



Mesure de température sans contact

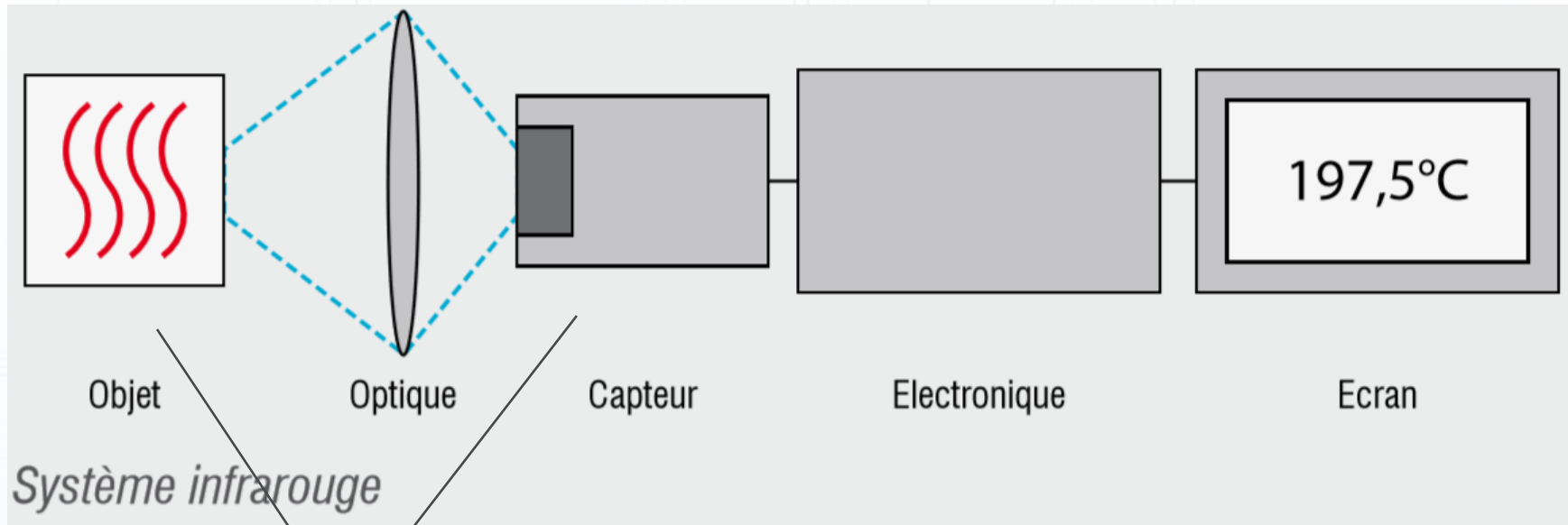
Comment on détecte le rayonnement d'un objet et convertir cette énergie en un signal électrique ?

Milieux : interactions, interfaces, homogénéité, ruptures (TIPE 2017-2018)

Plan:

- 1. Principe de mesure de température sans contact**
- 2. Les processus physiques d'émission du rayonnement:**
 - A. Expérience et interprétation classique**
 - B. Solution :avènement de la mécanique quantique**
 - C. Simulation numérique avec python d'un corps noir**
- 3. La physique du détecteur :**
 - A. Modélisation physique d'une photodiode**
 - B. Simulation numérique d'une photodiode**

1.Principe de mesure de température sans contact



On se concentre sur
l'émission d'objet et sur
le capteur



2. Les processus physiques d'émission du rayonnement:

Lord kelvin en 1892 a dit: la science forme aujourd'hui, pour l'essentiel un ensemble parfaitement achevé:

- La mécanique de Galilée et newton
- L'électromagnétisme de faraday et de Maxwell
- La thermodynamique de Carnot et de Boltzmann



Sauf deux petites nuages:

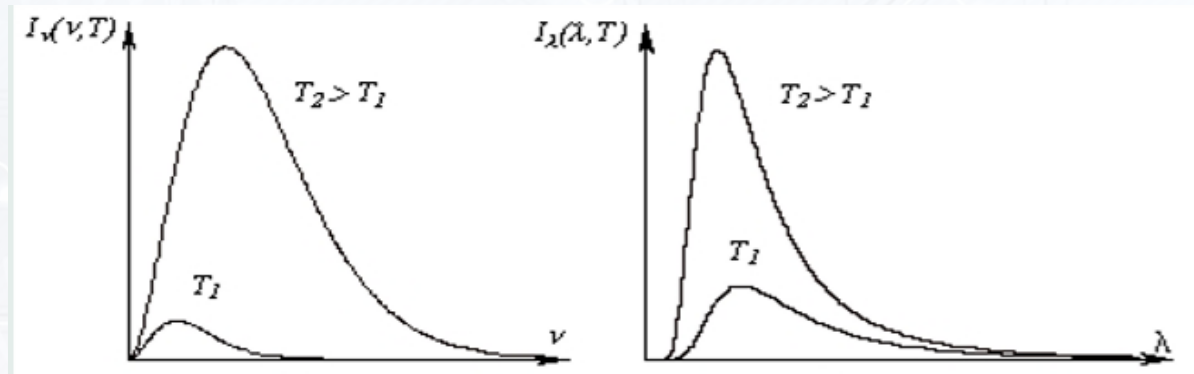
- L'expérience de Michelson et Morley
et la relativité de Lorentz, Poincaré et Einstein
- Le rayonnement du corps noir et les quanta
de Planck, Einstein, Bohr



A. Expérience et interprétation classique:

Un corps noir chauffé à haute température émet de la lumière à toutes les longueurs d'onde. On obtient cette courbe avec un maximum pour une longueur d'onde λ_M dépendant simplement de la température suivant la loi de "déplacement de Wien" (1896).

$$\lambda_M T = C_0 = 0.2898 \text{ cm.K}$$



Densité d'énergie radiative en fonction de la fréquence et de la longueur d'onde

Pour expliquer ces résultats, Rayleigh et Jeans, proposeront que le champ électromagnétique rayonné est dû à un ensemble dénombrable d'oscillateurs harmoniques linéaires qui vibrent.

La densité d'énergie rayonnée est: $I_\nu = \rho(\nu) \langle E(\nu, T) \rangle$

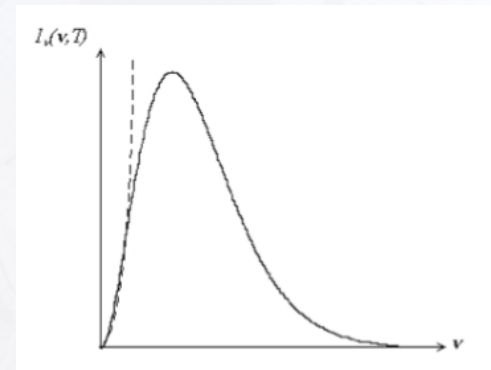
Avec $\rho(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}$ le nombre d'oscillateurs par unité de volume et

$$\langle E(\nu, T) \rangle = \frac{\int_0^\infty E e^{-E/kT} dE}{\int_0^\infty e^{-E/kT} dE} = kT \quad \text{l'énergie moyenne de chaque oscillateur.}$$

On obtient donc la loi de Rayleigh-Jeans

$$I_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT \nu^2$$

Cette loi n'est pas en accord avec l'expérience,
c'est "la catastrophe de l'ultraviolet".



B. Solution :avènement de la mécanique quantique

Le 14 décembre 1900, Planck émit l'idée que:

“Les échanges d'énergie entre la matière et le rayonnement ne se font pas de façon continue mais par quantités discrètes et indivisibles.”

l'énergie de chaque oscillateur est un multiple entier d'une valeur donnée ε soit : $E_n = n\varepsilon$.

Dans ce cas:

$$\langle E(\nu, T) \rangle = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} E_n e^{-E_n/kT}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-E_n/kT}} = \frac{\varepsilon \sum_{n=0}^{\infty} n e^{-n\varepsilon/kT}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\varepsilon/kT}}$$

On pose

$$x = \frac{\varepsilon}{kT}$$

$$\begin{aligned}
 & \rightarrow ne^{-nx} = -\frac{d}{dx}(e^{-nx}) \rightarrow \sum_{n=0}^{\infty} ne^{-nx} = -\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{1-e^{-x}}\right) = \frac{e^{-x}}{(1-e^{-x})^2} \\
 \langle E(\nu, T) \rangle &= \frac{\varepsilon \sum_{n=0}^{\infty} ne^{-nx}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-nx}} \\
 & \rightarrow \sum_{n=0}^{\infty} e^{-nx} = 1 + e^{-x} + e^{-2x} + \dots = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1-e^{-nx}}{1-e^{-x}} \right) = \frac{1}{1-e^{-x}}
 \end{aligned}$$

Donc $\langle E(\nu, T) \rangle = \frac{\varepsilon e^{-x}}{1 - e^{-x}} = \frac{\varepsilon}{e^x - 1} = \frac{\varepsilon}{e^{(\varepsilon/kT)} - 1}$ et $I_\nu(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{\varepsilon}{e^{(\varepsilon/kT)} - 1}$

Planck a posé $\varepsilon = h\nu$ où h est une nouvelle constante universelle appelée “constante de Planck”.

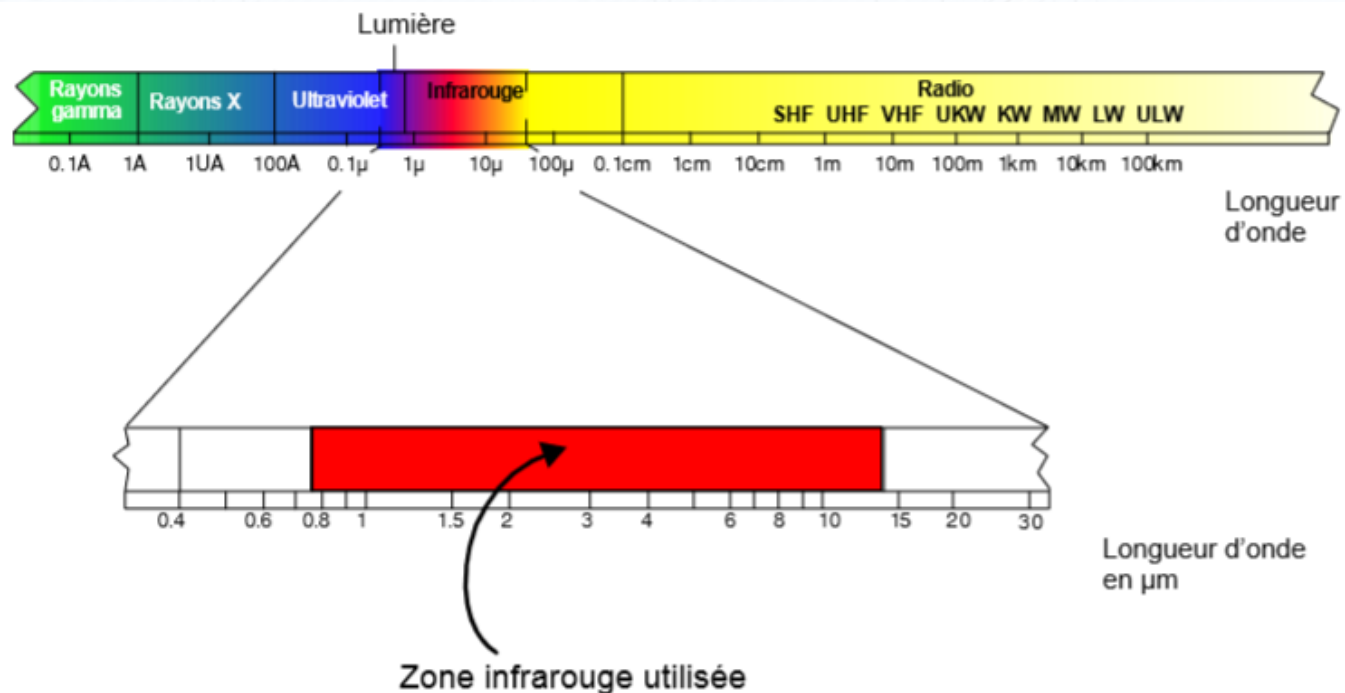
d'où

$$I_\nu(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{(h\nu/kT)} - 1}$$

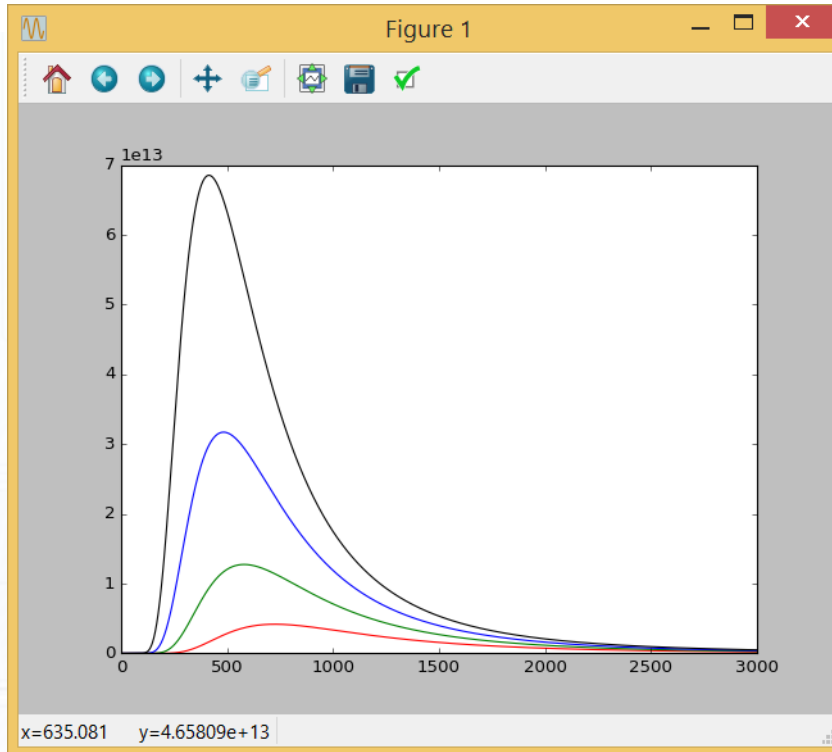
La loi de Planck peut s'exprimer également en fonction de la longueur d'onde. Elle s'écrit alors :

$$I_\lambda(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{(hc/\lambda kT)} - 1} \right)$$

- Ces photons émis par notre corps se déplacent à la vitesse de la lumière tout en respectant les principes optiques connus. Ils peuvent ainsi être déviés, focalisés par une lentille ou réfléchis par un miroir. Le spectre de cette émission va de 0,7 à 1000 μm (longueur d'onde). Pour cette raison, ils ne peuvent pas être vus à l'œil nu. Cette partie du spectre électromagnétique juste au-dessous du rouge du spectre visible est appelé infrarouge du latin « infra » (plus bas).



C. Simulation numérique avec python d'un



```
8 def planck(onde, T):  
9     a = 2.0*h*c**2  
10    b = h*c/(onde*k*T)  
11    intensité = a / ( (onde**5) * (np.exp(b) - 1.0) )  
12    return intensité
```


3. La physique du détecteur :

A. Modélisation physique d'une photodiode:

Effet photoélectrique:

Il était expérimentalement connu que lorsque de la lumière tombe sur une surface métallique, des électrons sont éjectés par cette surface.

En 1905 Einstein a précisé que le champ électromagnétique consiste en de véritables corpuscules d'énergie lumineuse $h\nu$ (les photons).

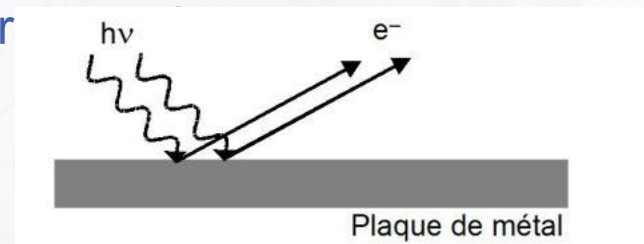
Cet électron acquiert l'énergie $E = h\nu$ au moment où il est encore dans le métal

Soit W le travail pour l'extraire du métal.

Cet électron sera donc émis avec l'énergie

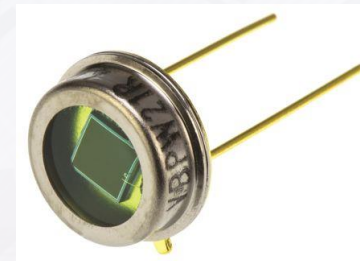
$$E_c = E - W$$

$$E_c = h\nu - W$$



Les détecteurs quantiques (photodiodes) entrent directement en interaction avec les photons captés créant ainsi des paires d'électrodes, puis un signal de courant électrique, ils sont caractérisés par:

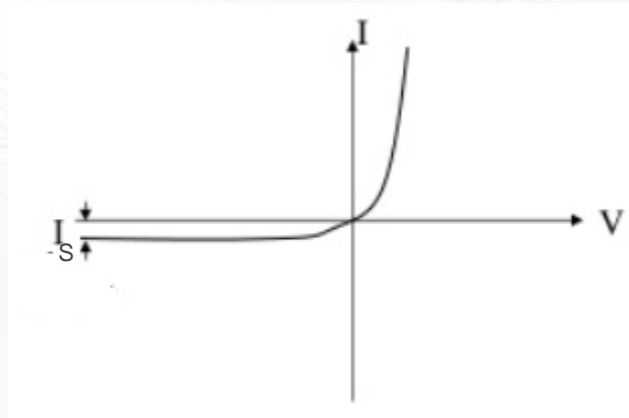
- La sensibilité $R = S / \phi$
- La réponse spectrale c'est la réponse à un flux de longueur d'onde λ
- Le rendement quantique $\eta(\lambda)$ c'est le nombre moyen d'électrons excités par photon incident de longueur onde λ
- La linéarité
- Le temps du réponse c'est le temps caractéristique d'évolution du signal détecté lorsque le flux incident varie brusquement



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

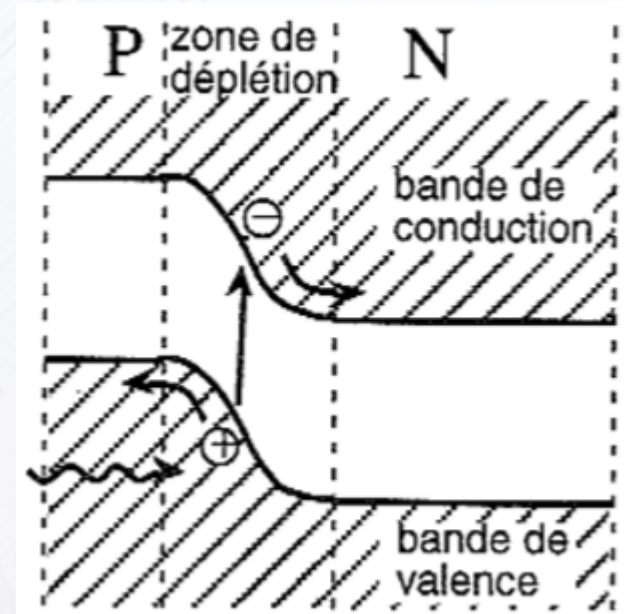
$$I_d = I_s [e^{(qV/k_B T)} - 1]$$

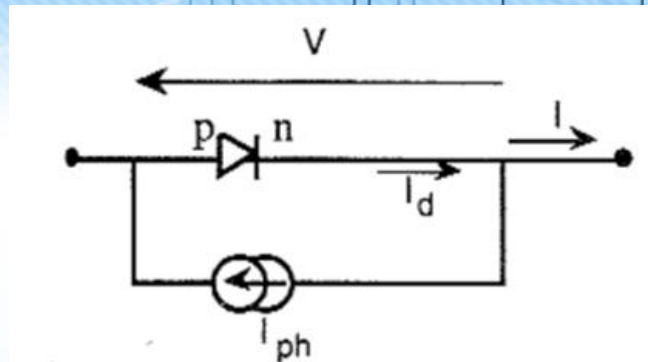
Avec I_s le courant inverse d'obscurité, K_B la constante de Boltzmann, T la température absolue du composant.



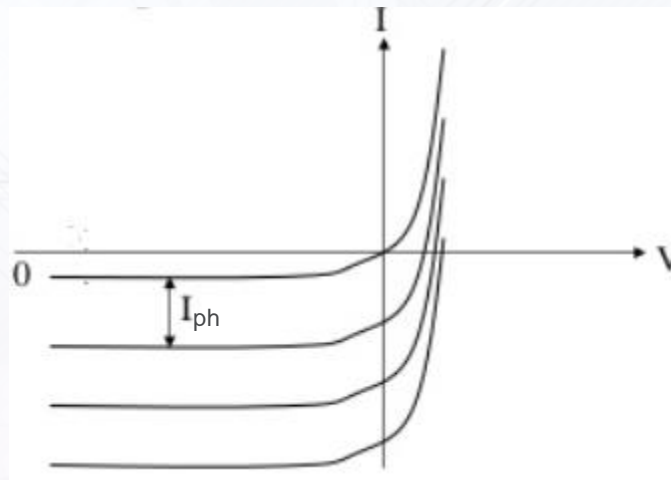
- Dans une photodiode, chaque photon absorbé crée une paire électron-trou. Le champ électrique qui règne dans la zone de déplétion sépare les deux porteurs s'ils sont créés à son voisinage.
- L'électron photocrée se déplace de la zone P vers la zone N
- On a donc un photocourant inverse

$$I_{ph} = \eta q \phi \lambda / hc$$

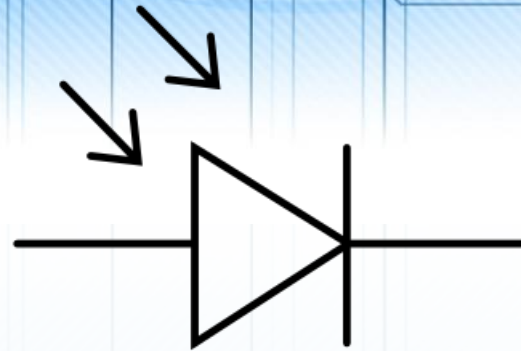




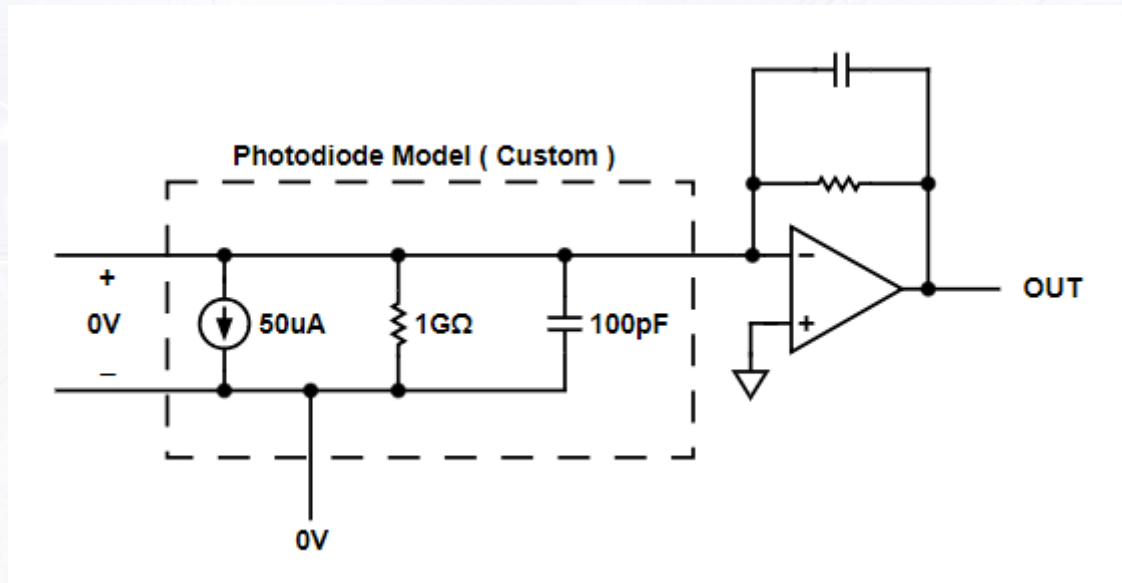
Le générateur associé à I_{ph} est en parallèle avec la diode donc le courant dans le circuit extérieur est $I = I_d - I_{ph}$



Symbole de la photodiode est:



Ci-contre, le schéma électrique équivalent de la photodiode:



B. Simulation numérique d'une photodiode

