

MESURE DE LA TEMPERATURE SANS CONTACT

Réalisé par: ESSAJAI LAILA

N° d'inscription : 11335

Sommaire:

- Introduction
- Les processus physique d'émission de rayonnement:
 - 1-Principes du rayonnement infrarouge
 - 2-Loi régissant le rayonnement infrarouge
- Principe de mesure de température sans contact
- Etude d'un détecteur thermique : bolomètre
 - 1-Définition et fonctionnement
 - 2-Bruit du bolomètre
 - 3-Optimisation du bolomètre
- Etude d'un détecteur quantique : photodiode
 - 1-Modélisation physique d'une photodiode
 - 2-Simulation numérique d'une photodiode
- Comparaison entre la détection thermique et quantique

INTRODUCTION

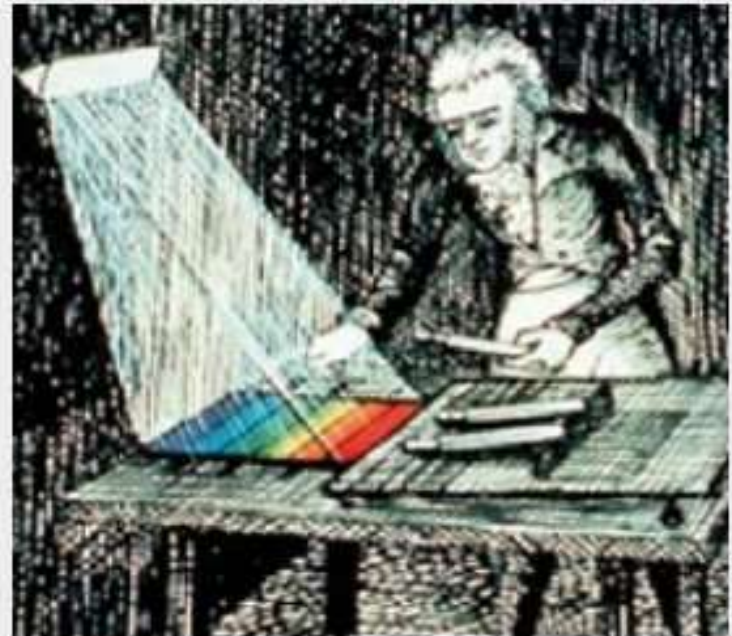


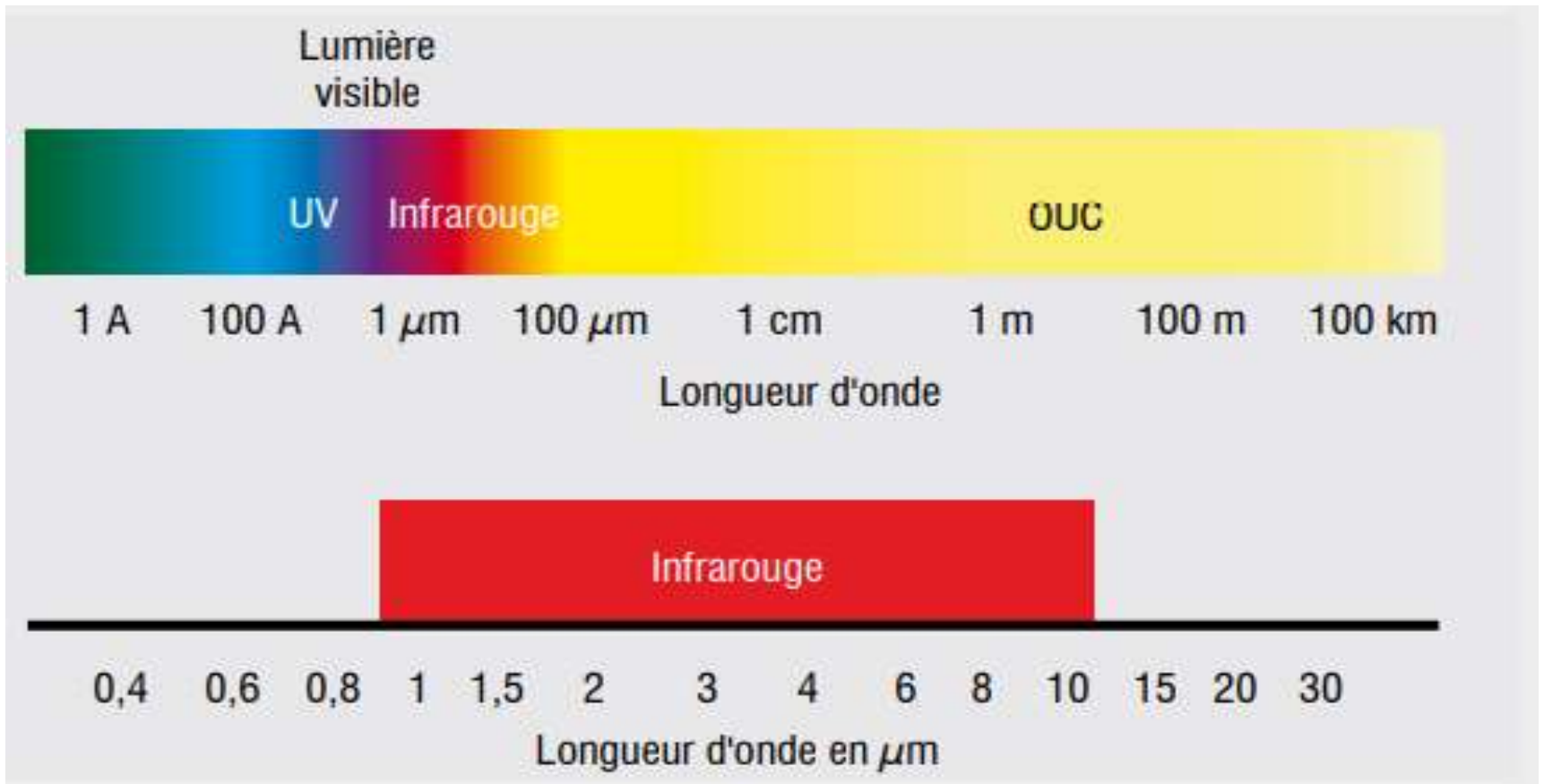
Les processus physiques d'émission du rayonnement :

1-Principe de mesure de température sans contact:



William Herschel (1738 - 1822)





Le spectre électromagnétique

2-Loi régissant le rayonnement infrarouge

-Loi de Planck:

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

avec:

- h : la constante de Planck
- c : la vitesse de la lumière dans le vide
- k : la constante de Boltzmann
- ν : la fréquence de la radiation électromagnétique
- T : la température absolue du corps.

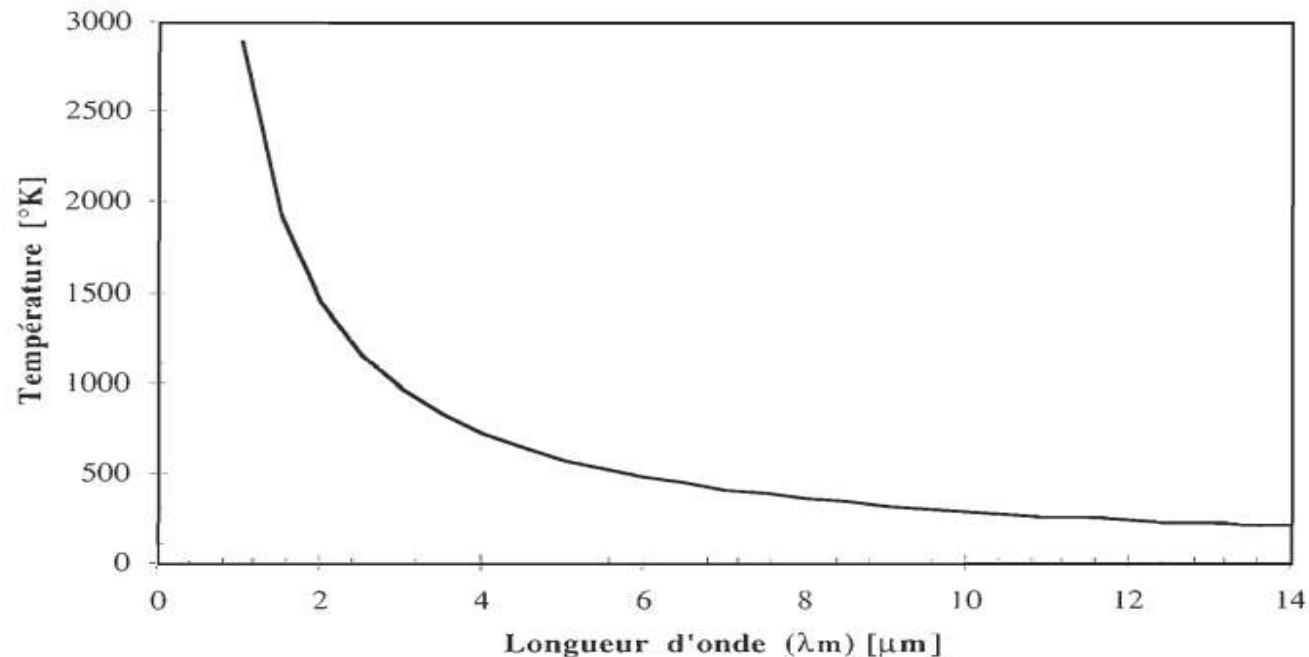
-Loi de Wien:

$$\lambda T = C = 0.2898 \text{ cm.K}$$

Avec :

-T: la température absolue du corps.

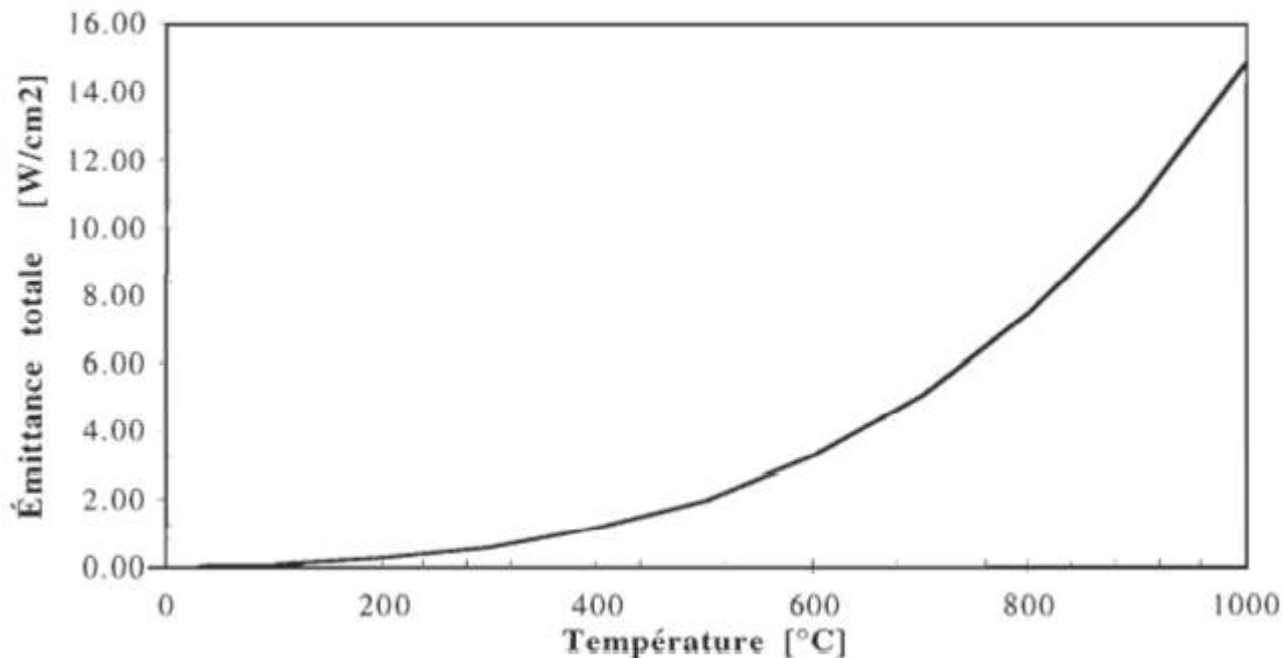
- λ : la longueur d'onde du corps.



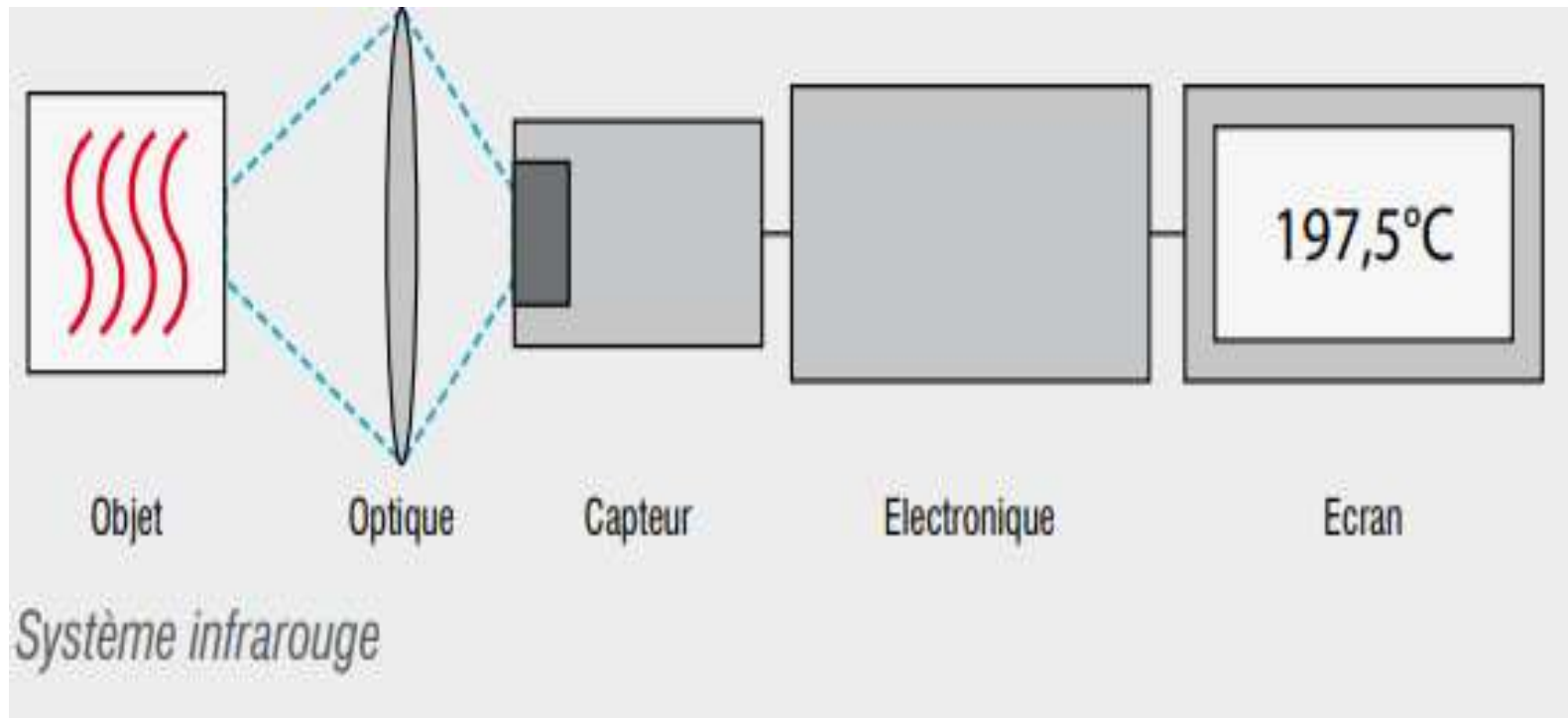
-Loi de Stefan-Boltzmann:

- L'émittance d'un corps noir à l'équilibre thermique et radiatif ne dépend que de la température.

$$M = \sigma T^4 \text{ avec } \sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2 h^3} = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$$



Principe de mesure de température sans contact:



Etude d'un capteur thermique : bolomètre

1-Définition et fonctionnement:

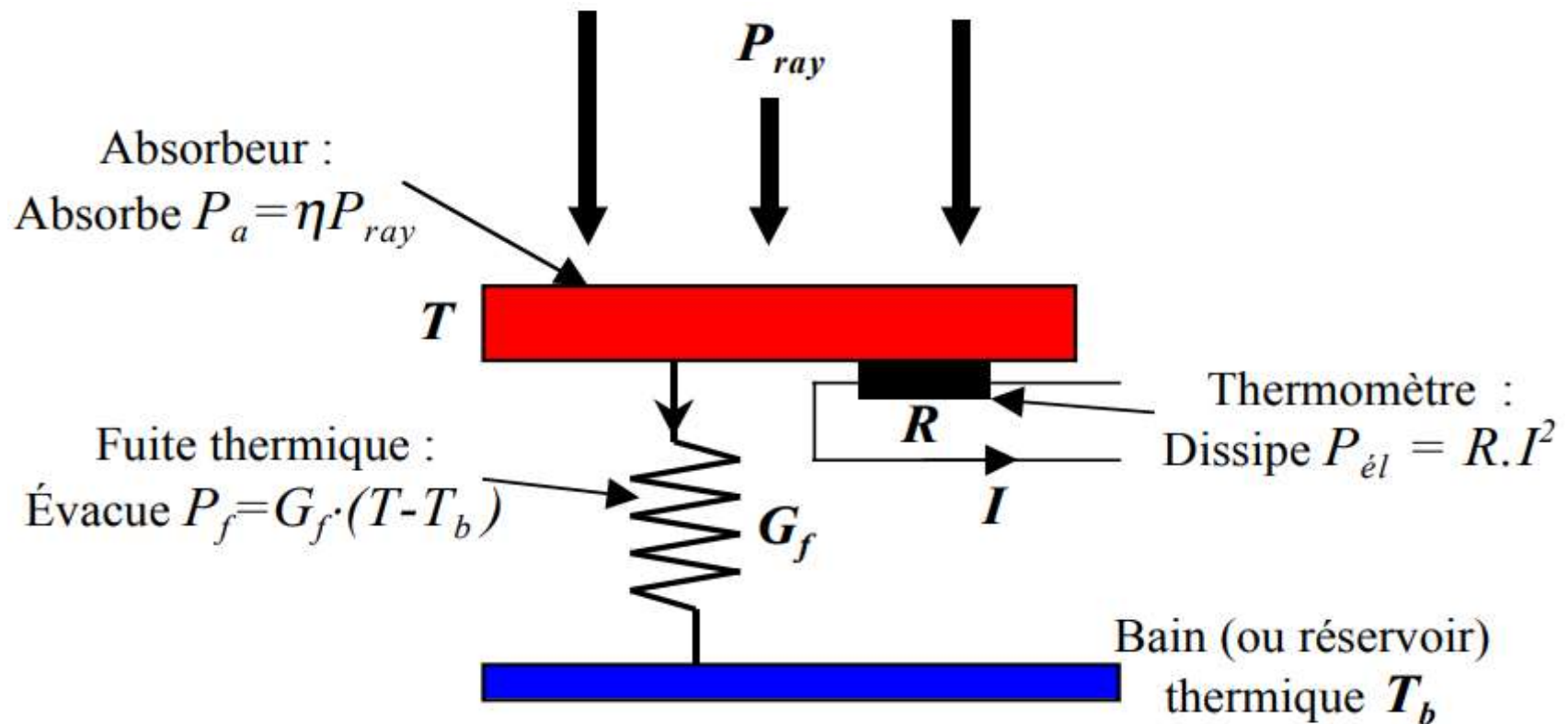


Schéma de principe d'un bolomètre

-Bilan d'énergie d'un bolomètre idéal:

-Pour un bolomètre idéal:

$$\frac{dE}{dt} = C \cdot \frac{dT}{dt} = P_a + P_{el} - P_f$$

$$C \cdot \frac{d\tilde{T}}{dt} = \tilde{P}_a + \tilde{P}_{el} - G_d \cdot \tilde{T}$$

Avec:

C : la capacité thermique totale absorbeur +
thermomètre [J/K]

G_d : la conductance thermique dynamique

-Cas d'un bolomètre à coefficient de température négatif:

-Pour une polarisation à courant constant, on a :

$$\tilde{P}_{\text{él}} = \frac{dP_{\text{él}}}{dT} \cdot \tilde{T} = I^2 \cdot \frac{dR}{dT} \cdot \tilde{T} = \alpha \cdot P_{\text{él}} \cdot \tilde{T} \quad \text{avec: } \alpha \equiv \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} \quad [K^{-1}]$$

Alors:
$$C \cdot \frac{d\tilde{T}}{dt} + (G_d - \alpha \cdot P_{\text{él}}) \cdot \tilde{T} = \tilde{P}_a(t)$$

La constante de temps 'effective' est:

$$\tau_e = \frac{C}{G_d - \alpha \cdot P_{\text{él}}} = \tau \cdot \frac{1}{1 - \frac{\alpha \cdot P_{\text{él}}}{G_d}} = \frac{\tau}{1 + L} \quad \text{avec: } \tau = C/G_d, \quad L \equiv \frac{|\alpha| \cdot P_{\text{él}}}{G_d}$$

Loi d'Ohm: $V = R \cdot I \Rightarrow s_{V/T} \equiv \frac{dV}{dT} = I \cdot \frac{dR}{dT} = \alpha \cdot V \quad [V / K]$

Alors la réponse en tension du système est:

$$S_V(\omega) \equiv \frac{\tilde{V}}{\tilde{P}_a} = \frac{\alpha V}{G_d - \alpha \cdot P_{\text{él}}} \cdot \frac{1}{1 + i \cdot \omega \tau_e} = \frac{\alpha V}{G_d} \cdot \frac{1}{1 + L} \cdot \frac{1}{1 + i \cdot \omega \tau_e} \quad [V / W]$$

-Cas d'un bolomètre à coefficient de température positif:

-Pour une polarisation à tension constante, la puissance électrique varie avec la température suivant :

$$\tilde{P}_{\text{él}} = -\frac{V^2}{R^2} \cdot \frac{dR}{dT} \cdot \tilde{T} = -\alpha \cdot P_{\text{él}} \cdot \tilde{T}$$

-Loi d'Ohm: $I = \frac{V}{R} \Rightarrow s_{I/T} = \frac{dI}{dT} = -\frac{V}{R} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} = -\alpha \cdot I \cdot P_{\text{él}}$

-La réponse en courant du détecteur est:

$$S_I(\omega) = \frac{\tilde{I}}{\tilde{P}_a} = \frac{-\alpha \cdot I}{G_d + \alpha \cdot P_{el}} \cdot \frac{1}{1 + i \cdot \omega \tau_e} = \frac{-\alpha \cdot I}{G_d} \cdot \frac{1}{1 + L} \cdot \frac{1}{1 + i \cdot \omega \tau_e} \quad [A/W]$$

-la constante de temps "effective" :

$$\tau_e = \frac{C}{G_d + \alpha \cdot P_{el}} = \tau \cdot \frac{1}{1 + \frac{\alpha \cdot P_{el}}{G_d}} = \frac{\tau}{1 + L}$$

-Si $L \gg 1$, alors:

$$S_I(\omega) \approx \frac{1}{V} \cdot \frac{1}{1 + i \cdot \omega \tau_e}$$

2-Bruit d'un bolomètre:

-Les bruits fondamentaux:

-Fluctuations thermodynamiques ou bruit de phonon:

La densité spectrale des fluctuations de température :

$$NEP_{phonon}(\omega) = \sqrt{G_d^2 \cdot P_T(\omega)} = \sqrt{4 \cdot G_d \cdot k_B \cdot T^2} \quad [W / \sqrt{Hz}]$$

-Bruit Johnson:

Les fluctuations de tension aux bornes d'une résistance électrique R sont décrites par :

$$NEP_{Johnson}(\omega) = \frac{\sqrt{4 \cdot k_B \cdot T \cdot R}}{S_V(\omega)} \quad [W / \sqrt{Hz}]$$

-contre réaction thermique:

On a:
$$NEP_{Johnson}(\omega) = \sqrt{4 \cdot k_B T \cdot P_{el}} \cdot \frac{G_d}{\alpha \cdot P_{el}} \cdot (1 + i \cdot \omega \tau)$$

Alors:
$$NEP^2 = NEP_{Phonon}^2 + NEP_{Johnson}^2 = 4k_B T^2 G_d \cdot \left(1 + \frac{G_d}{\alpha^2 \cdot T \cdot P_{el}} \right)$$

-Bruits liés à l'environnement:

-Microphonie:

-Perturbations électromagnétiques:

3-Optimisation du bolomètre:

- Optimiser un bolomètre=augmenter sa sensibilité
- L'expression relatives aux bruits de phonon et Johnson:

$$NEP^2 = 4 \cdot k_B T^2 \cdot G_d + 4 \cdot k_B T \cdot \frac{G_d^2}{\alpha \cdot P_{él}}$$

En posant:

$$NET = \sqrt{\frac{4 \cdot k_B T}{\alpha^2 \cdot P_{él}}} [K / Hz^{1/2}]$$

Il vient:

$$NEP^2 = 4 \cdot k_B T^2 \cdot G_d + G_d^2 \cdot NET^2$$

Paramètres à optimiser: $P_{él}$, G_d , T

Après calculs on trouve : $P_{él}^* \approx P_a$ et $G_d^*(T_b) \approx \frac{P_a}{T_b}$

-La NEP du bolomètre optimisé sera:

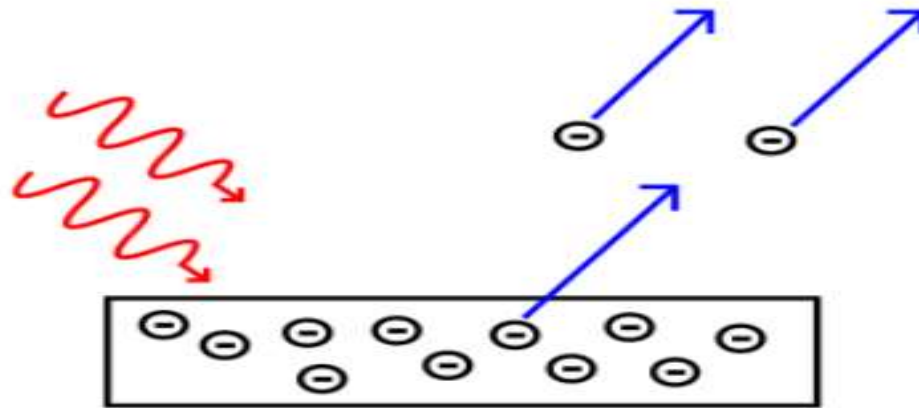
$$NEP^* \approx \sqrt{[15..25]} \cdot \sqrt{4 \cdot k_B \cdot T_0 \cdot P_{ray}}$$

conclusion: il est nécessaire de travailler dans des températures inférieures à 300mK dans le domaine millimétrique.

Etude d'un détecteur quantique : photodiode

1-Modélisation physique d'une photodiode:

-Effet photoélectrique:

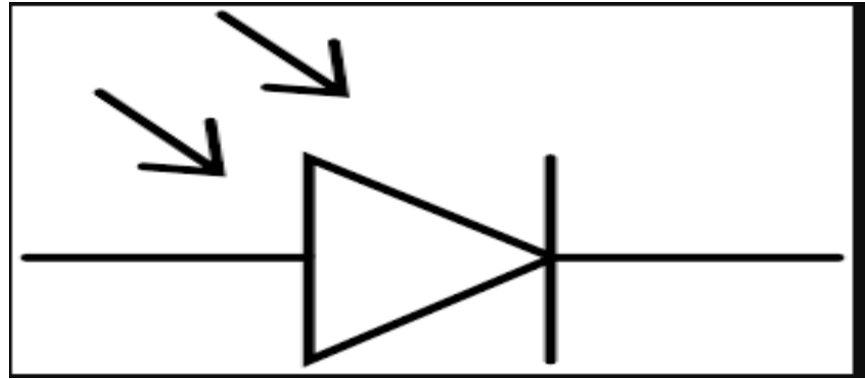


-Lors de l'effet photoélectrique, des ondes lumineuses frappant une surface en métal provoquent l'éjection d'électrons depuis ce métal.

-Principe de fonctionnement d'une photodiode:



photodiode

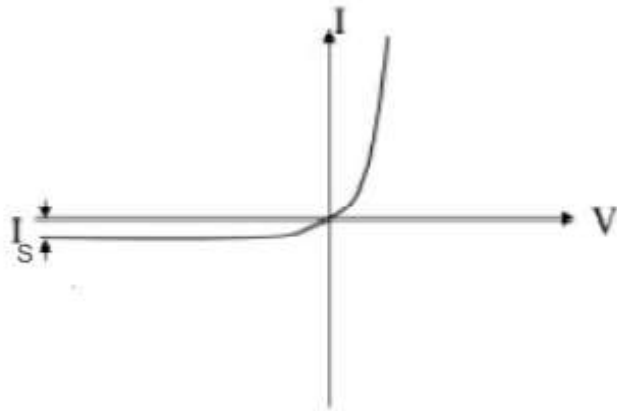


symbole d'une photodiode

-La relation courant-tension idéale d'une diode est:

$$I_d = I_s [e^{(qV/k_B T)} - 1]$$

Avec I_s le courant inverse, k_B la constante de Boltzmann, T la température absolue du composant.



caractéristique de la photodiode

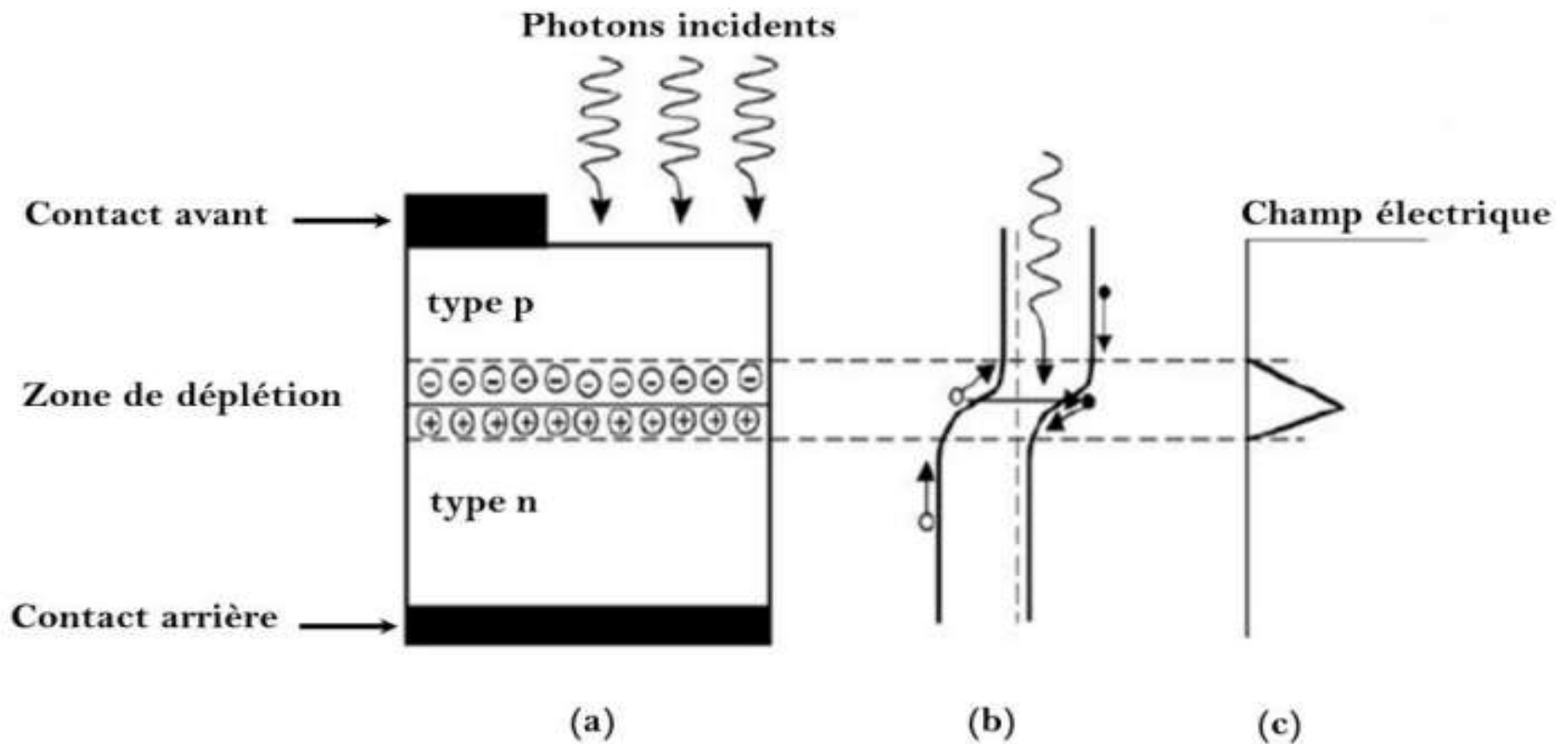
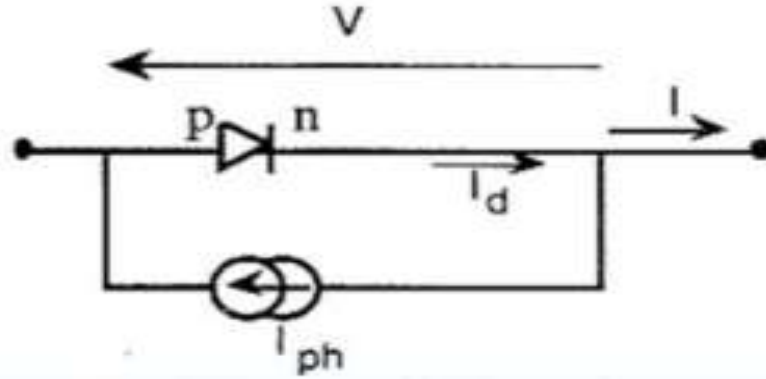


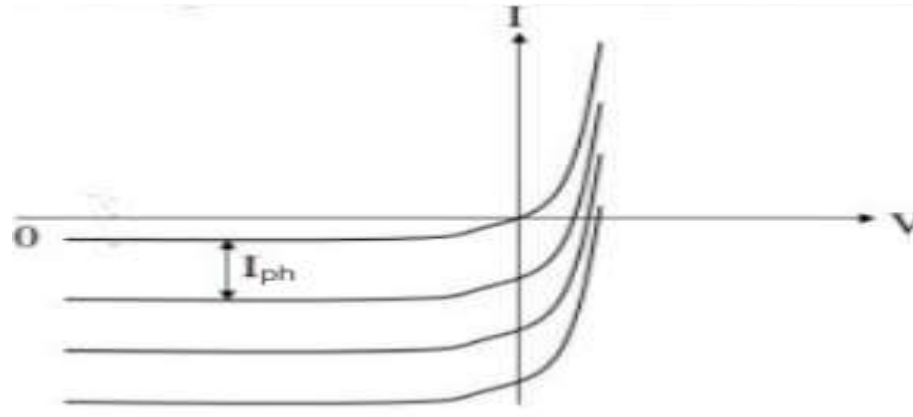
Schéma d'une photodiode à jonction p-n

- (a) Fonctionnement de la jonction.
- (b) Diagramme de bandes.
- (c) Champ électrique dû à la jonction p-n.

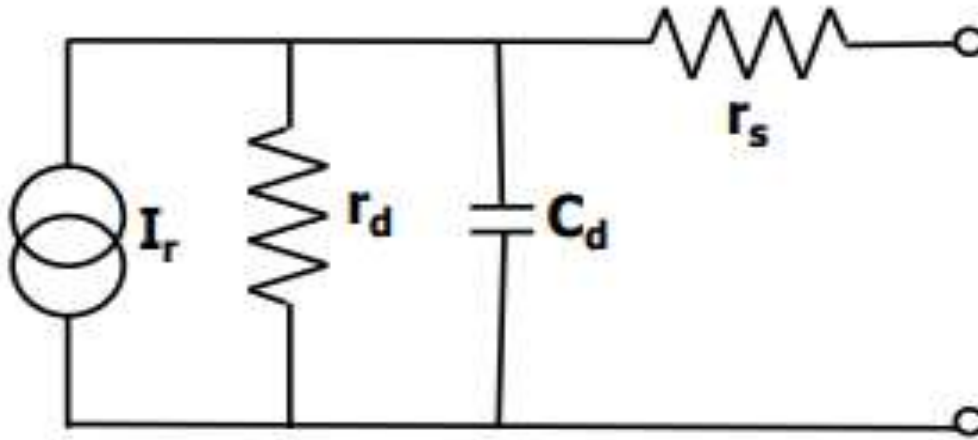
- L'électron photocrée se déplace de la zone P vers la zone N, on a donc un photocourant inverse: I_{ph}



- Le générateur associé à I_{ph} est en parallèle avec la diode donc le courant dans le circuit extérieur est $I = I_d - I_{Ph}$



-Montage électrique équivalent de la photodiode:



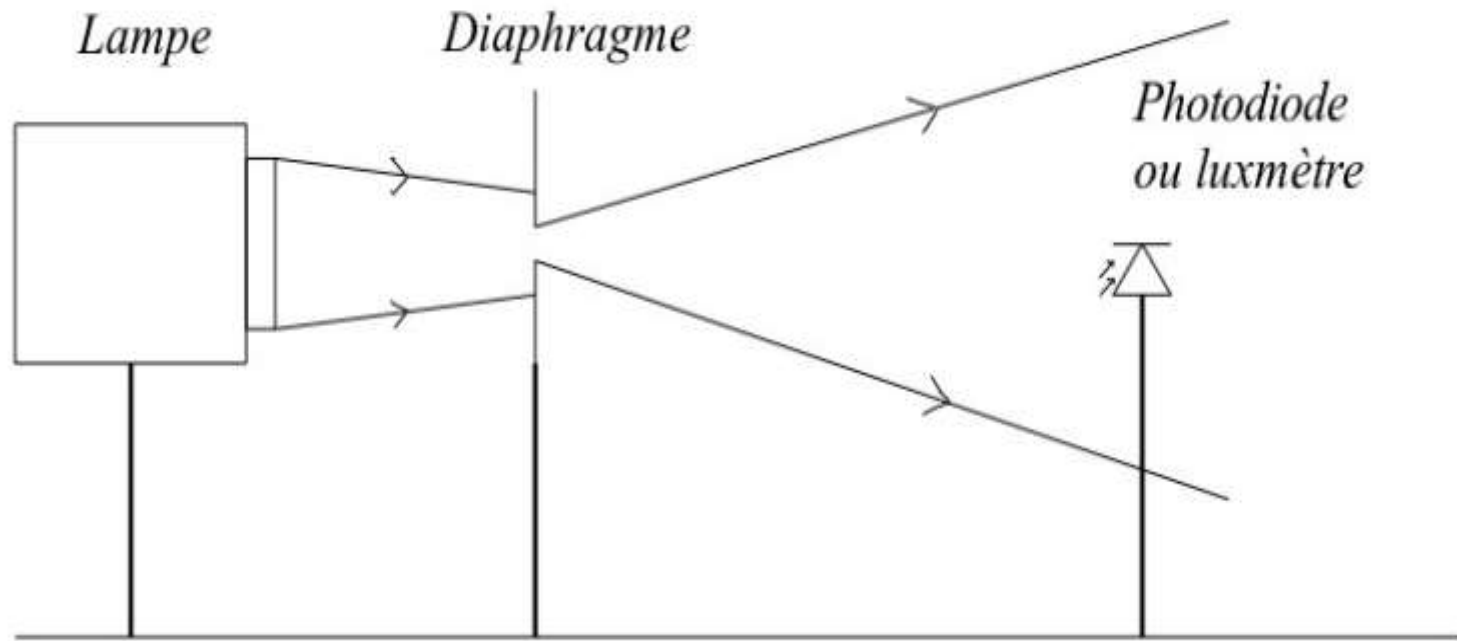
r_d : résistance dynamique de la jonction

r_s série: résistance des contacts ohmiques

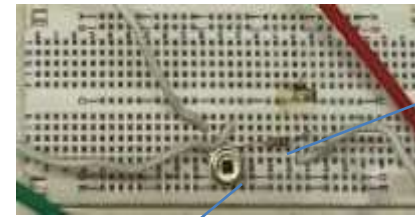
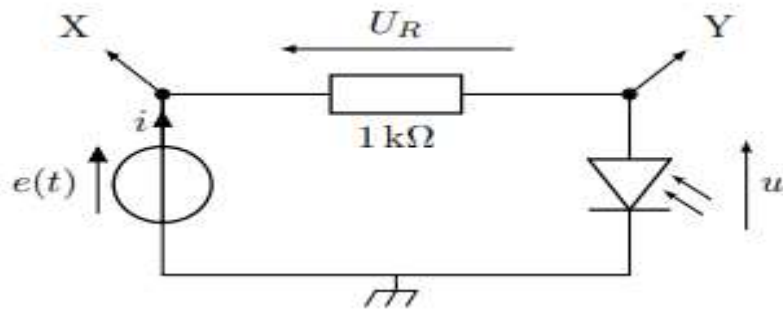
C_d : capacité de la jonction

2-Simulation numérique d'une photodiode

- Tracé de la caractéristique:

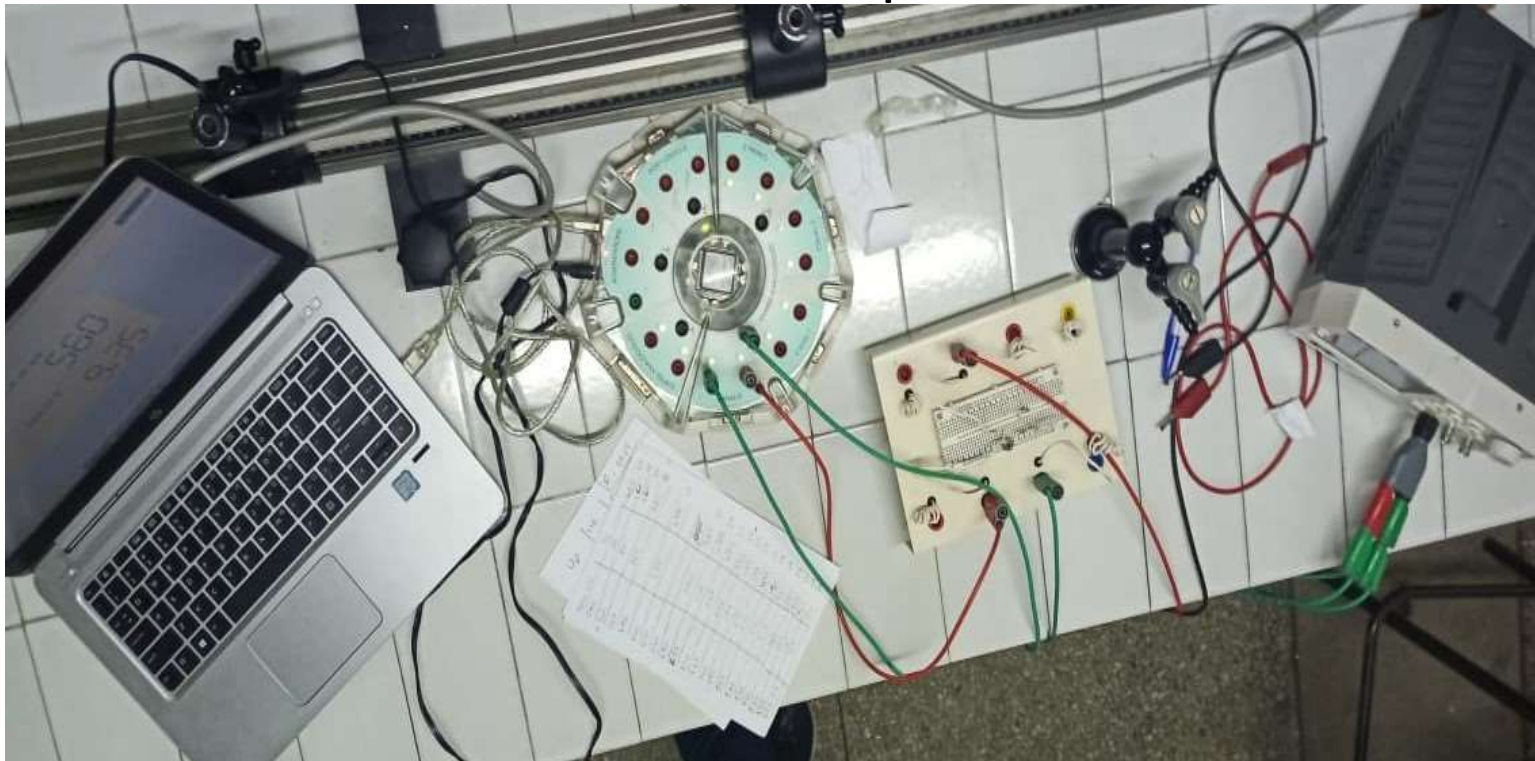


Dispositif expérimental pour l'étude et le tracé de la caractéristique de la photodiode.

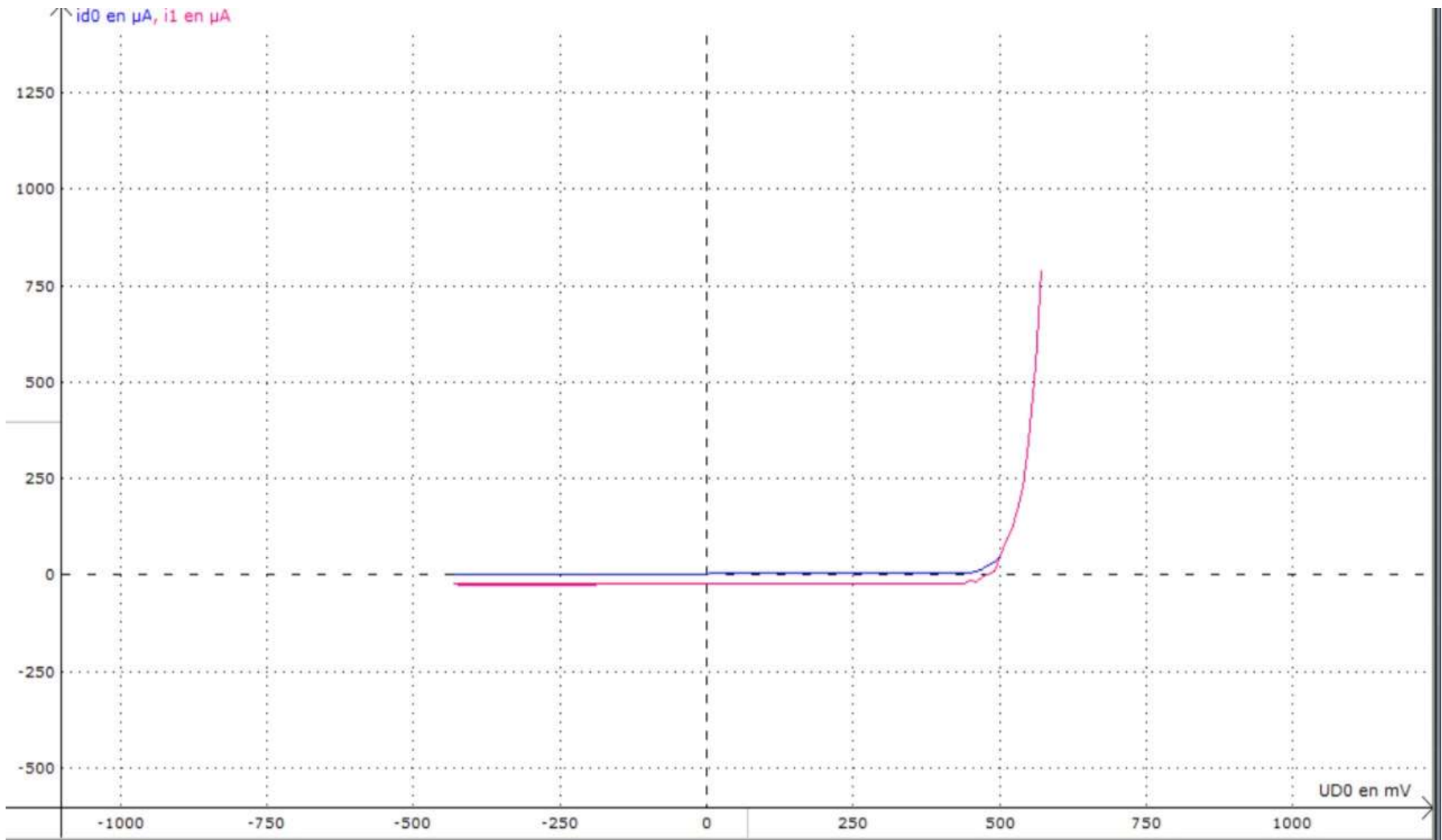


résistance

photodiode

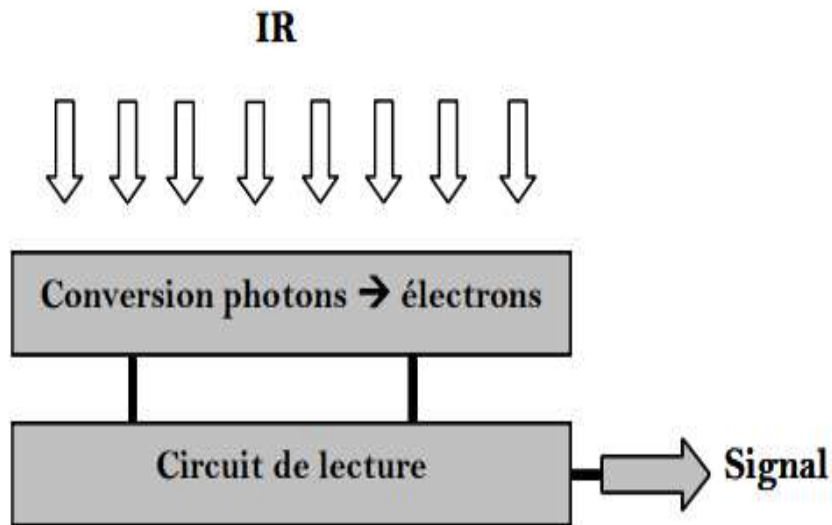


Montage de mesure de la caractéristique de la photodiode

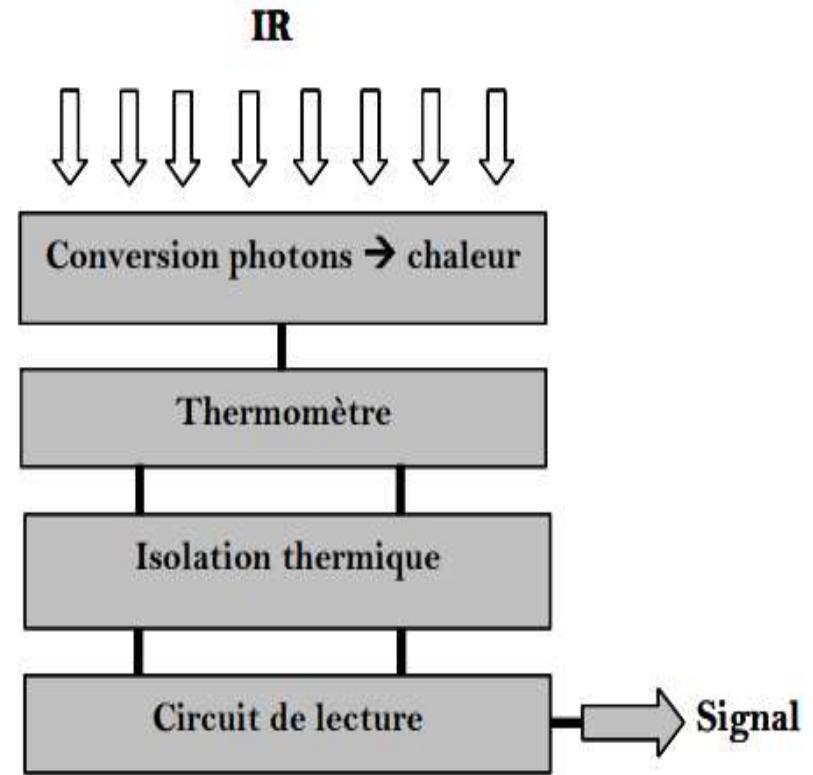


Caractéristique $I=f(V)$ d'une photodiode

Comparaison entre la détection thermique et quantique



Détecteur quantique



Détecteur thermique

- **Détecteurs quantiques:**

- Couts élevés
- S'usent avec le temps (les refroidisseurs cryogéniques ont une moyenne de vie de 20000 heures)
- Très sensibles (détecte la moindre variation de la température)
- Des temps d'arrêts plus importants pour le service
- Fonctionnent généralement dans l'infrarouge moyenne (3-5 μm)

- **Détecteurs thermiques:**

- Peu coûteux
- Consommation faible d'énergie
- Peu de pièces mobiles
- Durée de vie plus longue
- Peu sensibles
- Fonctionnement dans la bande infrarouge à ondes longues (7-14 μm)