

# Capteurs

## 8. Capteurs optiques

PAR F. MORAIN-NICOLIER

URCA - IUT de Troyes  
Ge2i - S3

### Table des matières

|  |    |
|--|----|
| <b>1 La lumière - propriétés fondamentales</b> | 1  |
| 1.1 Aspects de la lumière                      | 2  |
| 1.1.1 Aspect ondulatoire                       | 2  |
| 1.1.2 Aspect corpusculaire                     | 3  |
| 1.2 Notions de radiométrie et de photométrie   | 3  |
| 1.2.1 Radiométrie                              | 4  |
| 1.2.2 Photométrie (visuelle)                   | 4  |
| 1.2.3 Unités photométriques                    | 5  |
| 1.3 La lumière comme support d'information     | 6  |
| <b>2 Caractéristiques métrologiques</b>        | 7  |
| 2.1 Courant d'obscurité $I_0$                  | 7  |
| 2.2 Sensibilité                                | 7  |
| 2.3 Sensibilité spectrale                      | 7  |
| <b>3 La photorésistance</b>                    | 8  |
| 3.1 Quelques caractéristiques                  | 8  |
| 3.2 Modélisation                               | 9  |
| <b>4 La Photodiode</b>                         | 9  |
| <b>5 Capteurs d'images : CCD</b>               | 10 |

## 1 La lumière - propriétés fondamentales

### 1.1 Aspects de la lumière

**Lumière** — aspect ondulatoire et aspect corpusculaire (en même temps)

#### 1.1.1 Aspect ondulatoire

- La lumière est constituée d'ondes électromagnétiques,
- Ces ondes se propagent dans le vide à la vitesse  $c = 299792\text{km/s}$  et dans la matière à une vitesse réduite  $v = c/n$  où  $n$  est l'indice de réfraction du milieu.
- La fréquence  $\nu$  (nu) et la longueur d'onde  $\lambda$  sont liées par la relation

$$\lambda = \frac{v}{\nu}, \quad (1)$$

soit dans le vide

$$\lambda = \frac{c}{\nu}. \quad (2)$$

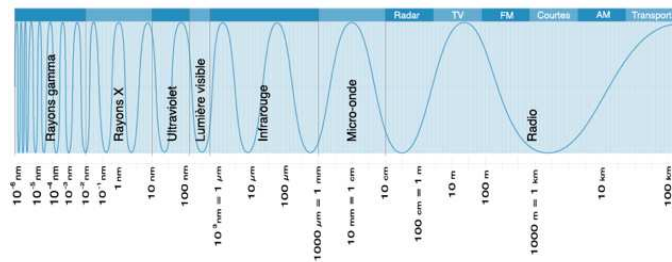


Figure 1. Spectre électromagnétique

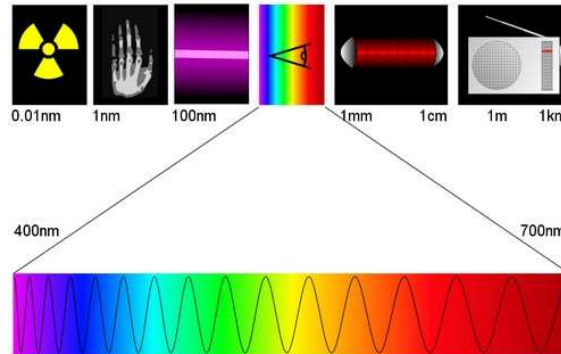


Figure 2. Spectre lumineux

- Une onde monochromatique est formée d'un champ électrique et d'un champ magnétique orthogonaux
- Les différents atomes de la source émettent des ondes dont les phase et les directions des champs sont indépendantes et varient aléatoirement au cours du temps  
(sauf LASER : *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*)
- L'utilisation d'un polariseur permet d'obtenir un rayonnement dont les champs ont une direction constante.

### 1.1.2 Aspect corpusculaire

- Mis en évidence lors de l'interaction avec la matière
- La lumière est constituée de particules (**les photons**) dont chacun est le support d'une énergie élémentaire  $E_\Phi$ , avec

$$E_\Phi = h\nu, \quad (3)$$

$h$  est la constante de Planck,  $h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{Js}$ .

- Dans la matière, les électrons sont liés aux atomes.
- Ils exigent pour devenir libres l'apport d'une énergie  $E_l$  qui est leur énergie de liaison.  
 → L'absorption d'un photon provoquera la libération d'un électron à condition que

$$\begin{aligned} E_\Phi &\geq E_l \\ \Leftrightarrow h\nu &\geq E_l \\ \Leftrightarrow \nu &\geq \frac{E_l}{h} \\ \text{ou } \lambda &\leq \frac{hc}{E_l} \end{aligned} \quad (4)$$

**longueur d'onde de seuil  $\lambda_s$**  — longueur d'onde maximale susceptible de provoquer la libération d'un électron :

$$\lambda_s = \frac{hc}{E_l} \quad (5)$$

$$\text{soit } \lambda_{s(\mu\text{m})} = \frac{1,237}{E_l(\text{eV})}. \quad (6)$$

De façon plus générale, la lumière libre :

- des paires  $\bar{e}$  /trous dans les isolants et les semi-conducteurs très purs
- des  $\bar{e}$  dans les semi-conducteurs dopés P
- des trous dans les semi-conducteurs dopés N

## 1.2 Notions de radiométrie et de photométrie

Les grandeurs relatives aux rayonnement lumineux peuvent être évaluées en :

**Radiométrie** — n'est considéré que le contenu énergétique et sa répartition dans l'espace et le temps

(aka photométrie énergétique)

**Photométrie** — l'impression visuelle pondère les définitions purement énergétiques.

(aka photométrie visuelle)

### 1.2.1 Radiométrie

Les grandeurs suivantes sont utilisées :

**Énergie rayonnante  $Q$**  — est l'énergie émise, reçue ou propagée sous forme de rayonnement (en joule). C'est la grandeurs de base.

**Flux énergétique  $\Phi$**  — est la puissance émise (en watt). C'est donc la dérivé de  $Q$  par rapport au temps :

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}. \quad (7)$$

**Intensité énergétique  $I$**  — pour une source ponctuelle, c'est le flux énergétique émis dans une direction donnée (en watt/stéradian) :

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (8)$$

où  $\Omega$  est un l'angle solide unité.

Pour une source donnée, l'intensité énergétique peut être fonction de la direction  $\theta$  de la mesure, voir de la longueur d'onde.

**Luminance énergétique  $L$**  — si la source possède une certaine étendue, il faut raisonner autour d'un point, i.e. une surface élémentaire.  $L$  est alors la densité surfacique de l'intensité énergétique (en watt/stéradian.m<sup>2</sup>)

$$L = \frac{dI}{dS_n} \quad (9)$$

où  $dS_n = dS \cdot \cos\theta$  car la direction de propagation n'est pas nécessairement colinéaire avec la direction de la mesure d'intensité.

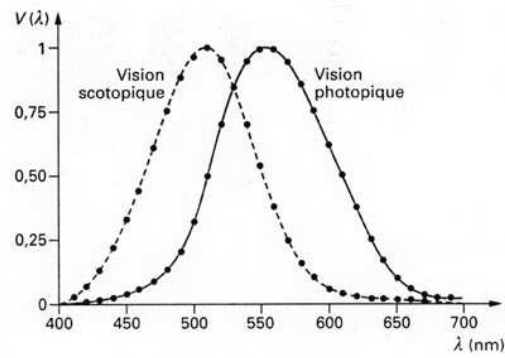
**Éclairement énergétique  $E$**  — c'est la puissance reçue par un élément de surface (en watt/m<sup>2</sup>)

$$E = \frac{d\Phi}{dS}. \quad (10)$$

Elle permet de caractérisé le coté récepteur.

### 1.2.2 Photométrie (visuelle)

La courbe de vision photopique (en opposition à scotopique) traduit la sensibilité relative de l'oeil :



**Figure 3.** Courbes de vision.

- La courbe est maximale pour  $\lambda_M = 555 \mu m$  et  $V(\lambda_M) = 1$ .
- Les diverses grandeurs énergétiques sont pondérées par un facteur  $K.V(\lambda)$   
 $\Rightarrow$  grandeurs lumineuses

$$X_v(\lambda) = 680.V(\lambda).X(\lambda). \quad (11)$$

Par exemple, le flux lumineux  $\phi_v$  est

$$\Phi_v(\lambda) = 680.V(\lambda).\Phi(\lambda). \quad (12)$$

Le flux total est

$$\Phi_v = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) \frac{d\Phi_v(\lambda)}{d\lambda} d\lambda. \quad (13)$$

### 1.2.3 Unités photométriques

|             | Unités énergétiques                                  | Unités lumineuses (visuelles)               |
|-------------|--|---|
| Énergie     | joule (J)  | lumen.s (lm.s)                              |
| Flux        | watt (W)   | lumen (lm)                                  |
| Intensité   | watt/stéradian (W/sr)                                | candela (cd)                                |
| Luminance   | watt/stéradian.m <sup>2</sup> (W/sr.m <sup>2</sup> ) | candela/m <sup>2</sup> (cd/m <sup>2</sup> ) |
| Éclairement | watt/m <sup>2</sup> (W/m <sup>2</sup> )              | lumen/m <sup>2</sup> ou lux (lx)            |

**Tableau 1.** Unités photométriques principales.

#### Luminances de sources (cd/m<sup>2</sup>)

|                              |             |
|------------------------------|-------------|
| Flash photographique         | $7.10^{10}$ |
| Soleil au méridien           | $2.10^9$    |
| Lampe à filament (tungstène) | $6.10^6$    |
| Minimum visible              | $10^{-5}$   |

#### Éclairements (lx)

|                 |           |
|-----------------|-----------|
| Lumière du jour | $10^4$    |
| Crépuscule      | 10        |
| Pleine lune     | $10^{-1}$ |
| Ciel étoilé     | $10^{-3}$ |

**Tableau 2.** Quelques ordres de grandeurs.

## 1.3 La lumière comme support d'information

Les principaux effets des mesurandes sur la lumière sont :

| Mesurande                                 | Paramètre modifié du rayonnement | Modification                       |
|---|----------------------------------|------------------------------------|
| position angulaire,<br>déformation        | direction de propagation         | déviations                         |
| épaisseur,<br>composition chimique        | flux                             | atténuation par absorption         |
| vitesse de rotation,<br>comptage d'objets |                                  | modulation par tout ou rien        |
| vitesse de déplacement                    | fréquence                        | changement (effet Doppler)         |
| température                               | intensité, longueur d'onde       | répartition spectrale de l'énergie |
| position,<br>dimension, déplacement       | phase                            | déphasage entre deux rayons        |
| pression, contrainte                      | polarisation                     | rotation du plan de polarisation   |

**Tableau 3.** Modification possibles d'un rayonnement optique par un mesurande.

## 2 Caractéristiques métrologiques

### 2.1 Courant d'obscurité $I_0$

- C'est le courant permanent délivré par le dispositif placé dans l'obscurité

Deux origines principales :

- origine interne** — libération de porteurs de charges par excitation thermique
- origine externe** — rayonnement thermique à dominante infrarouge  
(si le capteur est sensible à ces radiations)

Ainsi le courant d'obscurité présente :

- une sensibilité à la température : risque de dérives thermiques de courant pouvant être confondues avec des variations lentes du mesurande;
- des fluctuations autour de sa valeur moyenne : bruit de fond qui augmente avec l'intensité du courant d'obscurité et fixe une amplitude minimale détectable du mesurande.

### 2.2 Sensibilité

Le flux du rayonnement optique reçu par le capteur crée un courant d'origine photoélectrique  $I_p$ .

Le courant traversant le capteur est alors

$$I = I_p + I_0. \quad (14)$$

La sensibilité du capteur est alors

$$S = \frac{dI}{d\Phi} = \frac{dI_p}{d\Phi} \text{ (si } I_0 = \text{Cte)} \quad (15)$$

(attention à l'unité de mesure du flux : W, lm ou lux si le flux est spécifié par l'éclairement qu'il produit).

### 2.3 Sensibilité spectrale

C'est la sensibilité du capteur lorsque le rayonnement reçu est monochromatique

$$S(\lambda) = \frac{dI}{d\Phi}. \quad (16)$$

Il est possible de prévoir l'allure de la variation de  $S(\lambda)$  :

- pour  $\lambda > \lambda_s$**  — ( $\lambda_s$  : longueur d'onde de seuil)  
le courant  $I_p$  est en principe nul  $\Rightarrow S(\lambda) = 0$ .

- pour  $\lambda \leq \lambda_s$**  — en admettant que le photocourant est proportionnel au nombre  $G$  de porteur de charges libéré par seconde, on a

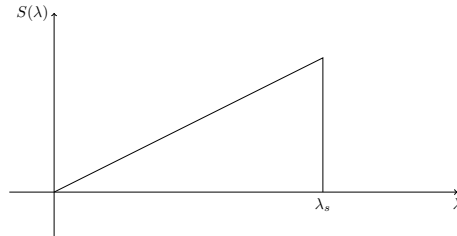
$$I_p \approx G = \frac{\eta(1-r)\lambda}{hc} \cdot \Phi$$

où

$\eta$ . rendement quantique : nb moyen de porteurs libérés par photon absorbés

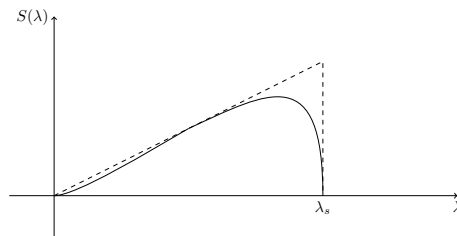
$r$ . coefficient de réflexion : proportion de photon réfléchis

$$\Rightarrow S(\lambda) \approx \frac{\eta(1-r)\lambda}{hc}. \quad (17)$$



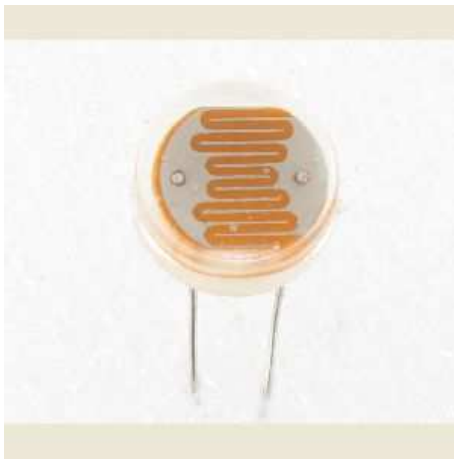
**Figure 4.** Sensibilité spectrale théorique

En pratique,  $\eta$  et  $r$  dépendent de  $\lambda$ , la courbe réelle est donc moins régulière :



**Figure 5.** Sensibilité spectrale réelle

### 3 La photorésistance



**Figure 6.** Une photorésistance

→ Pourquoi un serpent ?

La résistance d'une plaque conductrice de surface  $A$  et de largeur  $L$  est :

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{L}{A}. \quad (18)$$

- Dans une photorésistance,  $\sigma$  dépend de l'éclairement reçu.

Si la cellule est soumise à une d.d.p  $V$ , elle est traversée par un courant  $I$  :

$$\begin{aligned} I_p &= \frac{1}{R} \cdot V \\ &= \sigma \frac{A}{L} \cdot V. \end{aligned} \quad (19)$$

Ainsi pour avoir un courant  $I_p$  important, il faut avoir :

- $A$  : grand
- $L$  : petit
- La forme en peigne permet d'accroître la surface tout en maintenant la largeur faible.

### 3.1 Quelques caractéristiques

- En obscurité : 1 à 10 M $\Omega$
- En éclaircissement optimum, la résistance peut chuter à quelques centaines d'ohms.

### 3.2 Modélisation

**Photorésistance** .  $\Rightarrow$  résistance fixe  $R_0$  en // avec une résistance variable  $R_f$  avec le flux énergétique.

On établit

$$R_f = a\Phi^{-\gamma}. \quad (20)$$

- $a$  dépendant en particulier du matériau, de la température et du spectre du rayonnement,
- $\gamma$  ayant généralement des valeurs comprises entre 0,5 et 1.

Dans ces conditions, la résistance  $R$  de la photorésistance a pour expression :

$$\begin{aligned} R &= \frac{R_0 R_f}{R_0 + R_f} \\ &= \frac{R_0 \cdot a\Phi^{-\gamma}}{R_0 + a\Phi^{-\gamma}}. \end{aligned} \quad (21)$$

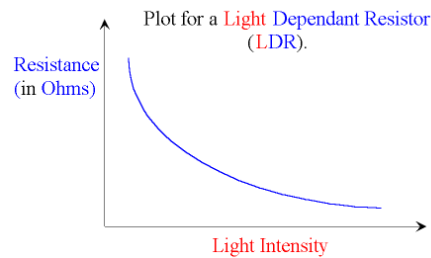


Figure 7.

## 4 La Photodiode

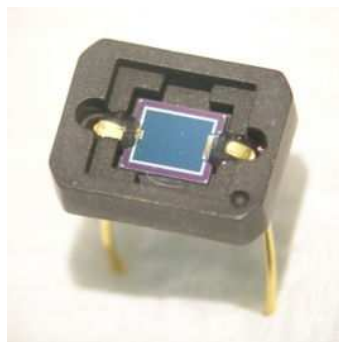


Figure 8. Exemple de photodiode

- C'est une jonction PN sur un substrat dopé  $n^+$

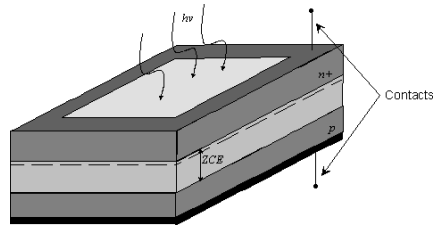


Figure 9.

- le substrat comporte une zone de charge (zone CE)
- la couche photosensible est située sur la zone  $n^+$  (ou la zone P) : c'est la couche sur laquelle les photons d'énergie  $h\nu$  vont influencer sur les propriétés de la jonction
- Sous éclairage, le bombardement photonique provoque la génération de paires électron-trou au voisinage de la jonction, qui conduisent à l'accroissement du courant inverse, et ce proportionnellement à l'intensité du flux incident

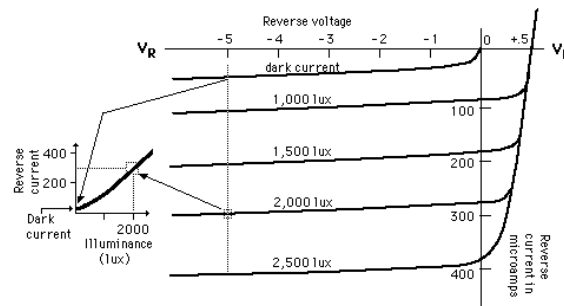


Figure 10. Exemple de caractéristiques d'une photodiode.

## 5 Capteurs d'images : CCD

---