœur, on obtient une propagation monomode.



Si la longueur d'onde du signal lumineux est correctement adaptée à la fibre, l'atténuation de ce dernier est très faible, rendant le processus intéressant pour des communications très longues distances, liaison transatlantique par exemple, où la fibre optique concurrence le satellite.