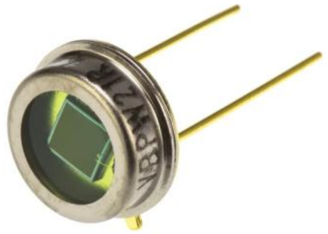
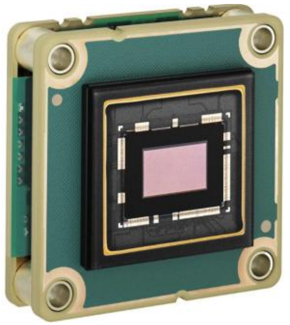
Bases de la photodétection



Module OPTO-ELECTRONIQUE

Julien VILLEMEJANE



Basler Sensor / Mouser

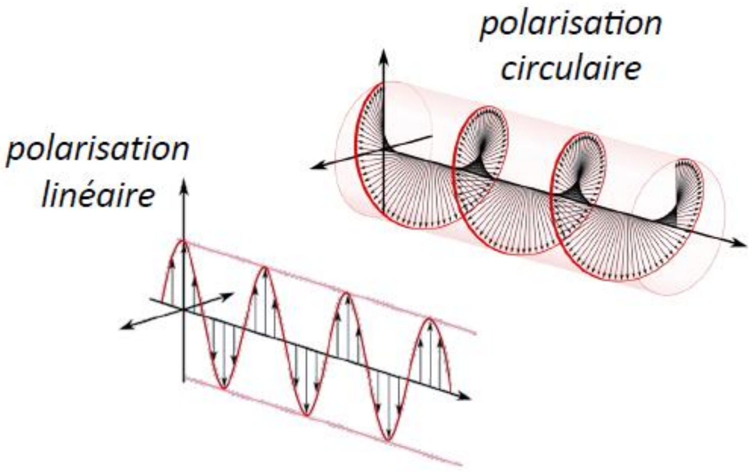
La lumière et la photonique

Lumière : vecteur d'informations

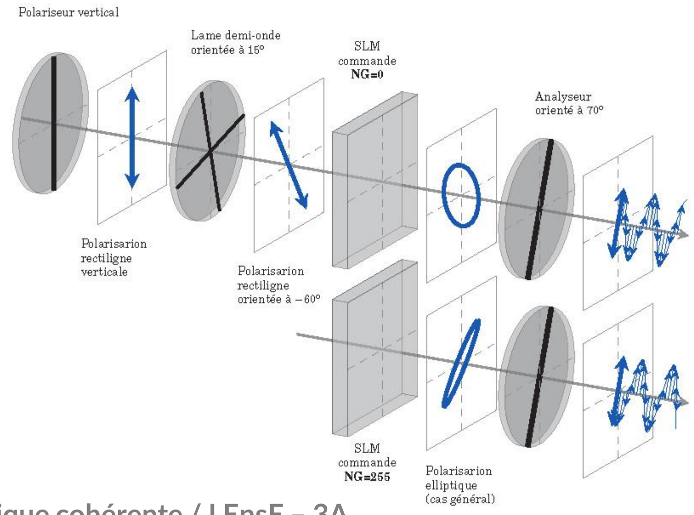
Schémas et image empruntés au cours d'optique instrumentale (SC19) de Sébastien de ROSSI

Lumière

La lumière est une **onde électromagnétique transversale** définie par sa **longueur d'onde** et sa **polarisation**



Transmission d'informations



Modification des propriétés de la lumière pour porter une information

- Polarisation
- Amplitude (modulation)
- Phase
- Intrication

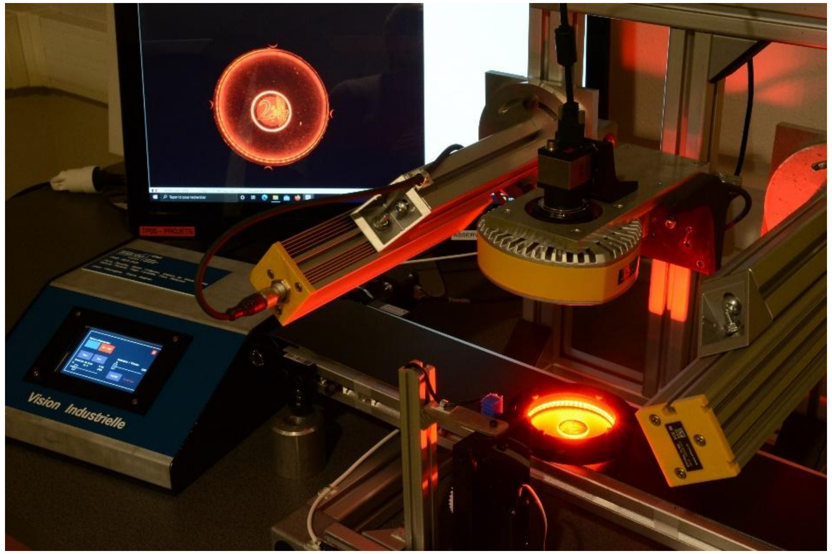
INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL

LEnsE

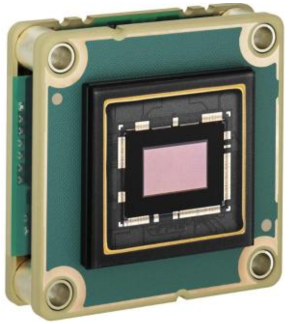
Laboratoire d'Enseignement Expérimental

Photodétection / Exemples

Application de la photodétection



IDS Sensor

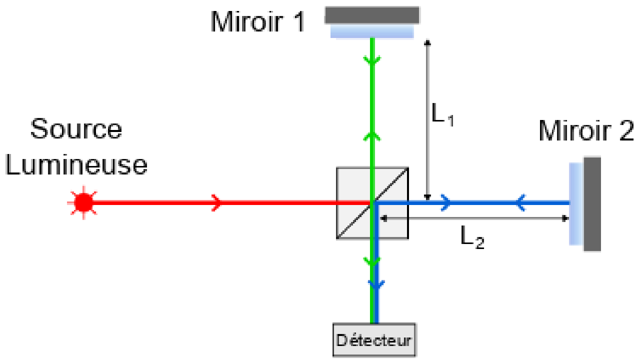


Basler Sensor / Mouser

Photodétection / Exemples

Applications en photonique

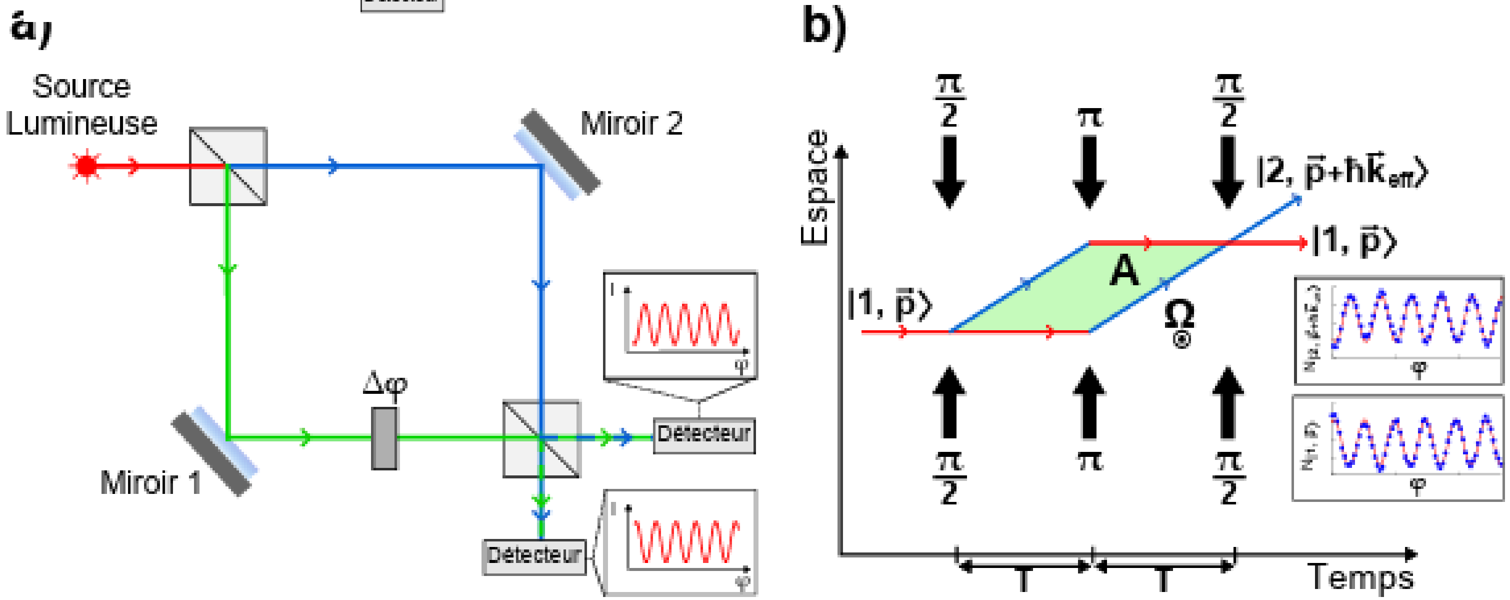
*Représentation d'un interféromètre de **Michelson***



Interféromètre à atomes froids piégés sur puce avec séparation spatiale

Groupe Gaz Quantiques / LCF

LABORATOIRE CHARLES FABRY



*Représentation d'un interféromètre de **Mach-Zehnder** (a) en optique, et (b) en version atomique, aussi appelé Ramsey-Bordé.*

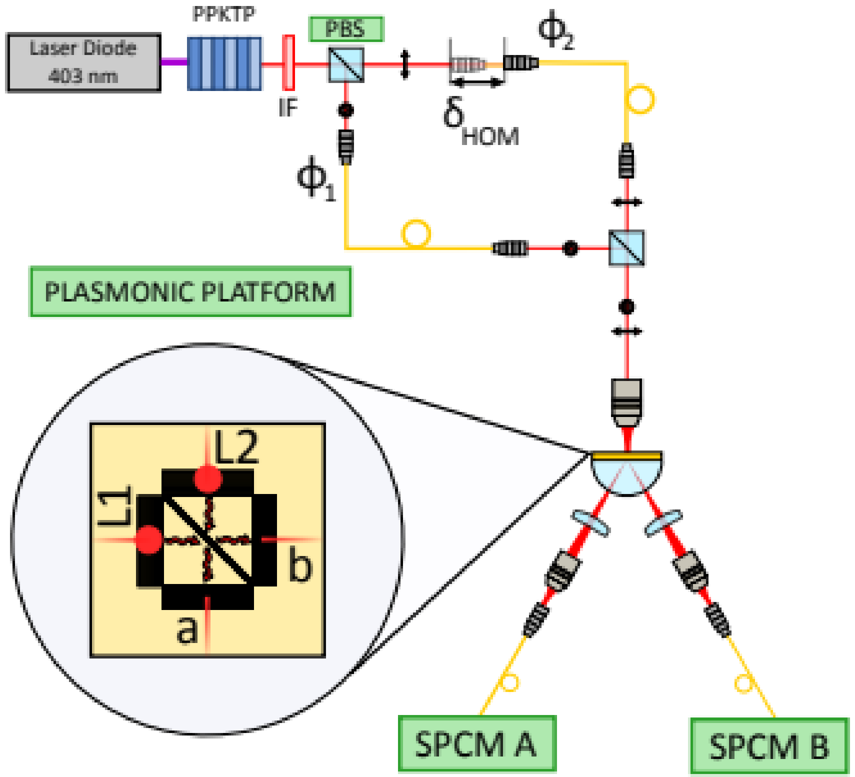
INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL

LEnsE Laboratoire d'Enseignement Expérimental

Photodétection / Exemples

Applications en photonique

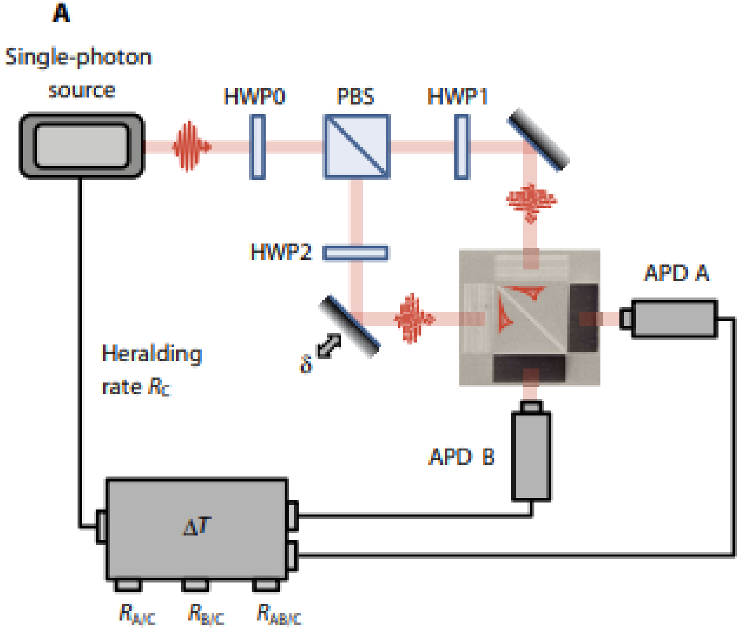
Anti-coalescence of bosons on a lossy beamsplitter



Groupe Nanophotonique / LCF

LABORATOIRE CHARLES FABRY

Single-plasmon interferences

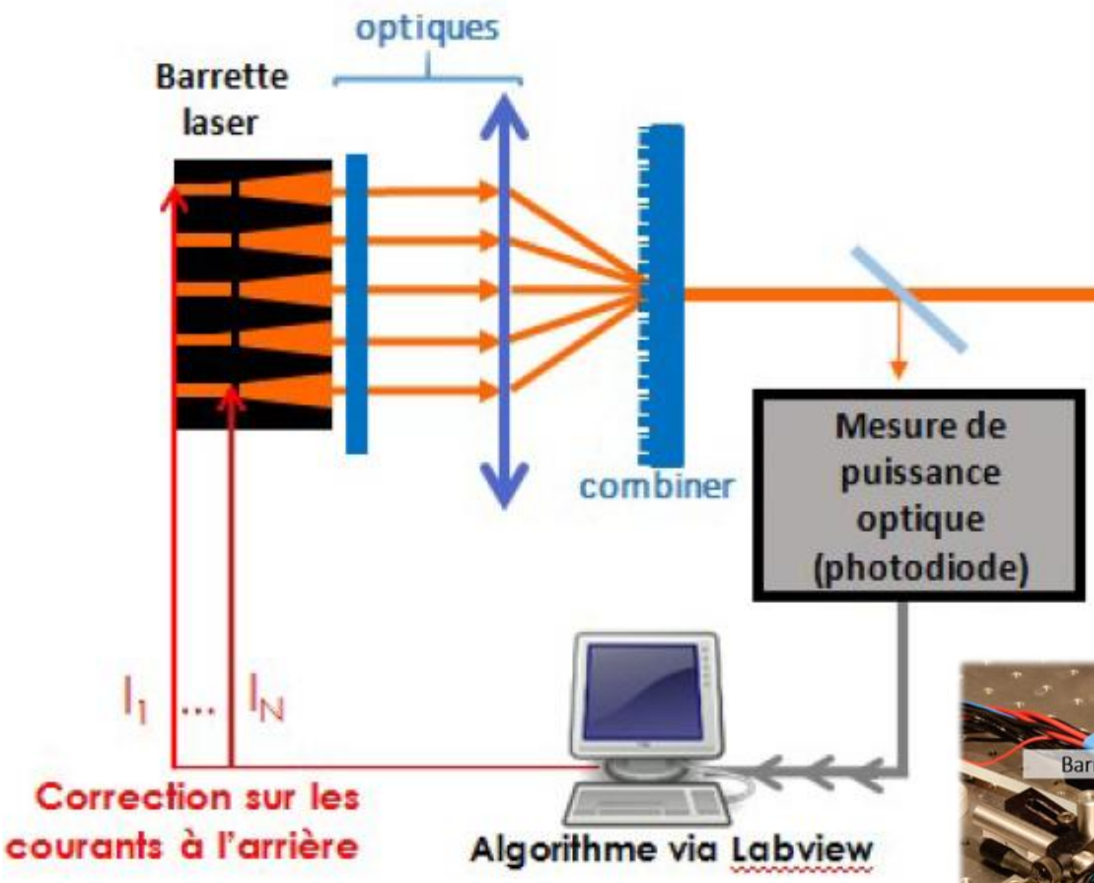


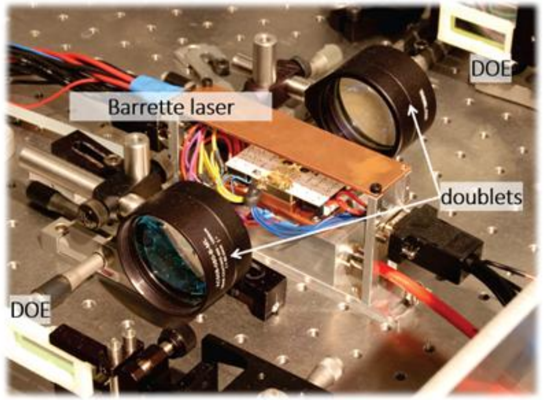
Photodétection / Exemples

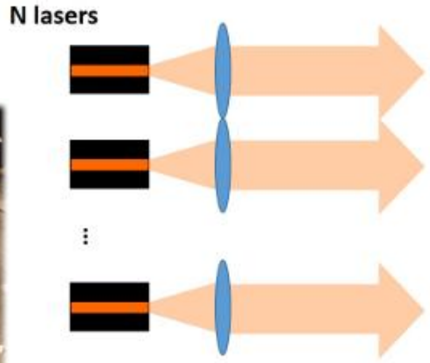
Applications en photonique

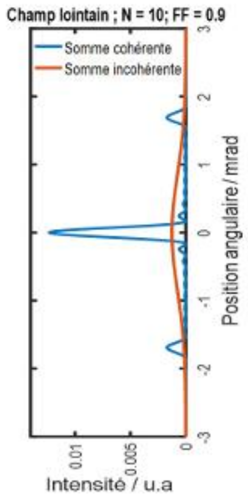
Combinaison cohérente de diodes laser de puissance

Groupe Laser / LCF









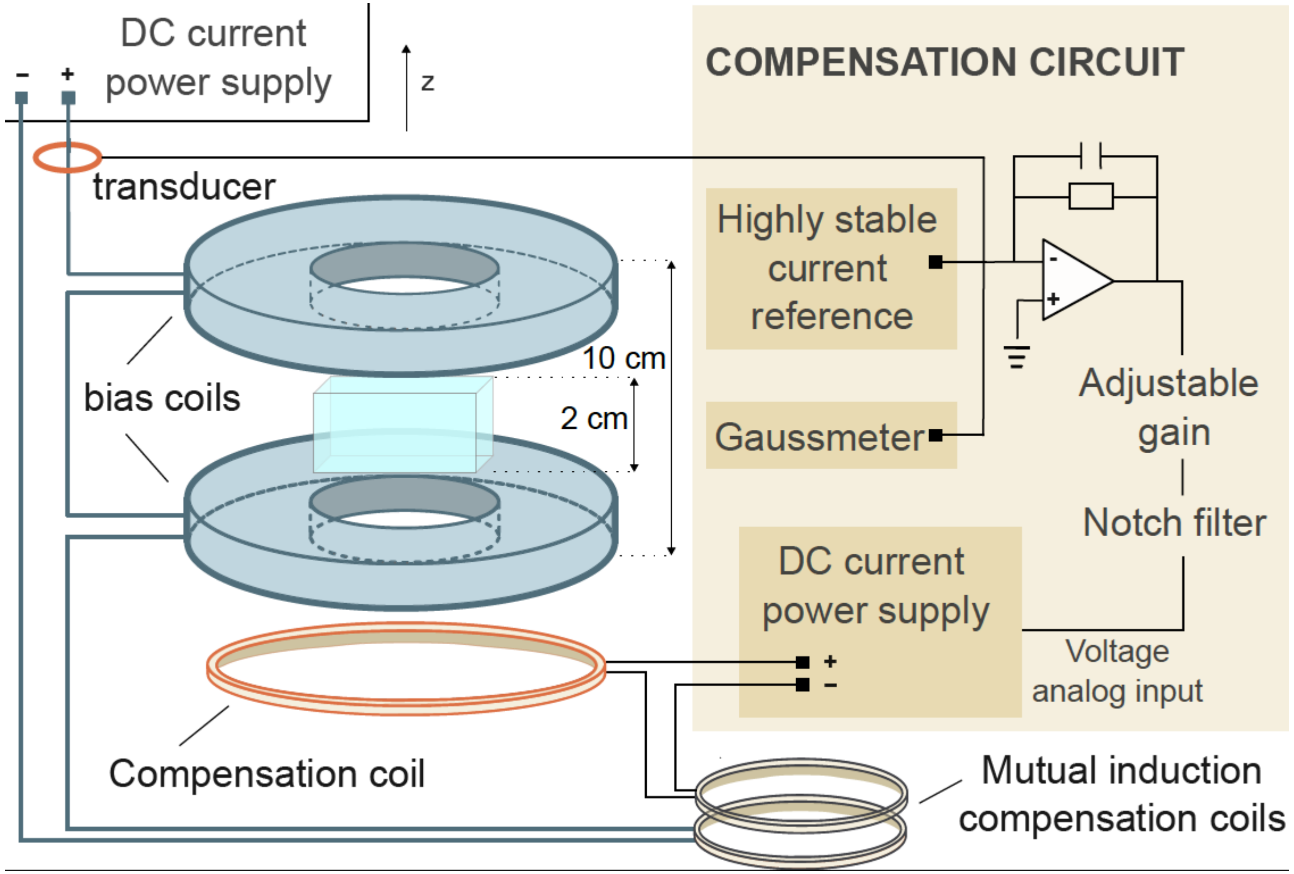
Electronique / Exemples

Applications en photonique

Magnetic field stabilisation for Bose-Einstein condensation experiments

Groupe Gaz Quantique / LCF

LABORATOIRE CHARLES FABRY



*Schematic of the **stabilization system**. In essence, it is a **feedforward** technique in a separated coil. A key feature is that the mutual inductance between the two circuits is cancelled.*

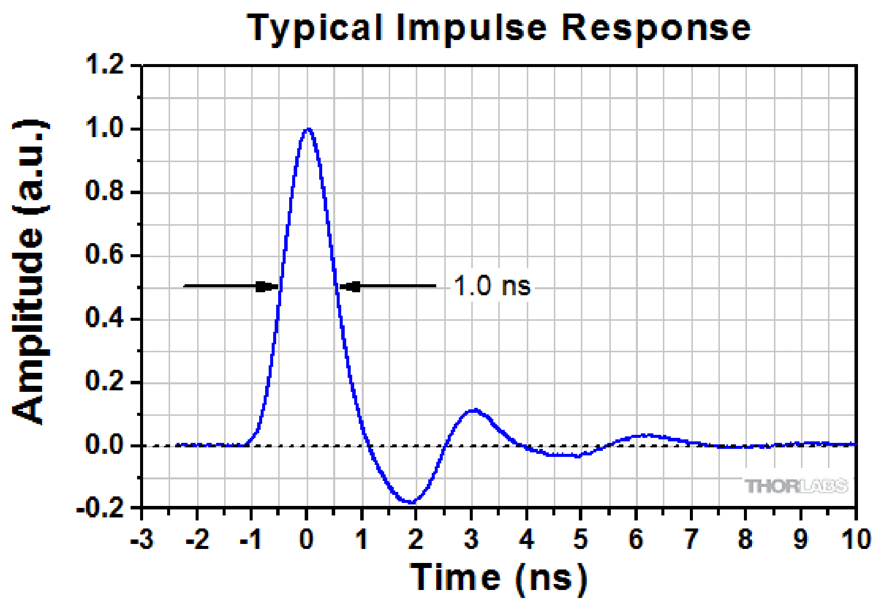
Photodétection / Exemples

Applications en photonique

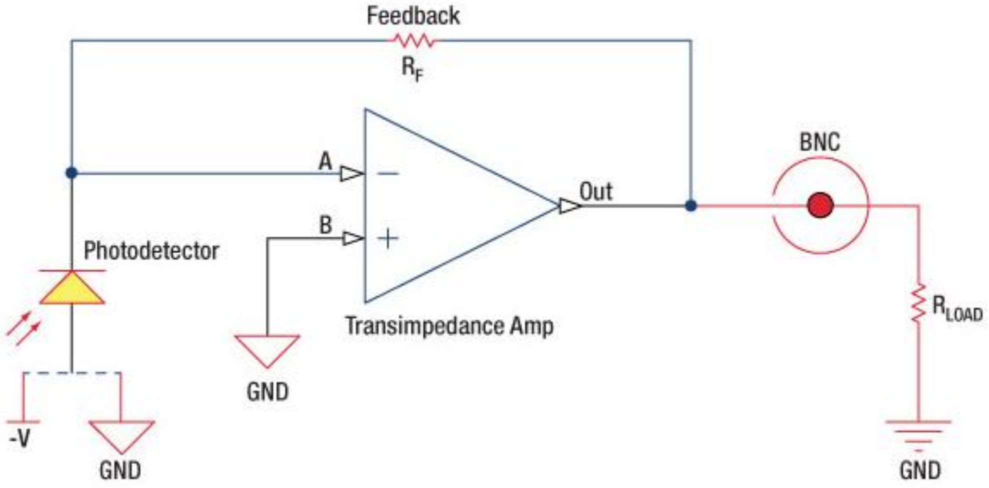
INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL
LEnsE
Laboratoire d'Enseignement Expérimental

PDA015C2 - InGaAs Fixed Gain Amplified Detector, 800 - 1700 nm, 380 MHz BW, 0.018mm^2, Universal 8-32 / M4 Mounting Holes

Responsivity | **Impulse Response** | Step Response | Frequency Response | S22 | Noise Spectrum | NEP



Click Here for Raw Data
The typical FWHM impulse response of the PDA015C2 receiver is 1 ns.

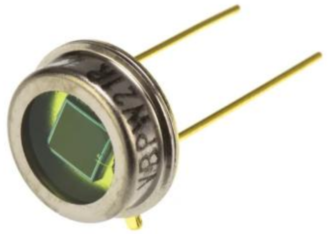


THORLABS

INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL

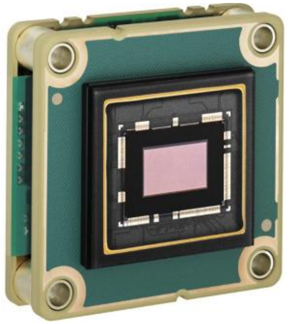
LEnsE Laboratoire d'Enseignement Expérimental

Photodétection



Définition et chaine d'acquisition

IDS Sensor



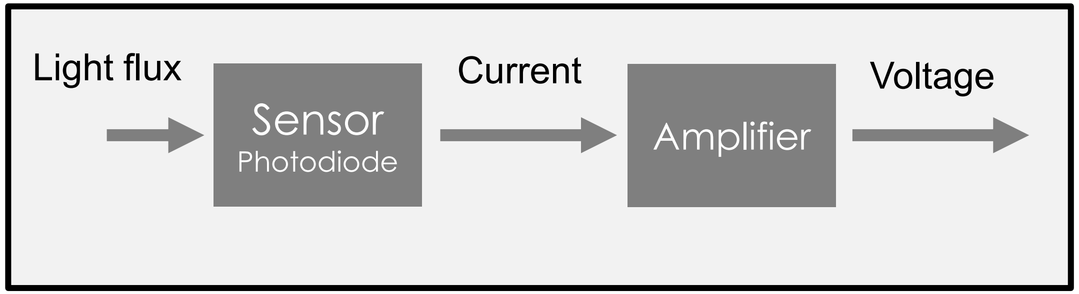
Basler Sensor / Mouser

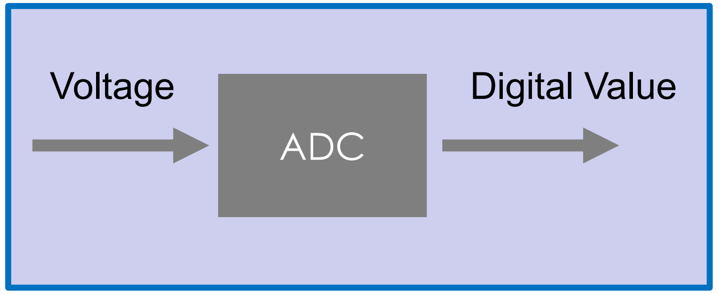
Photodétection

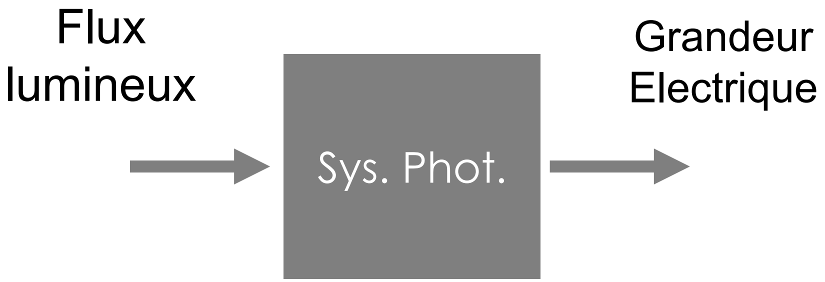
Système de photodétection

Système de photodétection

Convertir un signal lumineux (flux de photons) en un signal électrique mesurable





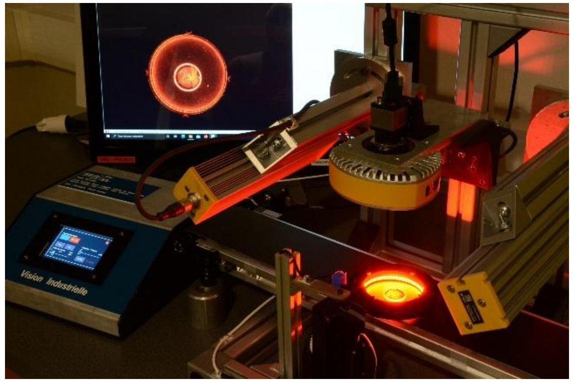


Photodétection

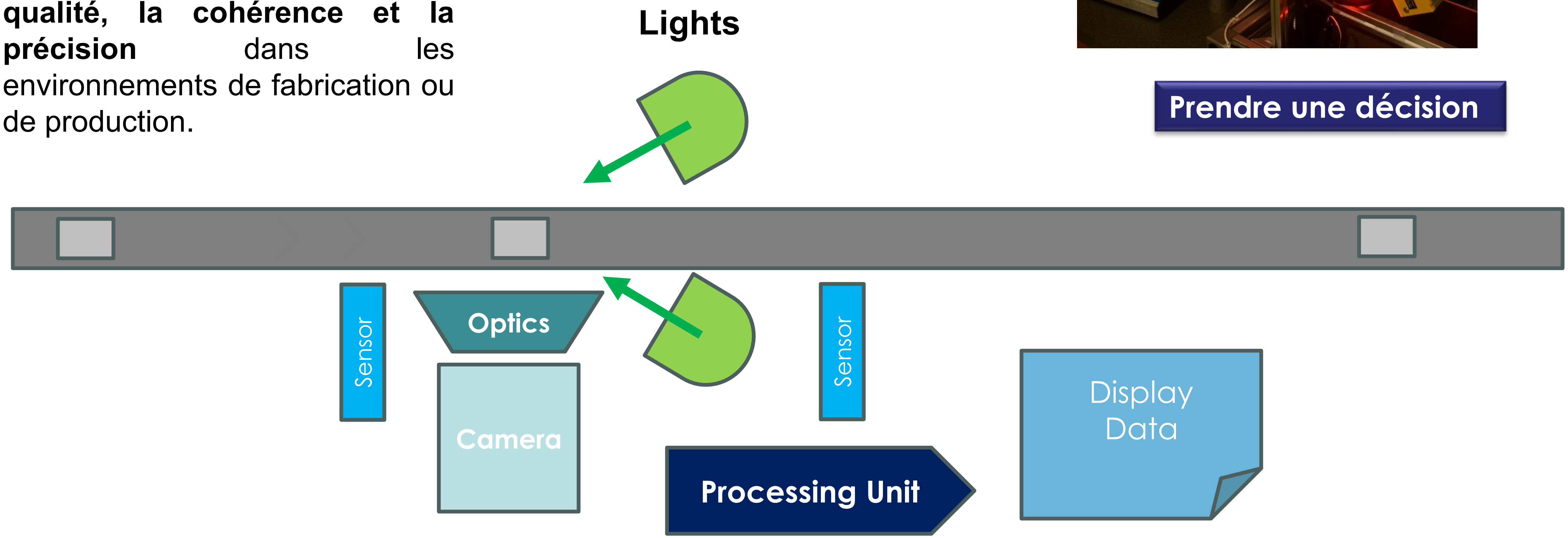
Système de photodétection

Système de vision industrielle

Automatiser le **processus d'inspection des produits** ou des matériaux afin de **garantir la qualité, la cohérence et la précision** dans les environnements de fabrication ou de production.



Prendre une décision



Photodétection

Système de phot. / Caractéristiques

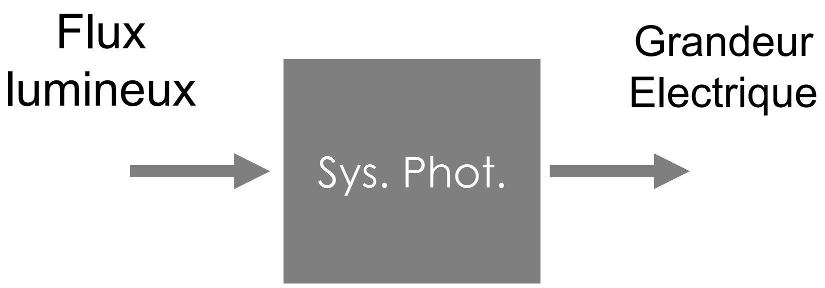
- **Sensibilité** : rapport entre le courant de sortie et la puissance optique incidente
- **Bruit** : fluctuations indésirables du signal électrique
    - *Bruit d'amplification*
    - *Bruit thermique (Johnson-Nyquist)*
    - *Bruit de photons*

- **Rapport signal à bruit** : mesure la qualité du signal détecté
- **Temps de réponse** : durée nécessaire pour que le signal atteigne un niveau stable après une variation
- **Bande passante** : fréquence maximale de modulation détectable

- **Courant d'obscurité** : courant généré par le détecteur en l'absence de lumière
- **Stabilité et linéarité**

Système de photodétection

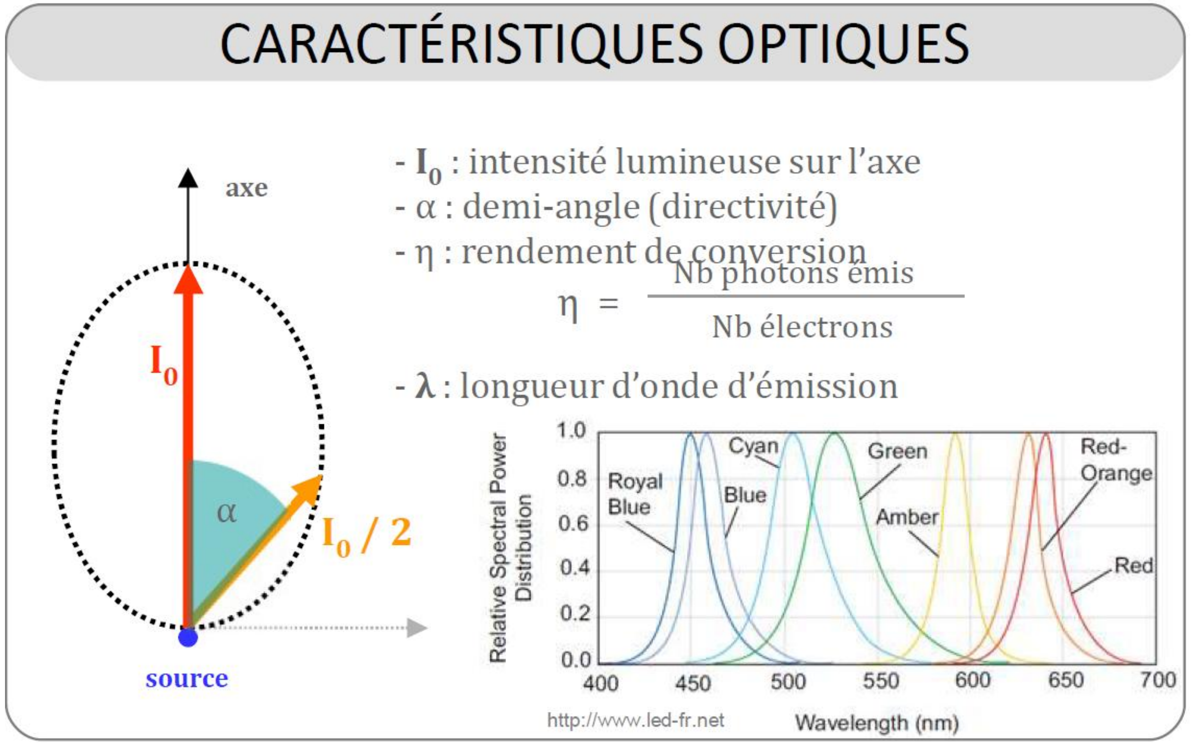
Convertir un signal lumineux (flux de photons) en un signal électrique mesurable



Photodétection

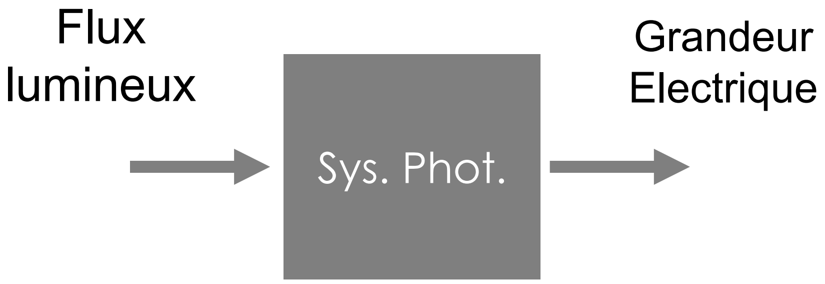
Système de phot. / Caractéristiques

- **Bande spectrale de réponse** : domaine de longueurs d'onde pour lesquelles le détecteur est sensible
- **Efficacité quantique** : fraction de photons incidents qui génèrent effectivement un électron
- **Taille active** : détermine la quantité de lumière collectée



Système de photodétection

Convertir un signal lumineux (flux de photons) en un signal électrique mesurable

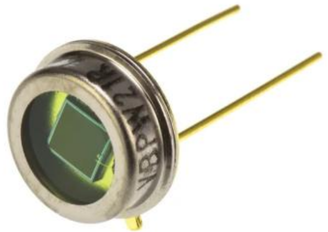


LEnsE

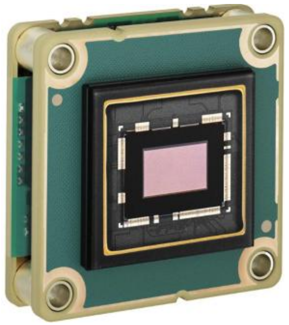
Laboratoire d'Enseignement Expérimental

LEDs / Photodiodes

Caractéristiques des diodes



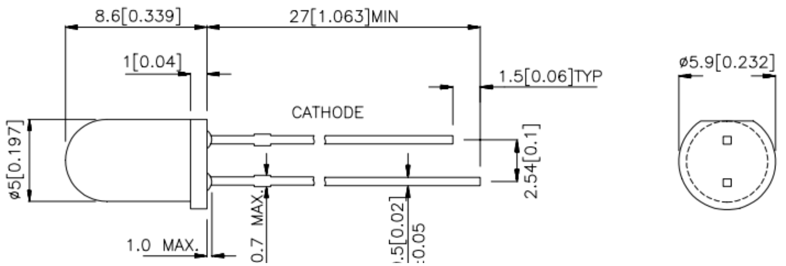
IDS Sensor



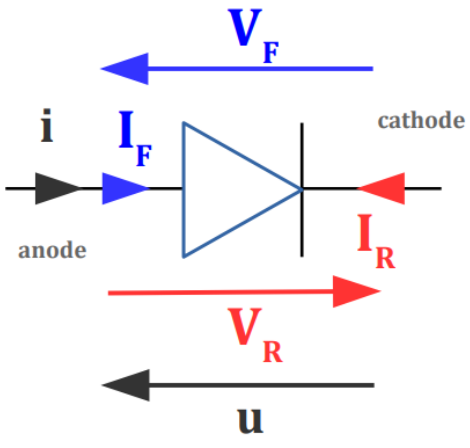
Basler Sensor / Mouser

Diode

Dipôle **non linéaire** et **polarisé**



DIODE



I_F : **courant direct**

souvent $I_F < I_{FMAX}$

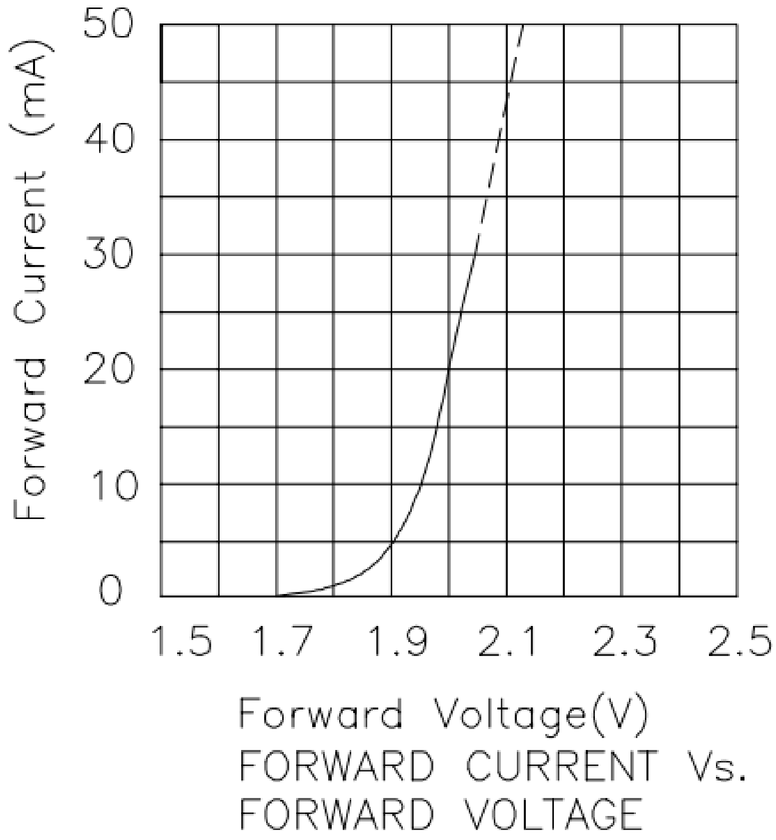
V_F : **tension directe**

aussi appelée seuil

I_R : **courant inverse**

V_R : **tension inverse**

souvent $V_R < V_{RMAX}$



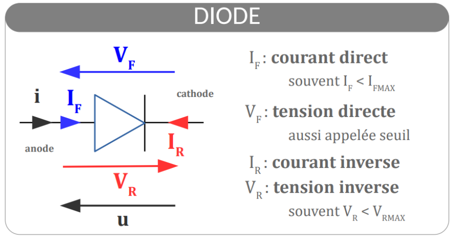
High Efficiency Red **L-53ID**

Diode

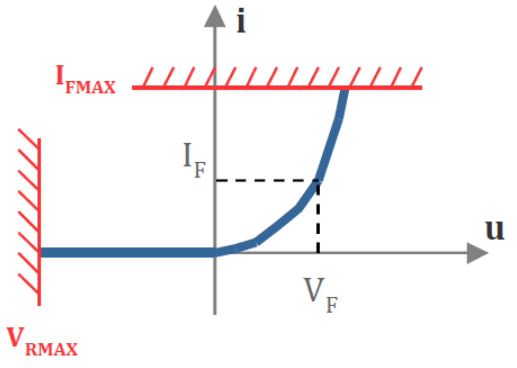
Caractéristique statique

Diode

Dipôle **non linéaire** et **polarisé**



MODÈLE COMPLET



Si u > 0, diode **passante**

$$i = I_0 \left[\exp(u / n.V_0) - 1 \right]$$

loi exponentielle

V_0 : tension thermique

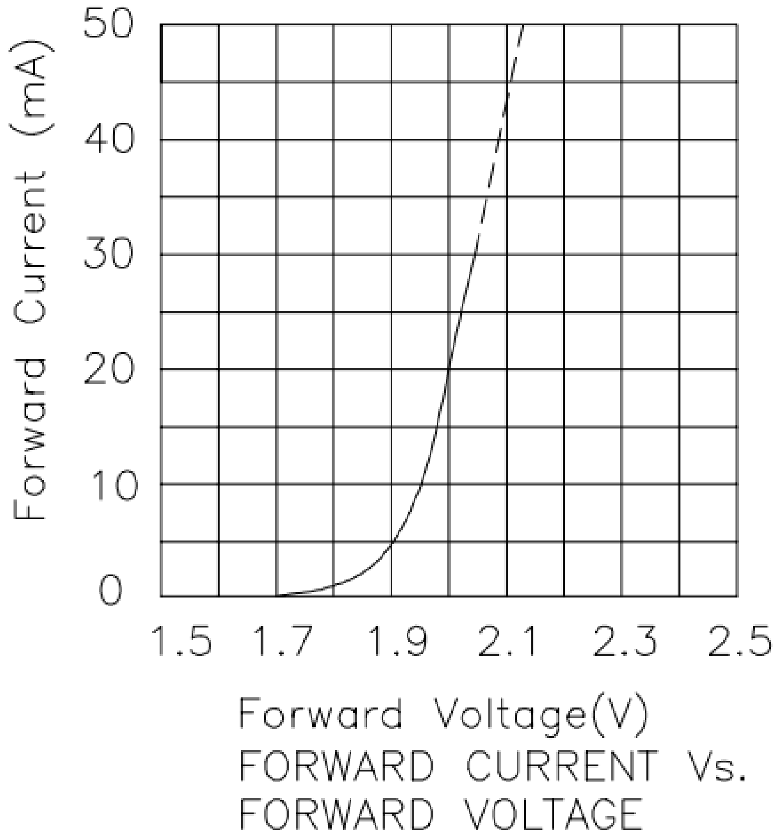
V_0 $= k.T / e$ — T : température (K) ; k : Constante de Boltzmann ; e : charge d'un électron

n : facteur de qualité

I_0 : constante spécifique à un type

$e = -1{,}602 \times 10^{-19}$ C

$k = 1{,}38064852 . 10^{-23}$ J/K



High Efficiency Red **L-53ID**

Photodiode

Caractéristique statique

Photodiode

Dipôle **non linéaire** et **polarisé,** ayant la **capacité de capter un rayonnement du domaine optique** et de le **transformer en signal électrique**

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_j}{n V_0} \right) - 1 \right]$$

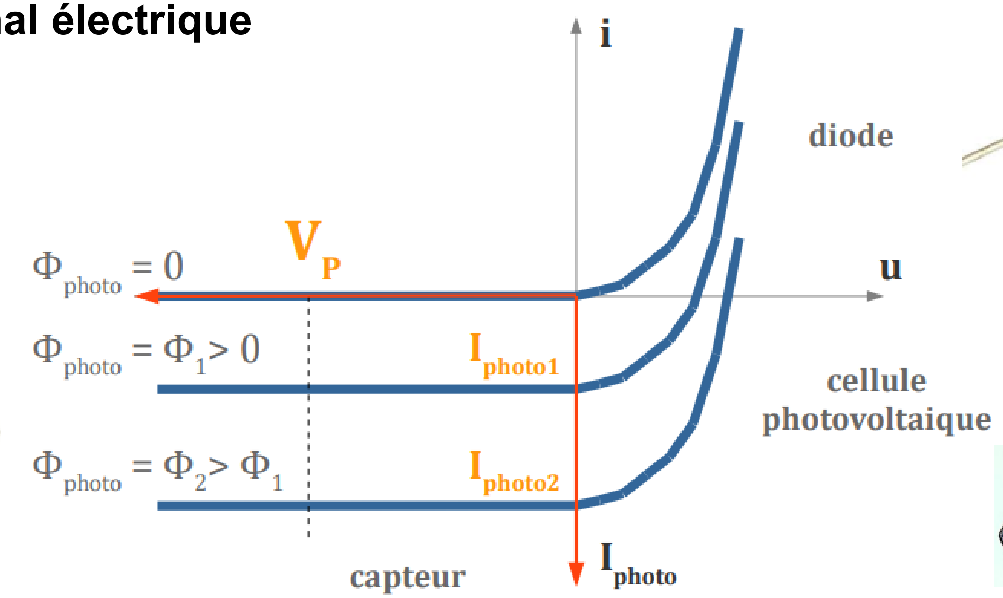
A   A/W   W

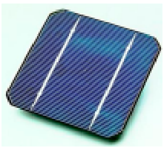
$$I_{photo} = S_\lambda \, . \, \eta \, . \, \Phi_{photo}$$

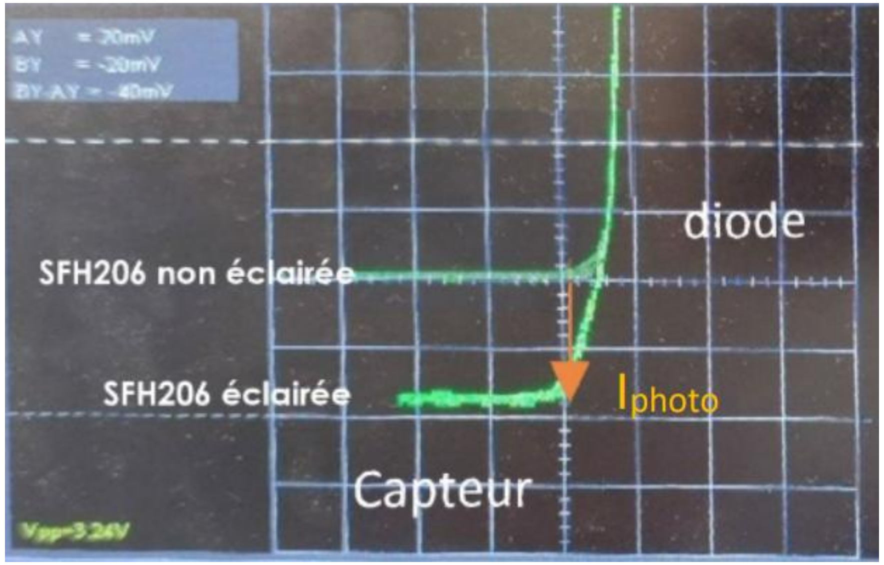
Sensibilité spectrale

Rendement quantique

Flux lumineux





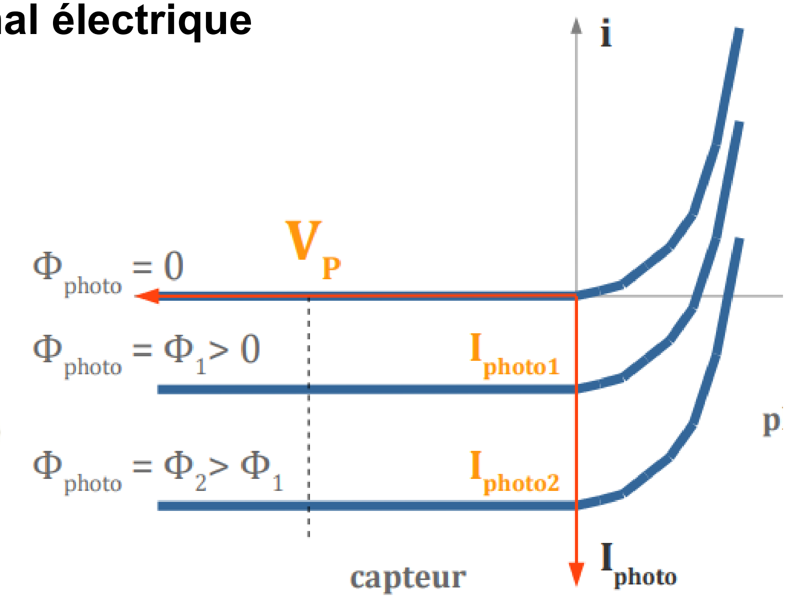


Photodiode

Caractéristique statique

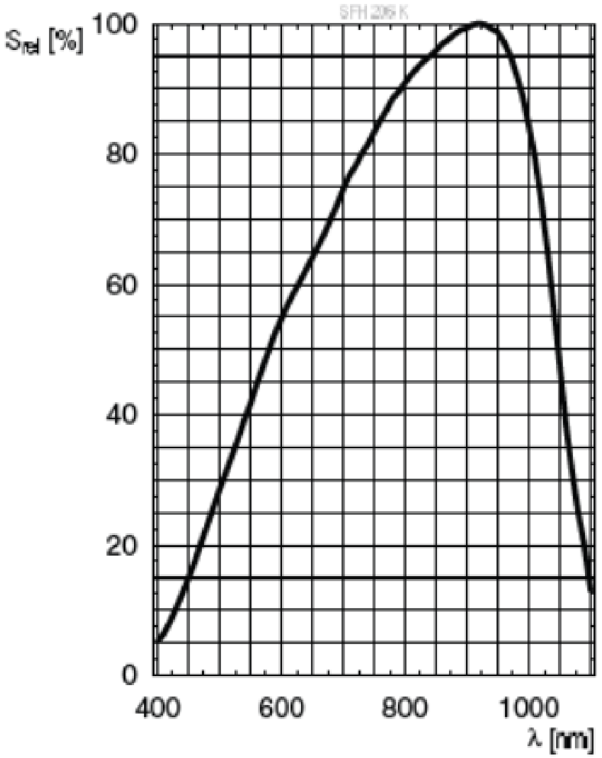
Photodiode

Dipôle **non linéaire** et **polarisé,** ayant la **capacité de capter un rayonnement du domaine optique** et de le **transformer en signal électrique**



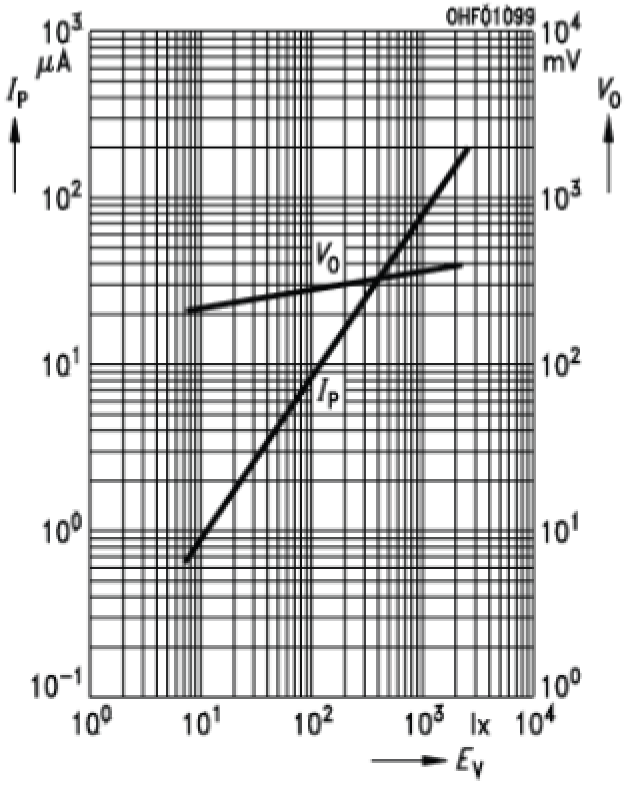
SFH 206 K

Relative Spectral Sensitivity



Photocurrent/Open-Circuit Voltage

I_P (V_R = 5 V) / V_O = f (E_v)

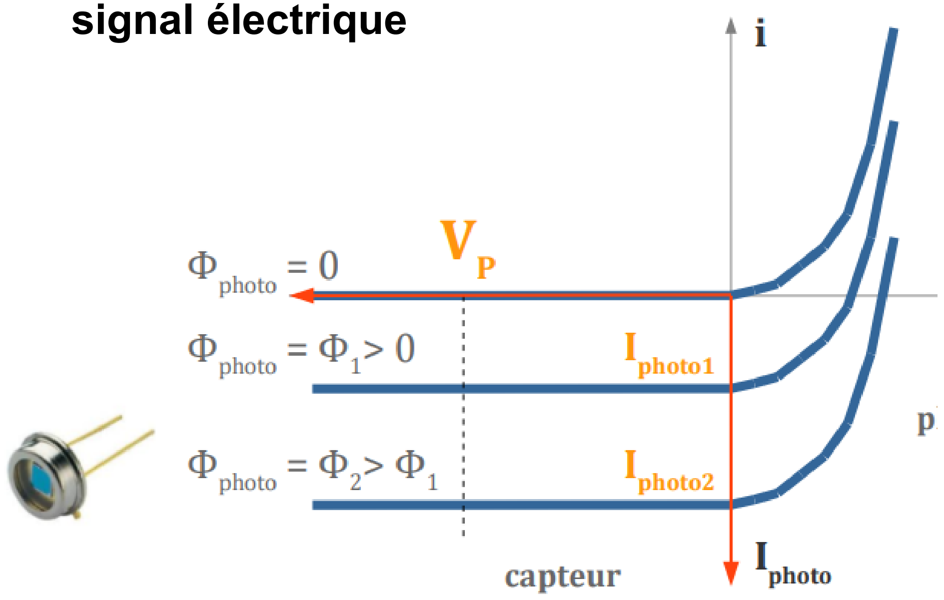


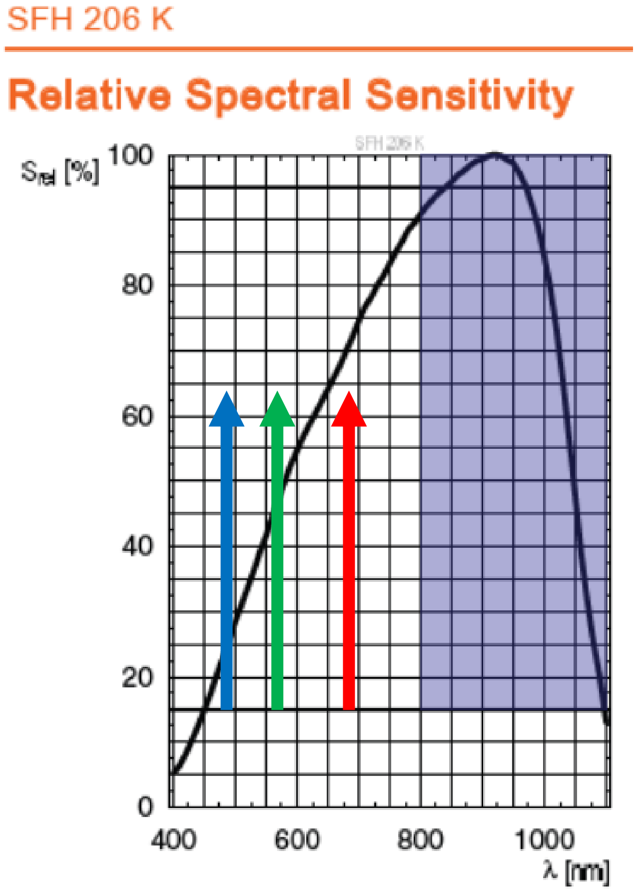
Photodiode

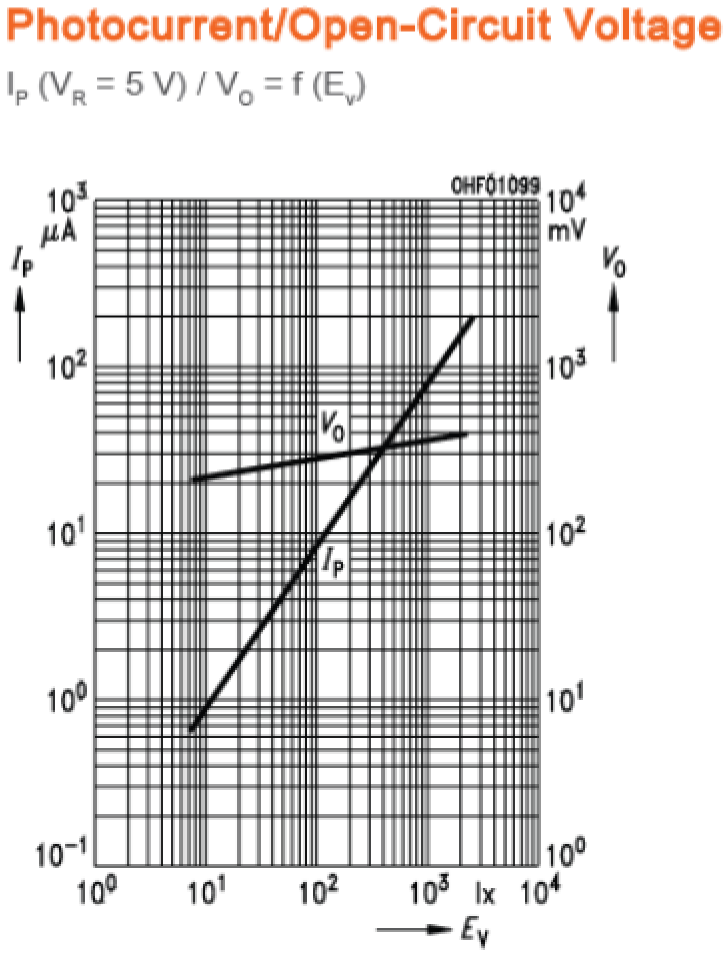
Caractéristique statique

Photodiode

Dipôle **non linéaire** et **polarisé,** ayant la **capacité de capter un rayonnement du domaine optique** et de le **transformer en signal électrique**



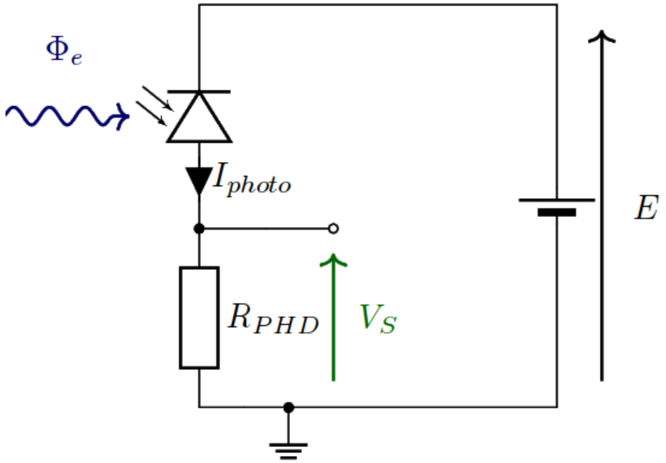




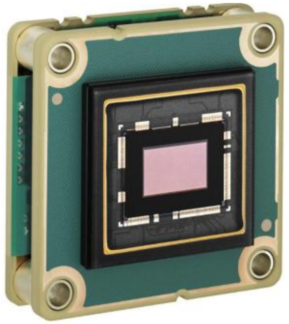
LEnsE
Laboratoire d'Enseignement Expérimental

Montage de photodétection

Montage « simple »



IDS Sensor



Basler Sensor / Mouser

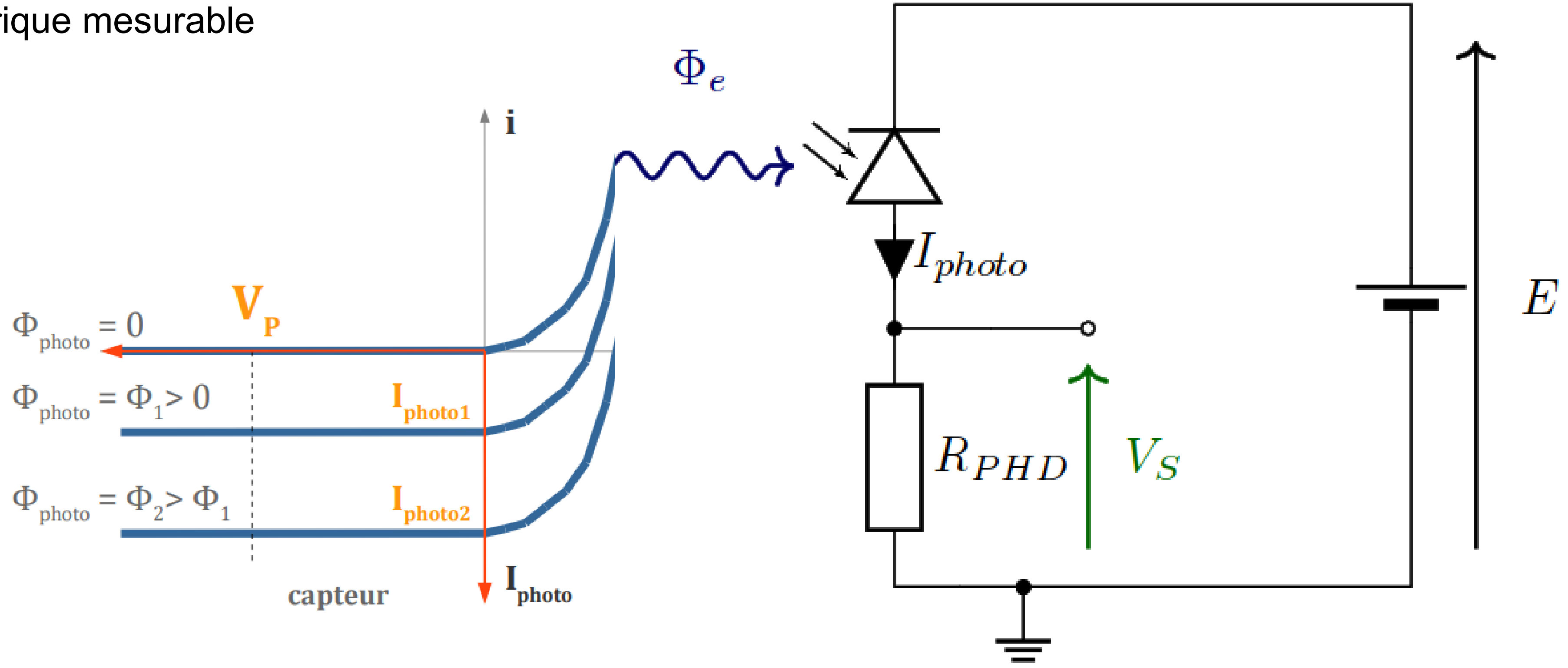
Système de photodétection

Version « simple »

Montage de photodétection

$$V_s = R_{PHD} \cdot I_{photo} = R_{PHD} \cdot k \cdot \Phi_e$$

Convertir un signal lumineux (flux de photons) en un signal électrique mesurable



Système de photodétection

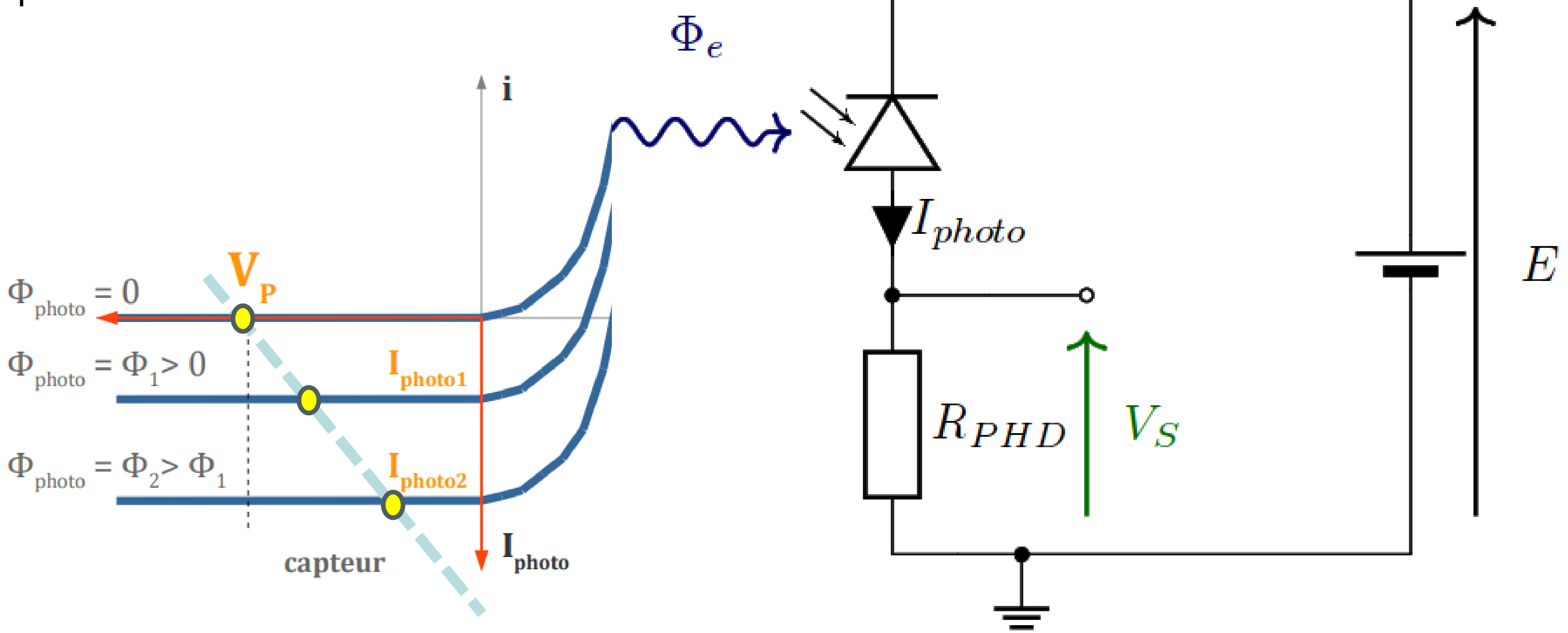
Version « simple »

Montage de photodétection

Convertir un signal lumineux (flux de photons) en un signal électrique mesurable

$$V_s = R_{PHD} \cdot I_{photo} = R_{PHD} \cdot k \cdot \Phi_e$$

Tension de polarisation non constante



Système de photodétection

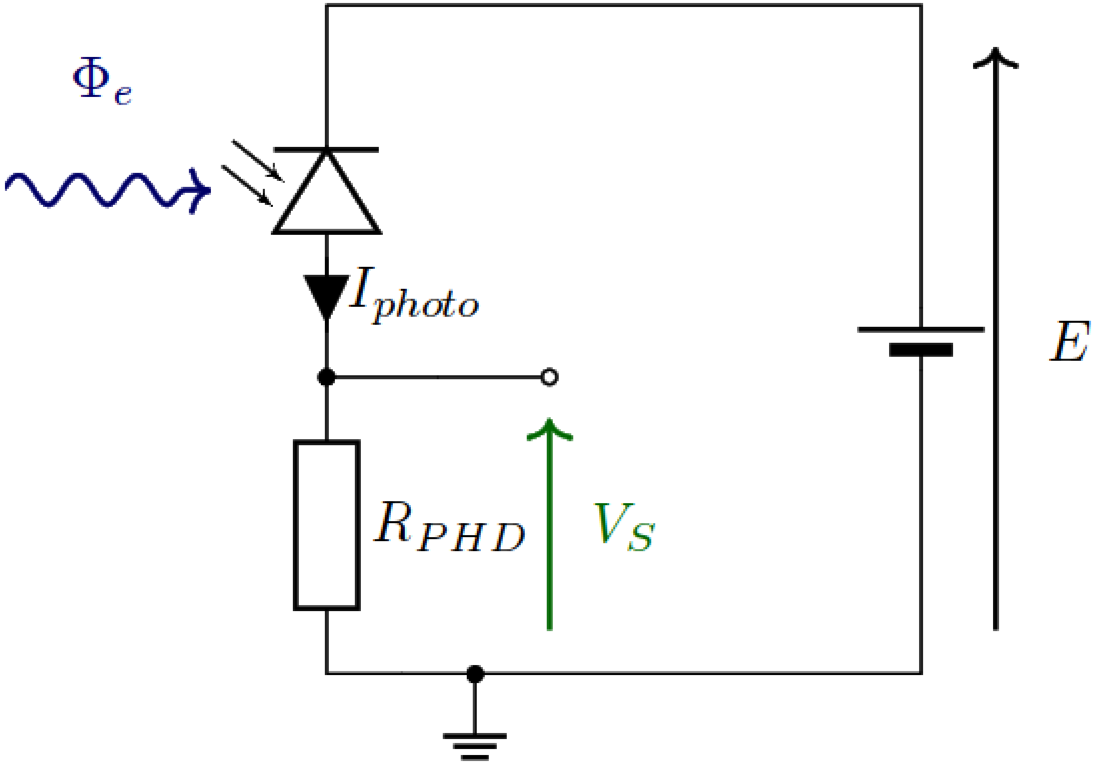
Version « simple » / En pratique

Montage de photodétection

Convertir un signal lumineux (flux de photons) en un signal électrique mesurable

$$V_s = R_{PHD} \cdot I_{photo} = R_{PHD} \cdot k \cdot \Phi_e$$

MODELE NON VALIDE !!



INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL

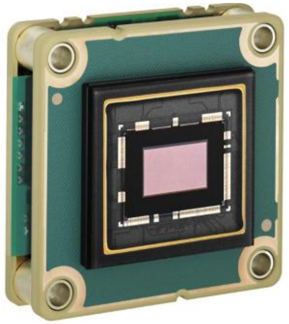
LEnsE

Laboratoire d'Enseignement Expérimental

LEDs

Caractéristiques

IDS Sensor



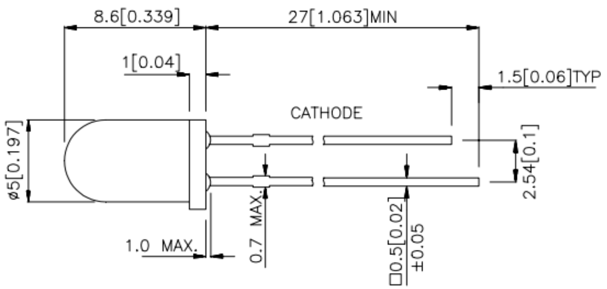
Basler Sensor / Mouser

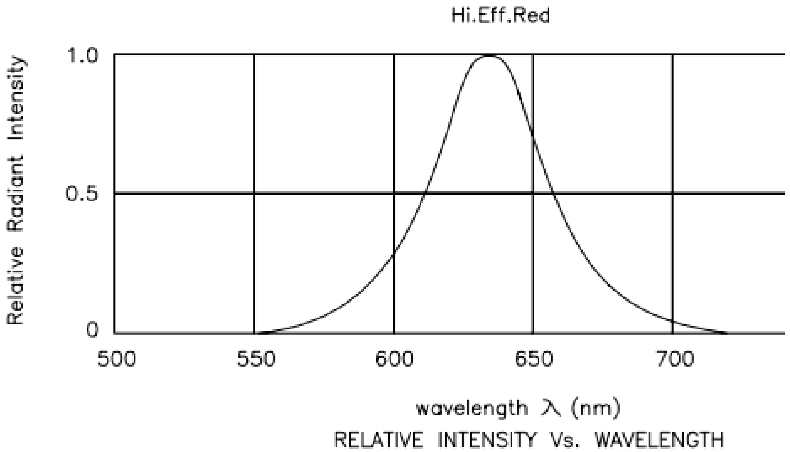
LED

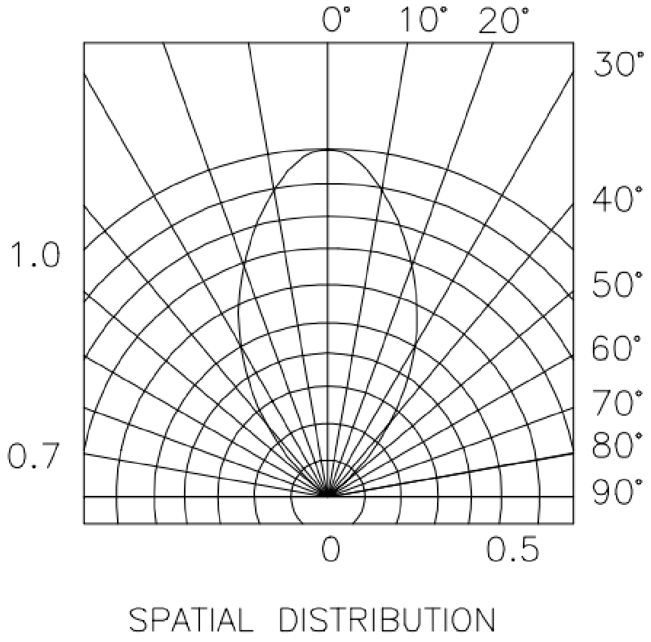
Caractéristique statique

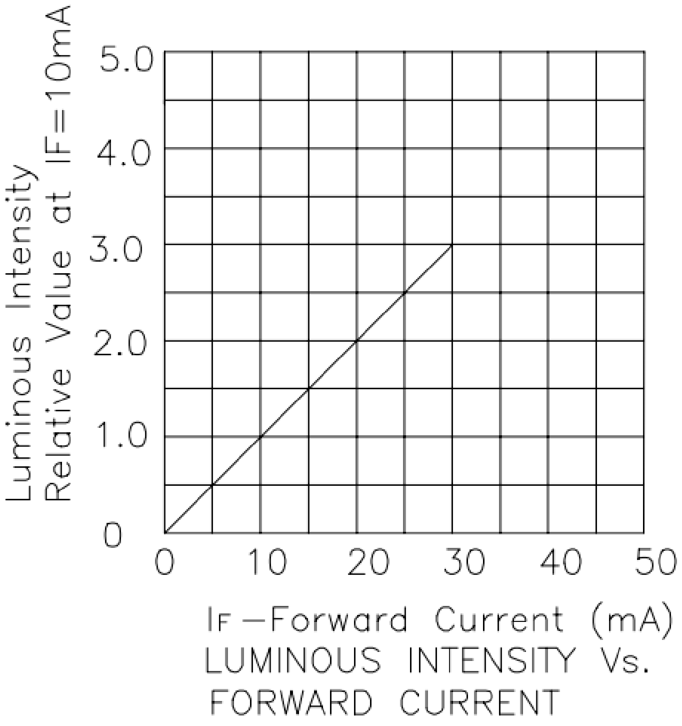
LED

Dipôle **non linéaire** et **polarisé** capable **d'émettre de la lumière** lorsqu'il est parcouru par un courant électrique









High Efficiency Red **L-53ID**

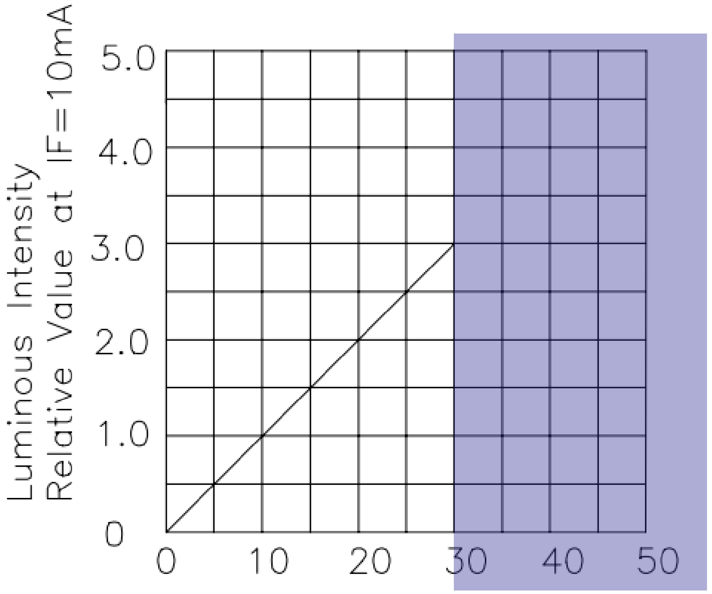
Utilisation et limites d'utilisation

LED

Absolute Maximum Ratings at T_A=25°C

Parameter	High Efficiency Red	Units
Power dissipation	105	mW
DC Forward Current	30	mA
Peak Forward Current [1]	160	mA
Reverse Voltage	5	V
Operating/Storage Temperature	-40°C To +85°C	
Lead Solder Temperature [2]	260°C For 5 Seconds	

Notes:
1. 1/10 Duty Cycle, 0.1ms Pulse Width.
2. 2mm below package base.



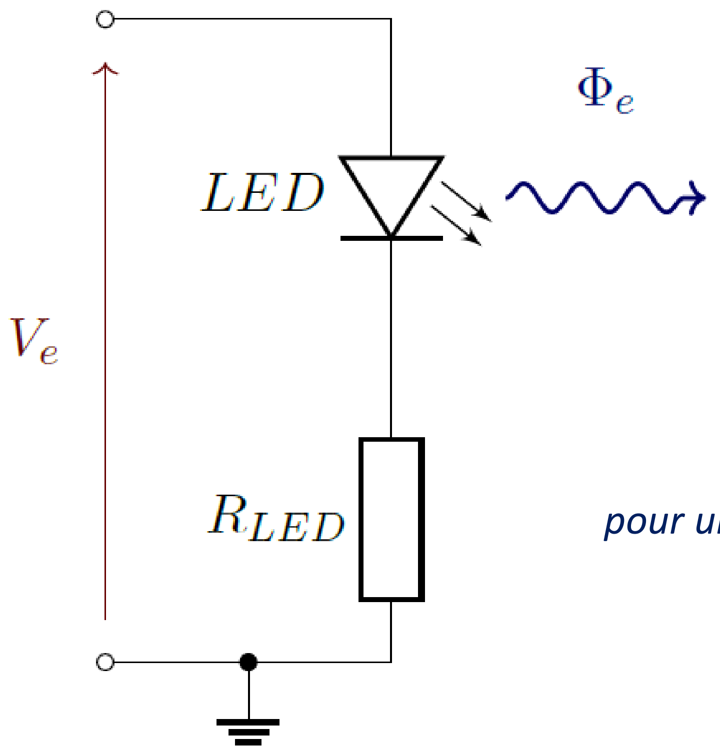
LUMINOUS INTENSITY Vs. FORWARD CURRENT

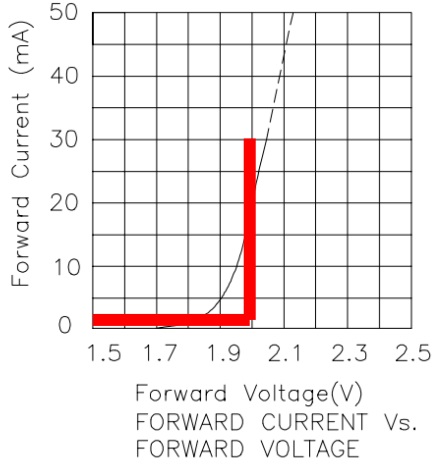
Kingbright

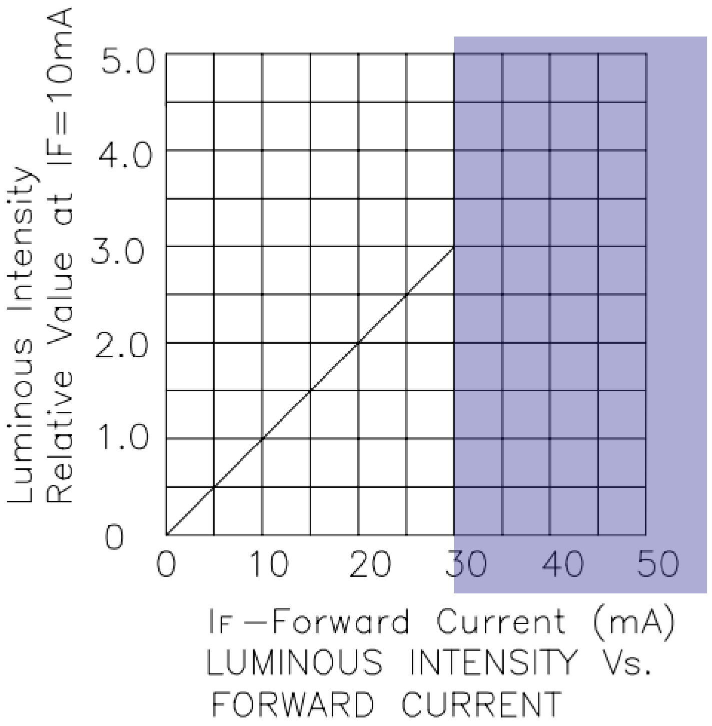
High Efficiency Red **L-53ID**

Utilisation et limites d'utilisation

LED







pour une LED Rouge Standard

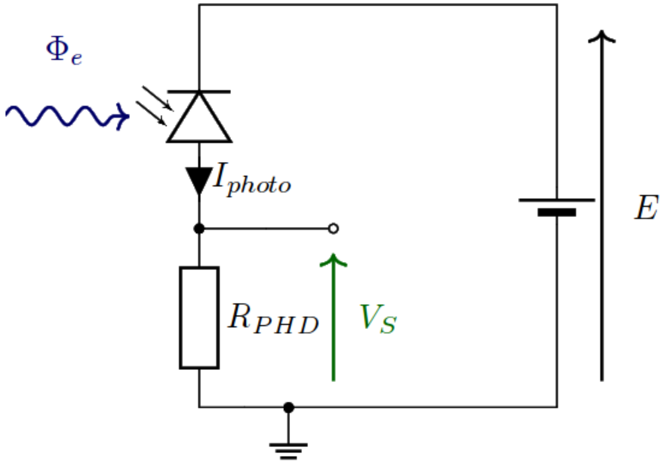
Vf = 2V

If_{MAX} = *30 mA*

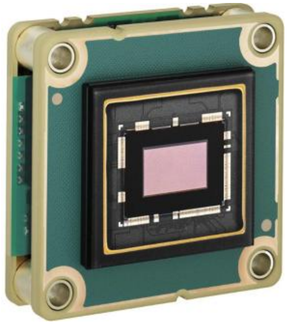
High Efficiency Red **L-53ID**

Montage de photodétection

Montage « simple » et modélisation



IDS Sensor



Basler Sensor / Mouser

Système de photodétection

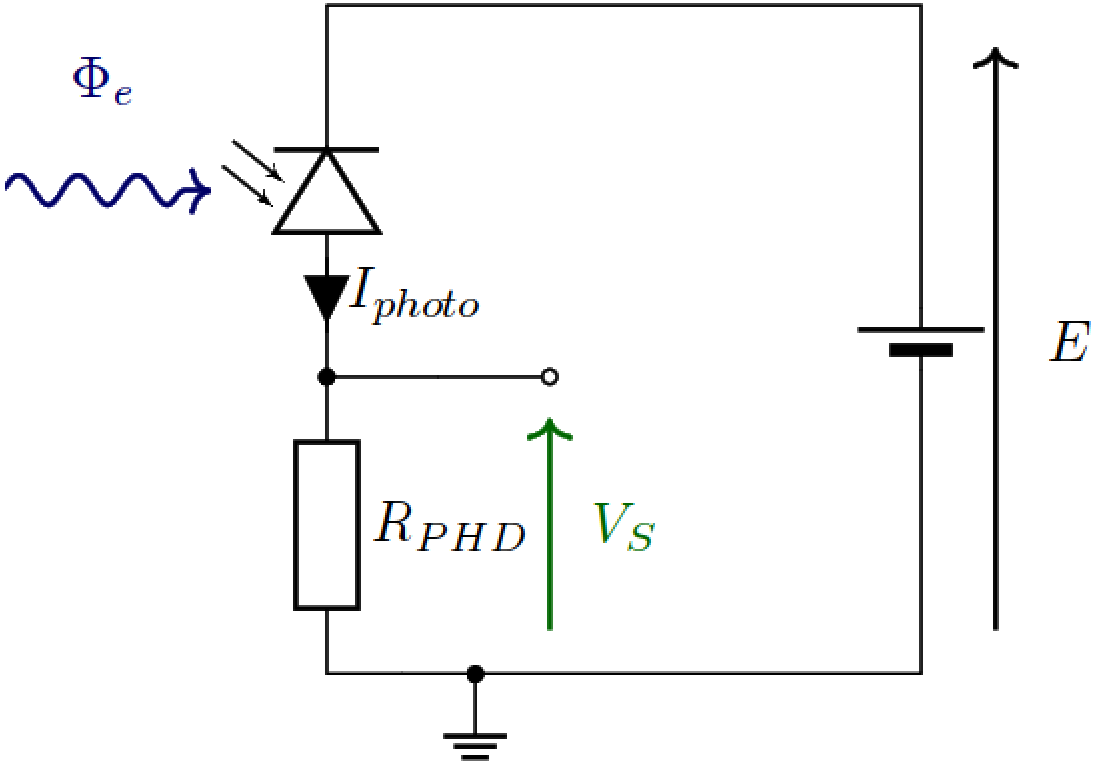
Version « simple » / En pratique

Montage de photodétection

Convertir un signal lumineux (flux de photons) en un signal électrique mesurable

$$V_s = R_{PHD} \cdot I_{photo} = R_{PHD} \cdot k \cdot \Phi_e$$

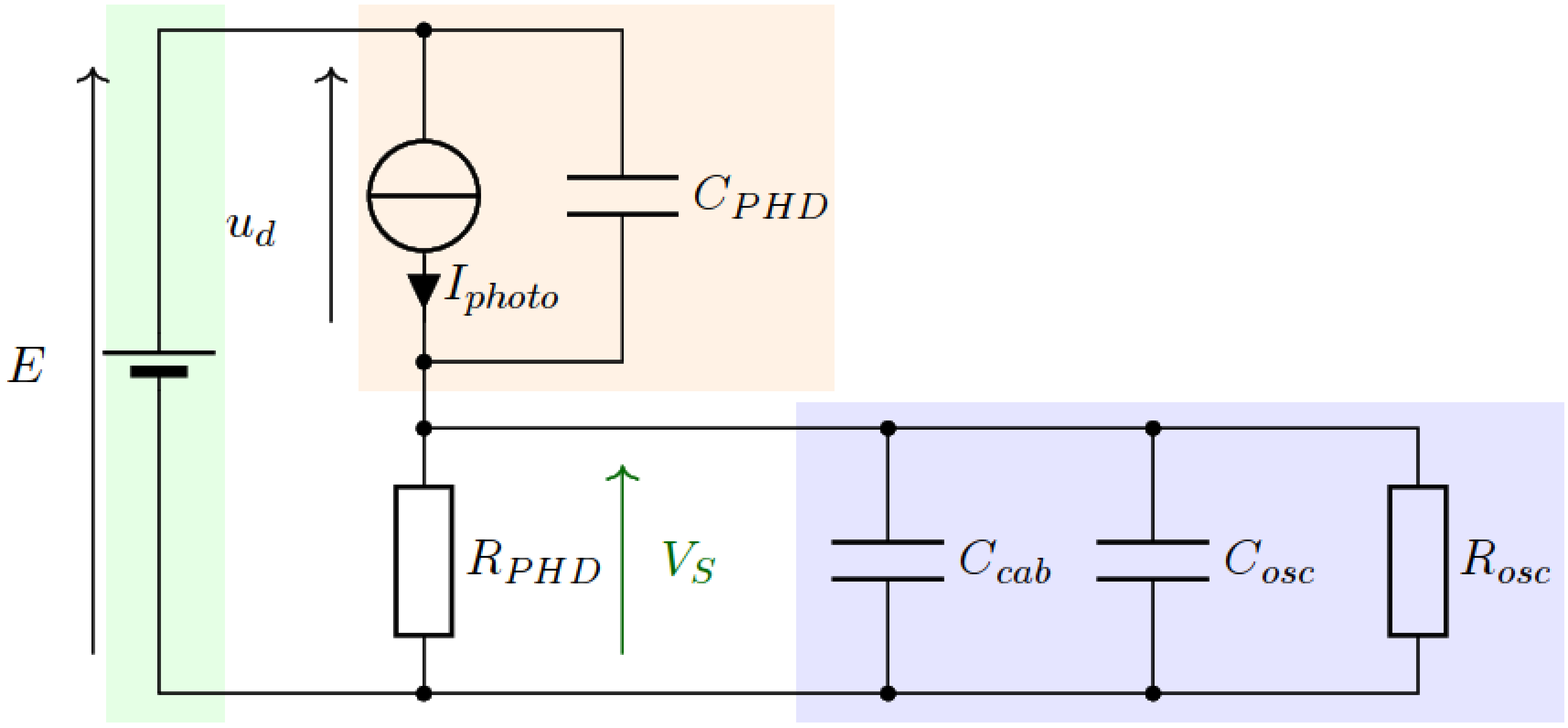
MODELE NON VALIDE !!



Système de photodétection

Version « simple » / Modélisation

Modélisation

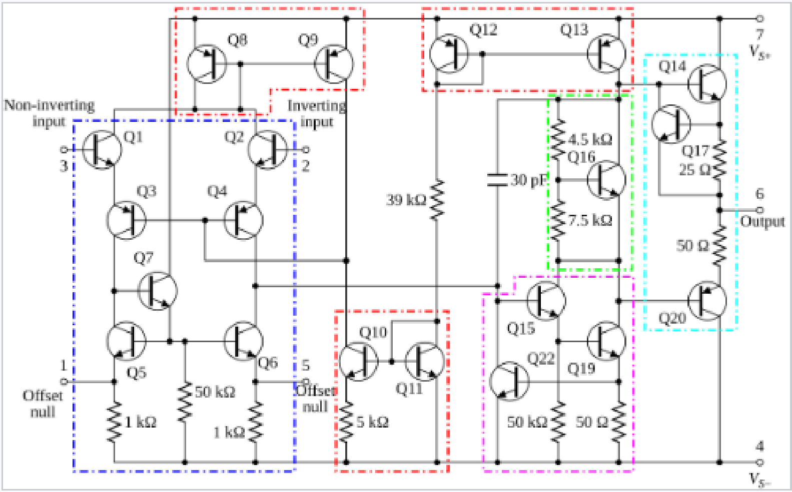


INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL

LEnsE Laboratoire d'Enseignement Expérimental

Amplificateur linéaire

Adaptation d'impédance et transimpédance

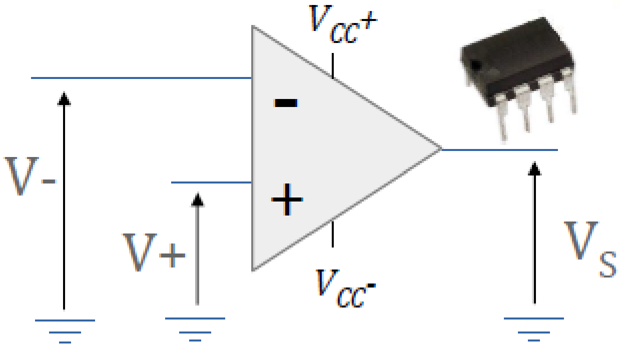


Amplificateur Linéaire Intégré

Fonction de transfert / Caractéristiques

ALI / AOP

Composant actif, **amplificateur différentiel** à grand gain



FONCTION DE TRANSFERT

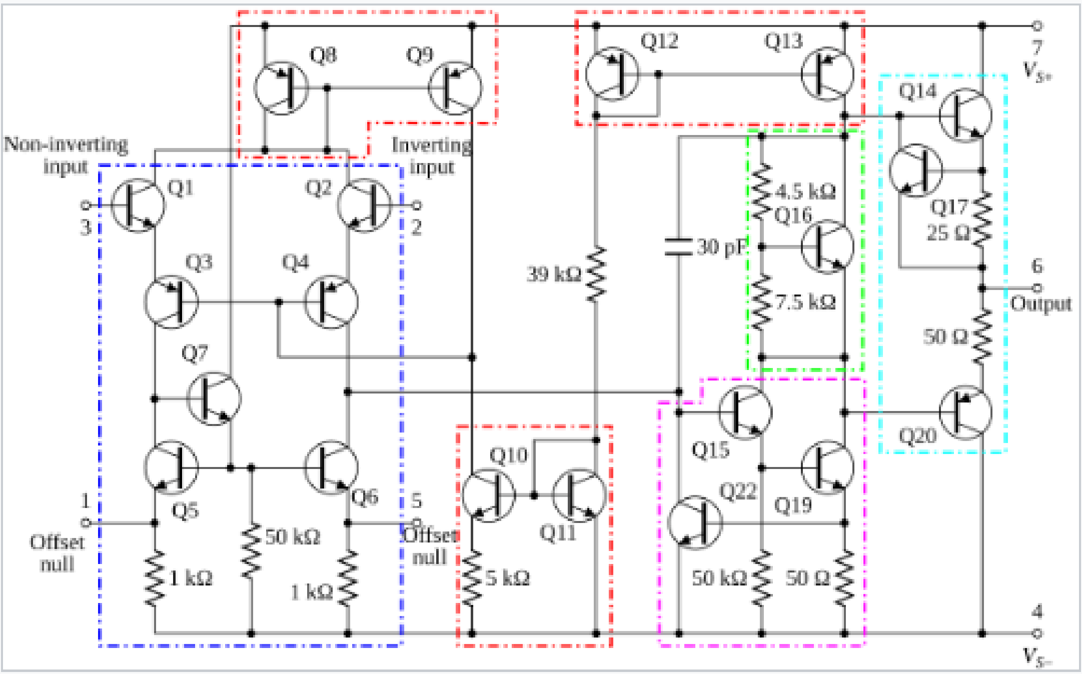
$$V_S = A \cdot (V+ \ - \ V-)$$

avec $10^5 < A < 10^7$

Saturation à $Vs = V_{CC}+$

Impédance d'entrée élevée

▶ $i+ = i- = 0$

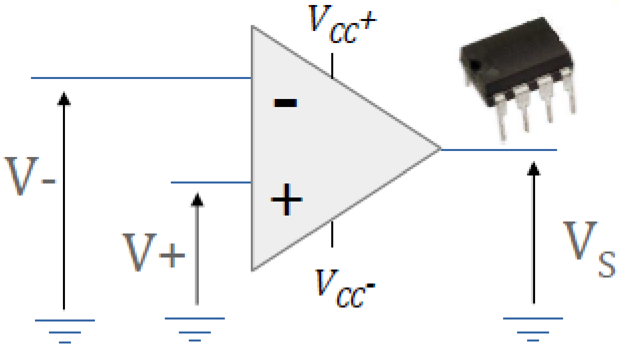


Amplificateur Linéaire Intégré

Fonction de transfert / Caractéristiques

ALI / AOP

Composant actif, **amplificateur différentiel** à grand gain



FONCTION DE TRANSFERT

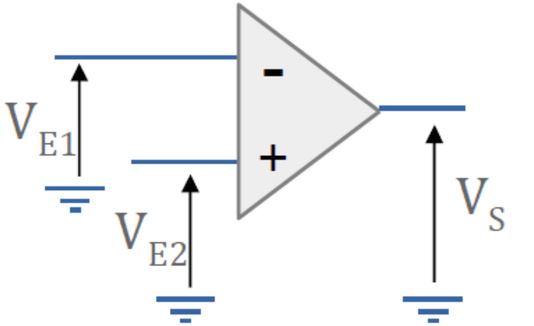
$$V_S = A . (V+ - V-)$$

avec $10^5 < A < 10^7$

Saturation à $Vs = V_{cc}+$

Fonctionnement non-linéaire

COMPARATEUR SIMPLE



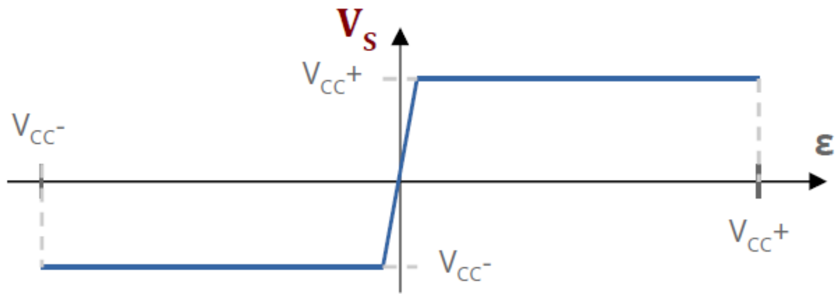
$V_S = V_{CC}+$

Si $V_{E2} > V_{E1}$

$V_S = V_{CC}-$

Si $V_{E1} > V_{E2}$

Caractéristique $Vs = f(\varepsilon)$ avec $\varepsilon = V+ - V-$

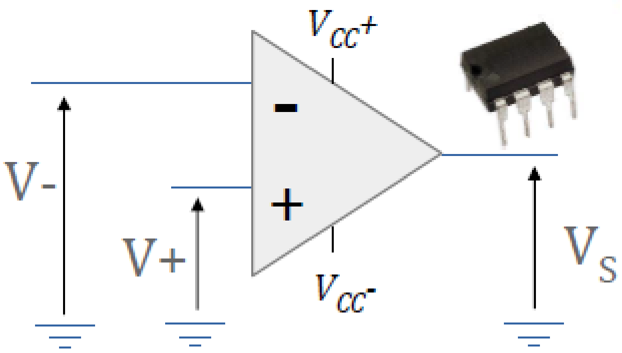


Amplificateur Linéaire Intégré

Fonction de transfert / Caractéristiques

ALI / AOP

Composant actif, **amplificateur différentiel** à grand gain



FONCTION DE TRANSFERT

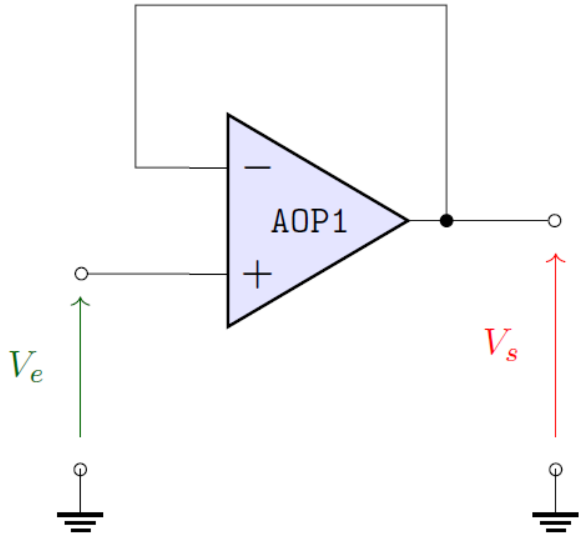
$$V_S = A\,.\,(V+ \;-\; V-)$$

avec $10^5 < A < 10^7$

Saturation à $Vs = V_{CC}+$

Fonctionnement linéaire

Si contre-réaction négative (via un dipôle)



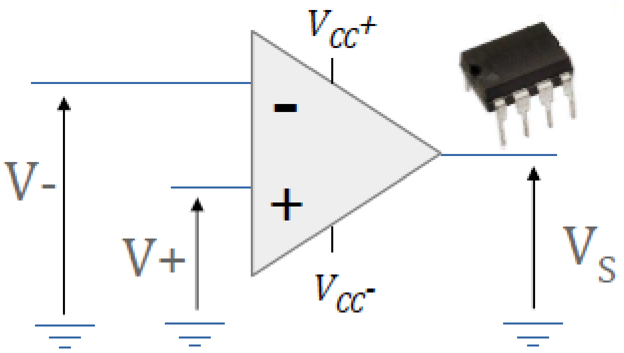
$$V_s = A.(V_e - V_s) \;\blacktriangleright\; \frac{V_s}{V_e} = \frac{A}{A+1}$$

Amplificateur Linéaire Intégré

Fonction de transfert / Caractéristiques

ALI / AOP

Composant actif, **amplificateur différentiel** à grand gain



FONCTION DE TRANSFERT

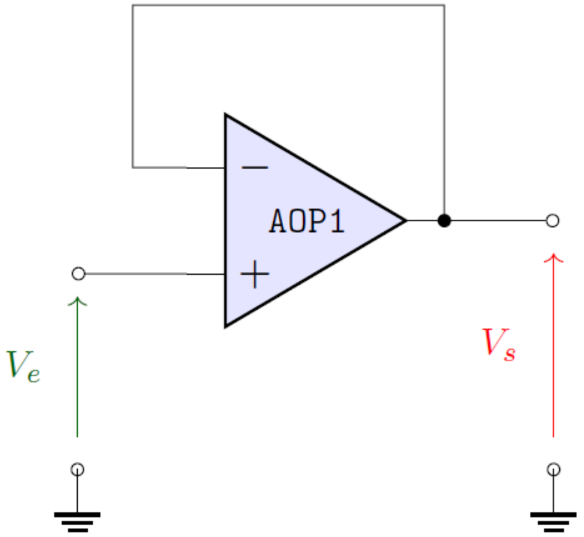
$$V_S = A \,.\, (V+ \; - \; V-)$$

avec $10^5 < A < 10^7$

Saturation à $Vs = V_{cc}+$

Fonctionnement linéaire

Si contre-réaction négative (via un dipôle)



$$\boxed{V_s = V_e}$$

▶ V+ = V-

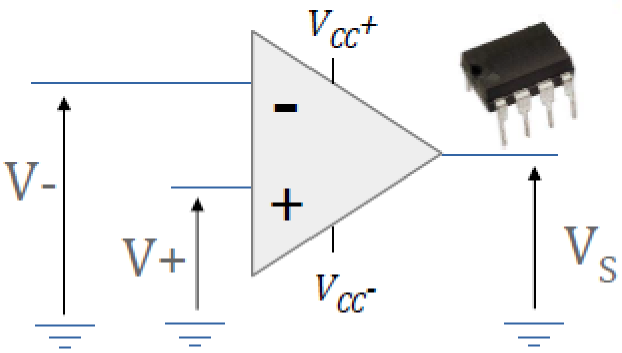
Hypothèse à vérifier…

Amplificateur Linéaire Intégré

Fonction de transfert / Bande-passante

ALI / AOP

Composant actif, **amplificateur différentiel** à grand gain



FONCTION DE TRANSFERT

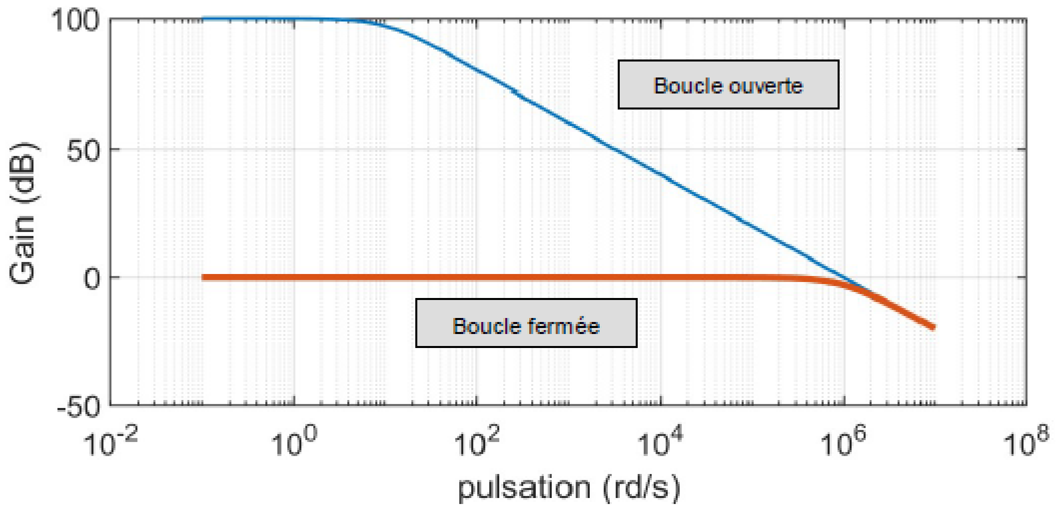
$$V_S = A\,.\,(V+ \; - \; V-)$$

avec $10^5 < A < 10^7$

Saturation à $Vs = V_{cc}+$

RÉPONSE EN FRÉQUENCE

Exemple d'un ALI ayant un produit gain – bande-passante GBW = 1 MHz et une amplification différentielle de 10^5 (identique ci-contre) et le rebouclage en mode suiveur.



Propriété des montages à ALI

▶ A.BP = cte

où A est l'amplification du montage et BP la bande passante du montage

Amplificateur Linéaire Intégré

Fonction de transfert / Boucle fermée

ALI / AOP

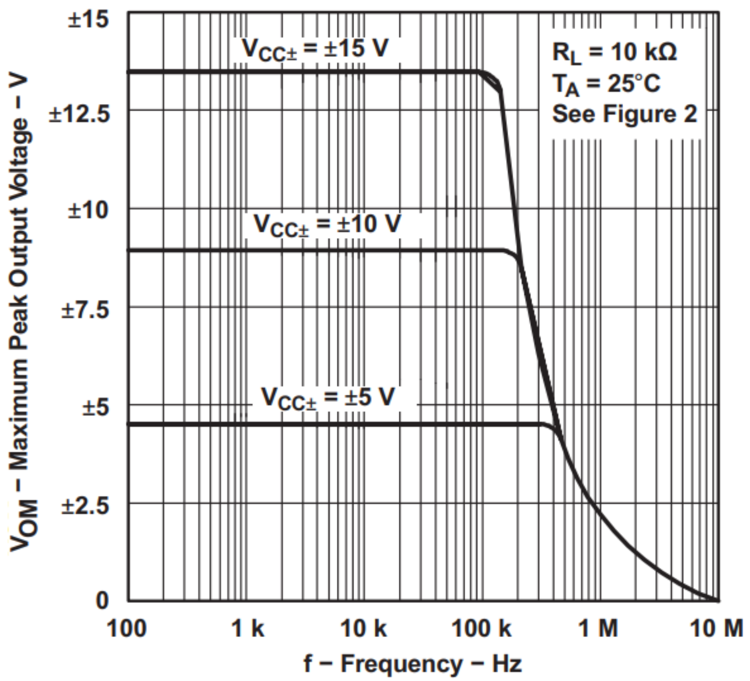
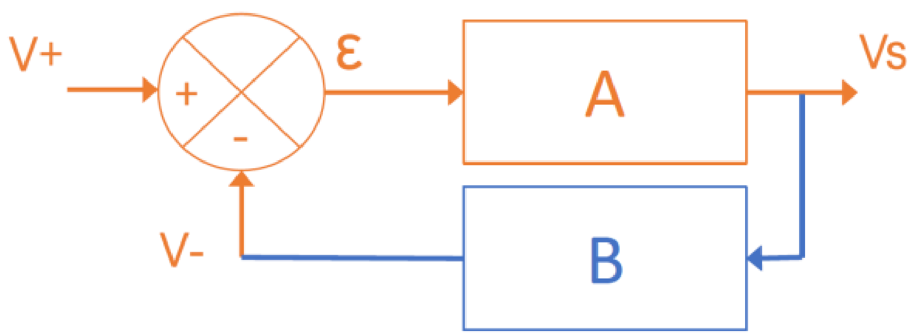


Figure 6-41. Maximum Peak Output Voltage vs Frequency

$$A(j\omega) = \frac{A_{MAX}}{1 + j\dfrac{\omega}{\omega_c}}$$

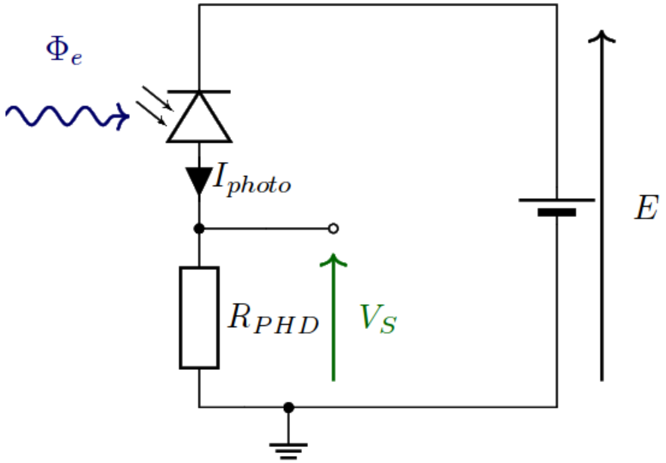


INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL

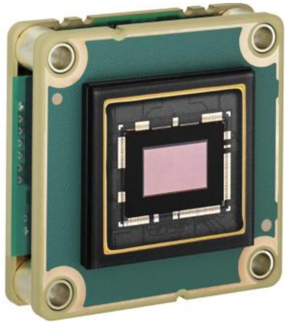
LEnsE Laboratoire d'Enseignement Expérimental

Montage de photodétection

Amélioration des performances



IDS Sensor



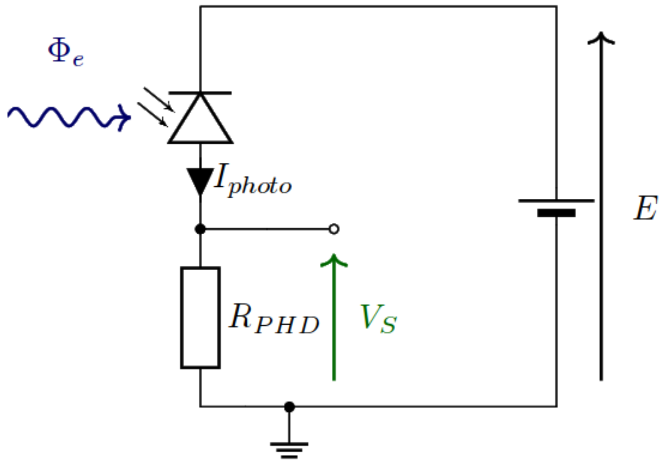
Basler Sensor / Mouser

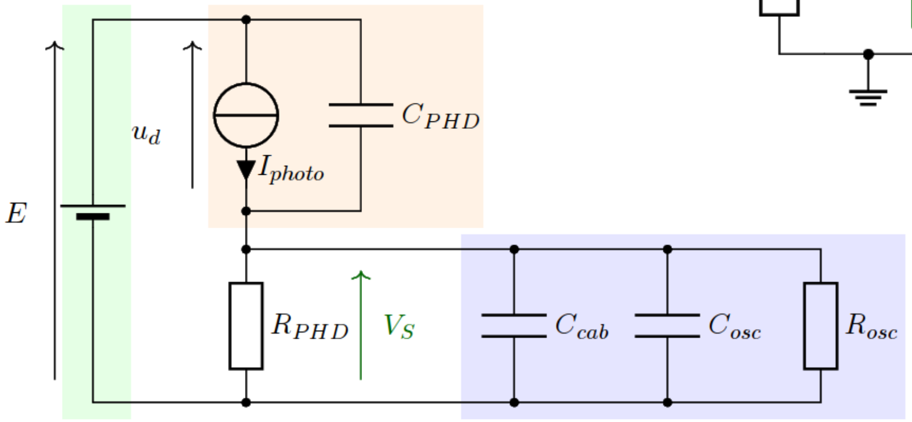
Système de photodétection

Version « simple » / En pratique

Montage de photodétection

Convertir un signal lumineux (flux de photons) en un signal électrique mesurable

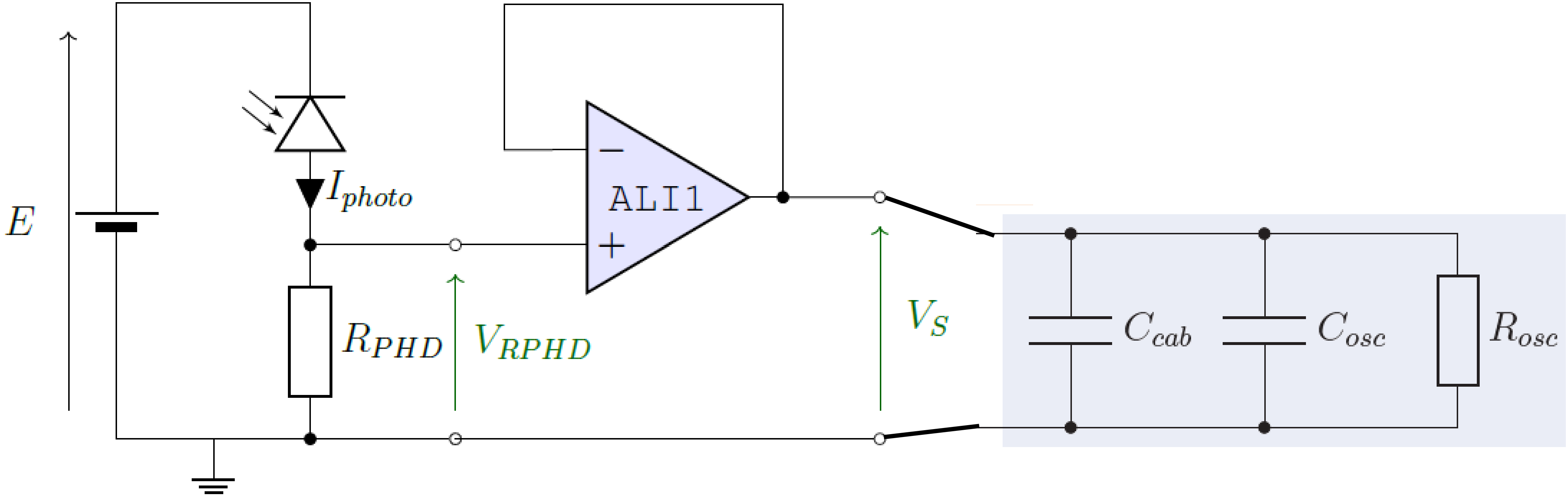




Système de photodétection

Version « suiveur »

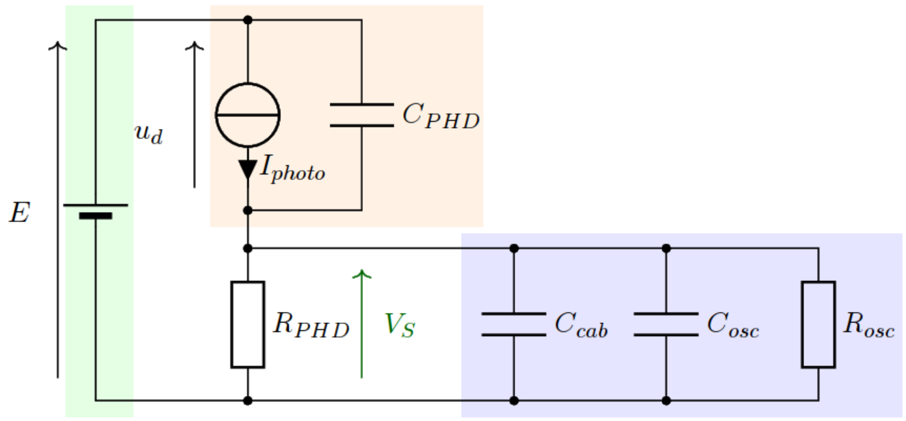
Montage de photodétection

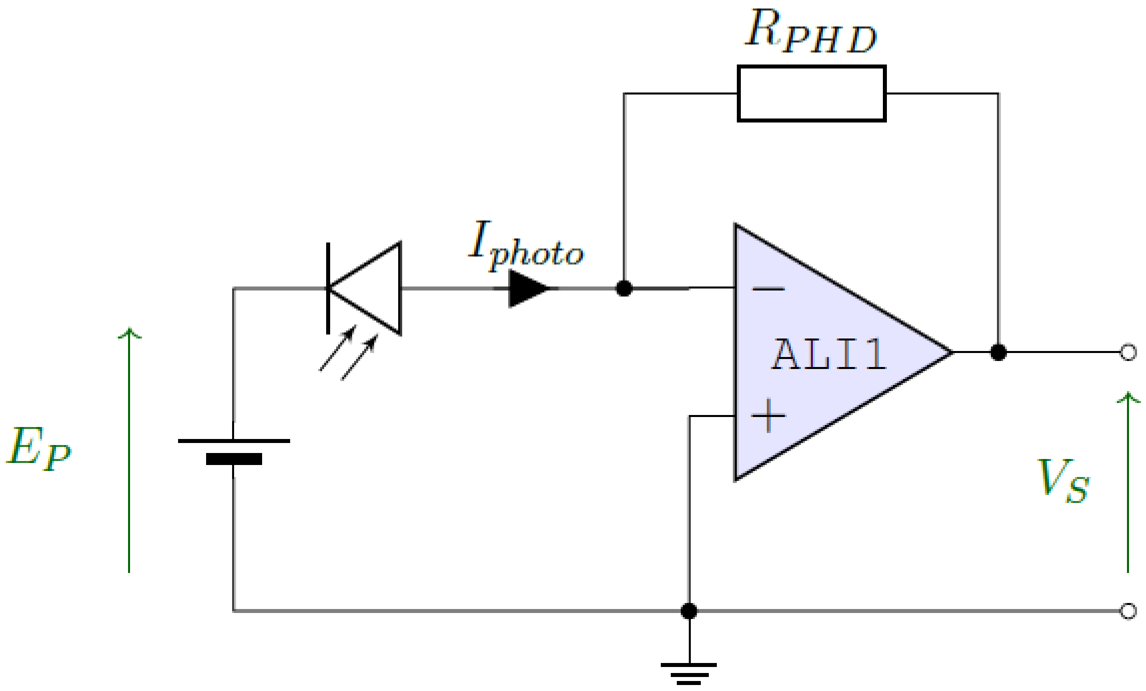


Système de photodétection

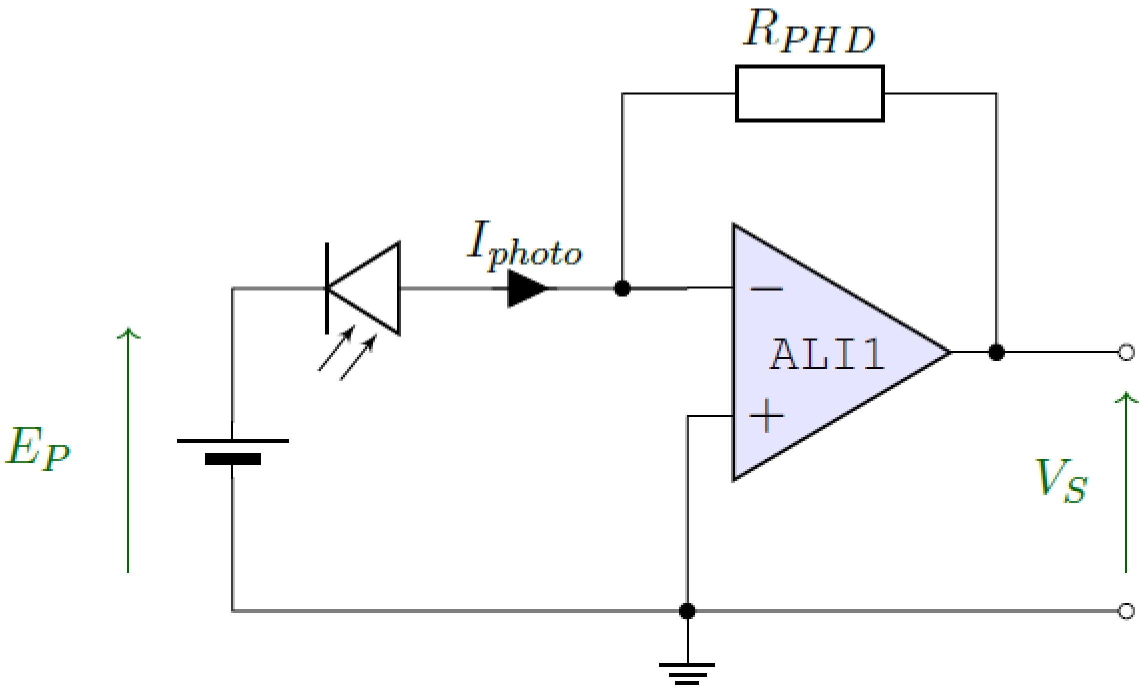
Version « transimpédance »

Montage de photodétection





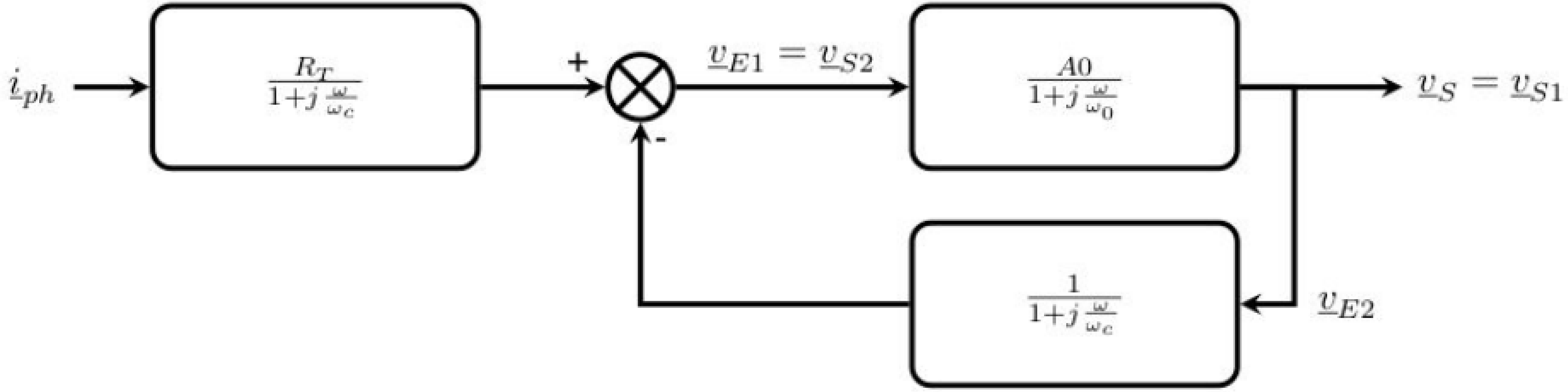
Montage de photodétection



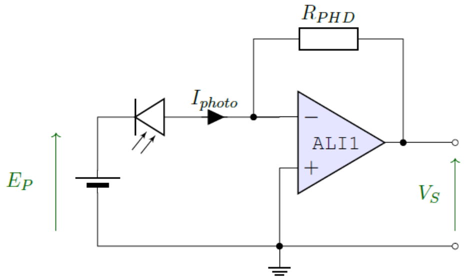
Système de photodétection

Version « transimpédance » / En pratique

Montage de photodétection



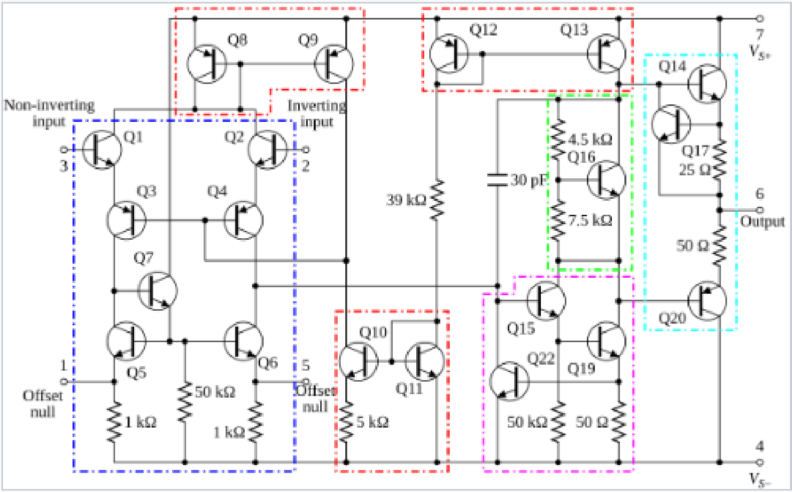
$$\frac{V_S}{I_{Phd}} = \frac{R_T \cdot A_0}{\left(1+\frac{j\cdot\omega}{\omega_0}\right)\cdot\left(1+\frac{j\cdot\omega}{\omega_c}\right)+A_0}$$



INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL | LEnsE Laboratoire d'Enseignement Expérimental

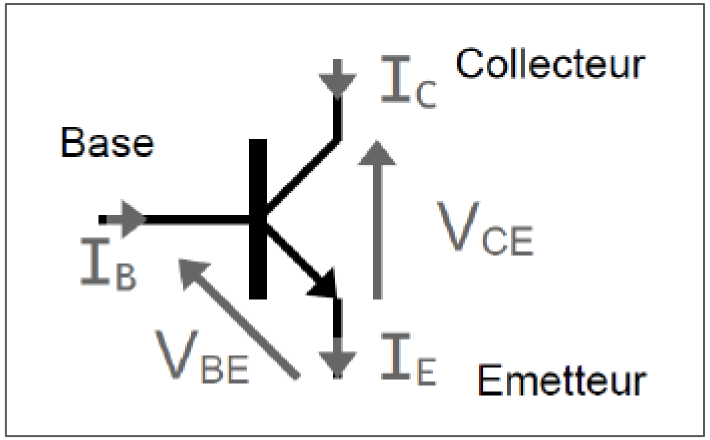
Transistors

Adaptation de puissance



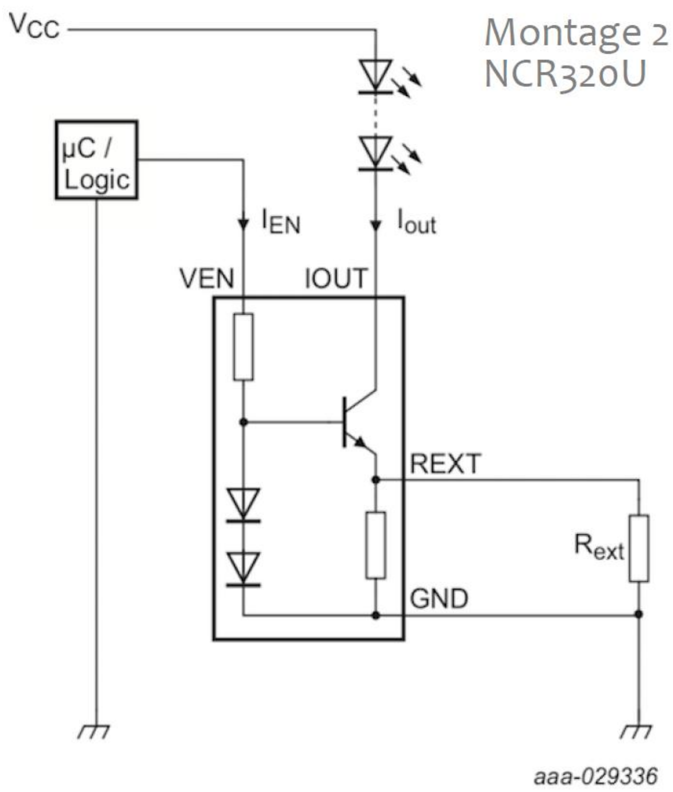
Transistor

Composant permettant de **contrôler** ou d'**amplifier des tensions** ou **des courants**



$$I_C = \beta \cdot I_B \qquad et \qquad I_E = I_C + I_B$$

$$I_C = \beta \cdot I_{BS} \cdot \exp(V_{BE}/U_T)$$



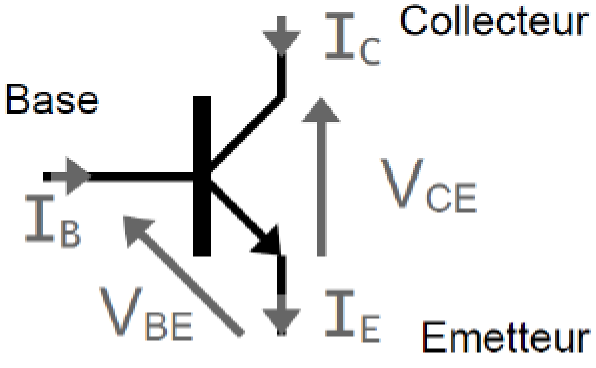
Montage 2
NCR320U

Transistors

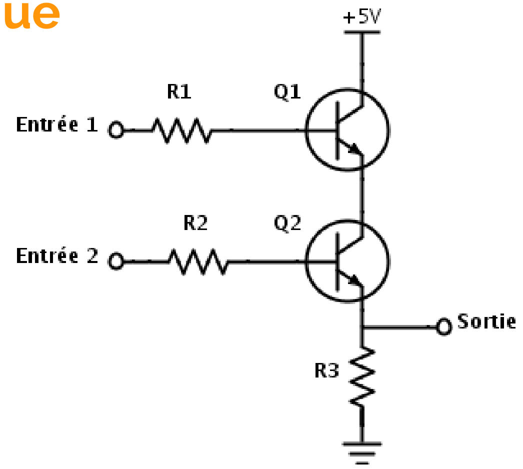
Fonctions logiques et arithmétiques

Transistor

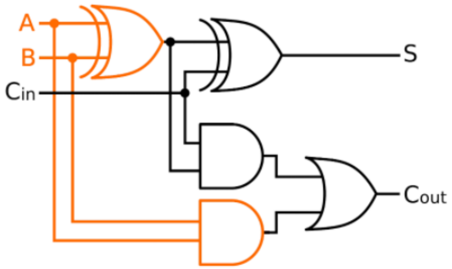
Composant permettant de **contrôler** ou d'**amplifier des tensions** ou **des courants**



ET logique



Additionneur



A	B	Cin	S	Cout
0	0	0	**0**	**0**
0	0	1	**1**	**0**
0	1	0	**1**	**0**
0	1	1	**0**	**1**
1	0	0	**1**	**0**
1	0	1	**0**	**1**
1	1	0	**0**	**1**
1	1	1	**1**	**1**

http://electroniqueamateur.blogspot.com/

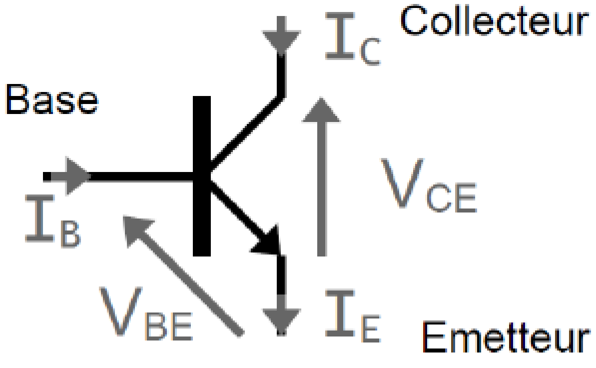
https://codeur-pro.fr/les-portes-et-fonctions-logiques/

Transistors

Fonctions logiques et arithmétiques

Transistor

Composant permettant de **contrôler** ou d'**amplifier des tensions** ou **des courants**



COLLECTEUR OUVERT / ÉMETTEUR OUVERT

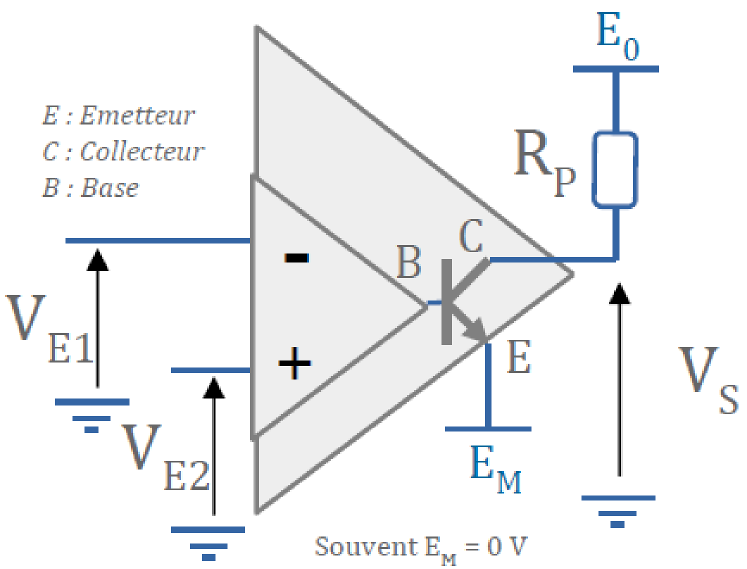
Comparateur associé à un transitor T :

I_B : courant entrant dans la base

I_C : courant entrant dans le collecteur

→ si $I_B > 0$ alors $I_C > 0$, T = interrupteur fermé

→ sinon $I_C = 0$, T = interrupteur ouvert



Si $V_{E2} > V_{E1}$

$\rightarrow I_B > 0$

$\mathbf{V_S = E_M}$

Si $V_{E1} > V_{E2}$

$\rightarrow I_B = 0$

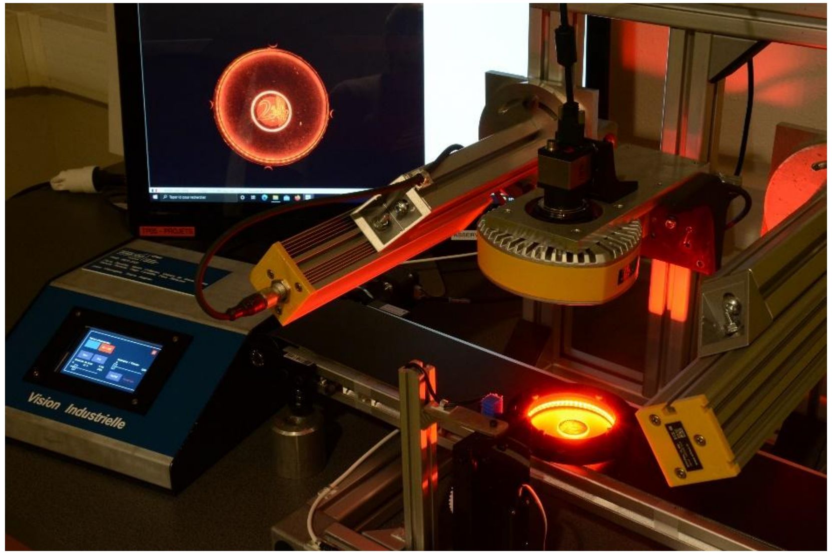
$\mathbf{V_S = E_0}$

INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL

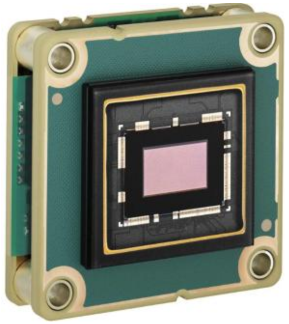
LEnsE Laboratoire d'Enseignement Expérimental

Caméras / Capteurs CMOS

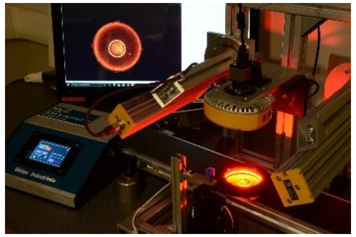
Application de la photodétection



IDS Sensor

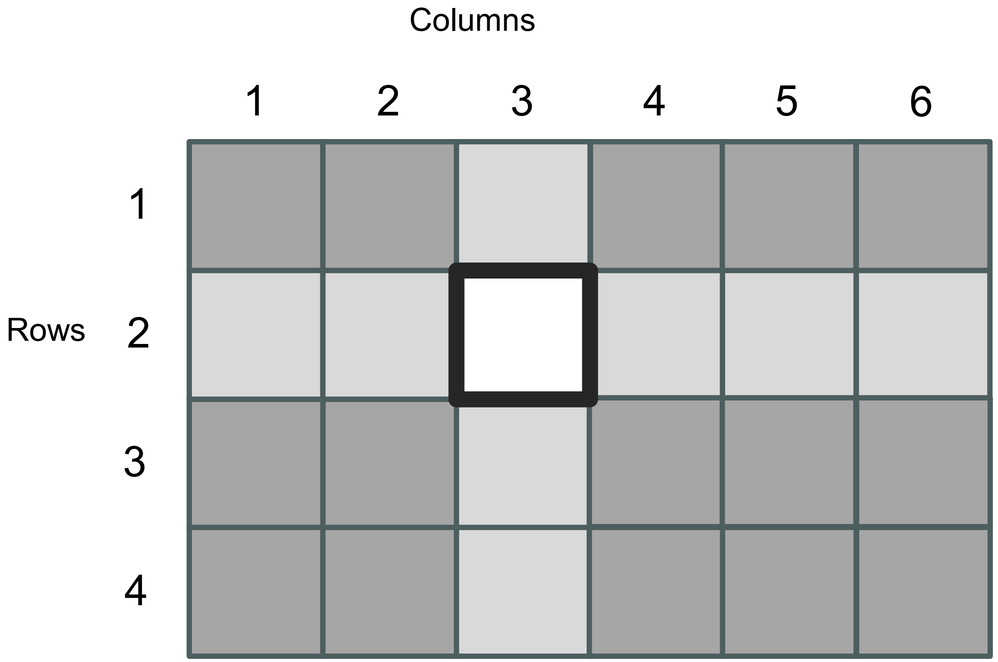


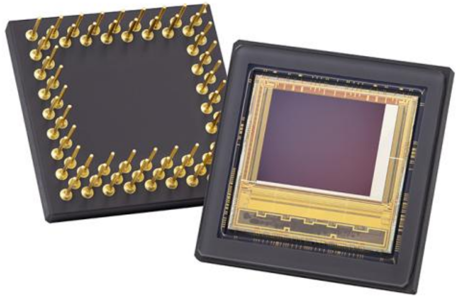
Basler Sensor / Mouser



Photodétection / Capteur CMOS

Matrice de pixels

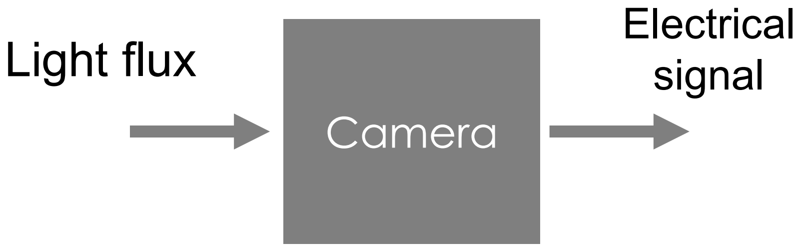


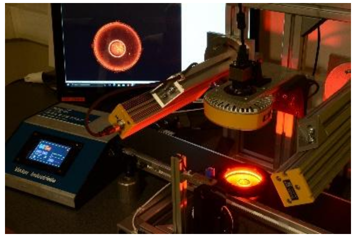


https://imaging.teledyne-e2v.com/products/2d-cmos-image-sensors/onyxmax/

Camera

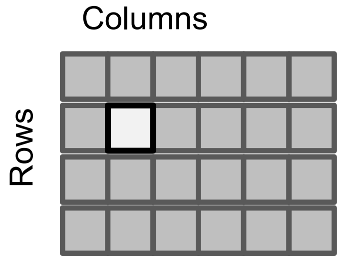
Système qui transforme un **flux de lumière** en un **signal électrique mesurable**, en function de la position du flux sur ce capteur

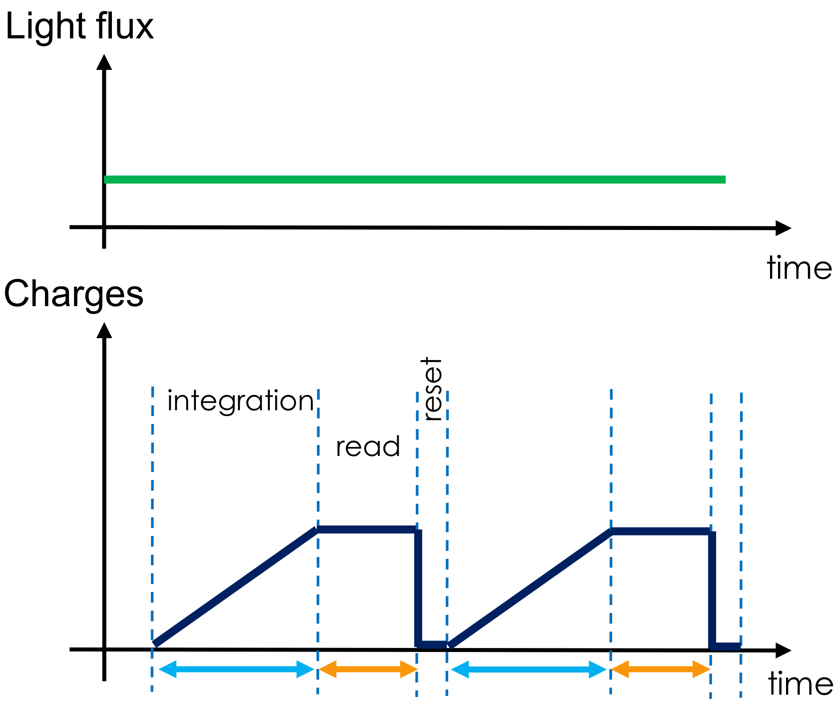




Photodétection / Capteur CMOS

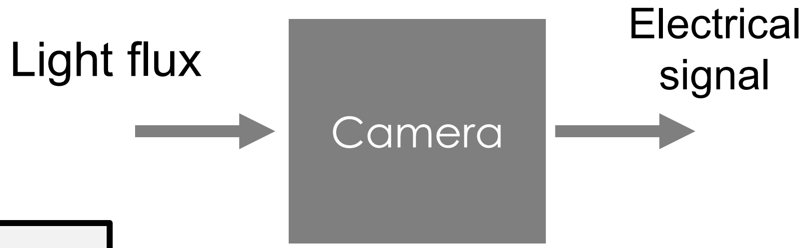
Intégration de lumière

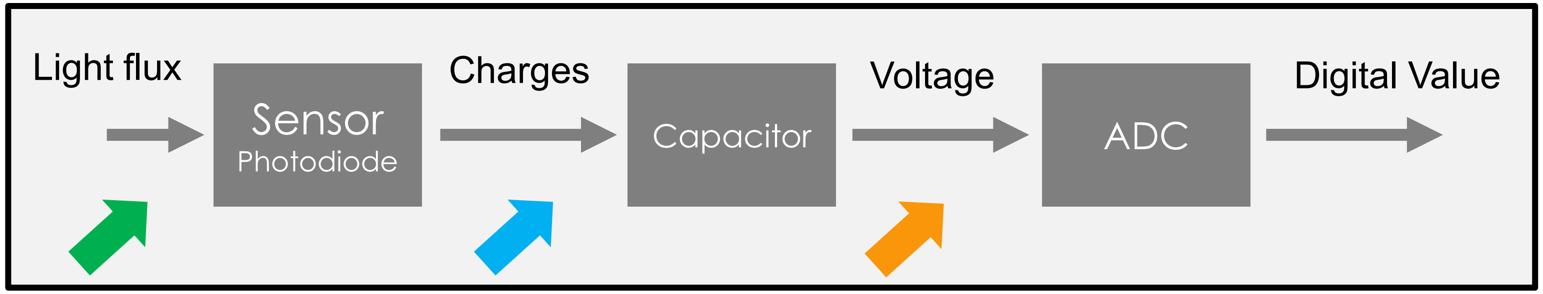




Camera

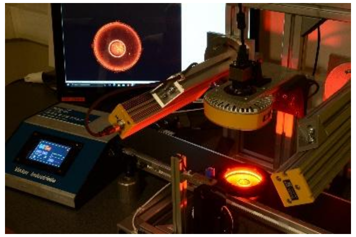
Système qui transforme un **flux de lumière** en un **signal électrique mesurable**, en function de la position du flux sur ce capteur



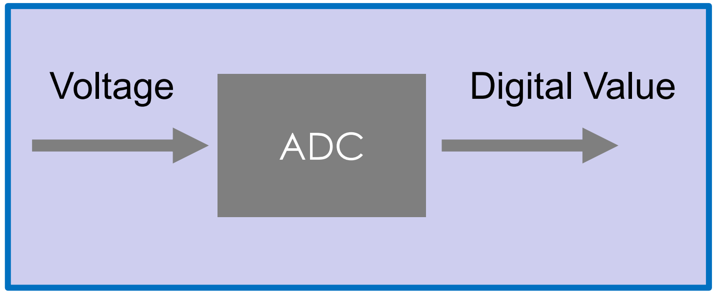


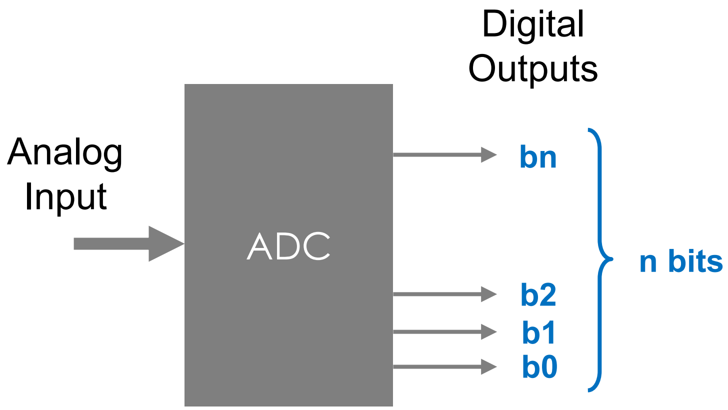
Photodétection / Capteur CMOS

Conversion AN / Quantification



Quantization

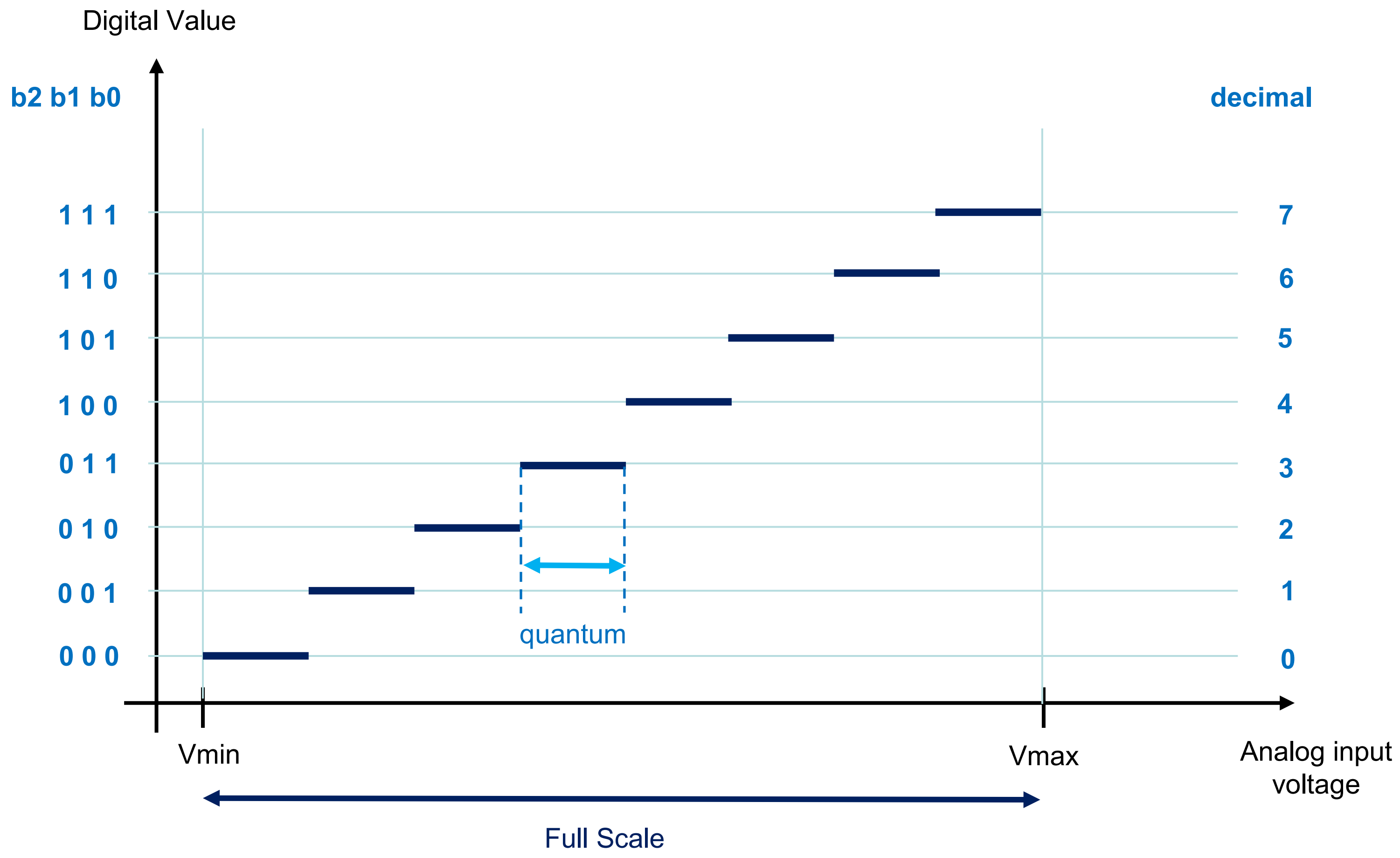


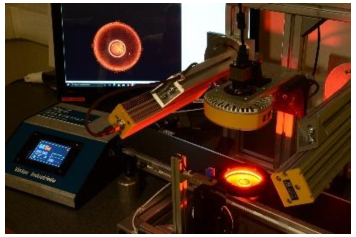


Each bit can have one of two values: **0** or **1**.

The **number of different values** that can be represented by **n bits** is **2ⁿ**.

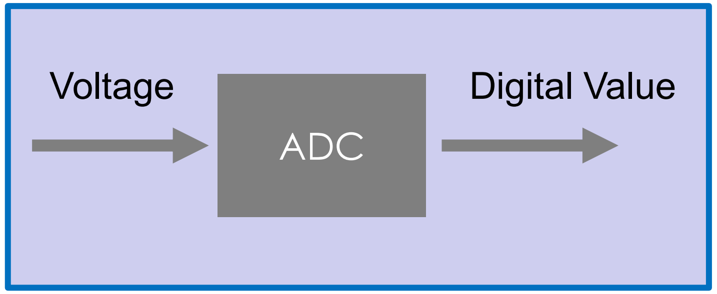
Example for n = 3 bits

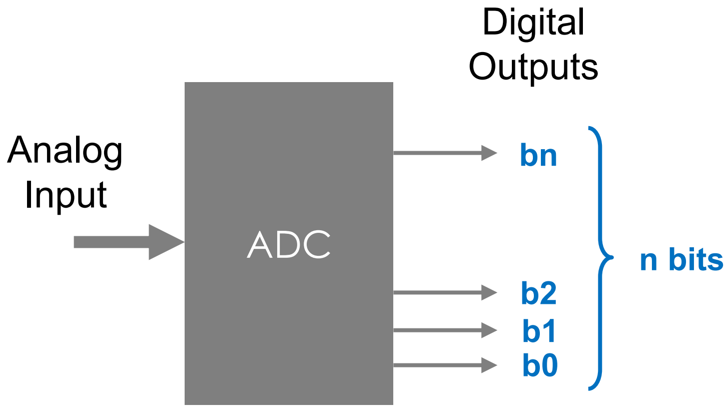




Photodétection / Capteur CMOS

Conversion AN / Quantification

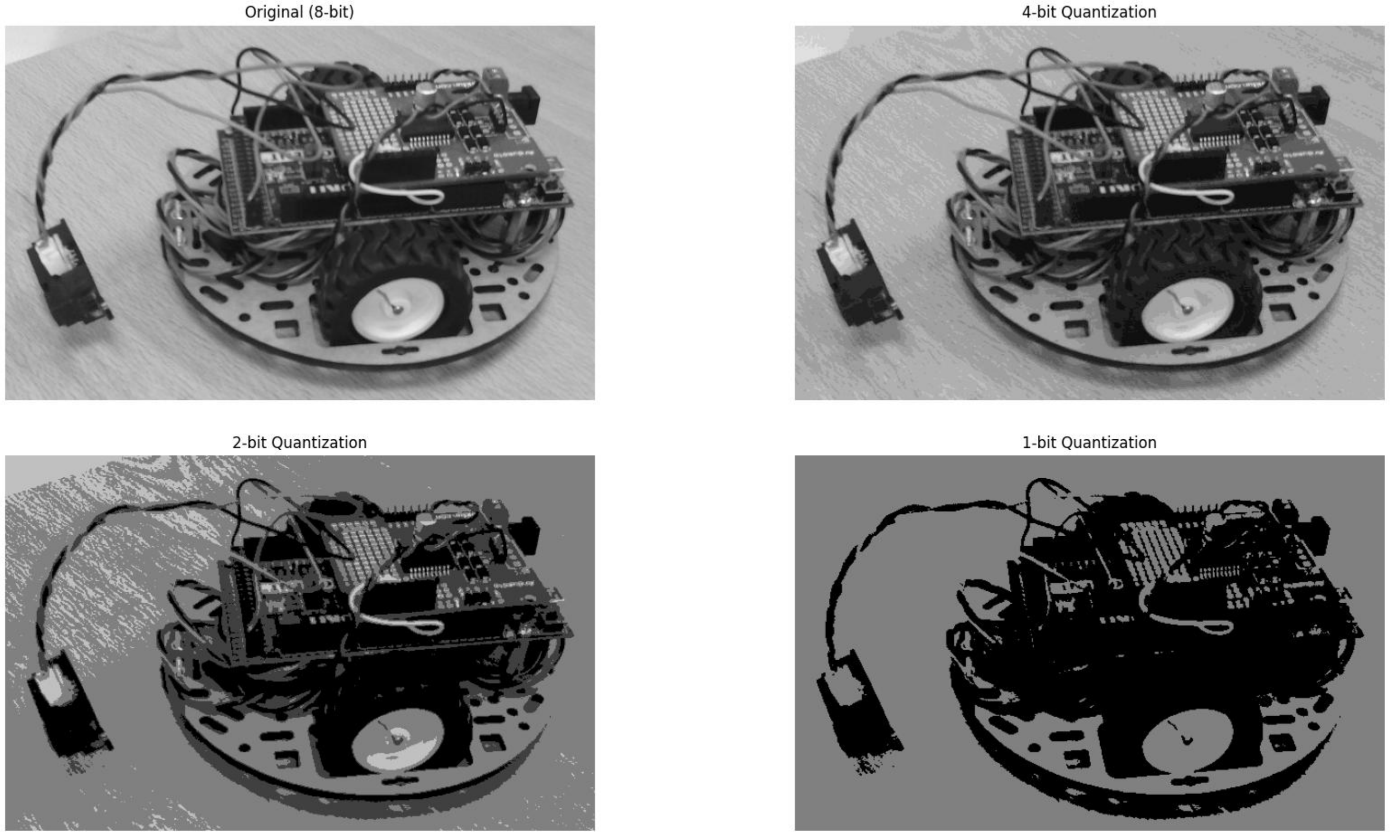


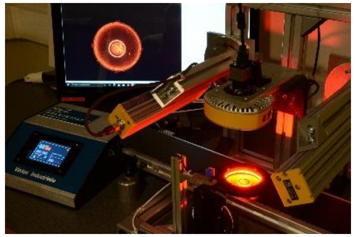


Each bit can have one of two values: **0** or **1**.

The **number of different values** that can be represented by **n bits** is **2^n**.

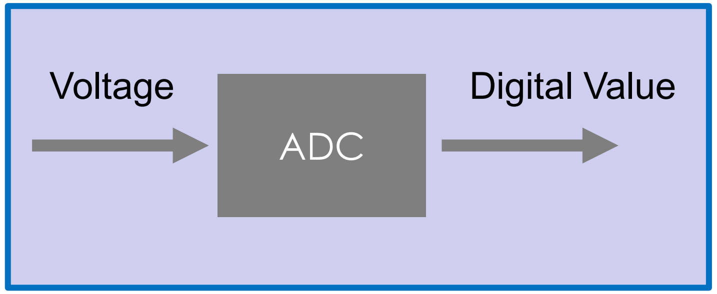
Quantization





Photodétection / Capteur CMOS

Conversion AN / Echantillonnage



Sampling theorem

Nyquist–Shannon sampling theorem

The sampling frequency must be equal to or **greater than twice** the frequency associated with the finest detail in the image (edges).

*With a grid spacing of **d** , a periodic component with a period higher than **2.d** can be reconstructed.*

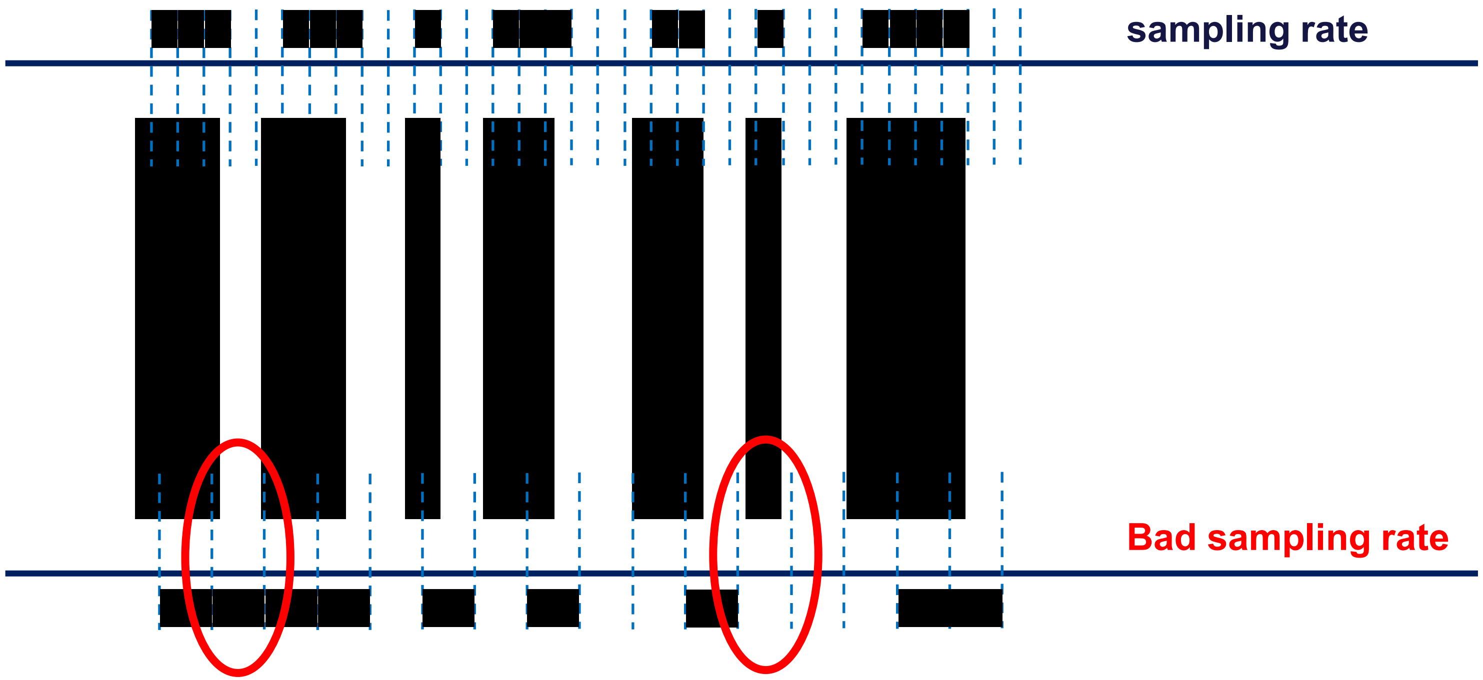
Sampling

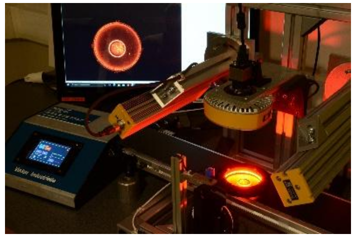
Barcode to decode

Area of sampling

https://barcode-coder.com/fr/specification-ean-13-102.html

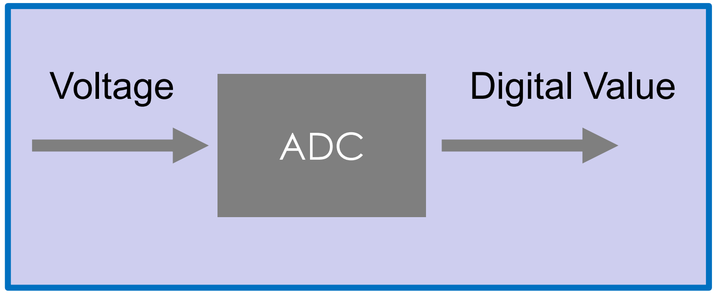
LEnsE 2024



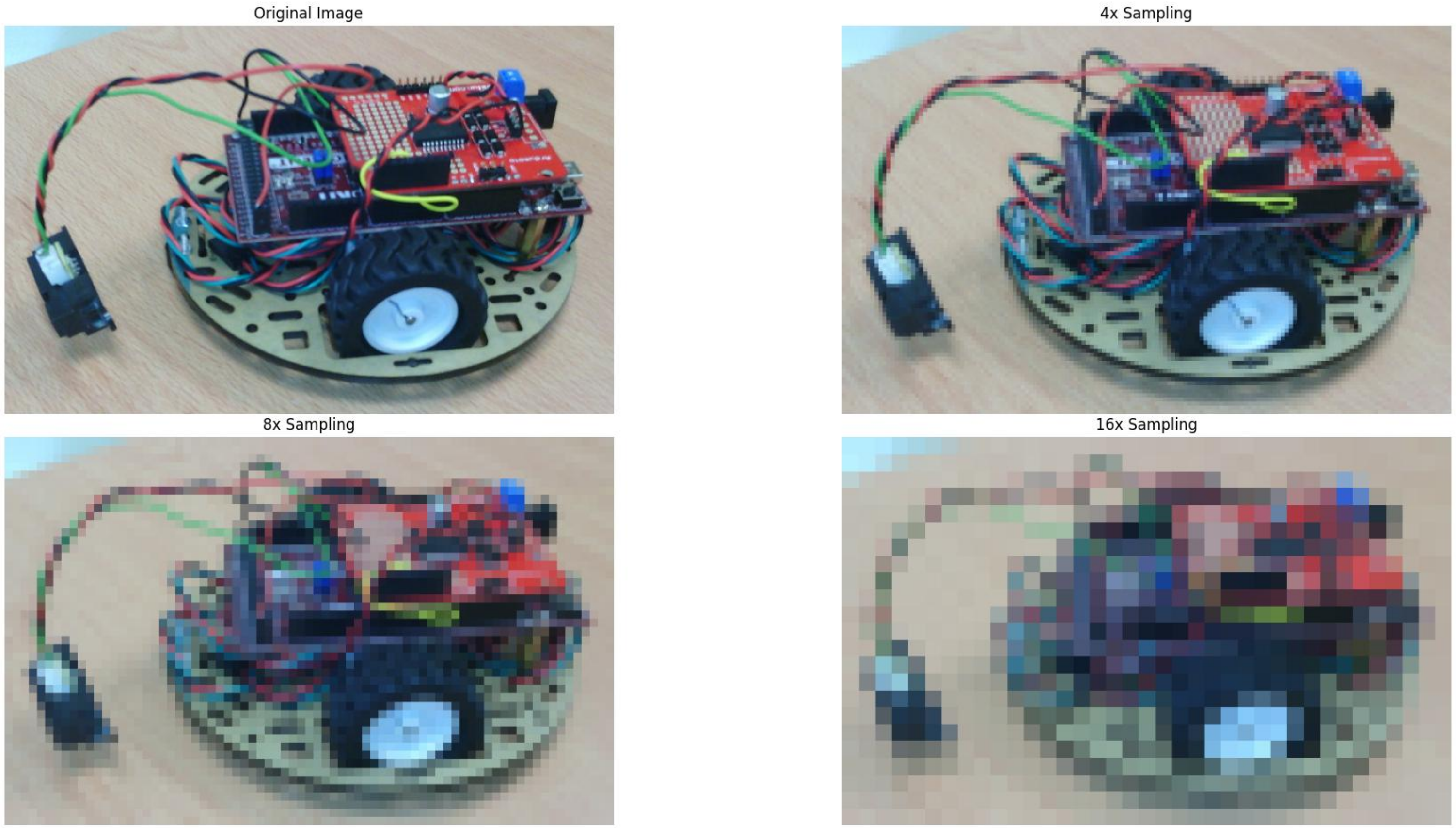


Photodétection / Capteur CMOS

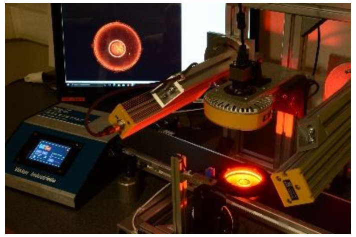
Conversion AN / Echantillonnage



Sampling

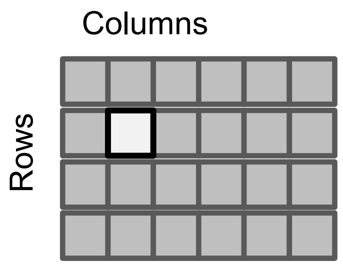


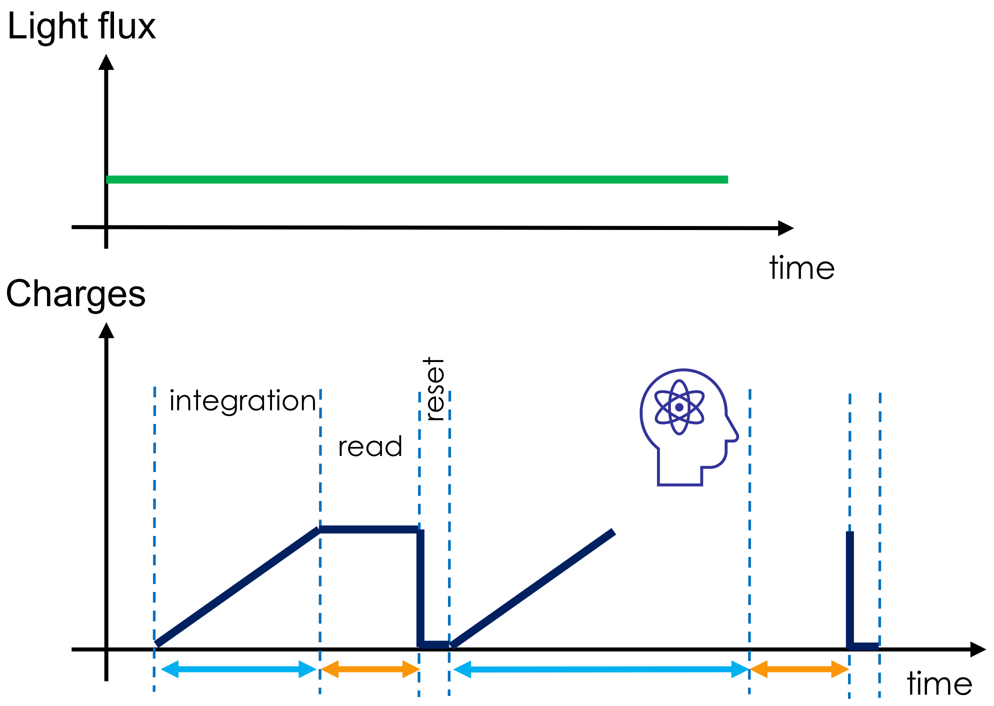
INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL | LEnsE Laboratoire d'Enseignement Expérimental



Photodétection / Capteur CMOS

Intégration de lumière



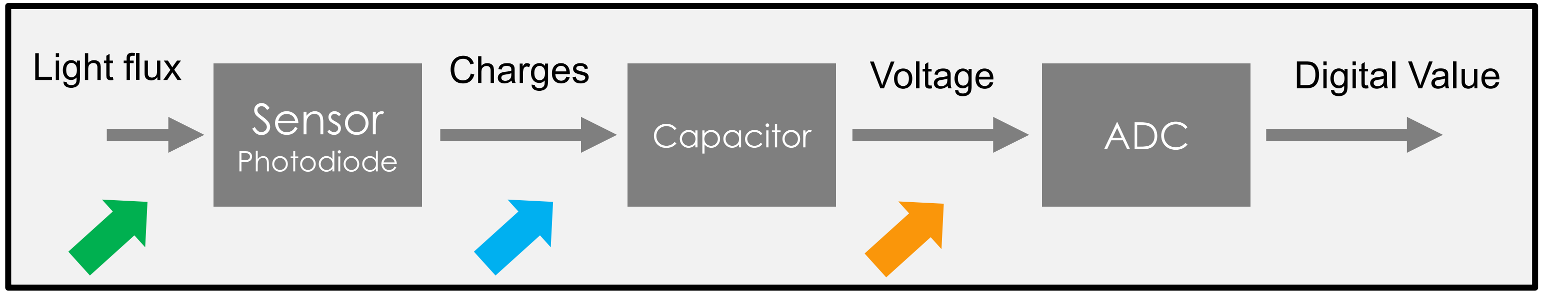


Exposure Time

Duration for which the **camera's sensor is exposed to light**, when capturing an image.

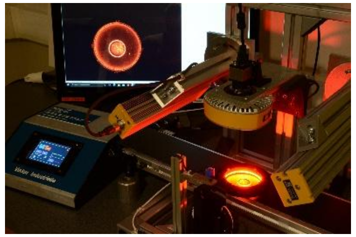
This parameter determines the amount of light collected.

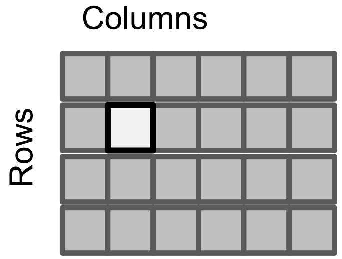
i.e. the amount of collected charges coming from the sensor stored in a capacitor

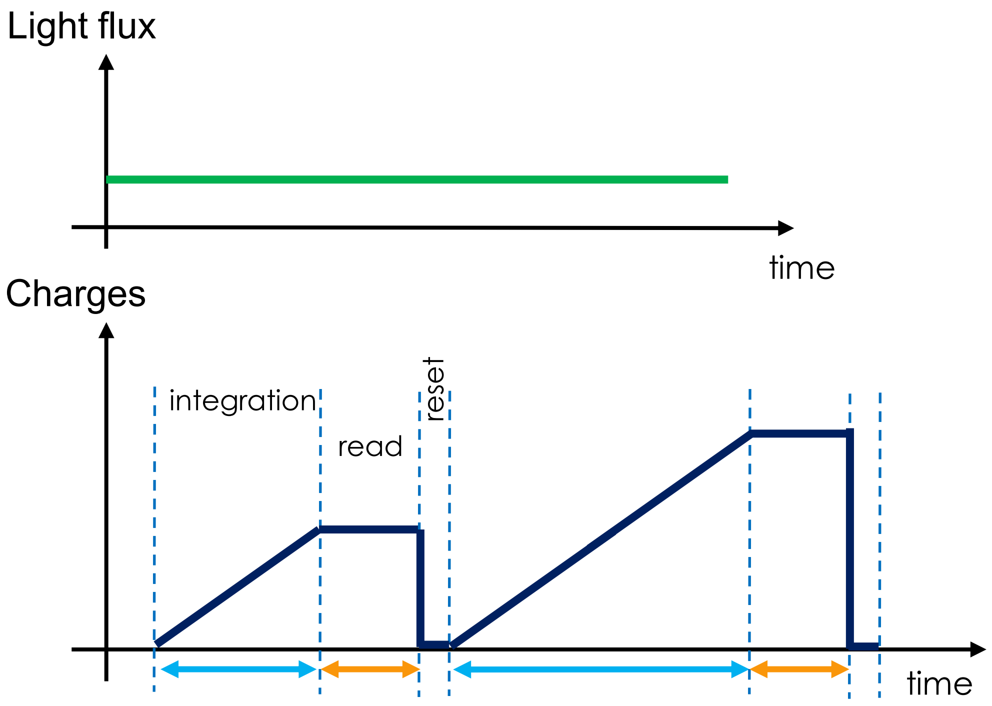


Photodétection / Capteur CMOS

Intégration de lumière





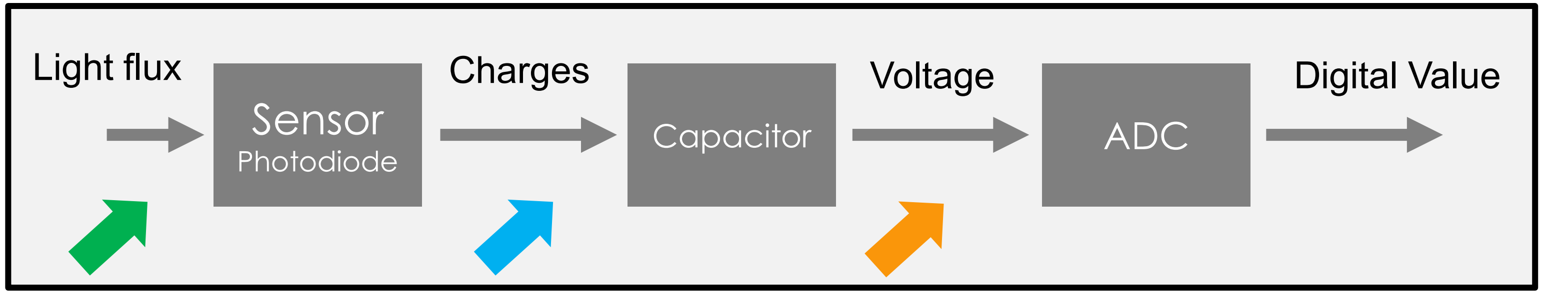


Exposure Time

Duration for which the **camera's sensor is exposed to light**, when capturing an image.

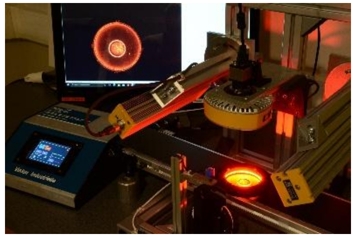
This parameter determines the amount of light collected.

i.e. the amount of collected charges coming from the sensor stored in a capacitor



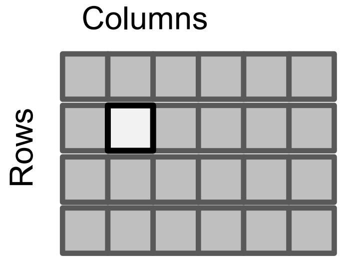
INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL

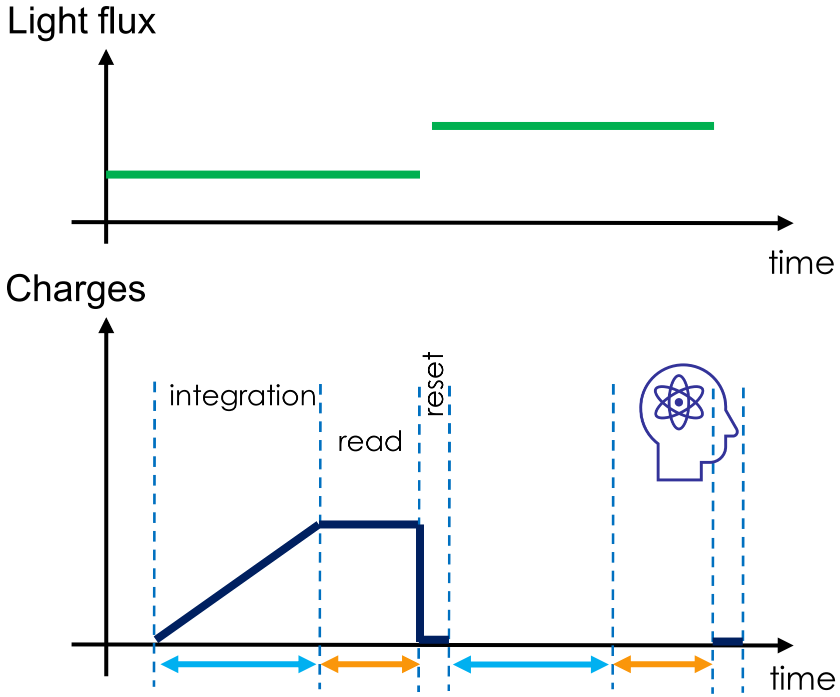
LEnsE Laboratoire d'Enseignement Expérimental



Photodétection / Capteur CMOS

Intégration de lumière



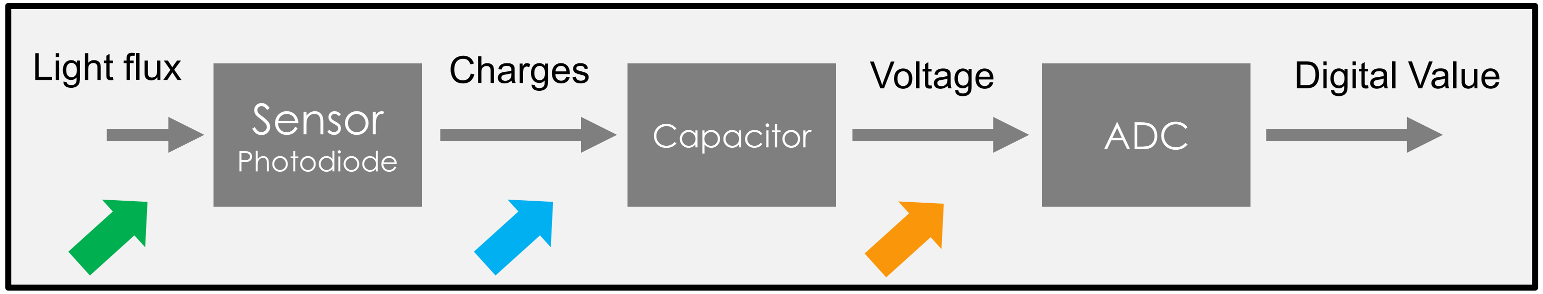


Exposure Time

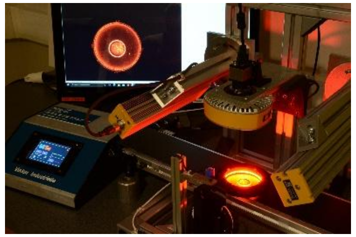
Duration for which the **camera's sensor is exposed to light**, when capturing an image.

This parameter determines the amount of light collected.

i.e. the amount of collected charges coming from the sensor stored in a capacitor

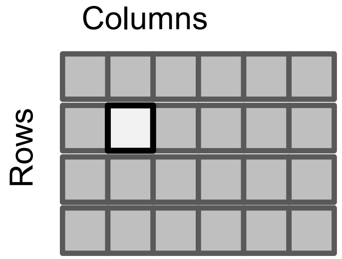


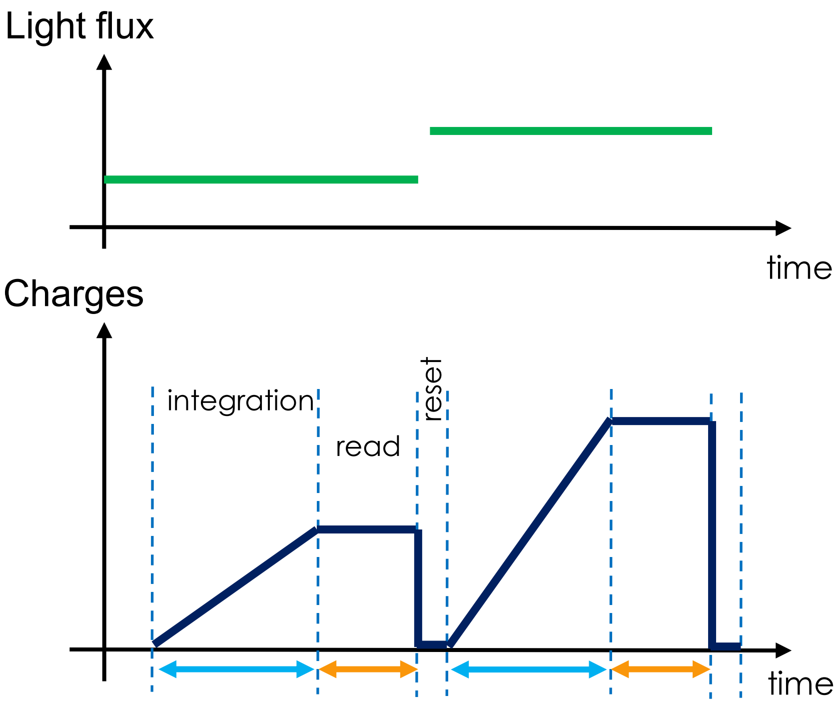
INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL
LEnsE Laboratoire d'Enseignement Expérimental



Photodétection / Capteur CMOS

Intégration de lumière



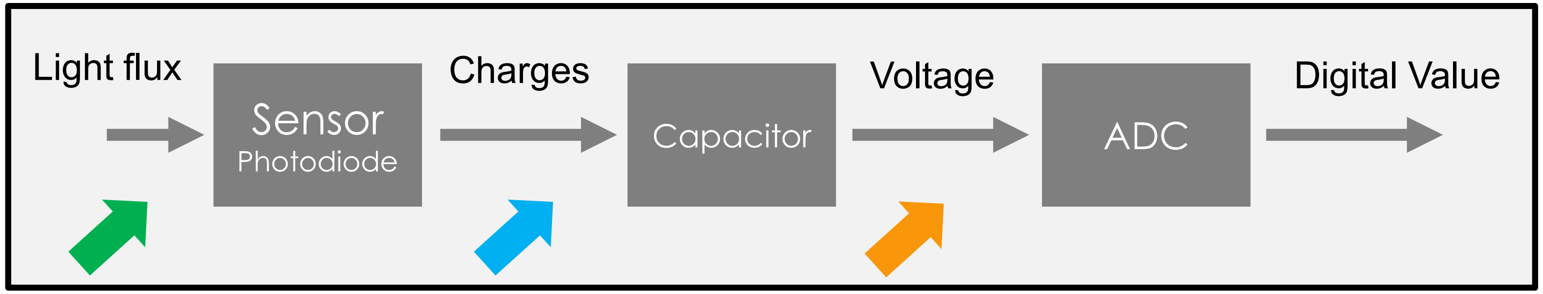


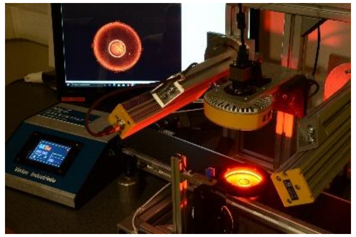
Exposure Time

Duration for which the **camera's sensor is exposed to light**, when capturing an image.

This parameter determines the amount of light collected.

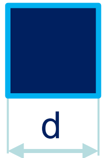
i.e. the amount of collected charges coming from the sensor stored in a capacitor



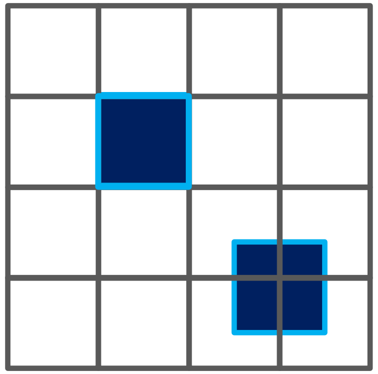


Photodétection / Capteur CMOS

Résolution spatiale

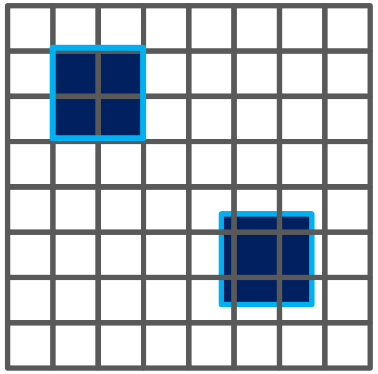


Small object to detect



$$P = d$$

Security factor S



$$P = \frac{d}{S}$$

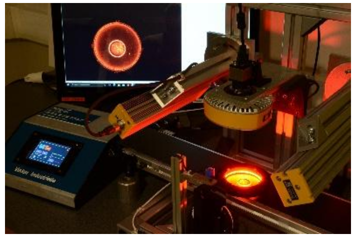
Spatial resolution / P

Distance observed by a single pixel in a given direction

This security factor is due to the Nyquist-Shanon theorem.

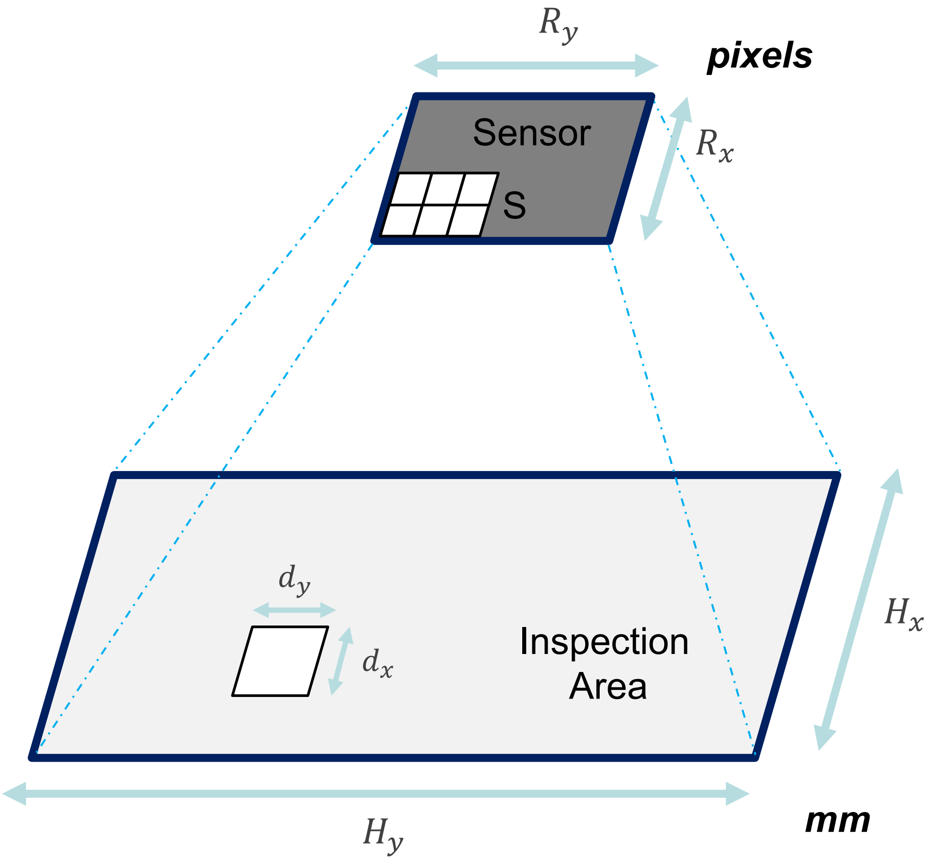
And S >= 2

*To verify is the spatial resolution is good enough, **calibration target** can be used. (Foucault)*



Photodétection / Capteur CMOS

Résolution spatiale



Spatial resolution / P

Distance observed by a single pixel in a given direction

$$P = \frac{d}{S}$$

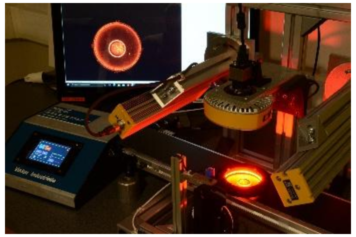
Sensor resolution (pixels)

$$R = \frac{H}{P} = \frac{S \times H}{d}$$

H (mm) → R (px)
d (mm) → S (px)
P (mm) → 1 (px)

Photodétection / Capteur CMOS

Intérêt de l'objectif devant un capteur



Schémas empruntés au cours d'optique instrumentale (SC19) de Sébastien de ROSSI