



Capteurs optiques

Kuan Fang REN

CORIA
CNRS-Université & INSA de Rouen

Email: fang.ren@coria.fr

Tél: 02 32 95 37 43

2016.11



Plan du cours



- **Introduction**
 - Objectifs du cours
 - Chaîne optronique
 - Caractéristique de capteurs
- **Modèles de la lumière**
 - Modèle géométrique
 - Modèle ondulatoire
 - Modèle corpusculaire
- **Photométrie**
 - Grandeurs énergétiques
 - Grandeurs visuelles
- **Sources lumières**
 - Classement de sources
 - Corps noirs
- **Lois de base**
 - Loi de l'inverse du carré
 - Loi de cosinus
 - Loi de Beer
 - Critère de Rayleigh
- **Capteurs**
 - Classification des détecteurs
 - Principes de différents capteurs
 - Œil
 - **Détecteurs à effet photoélectrique**
 - **Diode et photodiode**
 - **Capteurs CCD et CMOS**
 - détecteurs bolométriques
 - Thermocouples
 - Détecteurs pyroélectriques
 - Caractérisation des capteurs

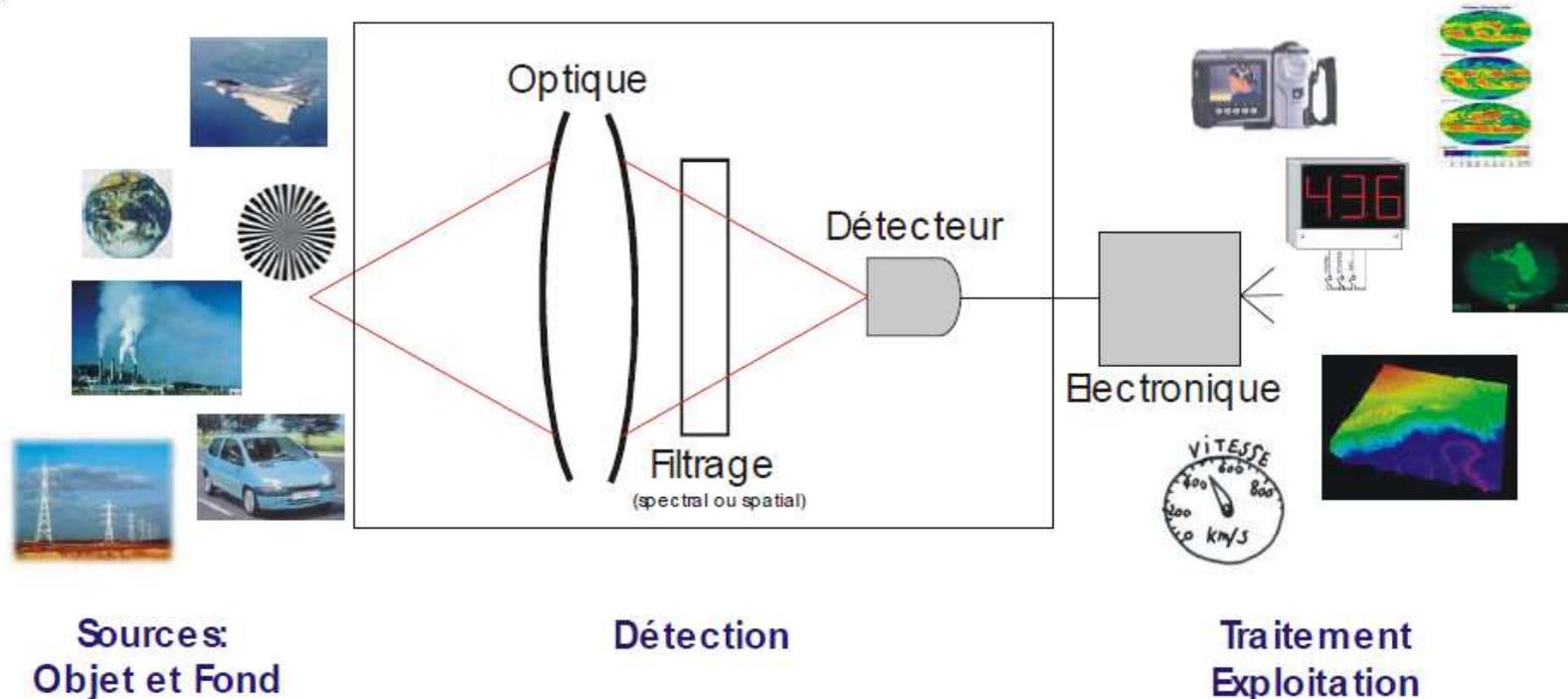


Introduction



- **Pourquoi capteurs optiques:**
 - **Métrologie optique**
 - Limite de l'œil
 - Limite d'autres techniques de mesure (mécanique ...) – précision, accessibilité, rapidité ...)
 - Grandeurs mesurables – électrique/électronique
 - **Automatisation - précision**
- **Objectifs**
 - **Connaître des grandeurs physiques**
 - **Connaître des lois de base**
 - **Comprendre les principes de différents détecteurs**
 - **Applications dans divers domaines**
- **Contrôle de connaissance**
 - **Un contrôle continu**
 - **Un examen**

Une chaîne optronique



Le bloc de détection qui englobe optique, filtrage spectral ou spatial, détecteur et électronique de proximité (convertisseur courant-tension, gain...) est au cœur du système et requiert la plus grande attention. Une détection doit être adaptée à la scène observée et à la nature de l'information à extraire.



Introduction



Capteurs optiques

Les **capteurs optiques** sont les capteurs qui **convertissent** le signal des ondes lumineuses (du ultraviolet au infrarouge) en signal électrique.

Ils sont omniprésents dans la société d'aujourd'hui. Ses utilités sont diverses et on peut les présenter en **quatre grandes classes** :

- **Les capteurs d'images** (capteurs CCD, CMOS,... pour la photographie et la vidéographie), les photodiodes, etc. sont très couramment utilisés dans la vie quotidienne aujourd'hui.
- **Les capteurs pour la recherche** sont très variés, ils doivent être spécialement conçu pour certaines applications.
- **Les capteurs industriels** (capteurs photorésistance, photomultiplicateur...) dans les domaines techniques qui correspondent au besoin notamment de l'automatisation des procédés.
- **Les capteurs militaires** utilisés dans la détection, la reconnaissance et l'observation aussi bien dans le domaine du spatial que de l'armée de terre (infanterie) ou de la marine.

?? Citer des applications de capteurs optiques ??
?? que vous connaissez. ??



Introduction



2015 INTERNATIONAL YEAR OF LIGHT AND LIGHT-BASED TECHNOLOGIES



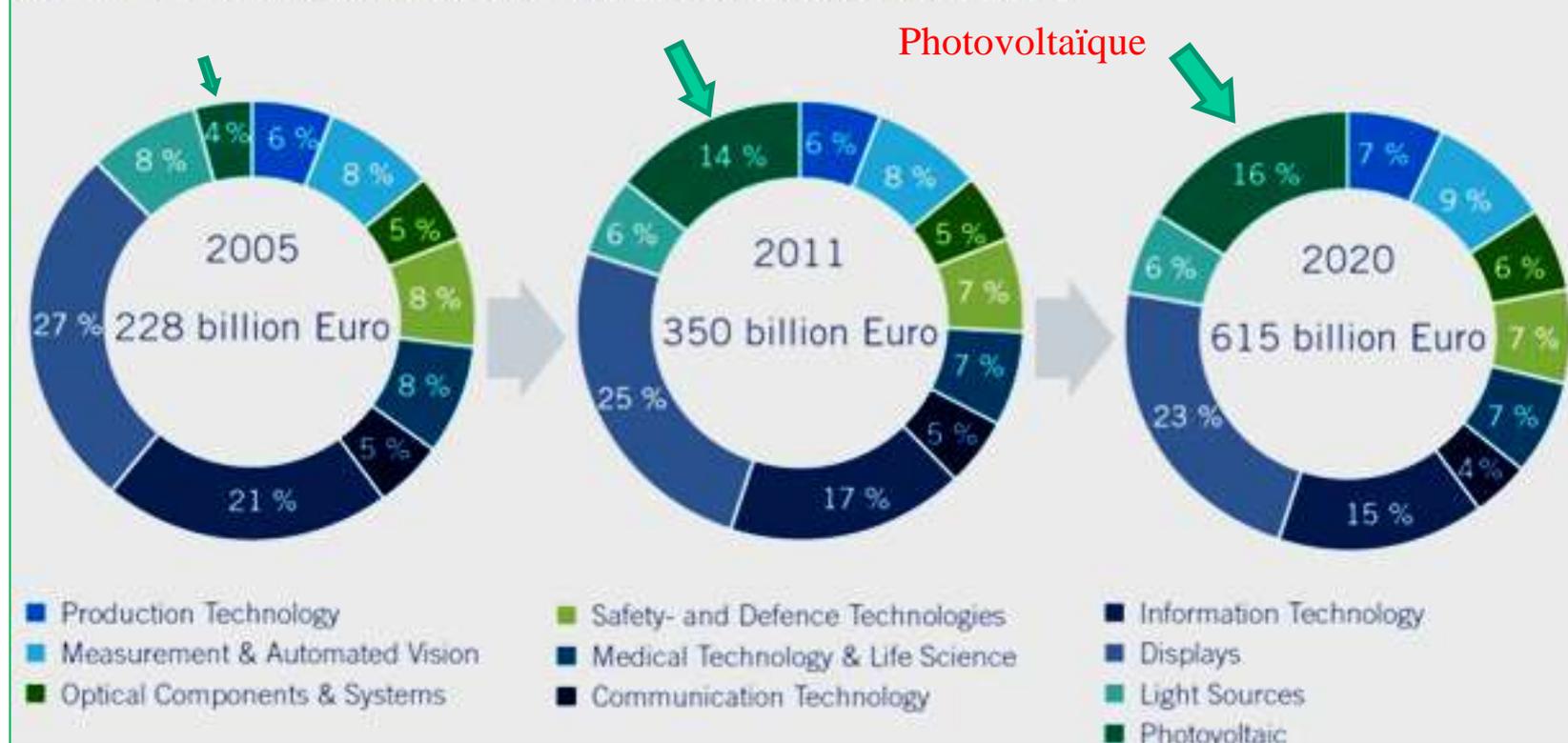
United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization



International Year of Light 2015

<http://www.light2015.org/Home/WhyLightMatters/Economic-Impact.html>

Key Data Photonics World 2005, 2011 and Expectations 2020



Caractéristiques de capteurs

- **Limites d'utilisation et étendue de mesure** (notamment λ , Λ),

Le capteur doit être utilisé dans son domaine normal d'emploi. En dehors de cette limite, la mesure n'est pas fiable ou le capteur peut être détruit.

- **Sensibilité**

La sensibilité S détermine l'évolution de la grandeur de sortie du capteur en fonction de la grandeur d'entrée.

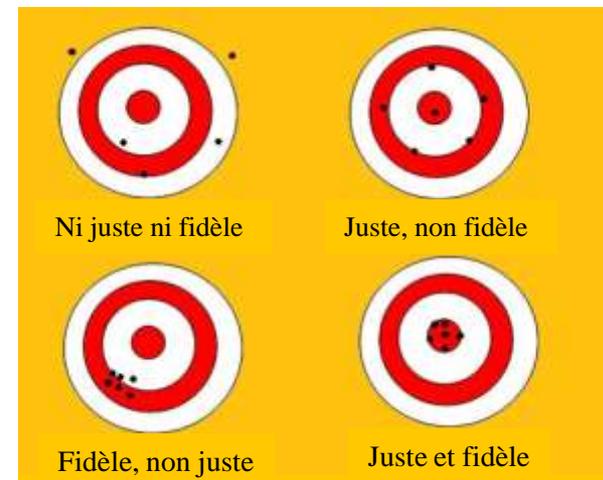
$$S = \frac{d(\text{sortie})}{d(\text{mesurande})}$$

- **Résolution**

La plus petite variation du mesurande que le capteur est capable de déceler.

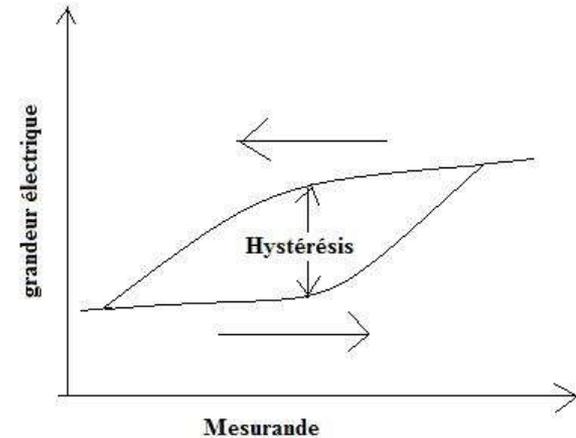
- **Fidélité - Justesse – Précision**

Il ne faut pas confondre ces trois termes
(voir figure).



- **Hystérésis ou réversibilité**

L'hystérésis est la différence maximale entre les deux grandeurs de sortie obtenues pour un même mesurande. Si l'hystérésis est nul la mesure est réversible.



- **Reproductibilité ou répétabilité**

	échantillon	méthode	laboratoire	personne	équipement
Répétabilité <i>mêmes conditions</i>	même	même	même	même	même
Reproductibilité <i>varier certaines conditions</i>	même	même	différent	différent	différent

- **Temps de réponse**

C'est l'intervalle de temps qui s'écoule après une variation brusque du mesurande jusqu'à ce que la variation de la sortie du capteur ne diffère plus que d'un écart limite ϵ fixée.



Modèles de la lumière



- **Modèle géométrique:**

La lumière est associée à des trajectoires décrites par l'énergie transportée par la lumière : rayons lumineux

- **Modèle ondulatoire :**

La lumière est décrite comme une onde électromagnétique se propageant à une vitesse c ($3 \cdot 10^8$ m/s dans le vide, c/n dans un milieu d'indice de n)

- **Modèle corpusculaire/modèle quantique:**

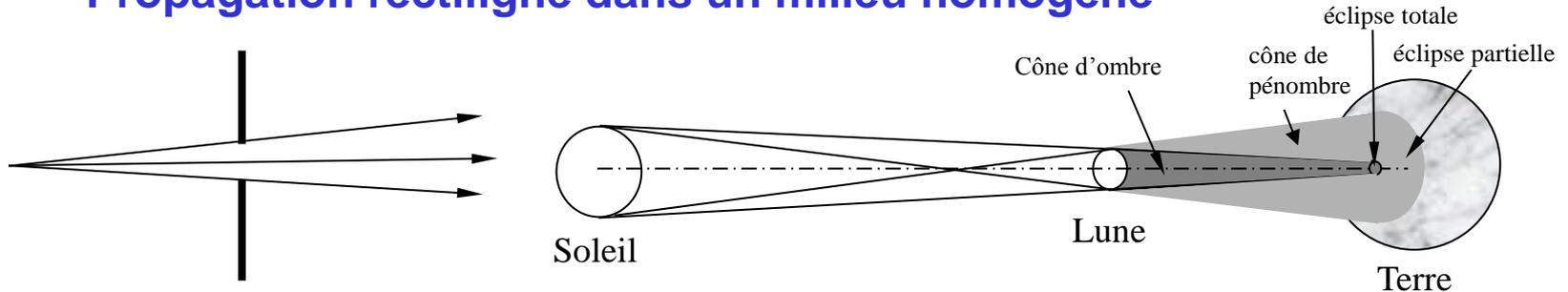
La lumière est interprétée comme de «grains» d'énergie appelés des photons, dont les propriétés (énergie et quantité de mouvement) sont reliées à la fréquence ν :

– énergie : $E=h\nu$, $h=6.62 \cdot 10^{-34}$ J.sec, constante de Planck

– quantité de mouvement : $p=E/c$

1. Modèle géométrique

- Propagation rectiligne dans un milieu homogène

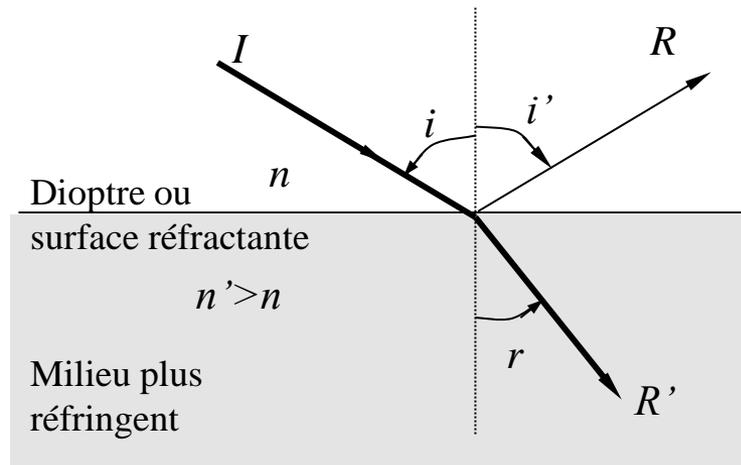


- Réflexion et réfraction sur une surface

Lois de réflexion et de réfraction

$$n \sin i = n' \sin r$$

Voir le cours optique géométrique pour plus détails



2. Modèle ondulatoire

- La lumière est une onde électromagnétique,
- La longueur d'onde pour la lumière dans le visible est comprise entre

0,4 μm ~ 0,8 μm ou 400 nm ~ 800 nm

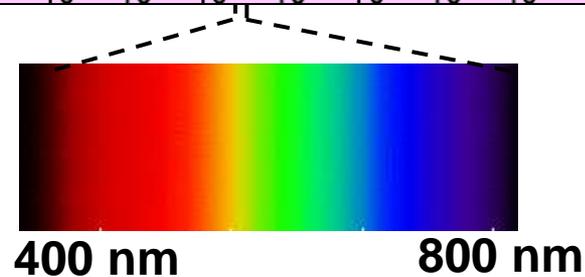
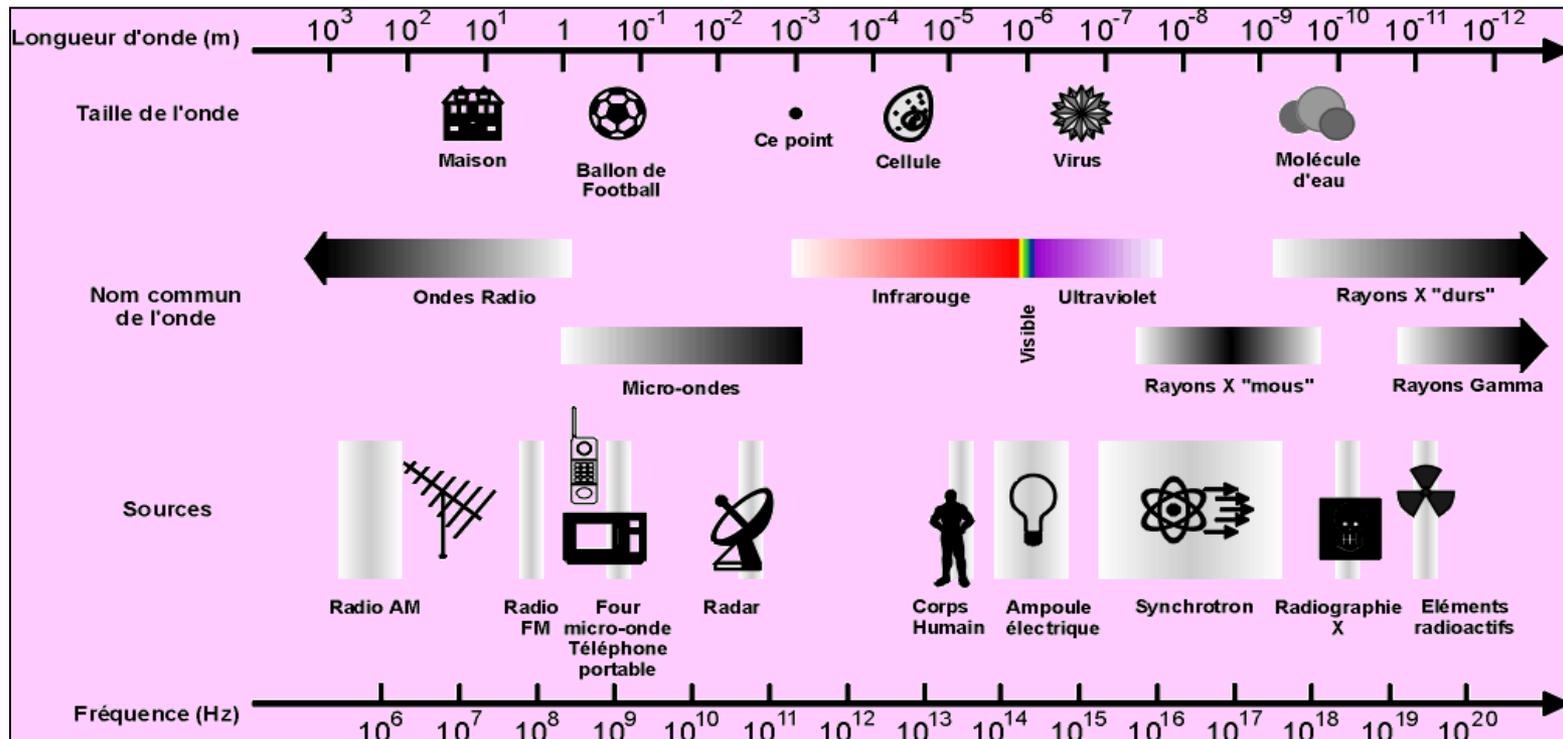
- La couleur est liée à la longueur d'onde,
- Quelques relations fondamentales:
 - La longueur d'onde et la fréquence :

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

- La période et la longueur d'onde:

$$T = \frac{\lambda}{c}$$

Rayonnement EM et la lumière





3. Modèle corpusculaire

- La lumière est interprétée comme de «grains» d'énergie appelés des photons
- Chaque photon porte une quantité d'énergie :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

où $h=6.62 \cdot 10^{-34}$ J.sec est la constante de Planck

- **Les photons se déplacent à une vitesse de la lumière :**
 $c=3.10^8$ m/s dans le vide, c/n dans un milieu d'indice de n .
- **Un faisceau lumineux peut être considéré comme un vent de « photons »,**
 - le « vent » est autant plus fort que les photons sont nombreux,
 - L'intensité est proportionnelle au flux des photons.

$$n = \frac{P}{h\nu}$$

n : nombre de photons/seconde.

P : flux énergétique/puissance.

Exemples de calcul

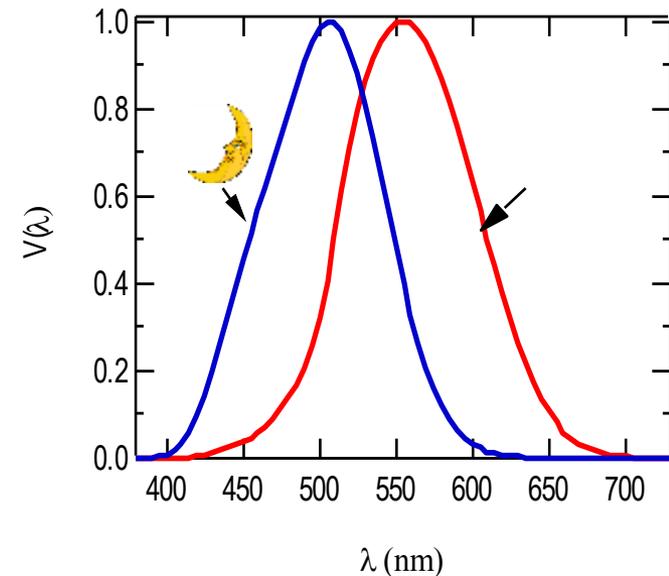
- Calculer la fréquence des ondes de la lumière de longueurs d'onde de $0,45 \mu\text{m}$ (bleu) et $0,6328 \mu\text{m}$
 - $c=v\lambda, \quad v=c/\lambda$
 - $v_{0,45}=6,67 \cdot 10^{14}\text{Hz}, \quad v_{0,6328}=4,74 \cdot 10^{14}\text{Hz},$
- Calculer la longueur d'onde des ondes EM de ($\lambda =c/v$)
 - la radio GO : $v=100 \sim 375 \text{ kHz} \quad \rightarrow \lambda_{\text{GO}}=3\sim 0,8 \text{ km}$
 - la radio AM : $v=520 \sim 1062 \text{ kHz} \quad \rightarrow \lambda_{\text{AM}}=577\sim 185 \text{ m}$
 - la radio FM : $v=87,5 \sim 107,9 \text{ MHz} \quad \rightarrow \lambda_{\text{FM}}=3,4\sim 2,8 \text{ m}$
 - la télévision : $v=30 \sim 300 \text{ MHz} \quad \rightarrow \lambda_{\text{TV}} = 10 \sim 1 \text{ m}$
- Calculer l'énergie d'un photon dans les cas précédents
 - $E=hv, \quad h=6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{sec}, \quad 1\text{eV}=1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
 - $E_{0,45}=4,4 \cdot 10^{-19} \text{ J}=2,75 \text{ eV}, \quad E_{0,6326}=3,14 \cdot 10^{-19} \text{ J}=1,96 \text{ eV},$
 - $E_{\text{GO}}=3,4\sim 12,8 \cdot 10^{-29} \text{ J}=2,1\sim 8 \cdot 10^{-10} \text{ eV}$
 - $E_{\text{TV}}=1,02\sim 10,2 \cdot 10^{-26} \text{ J}=6,4\sim 64 \cdot 10^{-8} \text{ eV} \quad (\sim 1000 \text{ fois de } E_{\text{GO}})$
- Calculer le nombre de photons en fonction de flux énergétique
 - $n=P/hv: \quad n_{0,45}=10^{-3}/4,4 \cdot 10^{-19} =2,27 \text{ p/s}, \quad n_{0,6326}=10^{-3}/3,14 \cdot 10^{-19} =3,18 \text{ p/s}$

Généralité

- La sensibilité de l'œil dépend de la longueur d'onde
 - L'œil présente un maximum de sensibilité vers 555 nm
 - Autour de cette longueur d'onde la sensibilité décroît et s'annule vers 380nm et 800nm
 - 1 watt (W) émis à 555 nm vaut 683 lumens (lm)
- Les détecteurs aussi.
Sensibilité en longueur d'onde.

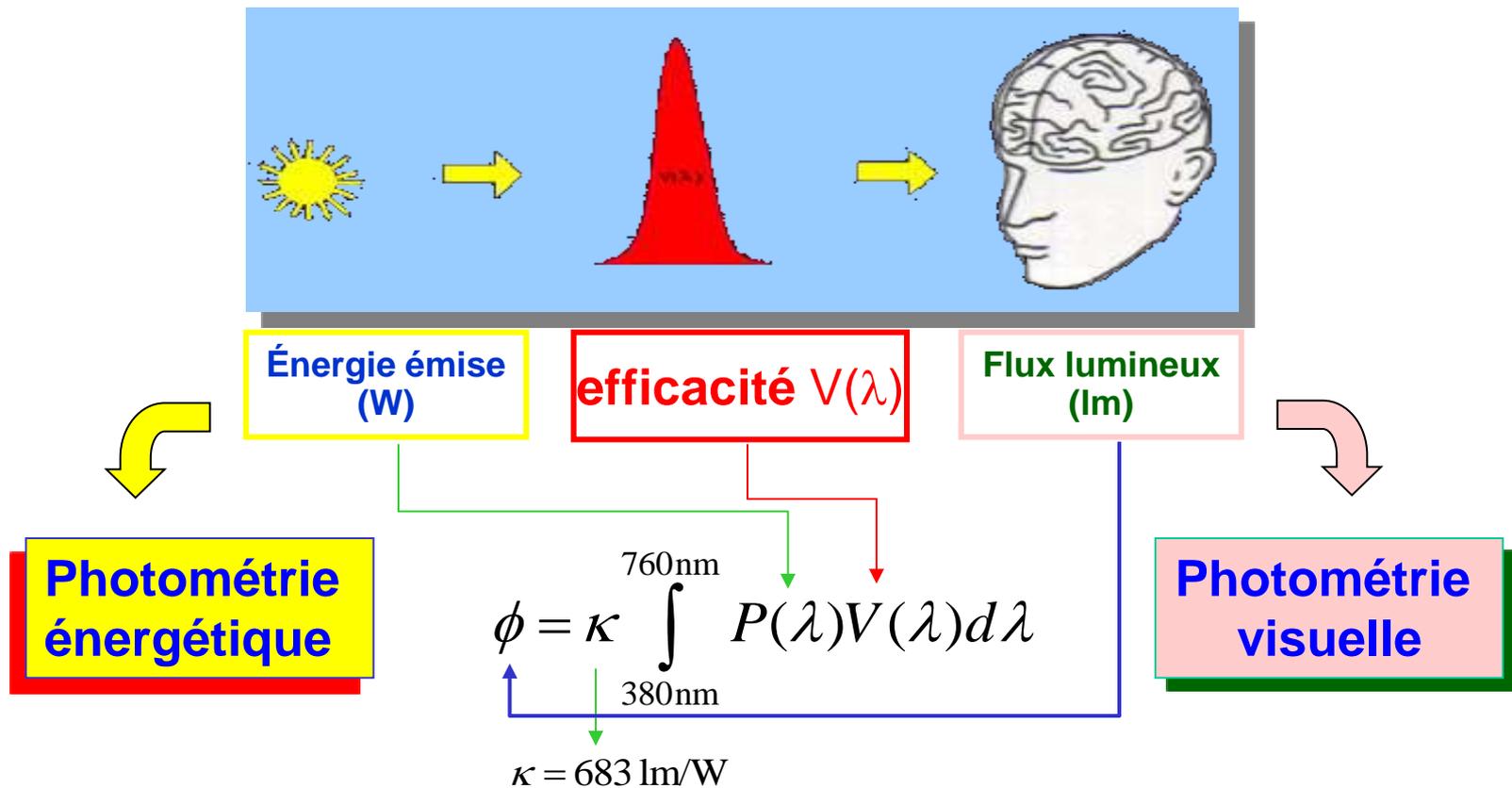
Donc :

- Photométrie énergétique
- Photométrie visuelle



Généralité

- La sensibilité de l'œil dépend de la longueur d'onde
- Les détecteurs aussi.



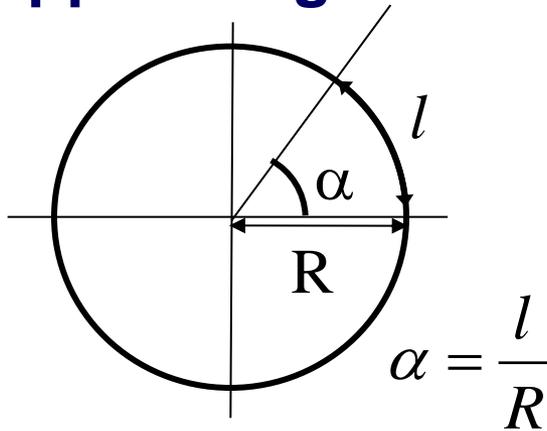


Photométrie

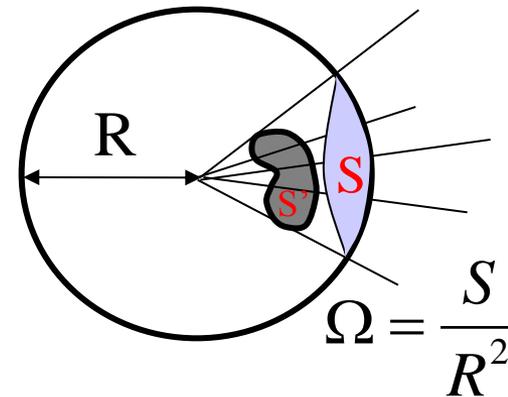
Efficacité lumineuse de certaines sources

Source Lumineuse	K (lm.W ⁻¹)
Lampe filament C	6
Lampe filament W (vide)	10
Lampe filament W + Gaz inerte	11-20
Lampe à vapeur d'iode	22-25
Tube fluorescent	50-80
Lampe à vapeur de Na	55
Soleil	91

0. Rappel : angle solide Ω :



L'angle (d'arc) est la longueur de l'arc intercepté sur un cercle de rayon unitaire.
Un tour complet correspond à un angle 2π radians.



L'angle solide est l'aire de la surface interceptée sur une sphère de rayon unitaire.
L'espace entier correspond à un angle solide 4π stéradians.

L'angle d'espace d'un cône à base circulaire : $\Omega = 2\pi(1 - \cos\alpha)$,
Pour des α petits: $\Omega = \pi\alpha^2$

Ex : Le diamètre angulaire du soleil : $0,5^\circ = 8,7 \cdot 10^{-3}$ radians
L'angle solide du soleil : $6 \cdot 10^{-5}$ stéradians.

$$S = r^2 \Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\alpha r^2 \sin\theta d\theta d\phi = 2\pi(1 - \cos\alpha)r^2$$

1e. Énergie (rayonnante) Q_e :

Unité: **Joule** (J, kJ ...), kWh

on paie l'énergie consommée : kWh à EDF, litres d'essence ...

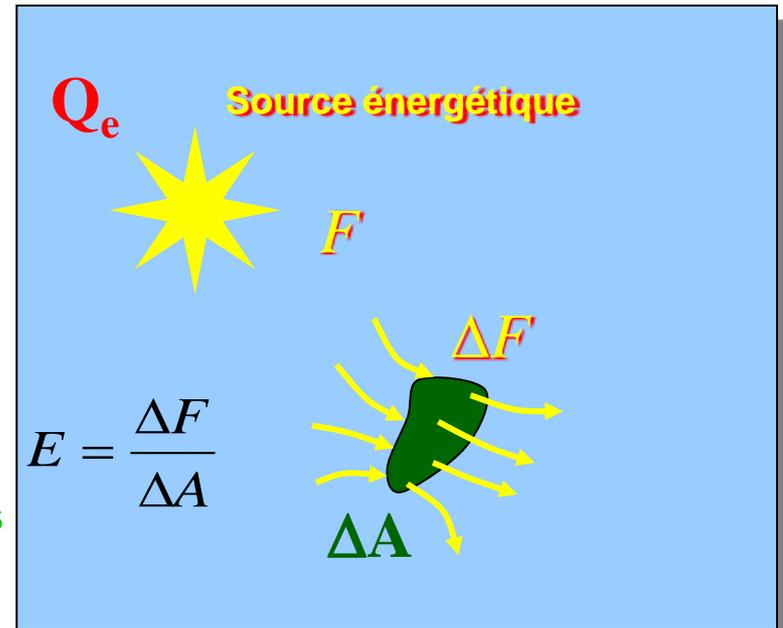
2e. Flux énergétique ou puissance F_e :

Définition :

$$F_e = \frac{dQ_e}{dt}$$

Unité: **Watt** (kW, ...)

- Une lampe : qqs W
- Un laser continu : mW~W
- Centrales thermiques/nucléaires
qqs 10^8 W



1v. Quantité de lumière Q_v :

1v, 2v ... visuelle

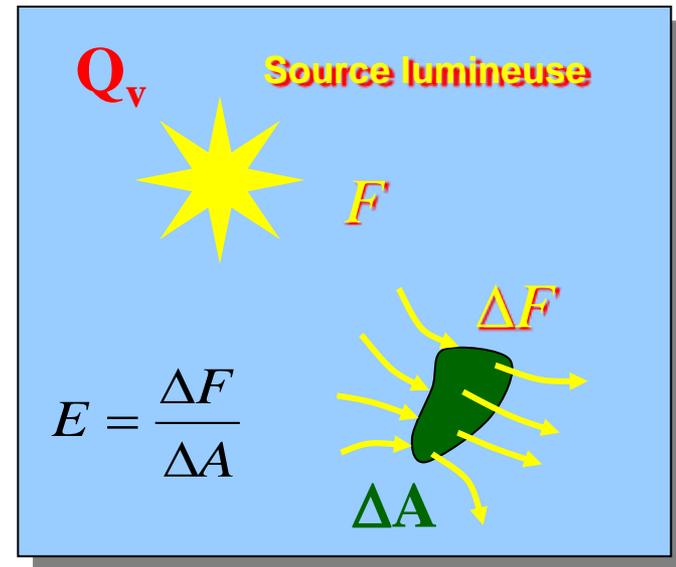
- Unité: lumen-seconde (lm.s)

2v. Flux lumineux F_v :

- Définition :

$$F_v = \frac{dQ_v}{dt}$$

- Unité: lumen (lm)



Plus l'ouverture Φ d'un appareil photo/télescope est grande, plus le flux lumineux est important .

- appareil photo professionnel $\Phi \sim \text{cm}$
- télescope astronomique $\Phi \sim \text{m}$

3e. Éclairement énergétique ou densité de flux énergétique E_e :

Définition :

L'éclairement énergétique correspond à un flux énergétique reçu par unité de surface:

$$E_e = \frac{dF_e}{dA}$$

Unité: W/m^2 , A : aire

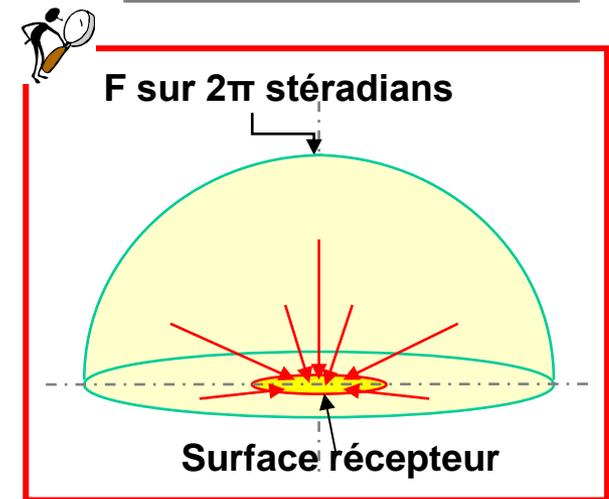
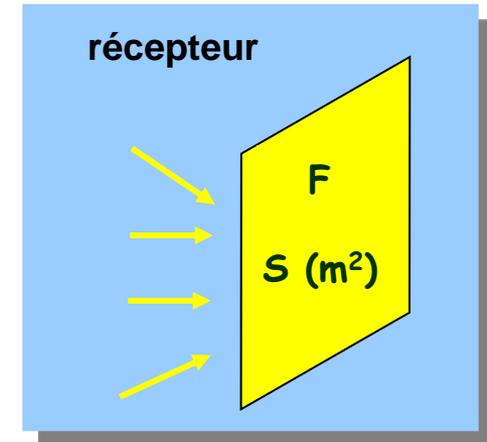
– $E_e = F/A$, éclairement constante.

3v. Éclairement lumineux E_v :

– Définition :

$$E_v = \frac{dF_v}{dA}$$

– Unité: lux = lumen.m^{-2}



Note : usage conventionnel mais pas stricte : intensité de la lumière $I=E$ ici.



Grandeurs de la photométrie



Correspondance sensibilité film (ISO), éclairage (lx) et ouverture(f/)

vitesse d'obturation env. 1/50 sec.)

ISO	f/1,4	f/2	f/2,8	f/4	f/5,6	f/8	f/11	f/16
50	500	1000	2000	4000	8000	16000	32000	64000
100	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	32000
200	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
400	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
800	32	63	125	250	5000	1000	2000	4000



Grandeurs de la photométrie

<i>Valeur repère d'éclairement</i>	
<i>Situation</i>	<i>Eclairement</i>
Pleine lune	0,5 lx
Lumière d'une bougie	10 lx
Rue de nuit bien éclairée	20 - 70 lx
Appartement lumière artif.	100 lx
Bureau, atelier	200 - 3000 lx
Grand magasin	500 - 700 lx
Stade de nuit, salle de sport	1500 lx
Studio ciné./TV	2000 lx
Extérieur à l'ombre	10000 - 15000 lx
Ciel couvert	25000 - 30000 lx
Soleil "moyen"	48000 lx
Plein soleil	50000 - 100000 lx

4e. Exitance énergétique M_e :

Définition :

$$M_e = \frac{dF_e}{dA}$$

A : aire

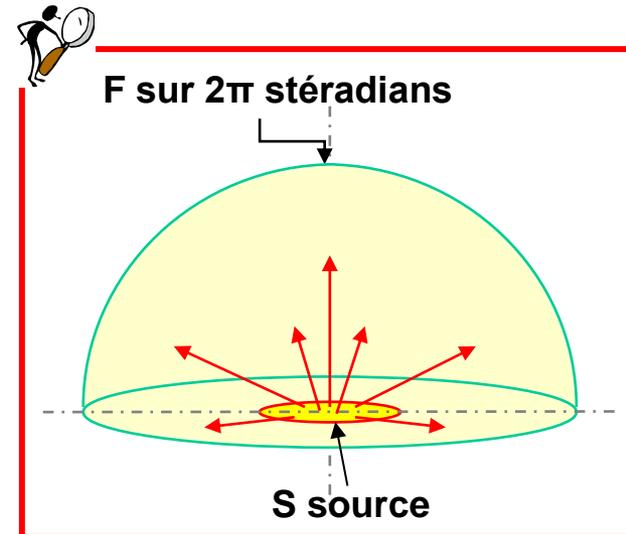
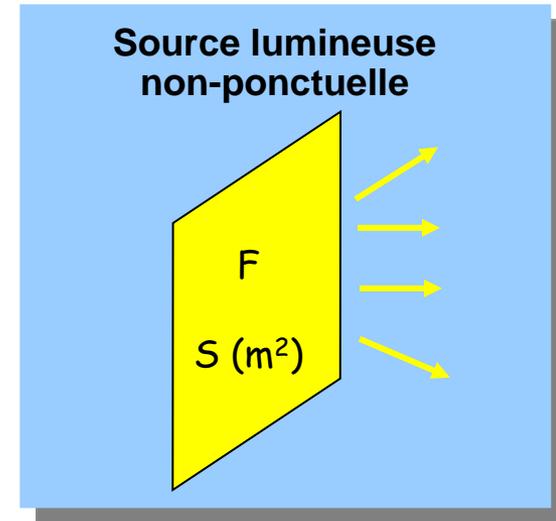
Unité: W/m^2 ,

4v. Exitance lumineuse M_v :

– Définition :

$$M_v = \frac{dF_v}{dA}$$

– Unité: lux = lumen.m^{-2}



5e. Intensité énergétique I_e :

– Définition :

$$I_e = \frac{dF_e}{d\Omega}$$

– Unité : $W \cdot sr^{-1}$

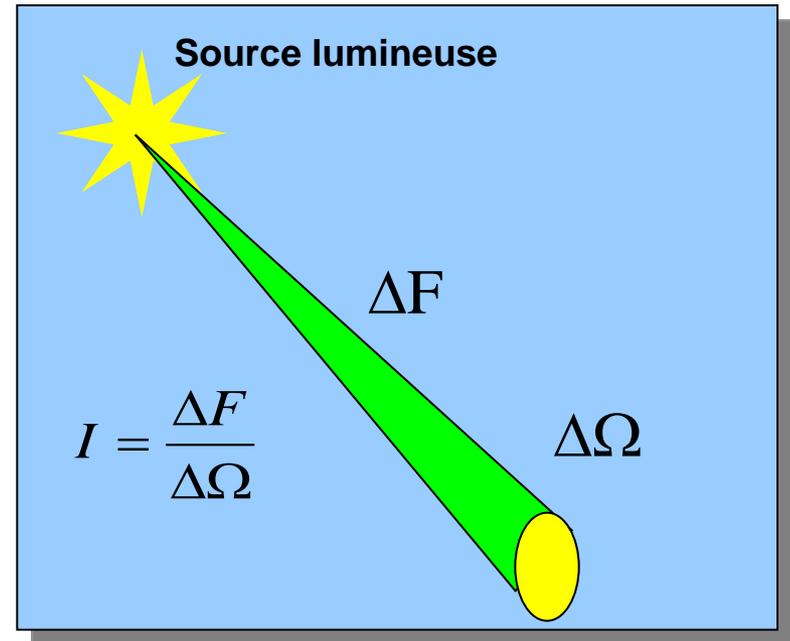
5v. Intensité lumineuse I_v :

– Définition :

$$I_v = \frac{dF_v}{d\Omega}$$

– Unité :

le candela (cd)
1 cd = 1 lm/sr



6e. Luminance énergétique L_e :

– Définition :

$$L_e = \frac{dI_e}{dA \cos \theta}$$

– Unité :

$$\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$$

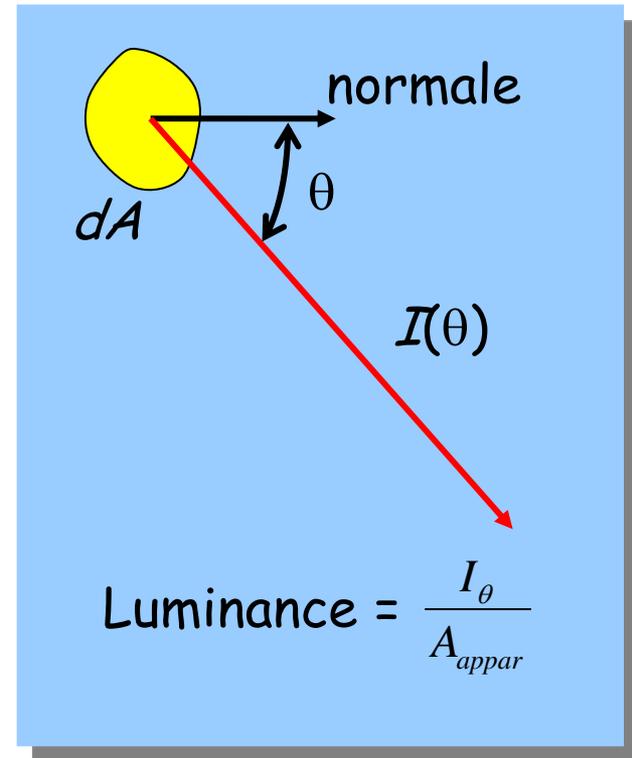
6v. Luminance lumineuse L_v :

– Définition :

$$L_v = \frac{dI_v}{dA \cos \theta}$$

– Unité :

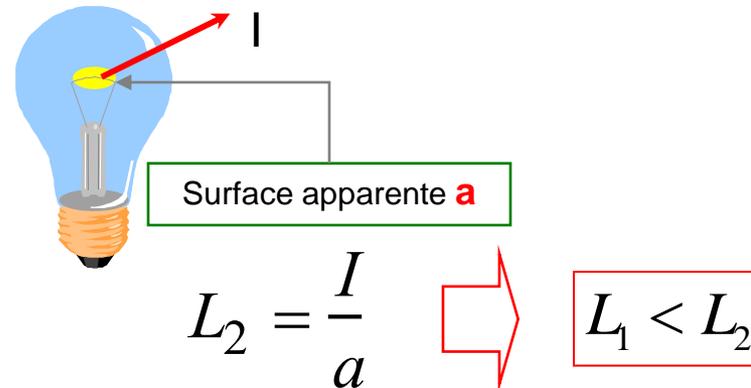
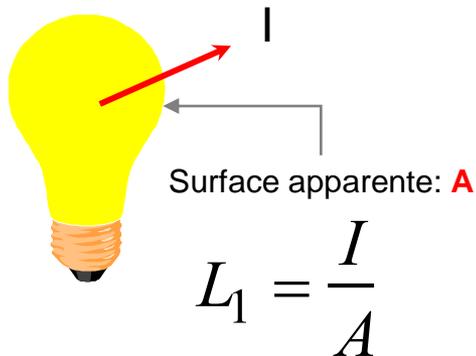
$$\text{cd.m}^{-2}, \text{Im.sr}^{-1}.\text{m}^{-2}$$



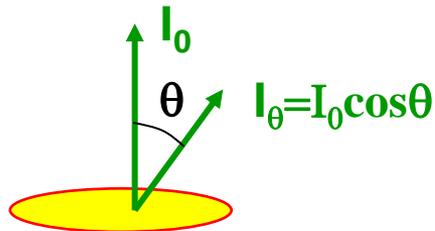


Illustration

1. Luminance des deux ampoules de puissance identique



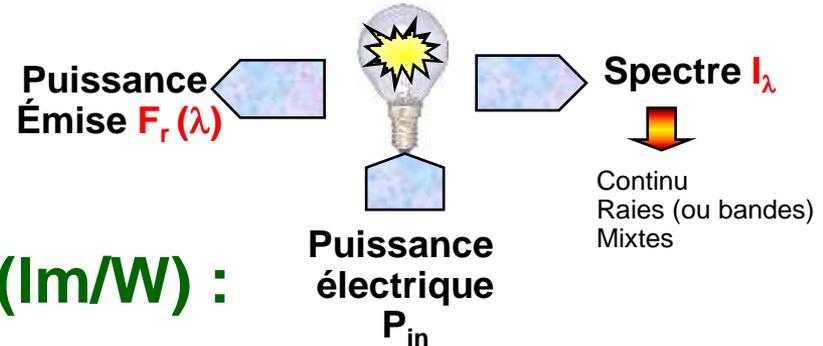
2. Source Lambertienne : luminosité constante dans toutes les directions



$$L(\theta) = \frac{KdA \cdot I_0 \cos \theta}{dA \cos \theta} = \text{constante}$$

7e. Efficacité électrique (%) :

$$\varepsilon = \frac{F_e}{P_{in}} = \frac{\int_0^{\infty} F_r(\lambda) d\lambda}{P_{in}}$$



7v. Efficacité lumineuse (lm/W) :

$$K = \frac{F_v}{F_e} = K_m \frac{\int_0^{\infty} F_r(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{F_e}$$

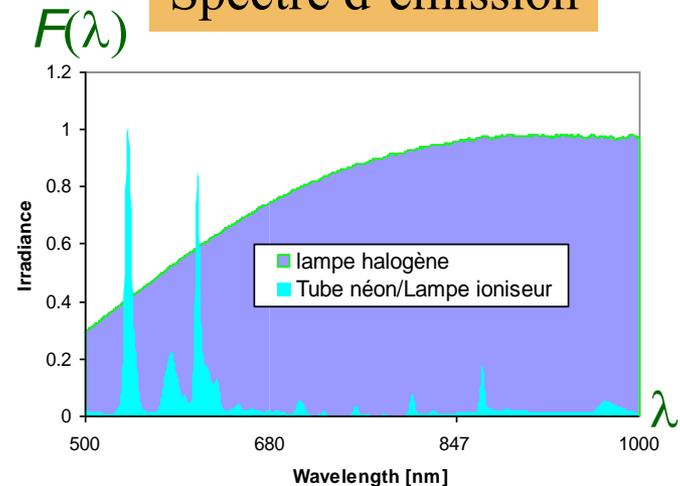
$$K_m = 685 \text{ lm/W}$$

Une lampe consomme 100 W d'électricité, émet un flux d'énergie de 80 W et un flux lumineux de 2000 lm.

$$\varepsilon = 80/100 = 80 \%$$

$$K = 2000/80 = 25 \text{ lm/W}$$

Spectre d'émission



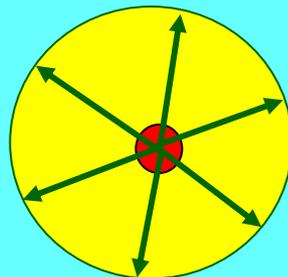
8. Indicatrice d'intensité :

$$I_d(\theta) = \frac{I(\theta)}{I_0}$$

Source parfaitement isotrope

$$I_\theta = \text{constante}$$

$$I_d = 1$$



Exemples :

- Soleil
- Source ponctuelle
- lampe isotrope

une surface parfaitement diffusante

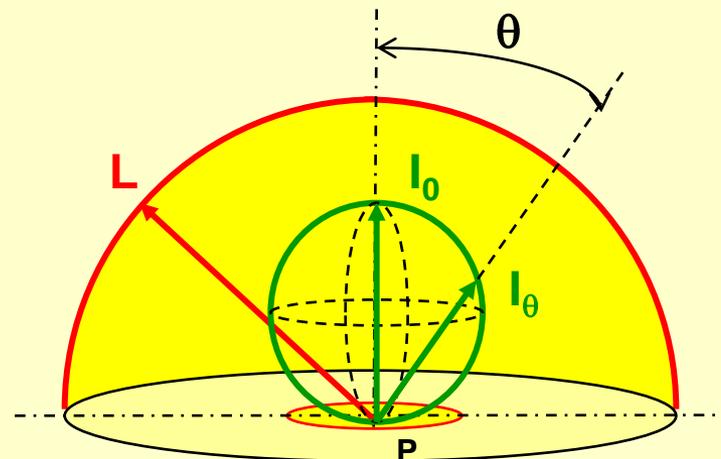
Source Lambertienne

$$L(\theta) = \text{constante}$$

$$I_\theta = I_0 \cos\theta$$

$$I_d = \cos\theta$$

Loi de Lambert





Luxmètre

L'éclairement se mesure avec un luxmètre. C'est un appareil muni d'une **cellule photoélectrique** (qui transforme l'énergie de rayonnement en énergie électrique).

Pour que la lecture ne soit pas qu'une lecture de courant électrique (en Ampères) il est nécessaire d'interposer dans le circuit un filtre qui restitue une courbe de réponse identique à celle de l'oeil humain standard.

$$E = \Delta\Phi_{\text{abs}}/\Delta S$$

Unité : lx ou lm/m²





Grandeurs de la photométrie



Unités photométriques *énergétiques*

Paramètre	Symb	Définition	Unités	Abbrév.
Énergie rayonnante <i>Radiant Energy</i>	Q_e		joule calorie kilowatt-heure	J cal kWh
Flux énergétique ou Puissance rayonnante <i>Radiant Flux</i>	F_e	$F_e = dQ_e / dt$	watt	W
Densité de flux énergétique ou Éclairement énergétique <i>Irradiance</i>	E_e	$E_e = dF_e / dA$	watt / unité de surface	$W \cdot m^{-2}$ $W \cdot cm^{-2}$
Intensité énergétique <i>Radiant Intensity</i>	I_e	$I_e = dF_e / d\Omega$	watt / stéradian	$W \cdot sr^{-1}$
Luminance énergétique <i>Radiance</i>	L_e	$L_e = dI_e / (dA \cos \Theta d\Omega)$	watt / unité de surface / stéradian	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$



Grandeurs de la photométrie



Unités photométriques *visuelles*

Paramètre	Symb	Définition	Unités	Abbrév.
Quantité de lumière <i>Luminous Energy</i>	Q_v	$\int K(\lambda) Q_e(\lambda) d\lambda$ $380 < \lambda < 760$	lumen-seconde lumen-heure	lm s lm h
Flux lumineux <i>Luminous Flux</i>	F_v	$F_v = dQ_v / dt$	lumen	lm
Éclairement lumineux <i>Illuminance</i>	E_v	$E_v = dF_v / dA$	lumen · m ⁻² = lux lumen · cm ⁻² = phot lumen · pi ⁻² = footcandle	lx ph fc
Intensité lumineuse <i>Luminous intensity</i>	I_v	$I_v = dF_v / d\Omega$	lumen / stéradian = candela	cd
Luminance lumineuse <i>Luminance (brightness)</i>	L_v	$L_v = dI_v / (dA \cos \Theta)$	candela · m ⁻²	cd · m ⁻²

Classées selon le spectre émis

- **Emission thermique**

- spectre continu (toutes les longueurs d'ondes).
- four, lampes tungstène, feu, corps humain
- ...



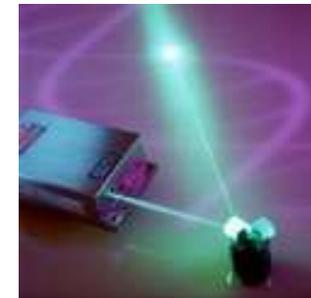
- **Lampes spectrales**

- spectre discontinue composés de plusieurs raies
- largeurs des raies sont relativement larges.
- longueur de cohérence: $l = \lambda^2 / \Delta\lambda \sim \text{mm}$.



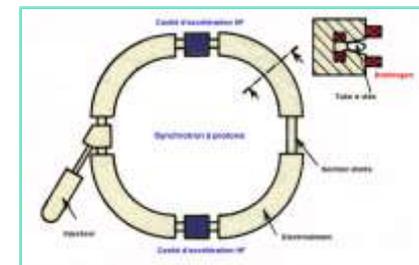
- **Laser :**

- Rayonnement mono-dispersé.
- longueur de cohérence: $l = \lambda^2 / \Delta\lambda \sim \text{m}$.
- Rayon du faisceau w_0 : $\mu\text{m} \sim \text{mm}$
- Intensité : $M = P/S \sim 10^6 \text{ W/m}^2$



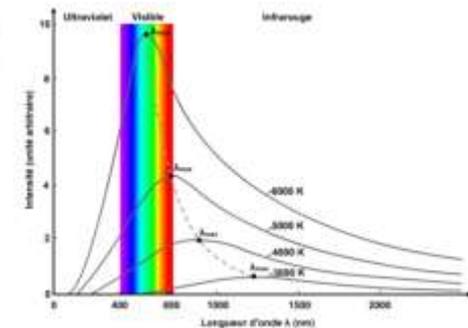
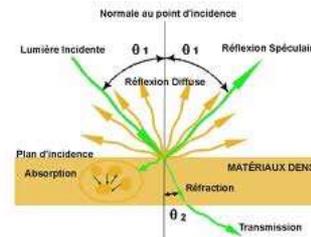
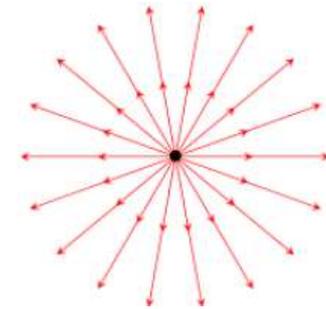
- **Synchrotron** (accélérateur à haute énergie):

- Rayonnement très énergétique
- Gamme spectrale très large



Sources particulières

- Source ponctuelle - isotrope
 - Lampe, soleil, ...
 - $M = P/4\pi r^2$
- Source Lambertienne
 - Luminance constante
 - $L = \text{const}$ et $I = I_0 \cos\theta$
- **Source corps noir :**
 - Soleil, corps humain, four ...
 - Référence d'un détecteur
 - Spectre d'émission ne dépend que de la température.

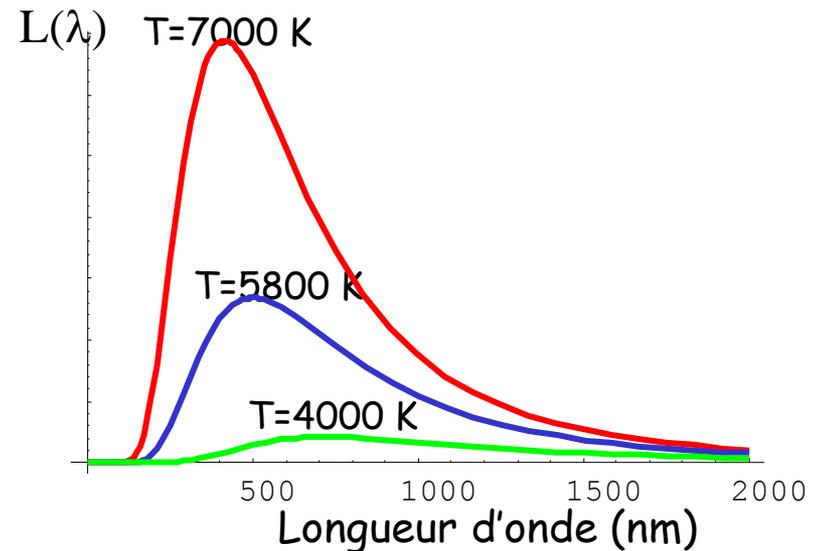


Corps noir

Un corps noir désigne un objet idéal dont le spectre électromagnétique ne dépend que de sa température

l'objet lui-même absorbe toute la lumière extérieure qui tomberait sur lui, et ne reflète aucune radiation non plus. En pratique, un tel objet matériel n'existe pas, mais il **représente** un cas *idéalisé* servant de référence pour les physiciens.

Pour étalonner les capteurs optiques, il est nécessaire de produire des flux lumineux parfaitement connus et reproductibles. Ceci peut être réalisé à partir du rayonnement du corps noir dont le comportement ne dépend que de la température et de constantes universelles.



Corps noir

1 Loi de Planck :

La luminance spectrale d'un solide, à la température T , est donnée par :
(montré en 1900 par Planck) :

$$L_e(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{C_2/\lambda T} - 1 \right)} \text{ (W.m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1} \text{)}$$

$$C_1 = 1.19088 \cdot 10^{20} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{nm}^4, \quad C_2 = 1.439 \cdot 10^7 \text{ K.nm}$$

2 Loi de Stefan :

L'exittance (luminance totale de toutes les longueurs d'onde dans toutes les directions) du corps noir est donnée par :

$$M_e = \pi \int_0^{\infty} L(\lambda) d\lambda = \sigma T^4$$

ou σ représente la constante de Stefan ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{k}^{-4}$).

3 Loi de déplacement de Wien :

La longueur d'onde de rayonnement maximum λ_{\max} évolue selon la loi :

$$\lambda_{\max} T = 2897 \text{ } \mu\text{m K}$$

Exemple corps noir:

1. Estimer l'exittance et le flux total émis par le corps humain si on le considère comme un corps noir sans couverture. Quelle est la longueur d'onde d'émission maximale ?

- Loi de Stéfán : $M_e = \sigma T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \times 310^4 = 524 \text{ W.m}^{-2}$

$$F_e = M_e A = 524 \times 2 = 1048 \text{ W}$$

- Loi de Wien : $\lambda = 2897/310 = 9,3 \text{ } \mu\text{m}$

2. Le feu dans le four peut être considéré comme un corps noir. Estimer la longueur d'onde λ_m sachant que la température d'émission maximale est de 2000 °C et 5000°C .

Loi de Wien : $\lambda_m = 2897 / (T + 273)$

$$\lambda_m = 1,27 \text{ } \mu\text{m}, 0,55 \text{ } \mu\text{m}$$

1. Loi de l'inverse du carré de la distance :

- Pour une source isotrope de puissance P , l'éclairement E à une distance d est **constant** et inversement proportionnel à d :

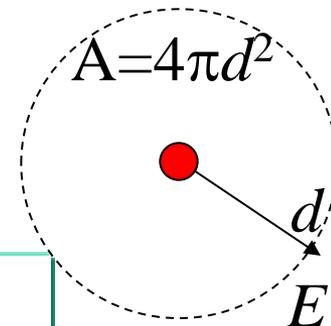
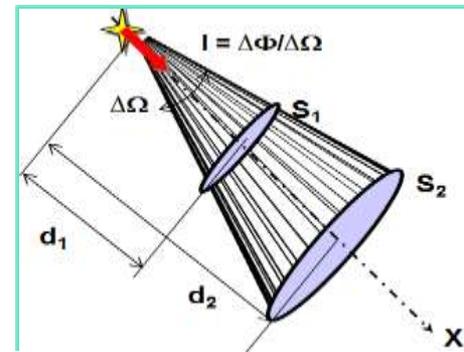
$$E = \frac{P}{4\pi d^2} \propto \frac{1}{d^2}$$

- Pour une source anisotrope:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}, \quad I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega} \Rightarrow E = \frac{I}{d^2}$$

- Conséquence :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$



L'éclairement diminue en s'éloignant de la source.

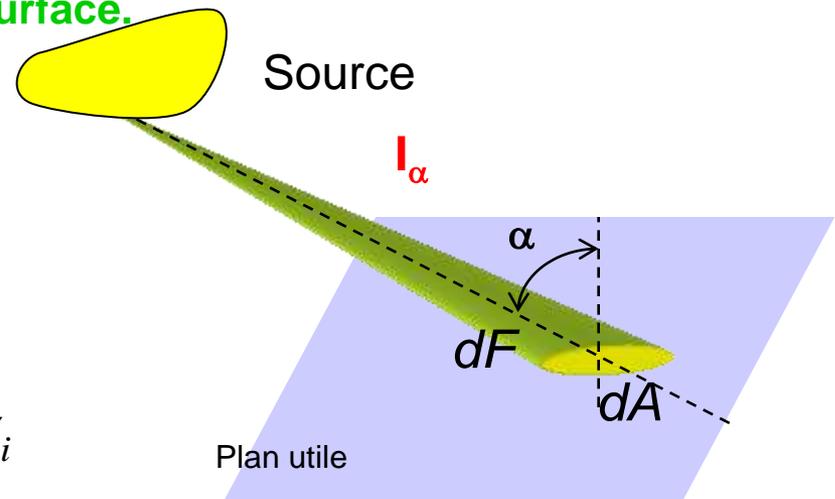
L'éclairement d'une lampe à 10 cm est 100 fois plus importantes qu'à 1 m.

2. Loi de cosinus :

- Flux d'énergie reçu sur la surface dA :

$$dF = E \cos \alpha dA$$

α est l'angle d'incidence - angle entre la direction du rayonnement incident et la normale de la surface.



- Pour une source étendue :

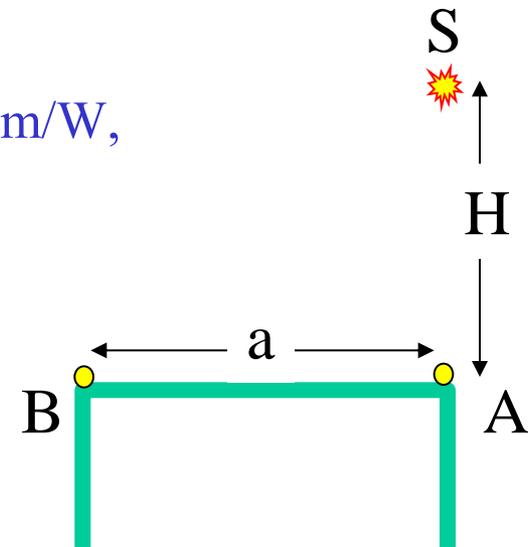
$$F = \sum_i \Delta F_i = \sum_i E_i \cos \alpha_i$$

L'éclairement du soleil est beaucoup plus important le midi que le soir.

Exemples : éclairage maximal d'une table

Une table ronde de rayon $a=1$ m est éclairée par une lampe S de 100 W supposée ponctuelle suspendue au dessus de la table à une distance H (voir la fig.).

1. Calculer l'intensité énergétique de la lampe.
2. Sachant que l'efficacité lumineuse est de 250 lm/W, calculer l'intensité lumineuse de la lampe.
3. Exprimer les éclairagements énergétique et lumineux au point juste au dessous de la lampe et au bord de la table en fonction H .
4. Pour quelle valeur de H l'éclairage au bord de la table est maximal?



Corrigé :

$$1. \quad I_e : \quad I_e = \frac{100}{4\pi} = 8 \text{ Wsr}^{-1}$$

$$2. \quad I_v : \quad I_v = 250I_e = 2000 \text{ lm.r}^{-1}$$

$$3. \quad E : \quad E = \frac{dF}{dA} = I \frac{d\Omega}{dA} = \frac{I}{d^2}, \quad E_{eA} = \frac{8}{H^2}, E_{eB} = \frac{8H}{(H^2 + a^2)^{3/2}} \quad E_{vA} = \frac{2000}{H^2}, E_{vB} = \frac{2000H}{(H^2 + a^2)^{3/2}}$$

$$4. \quad E_{\max} : \quad \frac{dE}{dH} = 0 \rightarrow H = \frac{a}{\sqrt{2}} = 0,71 \text{ m}$$



3. Loi de Beer

Soit un rayonnement traversant un milieu absorbant ou diffusant. L'éclairement de ce rayonnement subit une diminution exponentielle en fonction de la distance parcourue:

$$E(l) = E_0 e^{-\alpha l}$$

E_0 est l'éclairement du rayonnement incident.

E est l'éclairement du rayonnement sortant.

α est le coefficient d'absorption (en m^{-1}).

Exemple: Le coefficient de l'atmosphère est 0,1 1/km. Une crème solaire « indice 5 » divise par 5 la quantité du rayonnement reçu par la peau. Déterminer l'épaisseur d'atmosphère assurant une protection équivalente.

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1}{5} = e^{-0,1l} \rightarrow l = \frac{\ln 5}{0.1} = 16 \text{ km}$$

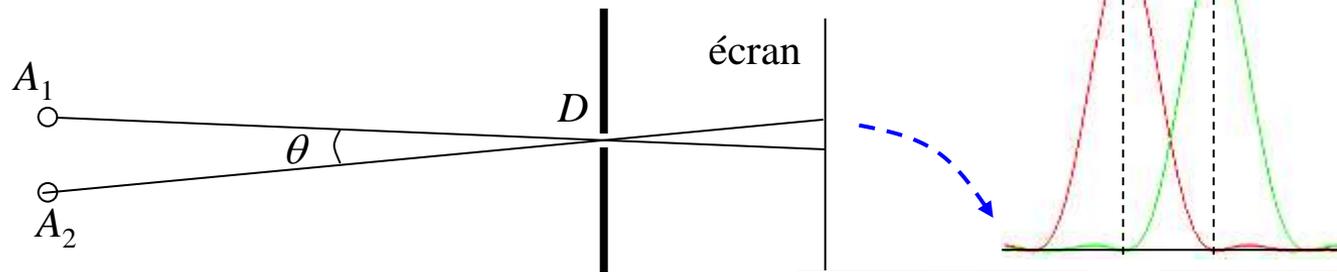
4. Critère de Rayleigh:

L'intensité de diffraction par un trou circulaire:

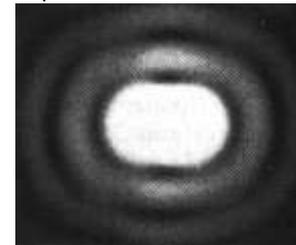
$$I = I_0 \frac{J_1(x)}{x} \quad \text{avec } x = \frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta$$

Le premier minimum nul de $J_1(x)$ s'obtient pour $x=3.832$, c'est-à-dire:

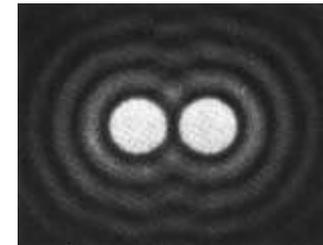
$$\theta_c = \frac{1.22\lambda}{D}$$



- Il est intéressant d'avoir une ouverture importante pour une meilleur résolution (lunette astronomique, appareil photo, ...)
- Limite de microscope optique $\sim \lambda$



θ trop petit,
images confuses



$\theta > \theta_c$
images distinctes

Application du critère de Rayleigh:

1. Calculer le pouvoir séparateur théorique d'un télescope spatial Hubble dont le miroir l'objectif principal a 2.4 m de diamètre, observant dans le visible à $\lambda = 500$ nm dans l'UV (115 nm) et dans le proche IR (1000 nm).

$$- \theta = 1.22 \lambda/D$$

$$\theta_{500} = 1.22 \times 500 \times 10^{-9} / 2.4 = 2.5 \times 10^{-7} \text{ rad}$$

$$\theta_{115} = 1.22 \times 115 \times 10^{-9} / 2.4 = 0.6 \times 10^{-7} \text{ rad}$$

$$\theta_{1000} = 1.22 \times 1000 \times 10^{-9} / 2.4 = 5.8 \times 10^{-7} \text{ rad}$$

2. Comparer le pouvoir séparateur d'un appareil photo de objectif d'ouverture 10 cm (réflexe) avec celui d'un objectif de 0,5 cm (compact).

$$2. \theta_{0,5} / \theta_{10} = D_{10} / D_{0,5} = 20$$

3. La résolution est 20 fois meilleure.



1. Classification des capteurs

Selon la nature des phénomènes mis en jeu on distingue deux types de détecteurs :

Capteurs thermiques:

Conversion de l'énergie lumineuse absorbée en énergie d'agitation thermique :

- augmentation de la température du matériau
- modification des propriétés électriques
 - ↳ résistance (bolomètres)
 - ↳ tension (thermocouples)
 - ↳ charges (détecteurs pyroélectriques)

oeil

Capteurs photoniques:

Interaction rayonnement-matière

Effets internes :

Photoconduction

- semi-conducteurs)

Effet photo-voltaïque

- jonction PN, PIN, avalanche,...

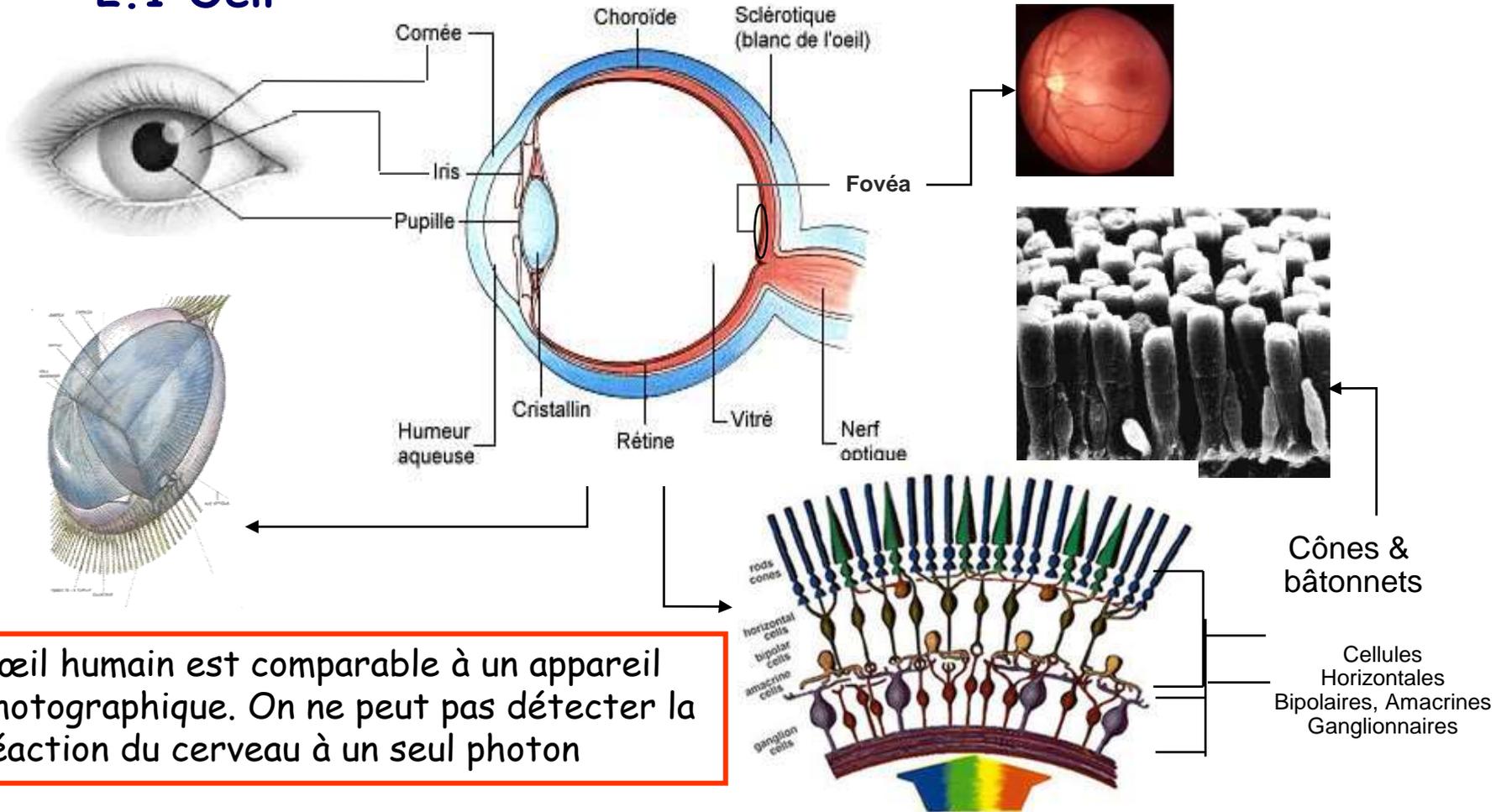
Effet photo-électromagnétique

Effets externe :

photo-émission (cellule à vide, photomultiplicateur,...)

2. Principes de différents détecteurs

2.1 Oeil



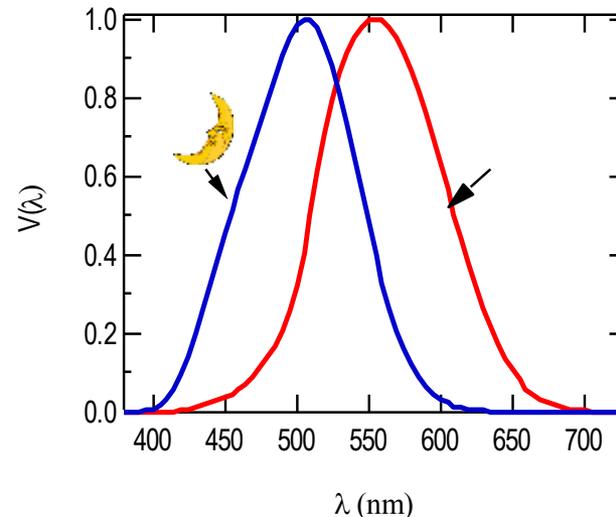
2.1 Oeil

Les bâtonnets



- ❖ Très nombreux (~125 millions)
- ❖ Très sensibles (1 bâtonnet peut réagir à 1 seul photon, mais le η quantique n'est que de 50%)
- ❖ Insensibles à la couleur
- ❖ Lents à l'adaptation

- 📄 L'œil présente un maximum de sensibilité vers $\lambda=555$ nm dans les conditions de vision photopique
- 📄 1 watt (W) émit à 555 nm vaut 683 lumens (lm)
- 📄 Autour de cette longueur d'onde la sensibilité décroît et s'annule vers 380nm et 760nm.



2.1 Oeil

Cônes

- ❖ En petit nombre :
~ 5 millions/œil)
- ❖ Sensibilité moyenne
- ❖ **Grande vitesse** de réponse
- ❖ Sensibles à la couleur

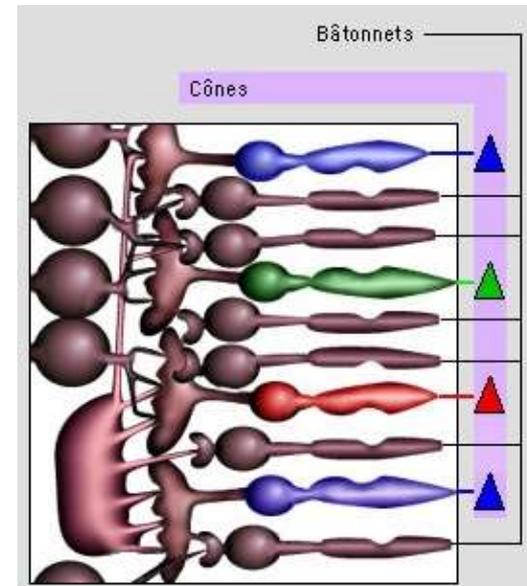


L'œil perçoit des longueurs d'onde
et le cerveau "voit" des couleurs



Un objet semble être coloré car il absorbe
sélectivement certaines longueurs d'onde
de la lumière incidente

- ☞ Le seuil de sensibilité d'un bâtonnet est environ 100 fois plus bas que celui d'un cône !
- ☞ Quand à la **vitesse** de réaction, celle des cônes est au moins 4 fois plus grande que celle des bâtonnets (100 ms).



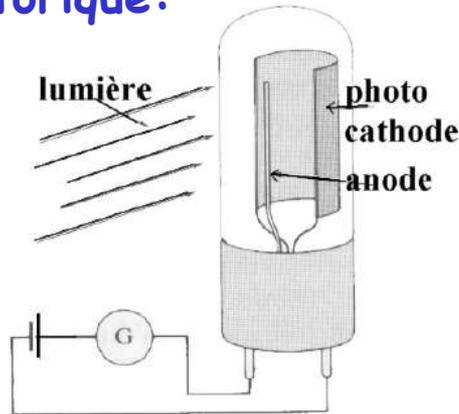


Capteurs



2.2 Capteurs à effet photo-électrique

1. Historique:



1887

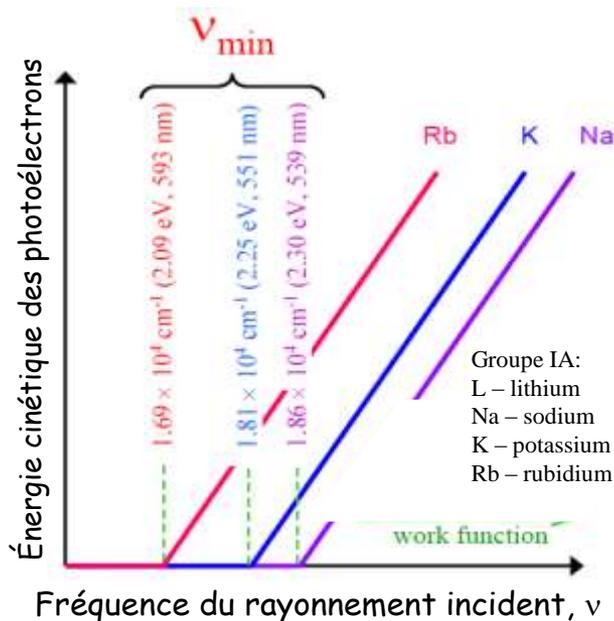


Heinrich Hertz

- L'irradiation de la photocathode recouverte par un métal alcalin, peut induire dans certains cas l'extraction d'électrons qui sautent sur l'anode et produisent ainsi un courant électrique détecté par le galvanomètre G.
- l'effet photoélectrique ne se produit qu'à partir d'une certaine *fréquence* ν_s (fréquence de seuil) de la lumière incidente.
- la lumière rouge (basse fréquence), même d'intensité très élevée, n'a aucun effet, alors que la lumière violette (haute fréquence), même de faible intensité, produit l'effet photoélectrique.

2.2 Capteurs à effet photo-électrique

2. Observations expérimentales



1. Aucun électron n'est extrait (quelque soit l'intensité) en dessous de ν_s .
2. L'énergie cinétique E_c des électrons rejetés augmente linéairement avec la fréquence ν (indépendante de l'intensité I)
3. A faible intensité I , les électrons sont immédiatement éjectés si $\nu > \nu_s$.
4. Au dessus de ν_s le courant émis dépend de l'intensité de la lumière et non de ν

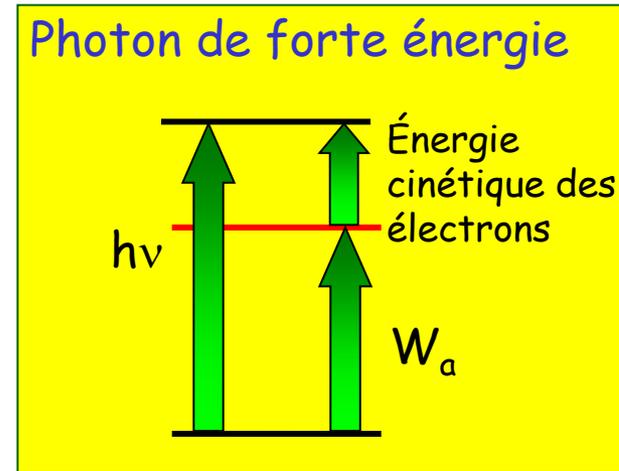
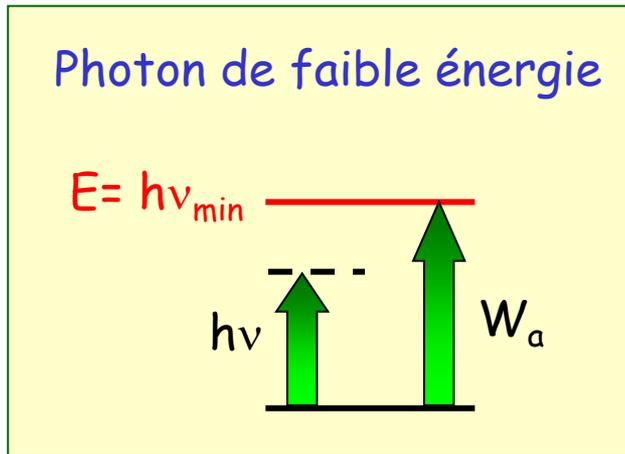
Travail d'attraction : W dépendant de matériaux, $h\nu_s = W_a$

Énergie cinétique d'électron : $E_c = h\nu - W_a$

Potentiel d'arrêt U_0 : Potentiel inverse pour $I = 0$, d'où $U_0 = E_c$

2.2 Capteurs à effet photo-électrique

3. Explication d'Einstein (1905)



Énergie du photon \rightarrow $h\nu = W_a + \frac{1}{2}m_e V^2$ \leftarrow Énergie cinétique

↑
travail de sortie

Caractéristique du matériau

Le photon heurte un électron et lui transfère son énergie

\Rightarrow La lumière a les propriétés de particule = jet de photons, $E_p = h\nu$

\Rightarrow dualité onde-particule

2.2 Capteurs à effet photo-électrique

4. Quelques grandeurs caractéristiques:

- Puissance énergétique de la lumière:

$$P_e$$

- Nombre de photons par seconde:

$$n_p = P_e / E_p = P_e / h\nu$$

- Rendement quantique: η .

Le taux du nombre des photons effectifs(reçus) n_p et sur le nombre d'électrons photo-émis n_e :

$$\eta = n_e / n_p$$

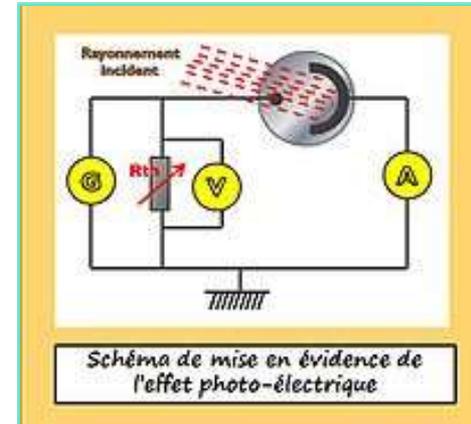
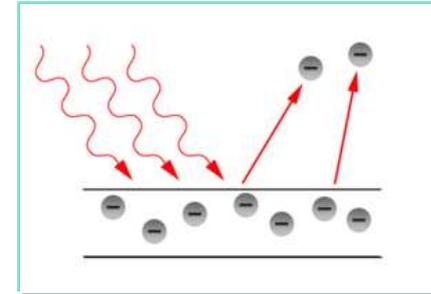
- Courant généré:

$$I_e = n_e e$$

$$e = 1.60218 \times 10^{-19} \text{C}, \quad h = 6,62607 \times 10^{-34} \text{J.s}$$

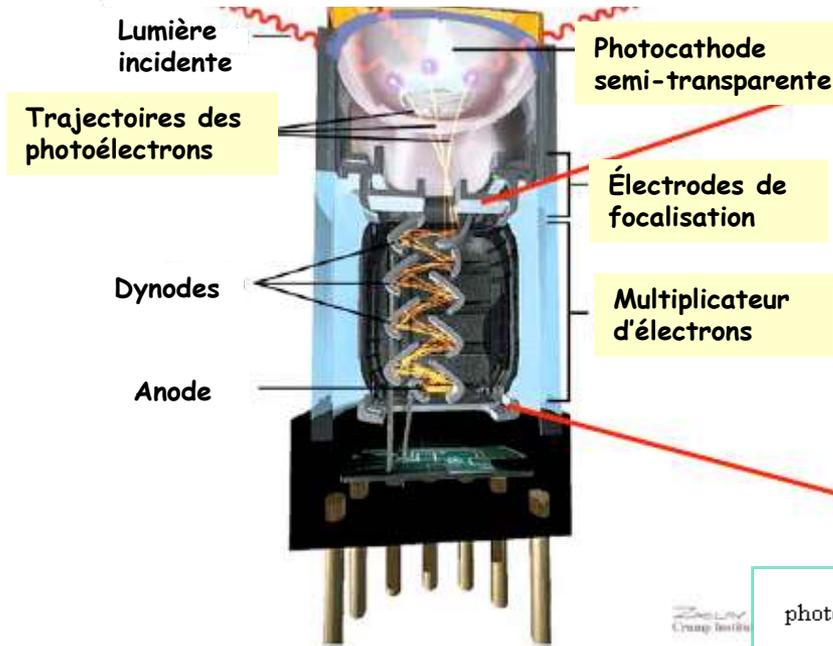
- Réponse spectrale

$$R(\lambda) = \frac{I_e(\lambda)}{P_i(\lambda)} = \frac{e\eta(\lambda)}{h\nu} \text{ (A/W)}$$



2.2 Capteurs à effet photo-électrique

5. Photomultiplicateur - principe



Accélération des e^- par le champ électrique

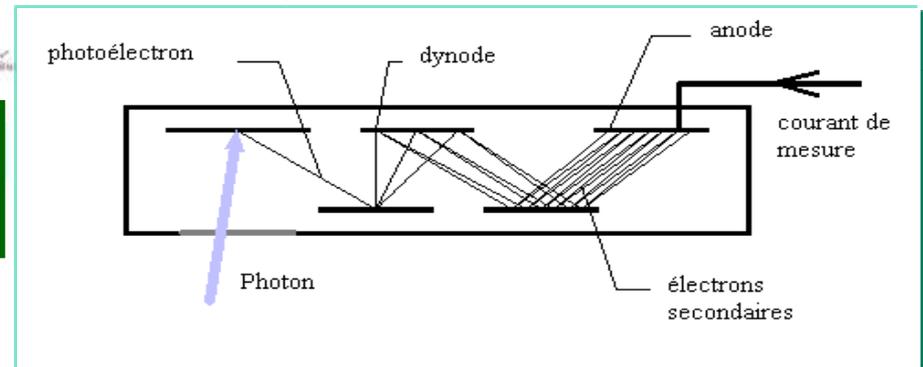
collision avec la Dynode suivante

Chaque e^- arrache 2 - 3 e^-

Multiplication

Haute tension appliquée :
typiquement ~ **900 V**

Un gain ~ 10^6



Dynode 中间极

2.2 Capteurs à effet photo-électrique

5. Photomultiplicateurs

Multitude de choix en forme et performance

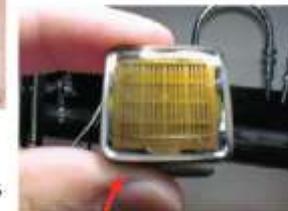


Fabricants : Hamamatsu, Photonis, DEP

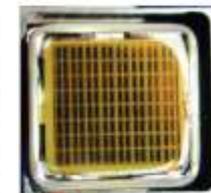
Matrices de photomultiplicateurs

Multi-Anode Photomultiplier Tubes (MAPMT)

Haute tension appliquée-typiquement = 900 V



M16



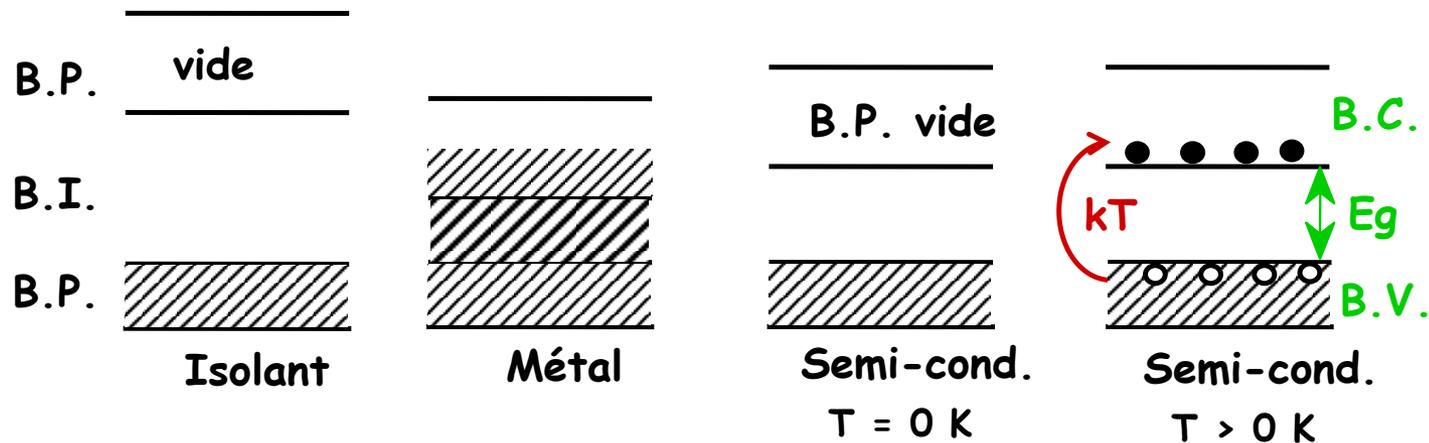
M64

Type No.	R5900U	R5900U-00-M4	H0550 (R5900-00-M16)	H7545 (R5900-00-M64)	R8520-012	R5900U-00-L16	H7260 (R7259)
Anode format							
Number of anodes	1	4	16	64	60(=6(Y))	16	32
Number of anode stages	10	10	12	12	11	10	10

2.3 Diode et photodiode

1. Semi-conducteurs

La conduction électrique implique que les e^- puissent avoir accès à des états infiniment proches du dernier état occupé à l'équilibre



Définitions :

- **Bande de valence (B.V.) :** dernière B.P. (presque) entièrement pleine
- **Bande de conduction (B.C.) :** première B.P. (presque) entièrement vide
- « **Gap** » : bande interdite (B.I.) séparant la bande de valence et la bande de conduction, largeur E_g



Capteurs

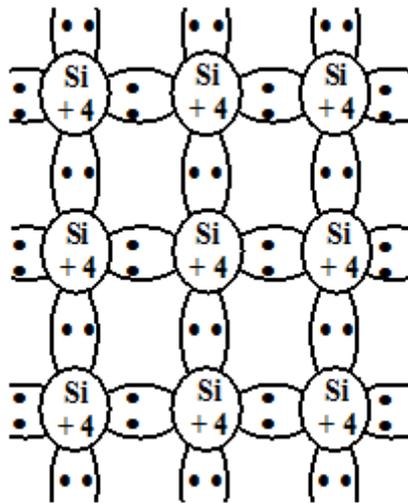


2.3 Diode et photodiode

1. Semi-conducteurs

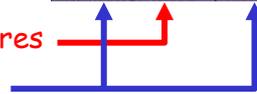
Liaisons Covalentes et Dopage

Silicium pur

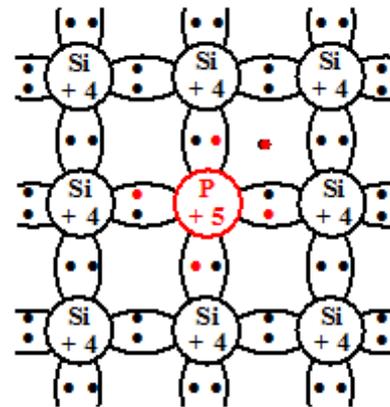


13 (3c)	14 (4c)	15 (5c)
III A	IV A	V A
5 B 10,811 Bore	6 C 12,011 Carbone	7 N 14,007 Azote
13 Al 26,98 Aluminium	14 Si 28,09 Silicium	15 P 30,974 Phosphore
31 Ga 69,72 Gallium	32 Ge 72,64 Germanium	33 As 74,92 Arsenic
49 In 114,82 Indium	50 Sn 118,71 Etain	51 Sb 121,76 Antimoine
81 Tl 204,38 Thallium	82 Pb 207,2 Plomb	83 Bi 208,98 Bismuth

Semi-conducteurs élémentaires
les composants III-V

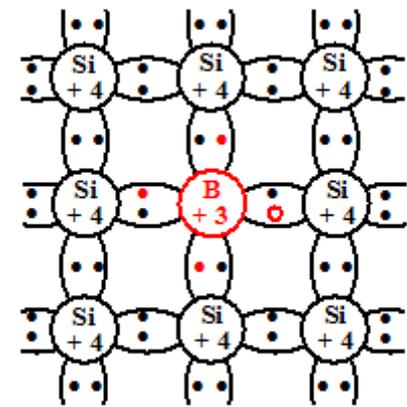


Donneur



P, As, Sb
type « n »

Accepteur



B, (Al, Ga, In)
type « p »

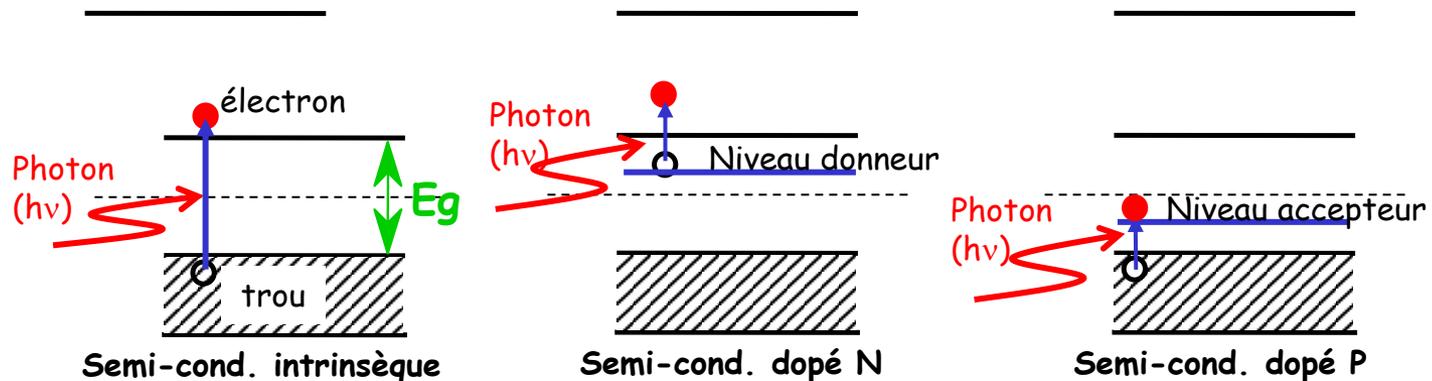
La valence du bore est +5 => donneur,
alors celle du phosphore est 3 => récepteur..

B=bore
P=Phosphore
In=Indium
Sb=Antimoine

2.3 Diode et photodiode

1. Semi-conducteurs

Semi-conducteurs extrinsèques



- L'énergie du photon incident doit être supérieure au gap du matériau pour avoir création de porteurs libres dans la bande de conduction.

La longueur d'onde seuil est donnée par :

Exemple :

Silicium $\rightarrow E_g = 1,12 \text{ eV} \Rightarrow \lambda_{\text{seuil}} = 1.1 \mu\text{m}$

Germanium $\rightarrow E_g = 0,67 \text{ eV} \Rightarrow \lambda_{\text{seuil}} = 1.85 \mu\text{m}$

$$\lambda_{\text{seuil}} = \frac{1,24}{E_g \text{ (eV)}} (\mu\text{m})$$

- **Le dopage du semi-conducteur introduit des niveaux intermédiaires, ce qui réduit le gap et augmente donc la longueur d'onde seuil.**

$$\frac{hc}{\lambda} \geq E_g, \lambda_{\text{seuil}} = \frac{hc}{E_g} = \frac{1,24}{E_g \text{ (eV)}} (\mu\text{m}), \text{ avec } 1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}, hc = 6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 \text{ J} \cdot \text{m}$$

2.3 Diode et photodiode

1. Semi-conducteurs

Cellule photoconductrice

Échantillon semi-conducteur de volume V alimenté par une tension U .
Le courant total traversant la cellule est donné par :

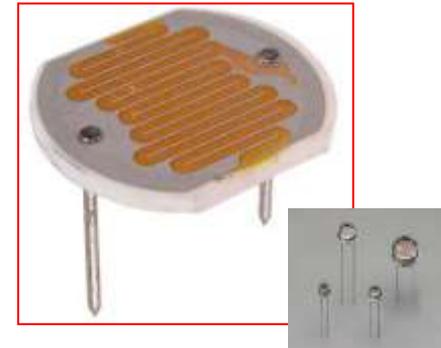
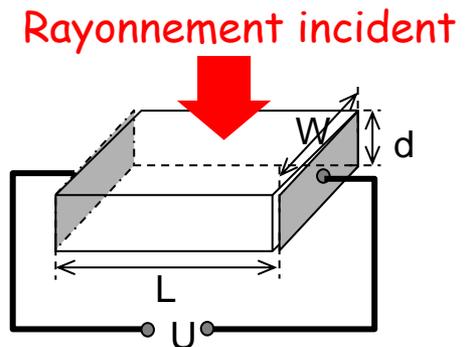
$$I_{\text{tot}} = I_0 + I_{\text{ph}}$$

Où I_0 est le courant d'obscurité (en absence d'éclairement) et I_{ph} le courant dû à l'éclairement.

$$I_{\text{ph}} = \eta q \mu_n \tau \frac{W}{L} \Phi U$$

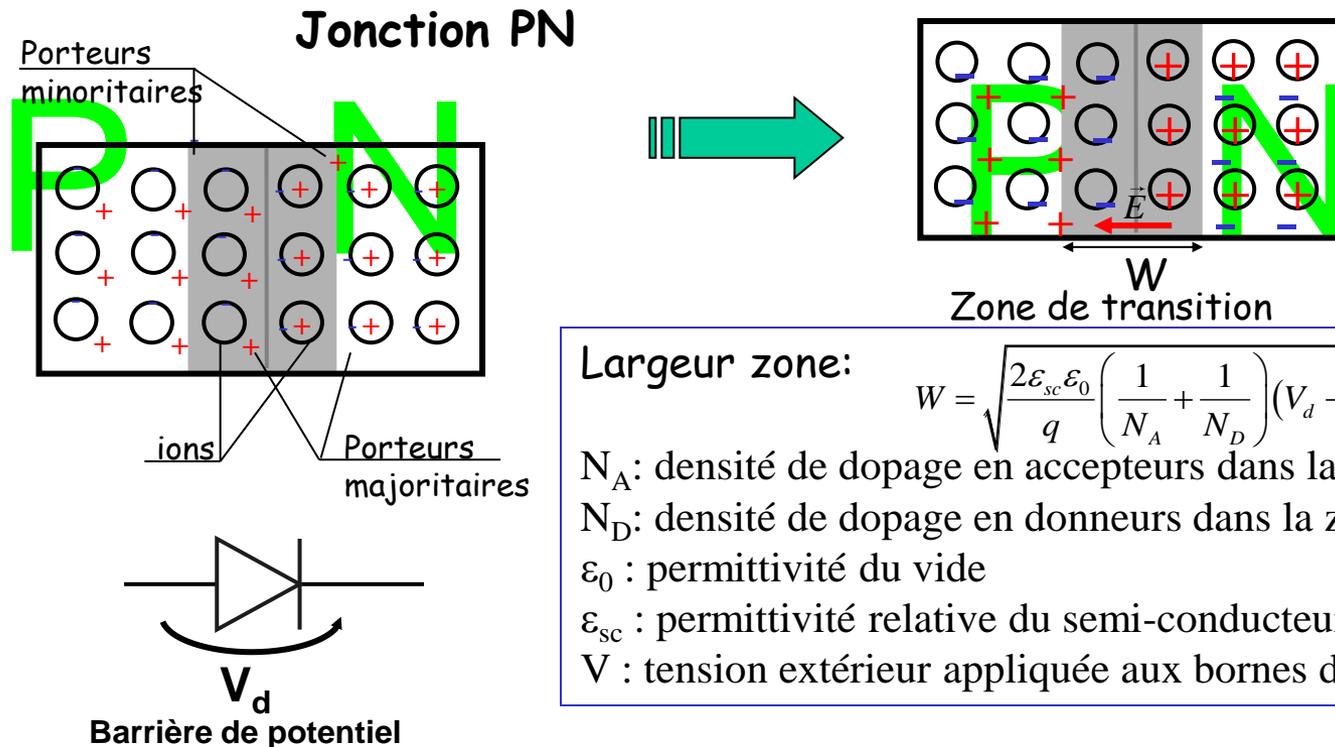
- η : rendement quantique de la cellule
- q : charge élémentaire de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C)
- μ_n : mobilité des électrons dans le matériau
- τ : temps de vie des porteurs
- Φ : flux de photons incident sur l'échantillon.

Pour augmenter le photo-courant on réalise des cellules avec W grand et L petit.



2.3 Diode et photodiode

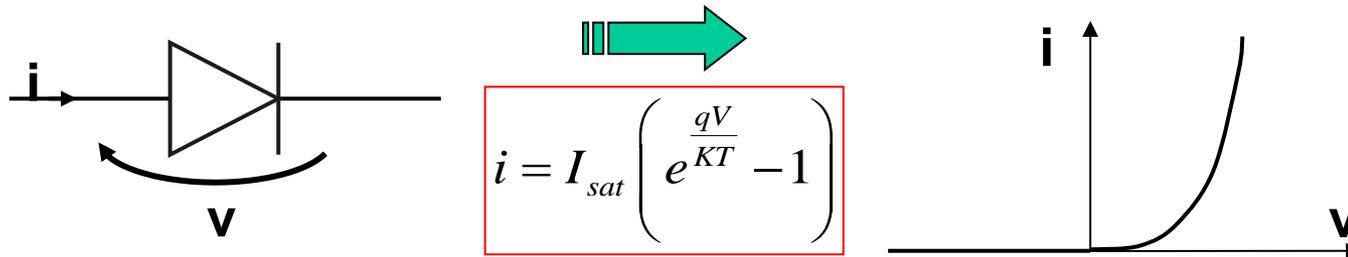
1. Semi-conducteurs



De part et d'autre de la jonction d'un semi-conducteur « P » et un semi-conducteur « N » se forme une zone de déplétion vide de porteurs libres en équilibre car il règne un champ électrique. **Ce dernier établit entre les deux éléments semi-conducteurs une barrière de potentiel V_d (qq dixièmes de V).**

2.3 Diode et photodiode

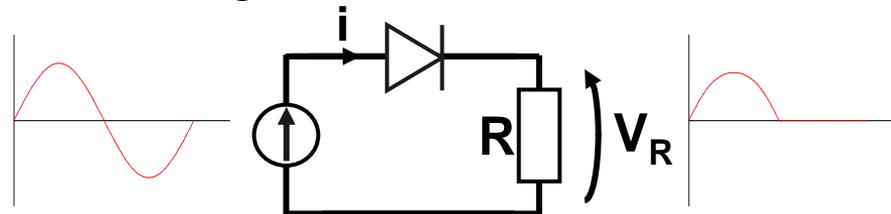
2. Principe de la diode



I_{sat} est le courant de saturation de la diode, il est de l'ordre du nA ($10^{-9}A$).

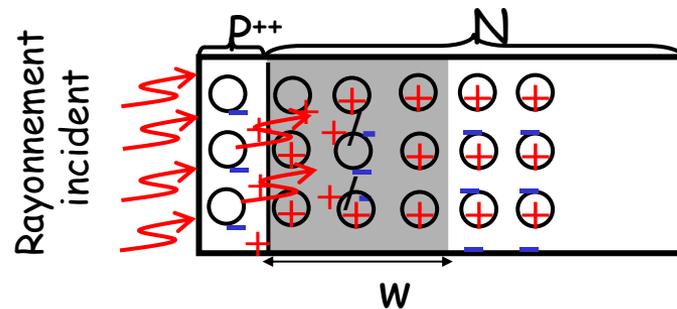
La diode PN se comporte comme un interrupteur fermé pour des tensions inférieures à V_d et ouvert pour des tension supérieures à V_d .

Application : redressement d'un signal alternatif



2.3 Diode et photodiode

2. Principe de la diode



1. Lorsqu'un éclaircissement lumineux est incident sur une jonction P⁺⁺ N, des paires électron/trou sont libérées dans la zone de transition.
2. Les électrons ainsi créés sont immédiatement balayés par le champs électrique vers la zone N (et les trous vers la zone P⁺⁺).

Il en résulte un photocourant inverse donné par :

$$I_{ph} = qA\eta\Phi$$

Où, A est la section transverse de la photodiode, Φ le flux lumineux pénétrant dans la structure, et η le rendement quantique du matériau.

Si de plus la diode est alimentée par une tension «V», le courant total s'écrit :

$$i = I_{sat} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - I_{ph}$$

Des semi-conducteurs fortement dopés (appelés N⁺⁺ et P⁺⁺) ont une conductivité proche de celle des métaux.

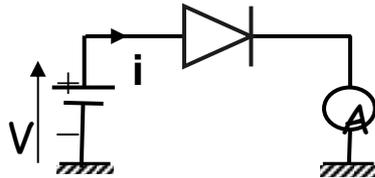
$kT/e \sim 26 \text{ mV à } T=300 \text{ K}$



2.3 Diode et photodiode

3. Différents montages

Montage en photocourant :



A : circuit de faible impédance (résistance)
Exemple : ampèremètre

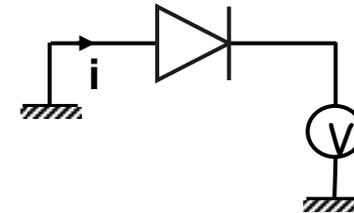
$$i = I_{sat} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - I_{ph}$$

Si la photodiode est polarisée en inverse ($V < 0$), le courant total s'écrit :

$$i = -(I_{sat} + I_{ph})$$

I_{sat} est de l'ordre du nA (10^{-9} A) alors que I_{ph} de l'ordre du μ A (10^{-6} A) ou plus, de sorte que I_{sat} est négligeable devant I_{ph} .

Montage photovoltaïque :



V : circuit de très haute impédance
Exemple : Voltmètre

$$i = I_{sat} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - I_{ph} = 0$$

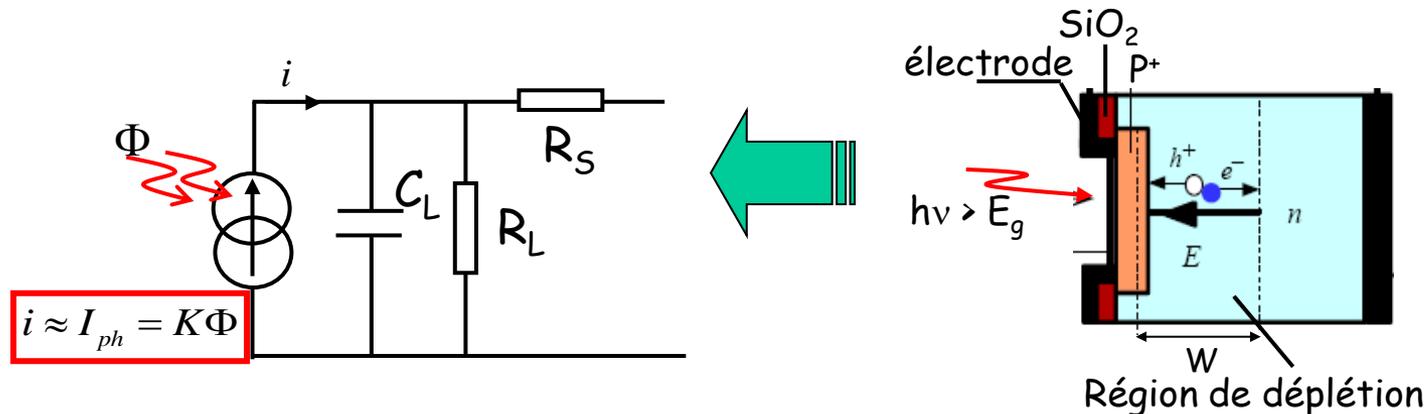
Dans ce cas, il apparaît aux bornes de la photodiode une tension V_{ph} :

$$V_{ph} = \frac{kT}{q} \log \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_{sat}} \right)$$

2.3 Diode et photodiode

3. Schéma électrique équivalent

Les photodiodes sont utilisées en montage photocourant avec une polarisation en inverse qui permet d'avoir une réponse linéaire en fonction du flux lumineux. Le schéma équivalent dans cette configuration est donné ci-dessous.



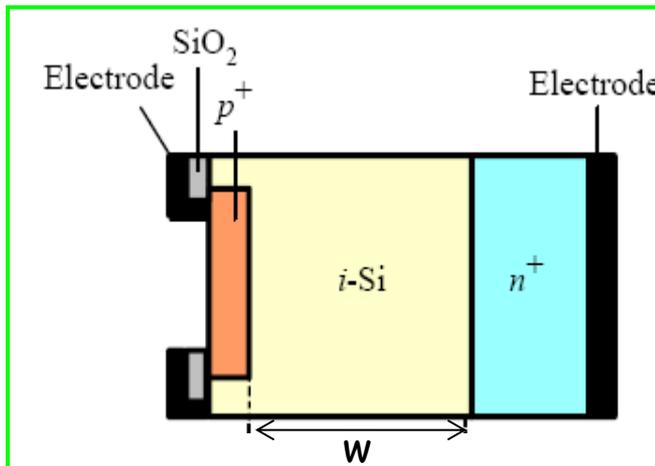
1. La résistance en série R_s correspond à celle des connecteurs et des couches P et N, elle reste faible : quelques Ω et négligeable en général.
2. La résistance R_L correspond à la zone de déplétion, elle est donc très grande, de l'ordre de $10^{10} \Omega$.
3. La capacité C_L de la zone de transition dépend du type de matériau utilisé, de la surface du détecteur, mais également de la tension inverse appliquée.

2.3 Diode et photodiode

4. Photodiode PIN

Les photodiodes PIN consistent en une couche de semi-conducteur intrinsèque (non-dopée) i mise en sandwich entre deux zones fortement dopées P^+ et N^+ .

La zone de transition s'étale essentiellement dans la zone intrinsèque et sa largeur est fixée par la largeur de la zone i .



Avantages :

- Rendement quantique élevé
- Temps de réponse très court
- large bande passante (>30 GHz)

2.3 Diode et photodiode

5. Photodiode avalanche (PDA)

Lorsque la polarisation inverse de la diode est voisine de la tension de claquage, les photoporteurs créés dans la zone de transition sont multipliés par effet avalanche.

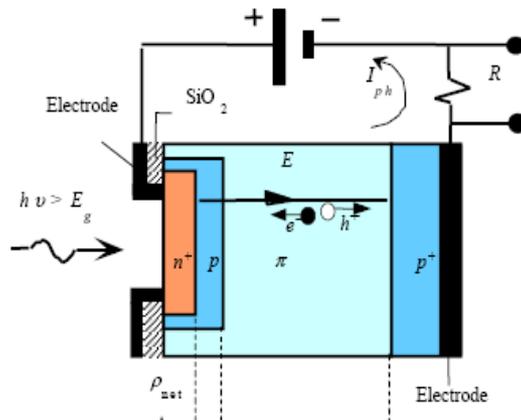
Cet effet se produit pour un champ électrique de l'ordre de 10^5 V/cm.

Sous l'effet d'un tel champ, les quelques porteurs photo-crées peuvent acquérir une accélération suffisante pour leur permettre de générer des paires électron/trou par ionisation par choc des atomes du cristal.

Ces paires sont à leur tour accélérées, et peuvent créer d'autres paires.

Il en résulte **un processus en chaîne appelé effet avalanche qui amplifie le photocourant.**

La photodiode avalanche est l'équivalent du photomultiplicateur.



Avantages :

- très grande sensibilité,
- amplification de courant ≈ 100 .

Inconvénients :

- sensibilité à la température et tension de polarisation,
- bruit dû à la multiplication des charges

2.3 Diode et photodiode

6. Caractérisation d'une photodiode

– Temps de réponse (constante de temps):

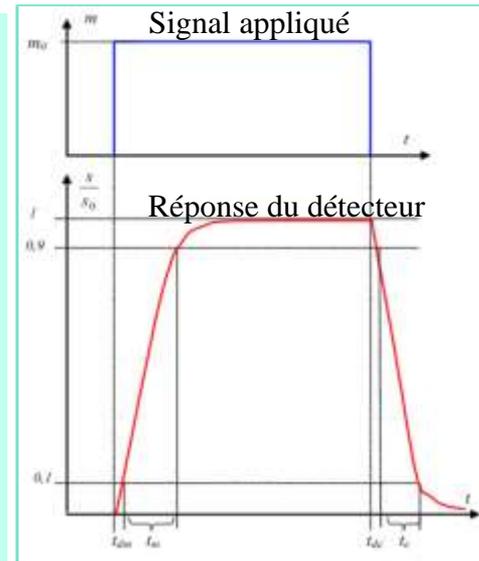
Le temps de réponse est la durée qui s'écoule après une variation brusque (appelée : échelon) du mesurande (grandeur à mesurer ou consigne) jusqu'à ce que la variation de la sortie du capteur ne diffère plus que de ε % de la valeur finale.

La montée du signal est souvent de forme exponentielle:

$$S = S_0(1 - e^{-t/\tau})$$

Le temps de réponse t est défini par :

$$\frac{S_0 - S(t)}{S_0} = \frac{1}{e}$$



t_{dm} : temps de retard à la montée ou délai de montée. Temps nécessaire pour que la grandeur de sortie s augmente, à partir de sa valeur initiale, de 10% de sa variation totale.

t_m : temps de montée. Intervalle de temps correspondant à la croissance de s de 10% à 90% de sa variation totale.

t_{dc} : temps de retard à la chute ou délai de chute. Temps nécessaire pour que la grandeur de sortie s diminue, à partir de sa valeur initiale, de 10% de sa variation totale.

t_c : temps de chute. Intervalle de temps correspondant à la décroissance de s de 10% à 90% de sa variation totale.

2.3 Diode et photodiode

6. Caractérisation d'une photodiode

– Longueur d'onde seuil:

L'énergie de photon E_p est supérieure du travail d'attraction W_a : $E_p > W_a \rightarrow hc/\lambda > W_a$

$$\lambda_{seuil} = \frac{1,24}{W_a (eV)} (\mu m)$$

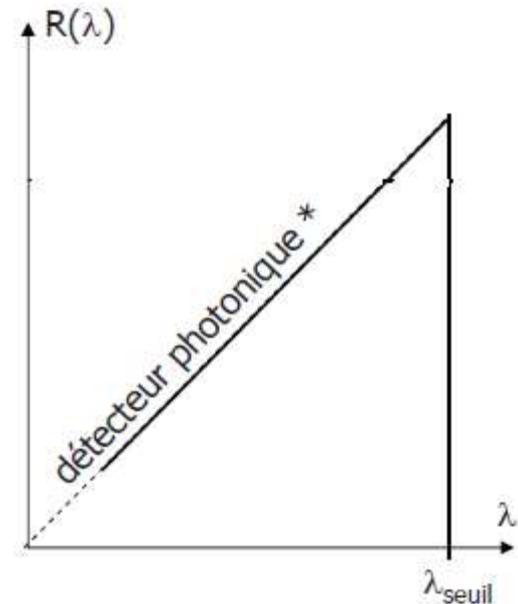
– Sensibilité théorique $R(\lambda)$ (A/W):

Un flux énergétique incidente F_e génère un flux de photons F_p :

$n_p = F_p/h\nu = \eta F_e/h\nu = \eta F_e \lambda/hc$, donc un courant :

Ainsi
$$i = en_p = e\eta \frac{\lambda}{hc} F_e = R(\lambda)F_e$$

$$R(\lambda) = K\lambda$$



2.3 Diode et photodiode

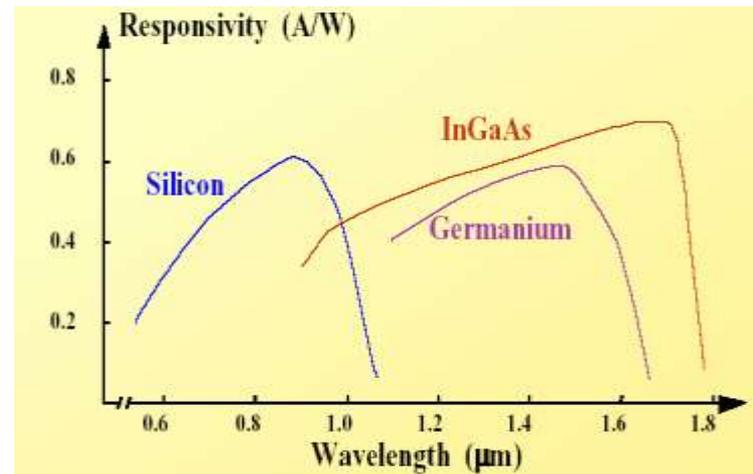
6. Caractérisation d'une photodiode

– **Sensibilité réelle** $R(\lambda)$: Voir figure

- La courbe n'est pas une droite.
- Elle dépend du matériaux
- Elle ne coupe à brutalement à la longueur d'onde seuil.
- Elle a aussi une limite en petite longueur d'onde.
- Il faut aussi tenir compte de la transmission de la fenêtre devant la surface sensible

– **sensibilité globale** R

$$R = \frac{\text{signal délivré}}{F_{e, total}} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R(\lambda) \frac{dF_e}{d\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{dF_e}{d\lambda} d\lambda}$$



2.3 Diode et photodiode

6. Caractérisation d'une photodiode

– Sensibilité spectrale:

Exemple: *InGaAs PIN photodiode, Standard type, G8376 series.*

Type No.	Spectral response range (μm)	Peak sensitivity wavelength λ_p (μm)	Photo sensitivity S	
			1.3 μm (A/W)	$\lambda = \lambda_p$ (A/W)
G8376-01	0.9 to 1.7	1.55	0.9	0.95
G8376-02				
G8376-03				
G8376-05				

– bande passante: Comportement dynamique:

Le circuit est donc équivalent à un filtre passe-bas du premier ordre de fréquence de coupure:

$$F_c = 2\pi / (RC_p)$$

Deux paramètres interviennent sur la valeur de la capacité parasite:

- La dimension de la surface active.
- La tension de polarisation.

Active area (mm)	Cut-off frequency f_c VR=2 V RL=50 Ω -3 dB (MHz)	Terminal capacitance C_t VR=5 V f=1 MHz (pF)
$\phi 0.04$	3000	0.5
$\phi 0.08$	2000	1
$\phi 0.3$	400 *	5
$\phi 0.5$	200 *	12

■ Spectral response

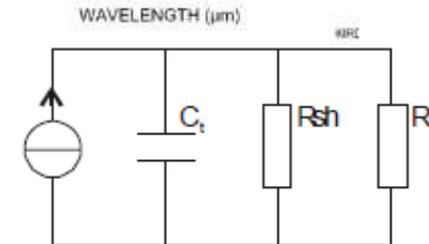
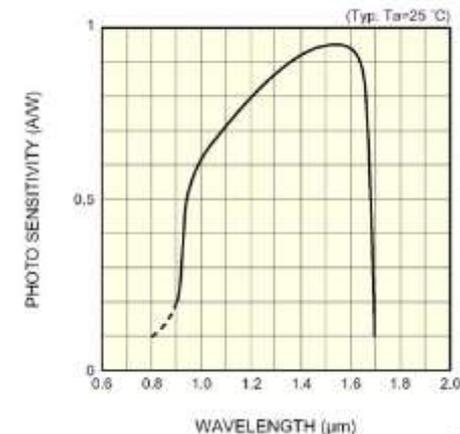
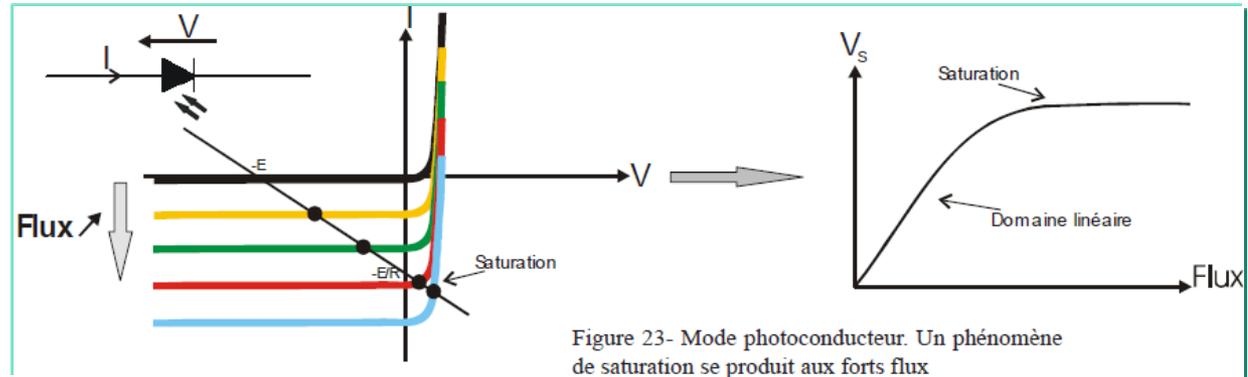
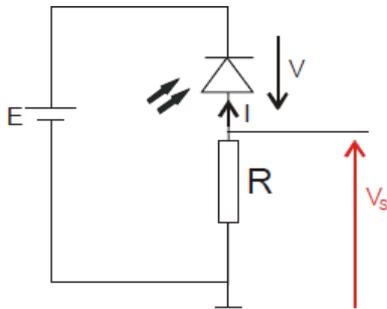


Schéma équivalent avec résistance de charge, résistance parallèle et capacité parasite.

2.3 Diode et photodiode

6. Caractérisation d'une photodiode

– Linéarité :



Montage typique avec polarisation et résistance de charge.

Le courant varie linéairement avec le flux lumineux si ceci ne dépasse pas certain seuil – saturation.

La tension $V_s (= -RI)$ est directement proportionnelle au photo-courant généré par la photodiode.



2.3 Diode et photodiode

6. Caractérisation d'une photodiode

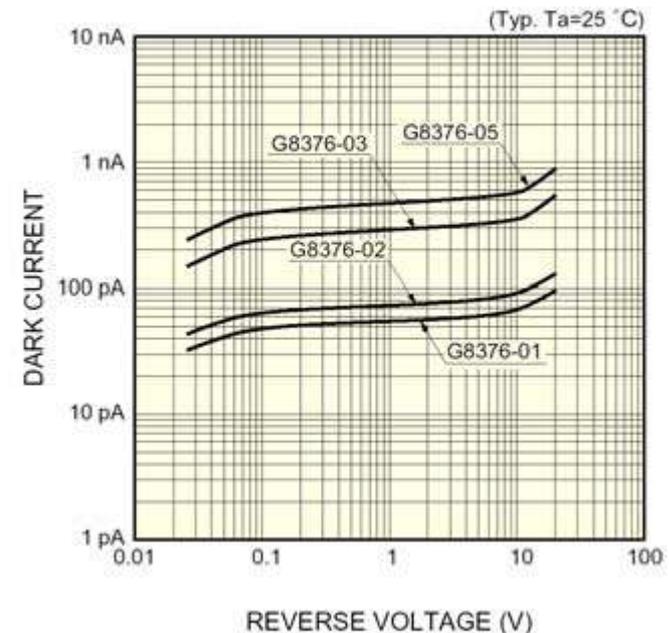
– Courant d'obscurité:

Exemple: *InGaAs PIN photodiode, Standard type, G8376 series*

En l'absence de lumière, il existe un courant inverse I_o . Ce courant est appelé "courant d'obscurité". Ce courant est d'autant plus grand que la tension inverse ("Reverse Voltage") appliquée est élevée. Il s'annule pour une tension nulle.

Dark current I_D $V_R=5\text{ V}$	
Typ. (nA)	Max. (nA)
0.06	0.3
0.08	0.4
0.3	1.5
0.5	2.5

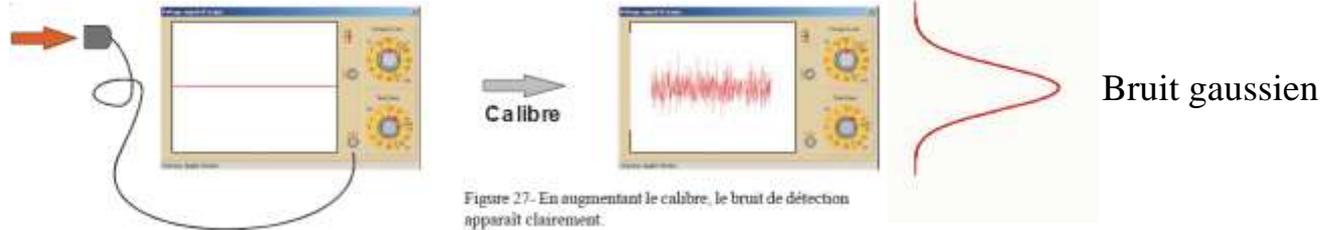
■ Dark current vs. reverse voltage



2.3 Diode et photodiode

6. Caractérisation d'une photodiode

– Bruits de détection:



Pour une intensité du faisceau lumineux constante, la tension mesurée aux bornes est une droite horizontale. Cependant, en augmentant le calibre de l'oscilloscope on voit une légères fluctuations autour de la valeur moyenne. Cette fluctuation imprévisible est le bruit qui se superpose au signal utile.

Différentes sources de bruit:

- **Bruit de scintillation** : Ce bruit est lié aux fluctuations lentes des porteurs de charges dans une photodiode. Ce bruit d'origine technologique se manifeste principalement aux basses fréquences et décroît rapidement, négligeable à quelques kHz.
- **Bruit thermique** (ou Johnson): L'agitation thermique dans une résistance R génère un courant de bruit (bruit blanc). $\sigma_i = \sqrt{4kT\Delta f / R}$
- **Bruit de grenaille** (ou Shot noise): Ce bruit a pour origine le caractère discret des porteurs de charges dans un circuit et présent dans tout circuit électrique où le transfert d'énergie est décrit par des phénomènes quantiques.

– NEP: Noise Equivalent Power:

En l'absence de flux incident, la photodiode est donc à l'origine d'un courant de bruit qui lui est propre et de densité spectrale S_b (en A^2/Hz). Ce flux équivalent minimal est appelé **NEP**: "Noise Equivalent Power" (ou **FEB** pour flux équivalent au bruit). Il est défini comme étant le flux donnant un signal juste égal à la valeur efficace de bruit $s(\lambda) = \sqrt{\langle I_b^2 \rangle}$. Il dépend de la longueur d'onde puisque la sensibilité $R(\lambda)$ de la photodiode en dépend.

Pour obtenir une caractéristique propre à la photodiode et indépendante du circuit électronique que vous choisirez, les constructeurs fournissent généralement une NEP ramenée à l'unité de racine de bande passante. Elle s'exprime donc en W/\sqrt{Hz} et s'écrit

$$NEP(\lambda) = \frac{\sqrt{S_b}}{R(\lambda)\sqrt{\Delta f}} \quad (W/Hz^{1/2})$$

Exemple: Si la photodiode n°1 est associée à un circuit de bande passante 1MHz, le flux équivalent au bruit propre de la photodiode s'écrit: $2 \times 10^{-15} * 10^3 \approx 2 \text{ pW}$. Cette valeur est très faible.

Type No.	Outline No. (P. 34,35)	Package	Active Area (mm)	NEP $\lambda = \lambda_p$ ($W/Hz^{1/2}$)
----------	---------------------------	---------	---------------------	--

■ Standard Types (0.9 to 1.7 μm)

G3476-01	1	TO-18	$\phi 0.08$	2×10^{-15}
G3476-03			$\phi 0.3$	4×10^{-15}
G3476-05			$\phi 0.5$	8×10^{-15}
G5832-01			$\phi 1.0$	2×10^{-14}



– détectivité spécifique D^* :

- **Détectivité D**

La détectivité est définie par

$$D(\lambda) = \frac{1}{NEP(\lambda)}$$

et s'exprime en $W^{-1}Hz^{1/2}$.

Pour pouvoir comparer plus facilement les détecteurs entre eux, on ramène le NEP ou la détectivité à l'unité de surface. La puissance de bruit interne varie le plus souvent linéairement avec la surface A

$$\sqrt{\langle I_B^2 \rangle} \propto S_B \propto \sqrt{A}$$

D'où le NEP spécifique $\frac{NEP(\lambda)}{\sqrt{A}}$ et détectivité spécifique.

- **Détectivité spécifique D^* :**

Les constructeurs ont introduit une grandeur plus commerciale pour caractériser leurs détecteurs.

$$D^*(\lambda) = \frac{\sqrt{A}}{NEP(\lambda)}$$

où A est l'aire de la surface en cm^2 . D^* est donc la détectivité pour une surface de $1cm^2$ dans un circuit de bande passante 1Hz.

Indication des conditions de mesure pour la valeur de D^* :

$$D^* \left(\begin{array}{l} \lambda \text{ pour rayonnement monochromatique} \\ T \text{ pour rayonnement de corps noir} \end{array}, \text{ fréquence, bande passante} \right)$$

Exemples:

- $D^*(500 \text{ K}, 800, 1)$ signifie que la température de couleur de la source est 500 K, la fréquence de modulation est 800 Hz, la BP de 1 Hz.
- $D^*(6,3 \mu m, 800, 1)$ signifie que la longueur d'onde de mesure est $6,3 \mu m$.

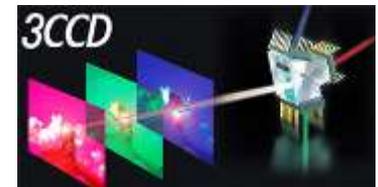
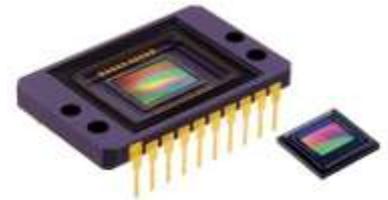
2.4 Capteur d'image CCD et CMOS

- **Capteurs images**

Capteurs CMOS, CCD, MOS, BSI-CMOS, 3MOS, SuperCCD... une flopée de technologies équipant nos appareils photos numériques dont il est bien souvent difficile de distinguer les différences sur le papier. Qui ne s'est jamais demandé quelles étaient les différences ? Un peu de vulgarisation ne fait pas de mal pour en comprendre les principes !

Les capteurs fonctionnent tous sur le principe de conversion de la lumière (photons) en signaux électriques grâce aux cellules photosensibles dont ils sont recouverts. Le tout passe ensuite via un convertisseur analogique/numérique pour traduire ces signaux et récupérer au final une restitution en pixels de couleurs, calculés et traités par le processeur d'imagerie. Le résultat est enregistré dans la mémoire tampon de l'appareil avant d'être transféré sur votre carte mémoire. Voilà pour simplifier le processus !

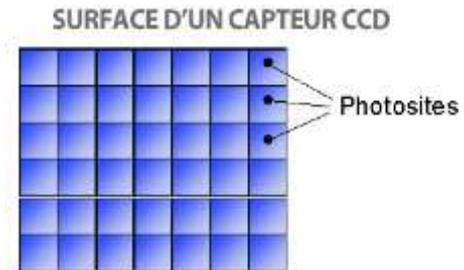
Historiquement, les premiers capteurs sont apparus entre les années 1970 et 1980 pour les CCD (Charge Couple Device) et les CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). De nos jours, ces capteurs équipent toujours nos appareils photos numériques, avec leur lot d'améliorations et variantes, propres à chaque constructeur (SuperCCD et BSI-CMOS de Fujifilm, 3MOS de Panasonic...).



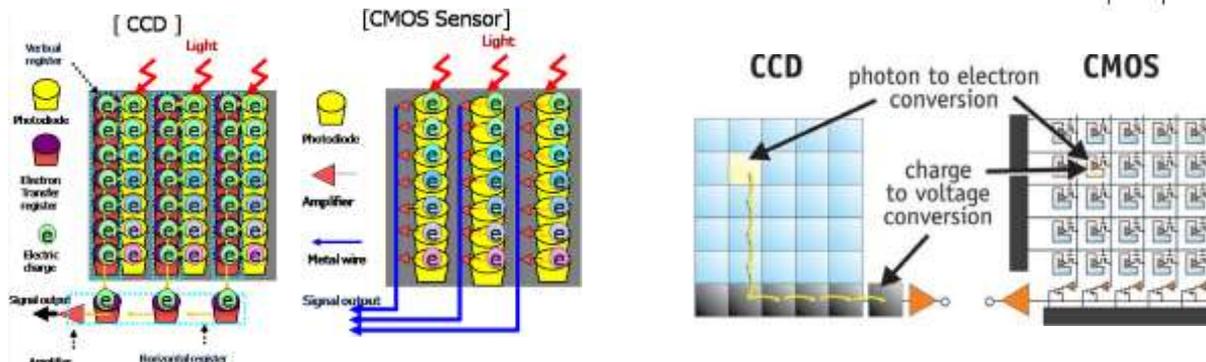
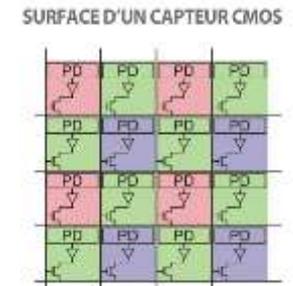
2.4 Capteur d'image CCD et CMOS

- CCD ou CMOS:**

Le principe des **capteurs CCD** repose sur un champ de photosites, petites cellules qui accumulent la lumière individuellement. La couleur est ensuite déterminée par un filtre analogique (Bayer) en fonction de l'intensité reçue. On peut donc imaginer qu'un photosite correspond à un pixel qui compose une image. On obtient une image fidèle avec des nuances de couleurs calculées par rapport aux tensions relevées sur chaque photosite.

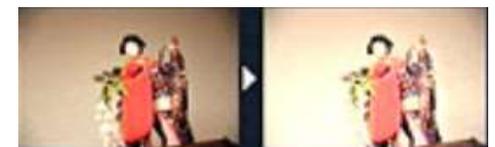
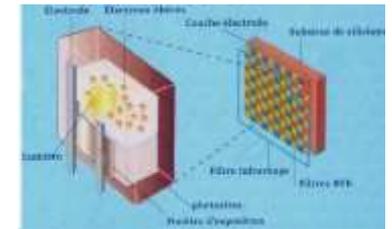
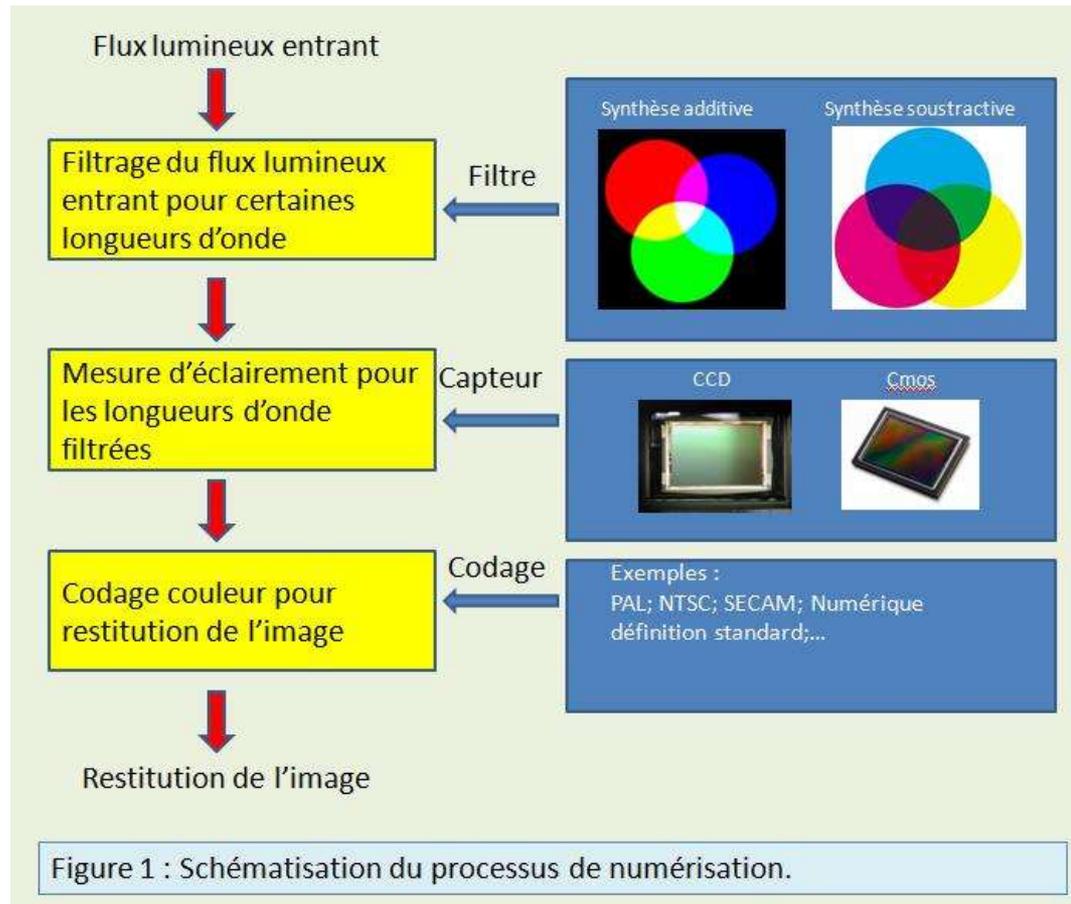


A l'inverse, les **capteurs CMOS** fonctionnent par champ de photodiodes (PD), chacune étant sensible à une seule des couleurs primaires (rouge, vert et bleu). C'est un champ de "oui" et de "non" qui recouvrent le capteur. Au final, c'est une combinaison des valeurs de chaque photodiodes (0 ou 1) qui permet d'obtenir la couleur "estimée" de chaque pixel. Le résultat final sera donc un ensemble de calcul des pixels, ce qui est souvent à l'origine du bruit électronique.



2.4 Capteur d'image CCD et CMOS

- Fonctionnement du système

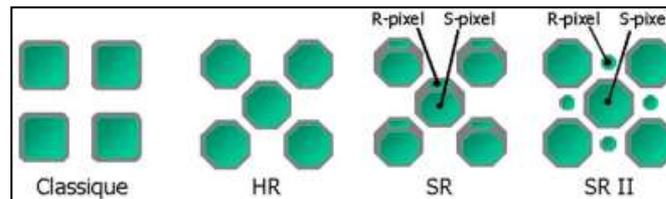


2.4 Capteur d'image CCD et CMOS

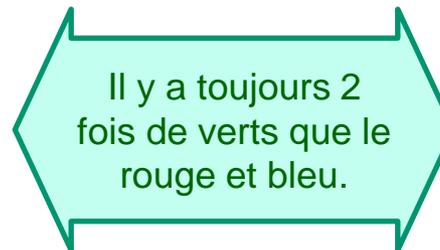
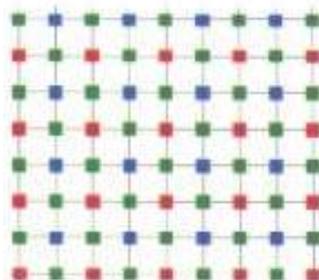
- Filtre de Bayer**

L'ensemble des filtres pour les trois couleurs forme le filtre de Bayer. Régulièrement des améliorations sont apportés au capteur afin d'en améliorer la sensibilité en augmentant la surface active. Ces améliorations sont obtenues par exemple en modifiant la forme des pixels ou en changeant la nature des électrodes (qui se trouve être au dessus du pixel) pour obtenir une meilleure transparence à la lumière

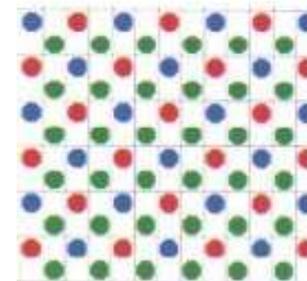
- Changement de forme des capteurs:



Conventional CCD



Super CCD

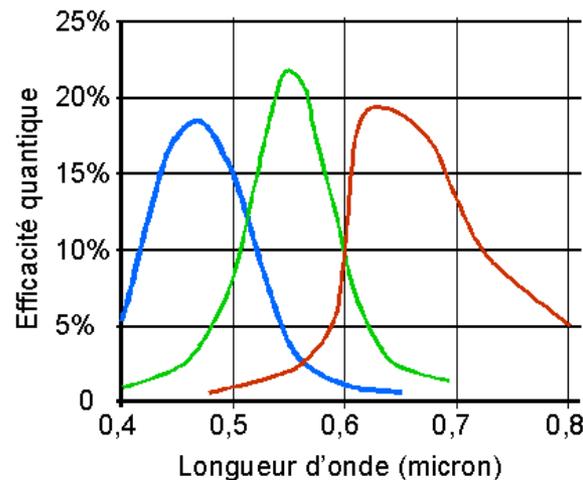


2.4 Capteur d'image CCD et CMOS

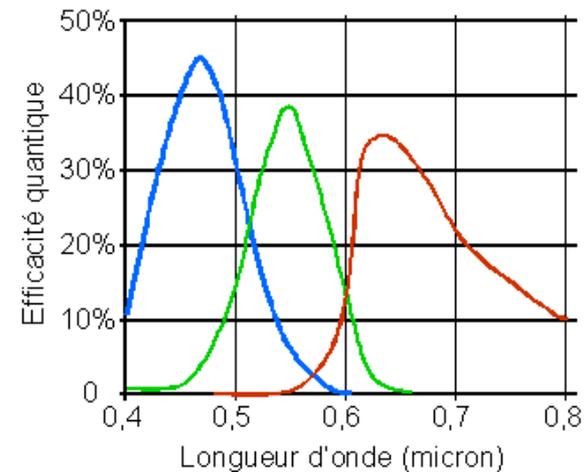
- **Couleurs**

Grâce à un *Color filter array* (en), par exemple un filtre de Bayer, constitué de cellules colorées des couleurs primaires, chaque photosite du capteur ne voit qu'une seule couleur: rouge, vert ou bleu. Sur chaque groupe de quatre photosites on trouve un pour le bleu, un pour le rouge et deux pour le vert ; cette répartition correspond à la sensibilité de notre vision.

C'est le logiciel du photocopieur qui va recréer les couleurs, en tenant compte des courbes de réponse spectrale pour un résultat final en trichromie ((interpolation, filtrage...)).



CCD pleine trame avec LOD



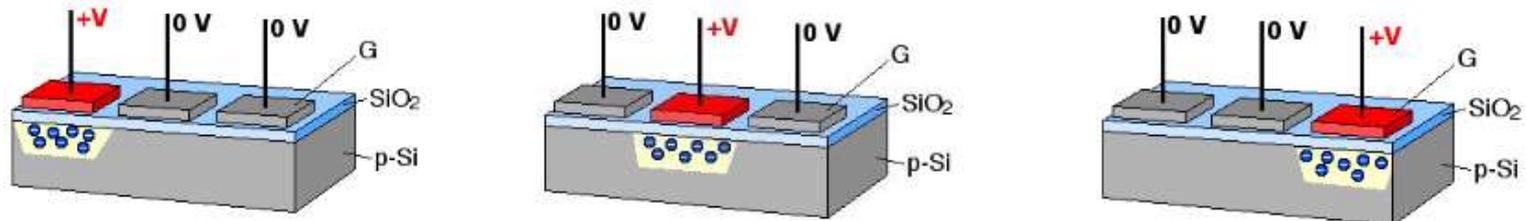
CCD interligne + microlentilles

2.4 Capteur d'image CCD et CMOS

- **Transfert de charges**

En modifiant le potentiel sous une grille on peut de proche en proche déplacer les charges d'un photo-site à l'autre afin de les extraire du capteur.

En utilisant la technique décrite plus haut les charges sont déplacées vers le bas de ligne en ligne. Puis elles sont récupérées dans un registre en faisant un décalage.



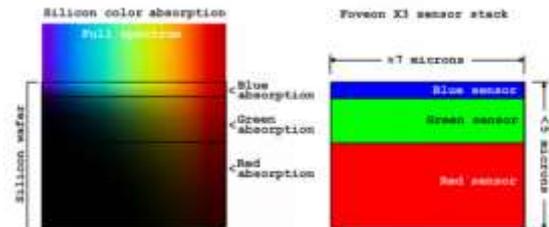
- **Les capteurs Foveon**

Ce capteur permet la capture des trois couleurs rouge, vert et bleu par un seul photosite, au moyen de trois couches de silicium recouvertes de photosites et disposées en sandwich et filtrées chacune par un filtre bleu, vert ou rouge ; Chacune des couches de photo-récepteurs est précisément espacée relativement aux longueurs d'onde bleue, verte et rouge de la lumière visible.

Avantages:

- La couleur est directement obtenue sur le photosite.
- Il permet d'espérer des images plus « propres ».

Donc moins cher et plus propre.



2.4 Capteur d'image CCD et CMOS

- **Quelques caractéristiques**

- **Surface:**

Full frame: 24 mm x 36 mm, haute gamme.

APS-H(Canon): 19.1 mm x 28.7 mm, **APS-H(Nikon):** 15.5 mm x 23.7 mm

- **Pixels:**

Hauteur	Longueur	Nbre pixels	Surface [mm ²]	Densité pixels/mm ²
3 000	4 000	12 M	864	13 889
4 000	5 000	20 M	864	23 148
5 000	6 000	30 M	864	34 722
6 000	6 000	36 M	864	41 667

- **performances des capteurs**

- **La résolution.**
 - **la dynamique (CCD) et le niveau de bruit (CCD et CMOS)**

$$\text{Dynamique}(dB) = 20 \log \left(\frac{\text{Capa}}{\text{Courant} + \text{Bruit}} \right)$$

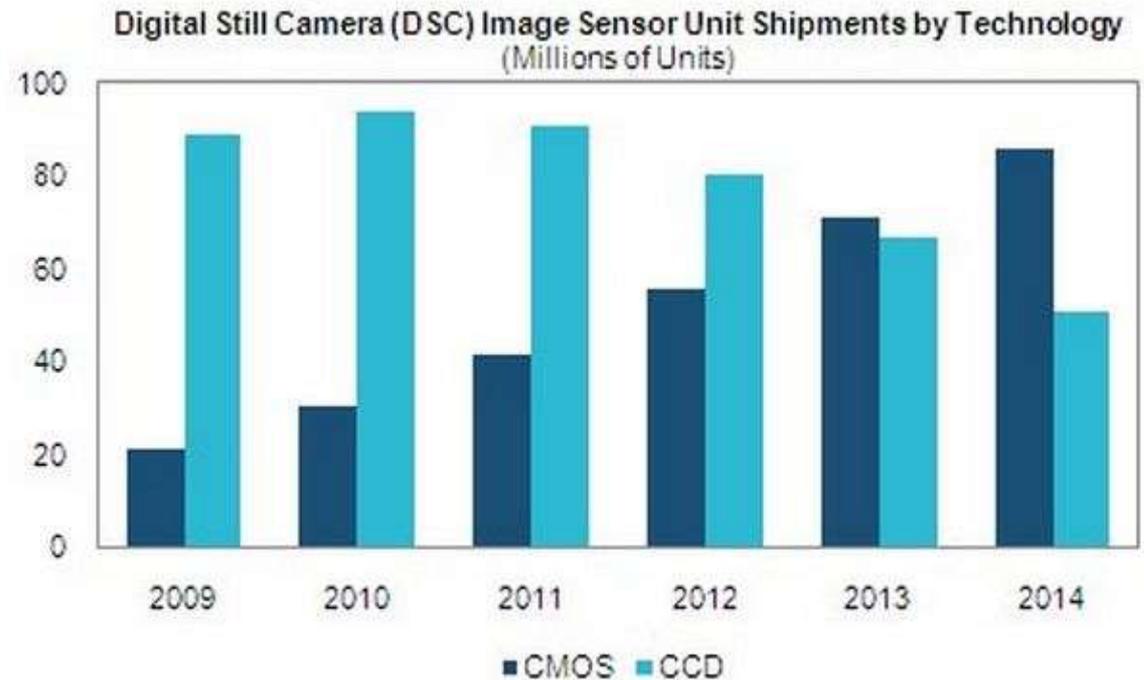
où la dynamique est obtenue en dB (décibels) ; « Capa » (la capacité de stockage d'un photosite), « Courant » (le courant d'obscurité) et « Bruit » (le bruit de lecture) sont évalués en électrons.

- **Sensibilité, efficacité quantique,**
 -

2.4 Capteur d'image CCD et CMOS

- **Quelle tendance pour demain?**

- Un capteur CMOS peut être supplanté par un CCD ou inversement
- Les appareils photo grand public tendent à remplacer CCD par CMOS, de qualité comparable et à un coût plus faibles.
- CCD reste utilisé dans des applications d'imagerie très haute cadence ou à très bas niveau de lumière, car il génère des images moins bruitées que les CMOS.



<https://lh5.googleusercontent.com/> Source: IHS iSuppli February 2011



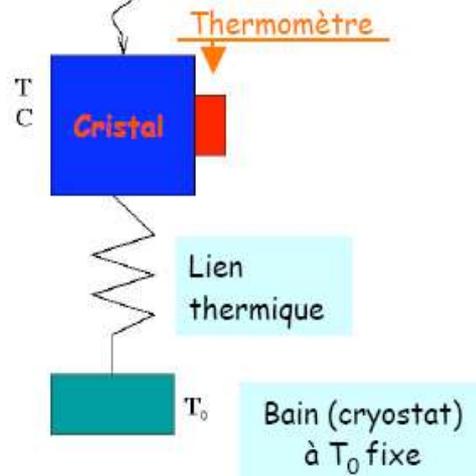
Capteurs



2.5 Capteurs bolométriques

Rayonnement incident

$200 \mu\text{m} - 1 \text{mm}$

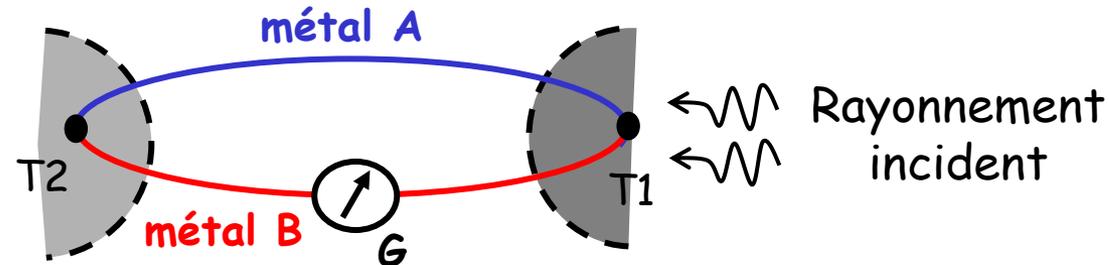


- Le cristal est chauffé par le rayonnement
- Le thermomètre mesure cette élévation de température
- Le lien thermique permet de rétablir la température du cristal
- La sensibilité sera d'autant meilleure que la capacité thermique du cristal sera faible *i.e.* à **basse température** (Loi de Debye : $C \approx T^3$)

Caractéristiques :

- Capteur résistif thermique, $\Delta T \rightarrow \Delta R \rightarrow \Delta V$
- Sensibilité dans la bande passante: 1 à 100 V/W
- **Constante thermique 1 à 10 ms**

2.6 Thermocouples



Effet Seebeck :

Lorsqu'on soude les extrémités de deux fils métalliques de natures différentes et que l'on maintient ces deux soudures à des températures T_0 et T différentes, on observe que dans le circuit fermé entre les deux points circule un flux de charges électriques, c.a.d., courant électrique.

Thermocouple

L'échauffement d'une des soudures d'un thermocouple par suite de l'absorption d'un rayonnement, produit une variation de **force électromagnétique** donc de tension électrique. Cette dernière est mesurée par un voltmètre extérieur.

Caractéristiques :

- Sensibilité : 0.1 à 100 V/W
- Constante thermique 1 à 100 ms



Capteurs



2.7 Capteurs pyroélectriques

Principe :

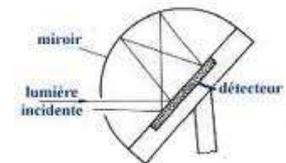
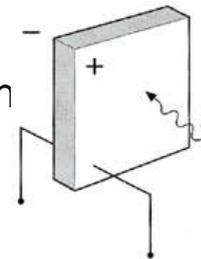
La pyroélectricité est la propriété d'un matériau dans lequel un changement de température entraîne une variation de polarisation électrique. Cette variation de polarisation crée une différence de potentiel temporaire, celle-ci disparaissant après le temps de relaxation diélectrique.

Les capteurs sont constitués des lames cristallines (exemple niobate de lithium : LiNbO_3) qui, sous rayonnement, produisent des charges électriques de surface. Ceci se traduit par la génération d'un courant électrique dans le circuit dans lequel ils sont insérés.

Ils sont tout particulièrement utilisés dans certains détecteurs infrarouge

Caractéristiques :

- Sensibilité en courant : 0.1 à quelques mA/W
- Sensibilité en tension : jusqu'à 105 V/W
- Temps de montée de 0.1 ms à 1 ns
- Bande passante de 1 kHz à 100 MHz



Fin du cours