DÉTECTEUR DE FLAMME INFRA-ROUGE

Comment détecte-t-on le rayonnement émis par une flamme et convertir cette énergie en un signal électrique ?

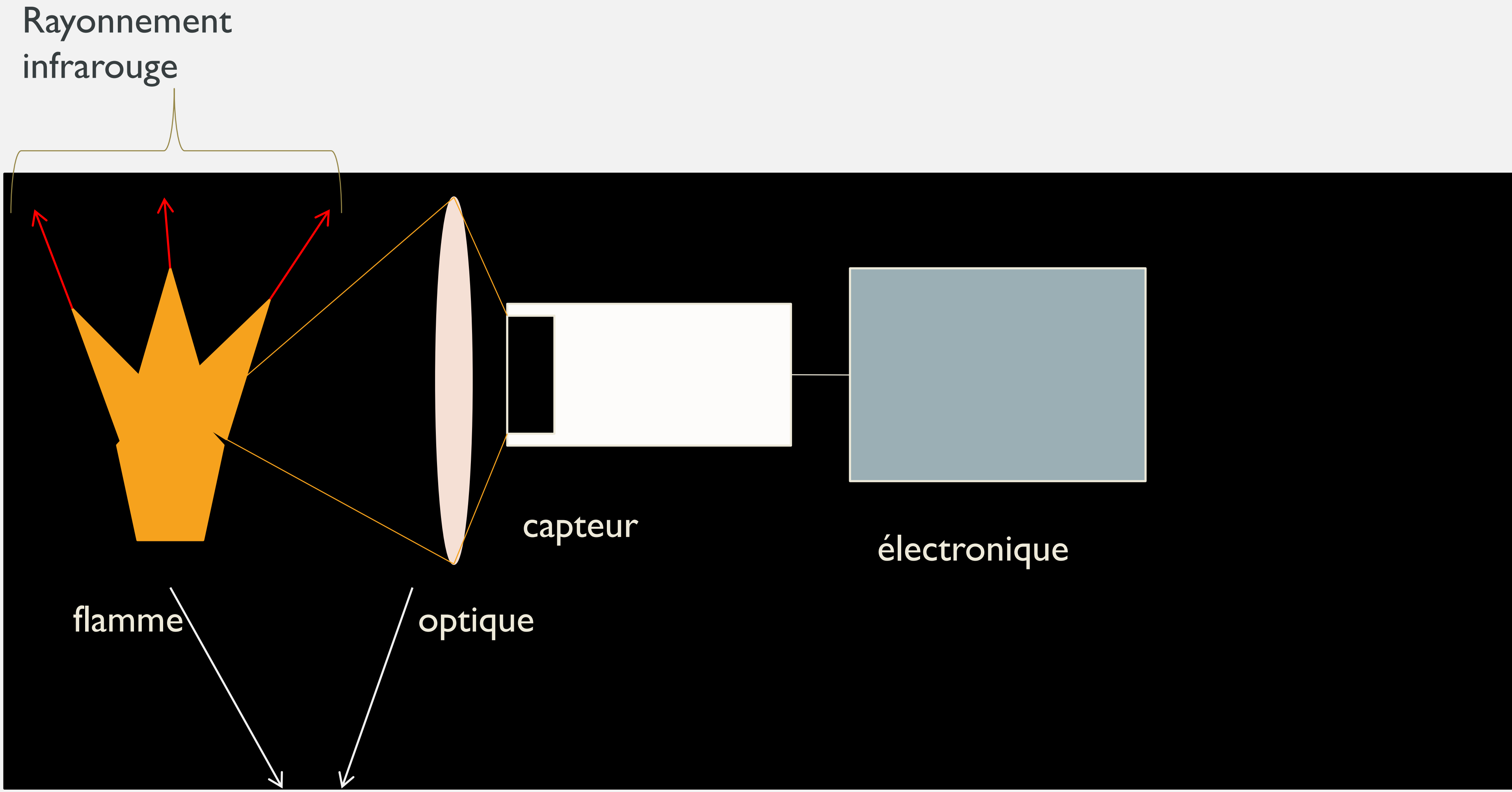
Numéro d'inscription : 47291

TIPE 2020/2021 : Enjeux sociétaux : environnement , sécurité , énergie.

PLAN :

1. Principe de détection de la flamme
2. Les processus physiques d'émission de rayonnement :
   a. Expérience et interprétation classique
   b. Simulation numérique avec python d'un corps noir
   c. Avènement de la mécanique quantique
   d. Implémentation avec python du processus de distinction du rayonnement émis par la flamme
3. La physique du détecteur :
   a. Effet photo électrique
   b. Modélisation physique d'une photo diode

1. Principe de détection de la flamme



On se concentre sur l'émission de la flamme et sur le capteur.

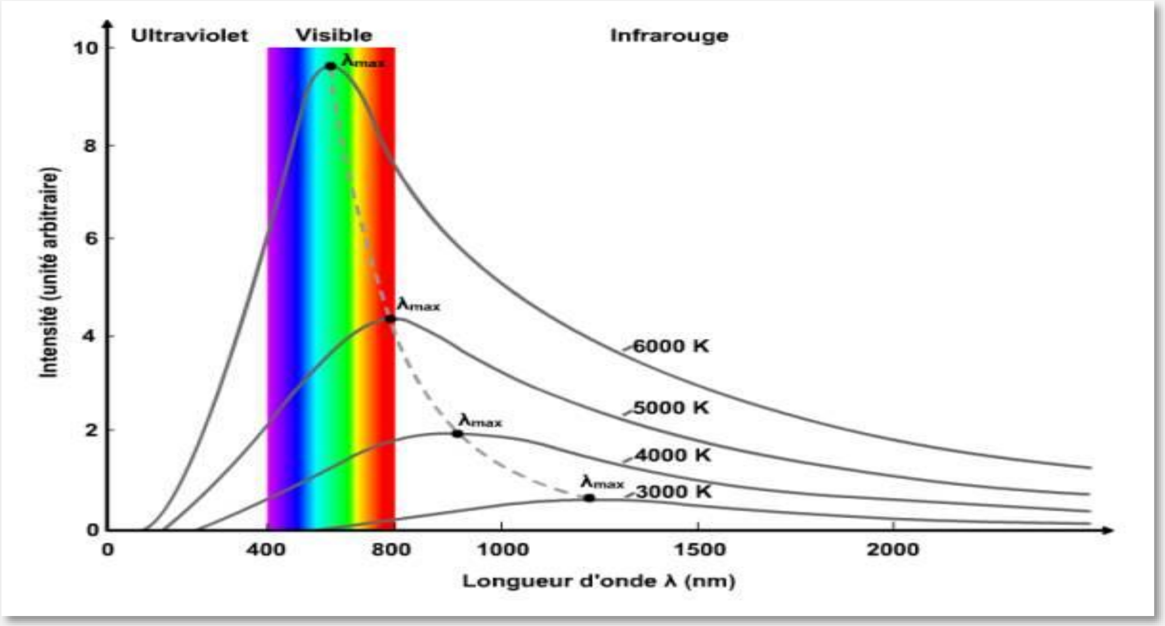
2. Les processus physiques d'émission de rayonnement :

a. Expérience et interprétation classique:

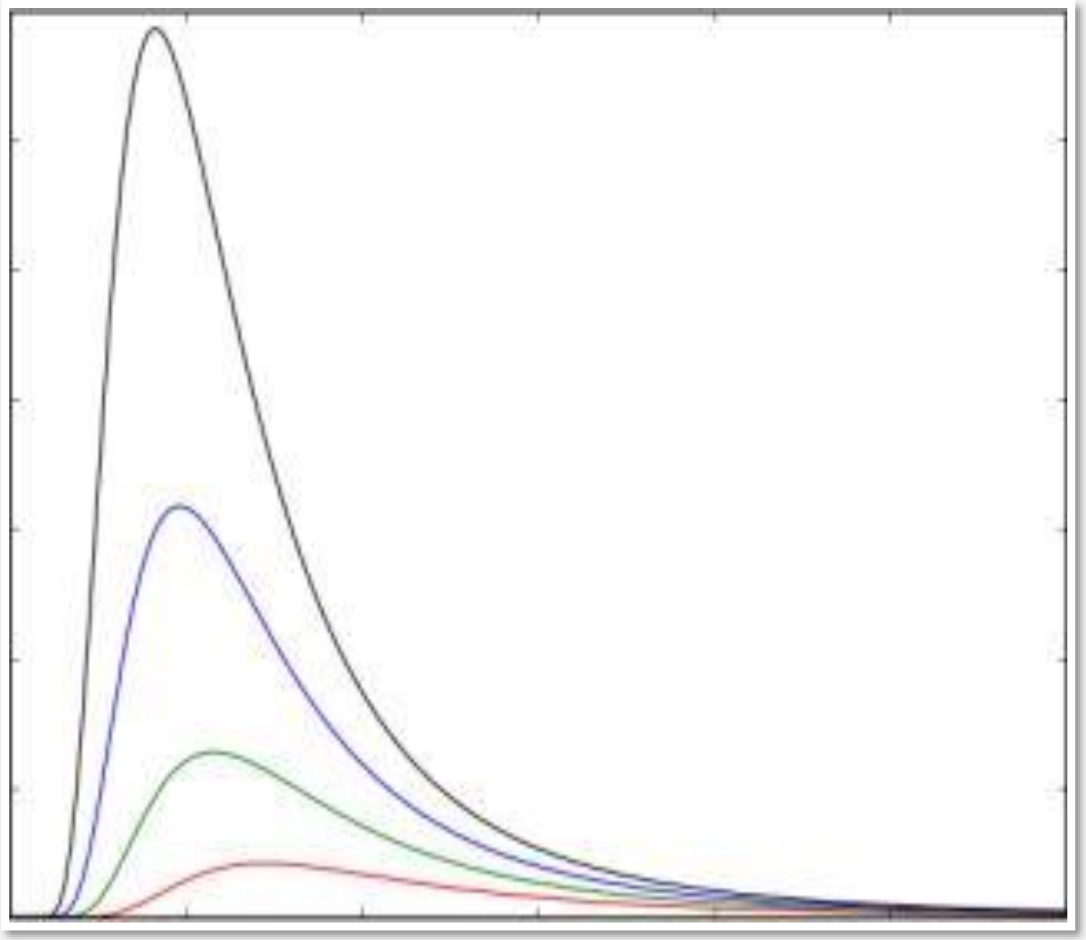
Un corps noir chauffé à haute température , émet des radiations à toutes les longueurs d'ondes . On obtient ainsi la courbe suivante qui atteint son maximum pour une longueur d'onde λm qui ne dépend que de la température suivant la loi de « déplacement de Wien » .

$$\sigma_W = \lambda_m T = 2{,}898.10^{-3}\, m.K$$

Où σ_W est appelé constante de Wien.



b. SIMULATION NUMÉRIQUE AVEC PYTHON D'UN CORPS NOIR :



○ Limite de l'interprétation classique du phénomène de rayonnement:

Rayleigh et Jeans, proposèrent comme explication pour ce résultat que le champ électromagnétique rayonné est dû à un ensemble dénombrable d'oscillateurs harmoniques linéaires qui vibrent.

La densité d'énergie rayonnée est: $I_\upsilon = \rho(\upsilon) < E(\upsilon,T) >$

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

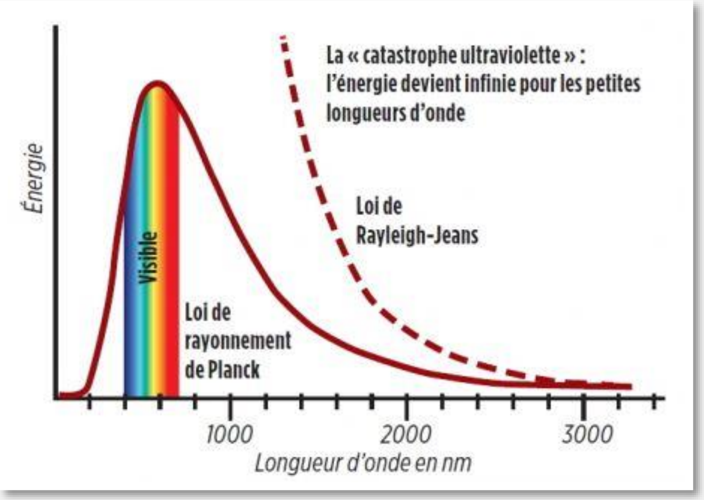
$$< E(\upsilon,T) > = \frac{\int_\infty^0 E e^{-E/kT} dE}{\int_\infty^0 e^{-E/kT} dE} = kT$$

l'énergie moyenne de chaque oscillateur.

On obtient donc la loi de Rayleigh-Jeans :

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

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



c. 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 : En = nε.

Dans ce cas :

$$< E(\upsilon,T) >= \frac{\sum_{n=0}^{\infty} E_n e^{-E_n/kT}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-E_n/kT}} = \frac{\varepsilon \sum_{n=0}^{\infty} n e^{-n\varepsilon/kT}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\varepsilon/kT}}$$

On pose :

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

D'autre part on a :

$$ne^{-nx} = -\frac{d}{dx}(e^{-nx}) \rightarrow \sum_{n=0}^{\infty} ne^{-nx} = -\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{1-e^{-x}}\right) = \frac{e^{-x}}{(1-e^{-x})^2}$$

et :

$$\sum_{n=0}^{\infty} e^{-nx} = 1 + e^{-x} + e^{-2x} + ... = \lim_{n\to\infty}\left(\frac{1-e^{-nx}}{1-e^{-x}}\right) = \frac{1}{1-e^{-x}}$$

Donc : $$< E(\upsilon,T) > = \frac{\varepsilon e^{-x}}{1-e^{-x}} = \frac{\varepsilon}{e^{x}-1} = \frac{\varepsilon}{e^{(\varepsilon/kT)}-1}$$ et $$I_\upsilon(\upsilon,T) = \frac{8\pi\upsilon^2}{c^3}\frac{\varepsilon}{e^{(\varepsilon/kT)}-1}$$

Planck a posé h ,comme une nouvelle constante universelle appelée “constante de Planck”.
D’où on obtient :

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

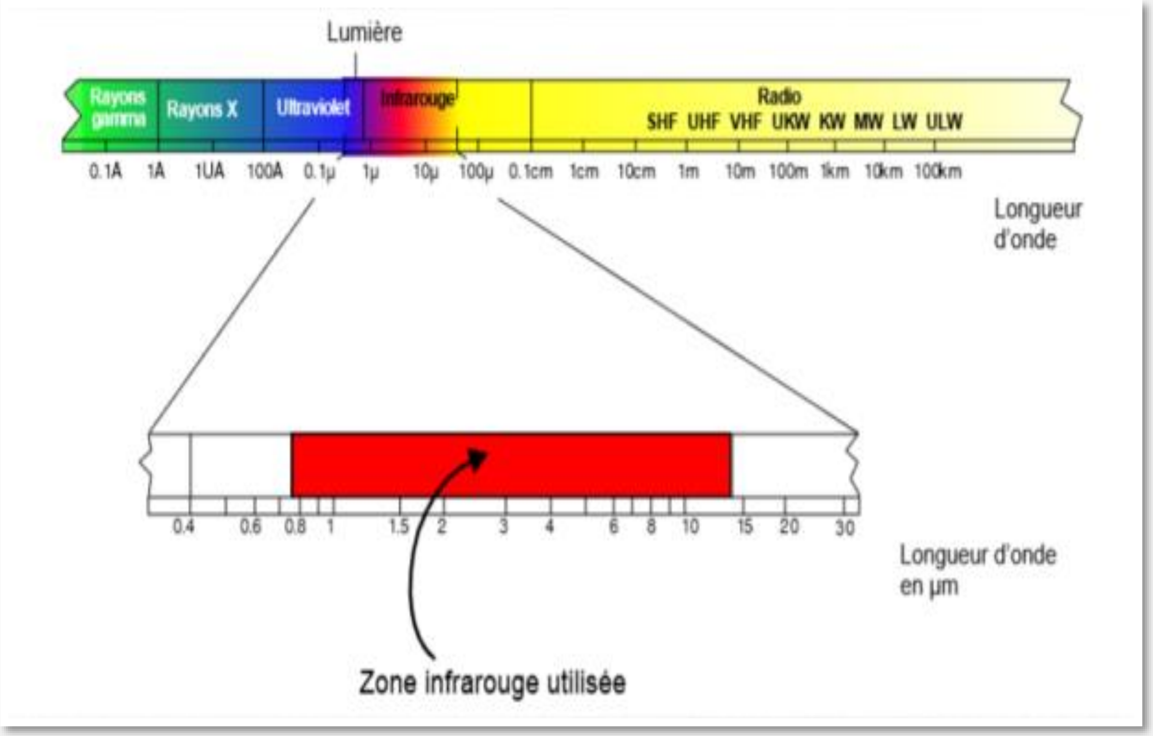
La loi de Planck peut s’exprimer également en fonction de la longueur d’onde. Elle s’écrit alors :

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

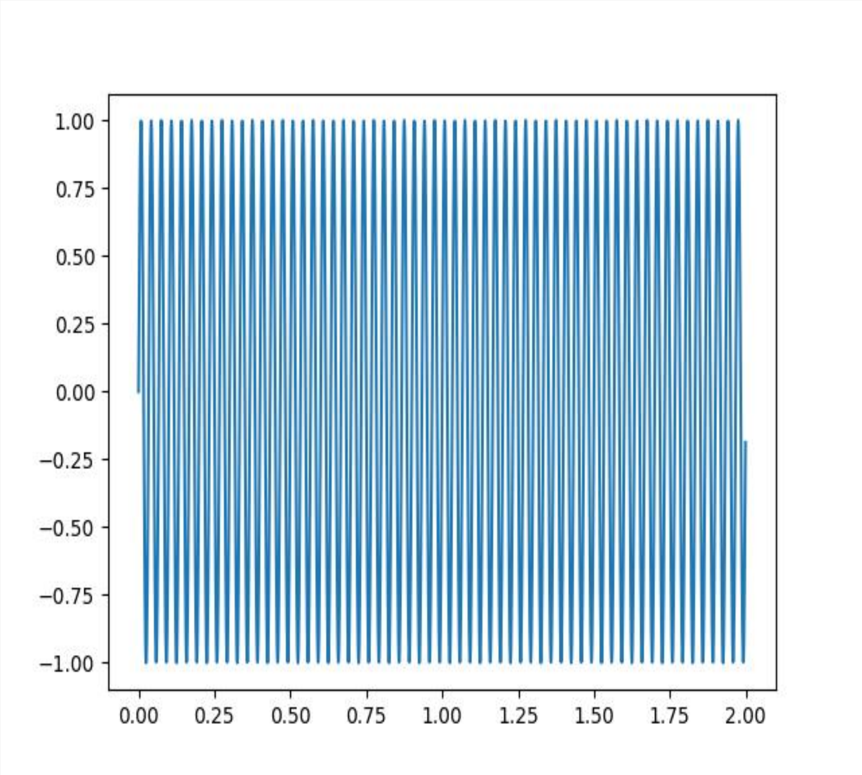
○ L’émission dans le domaine de l’infra rouge :

Tout corps chaud rayonne à toutes les longueurs d’ondes .

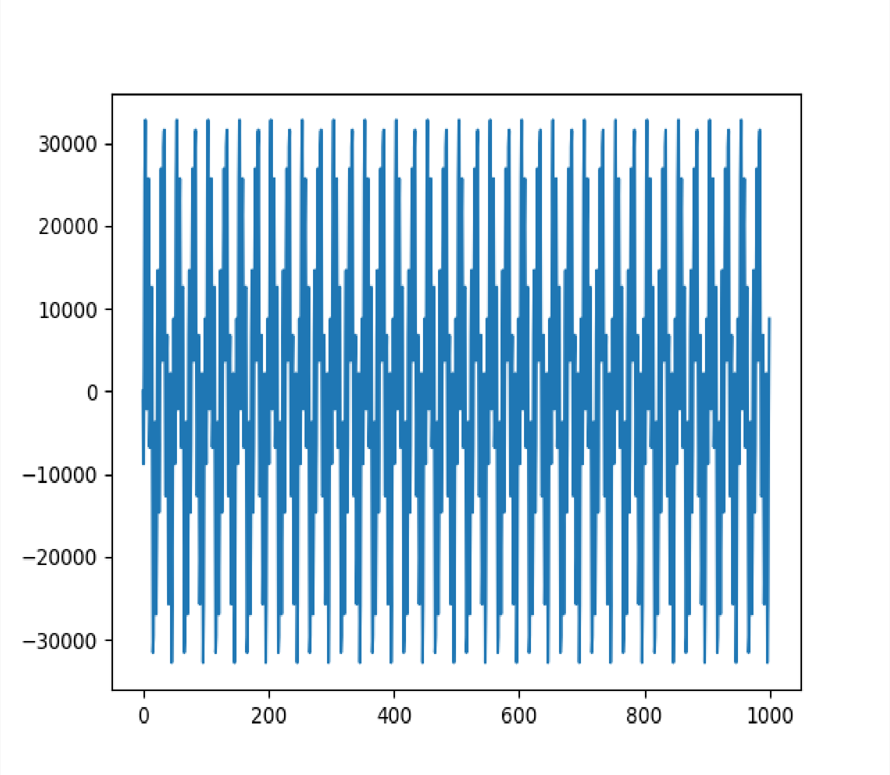
Mais les détecteurs de flamme infrarouge se limitent à l’analyse des rayonnements situés dans le domaine de l’infrarouge, de longueurs d’ondes voisines de 4,3 µm, avant de passer à l’étape de filtrage .



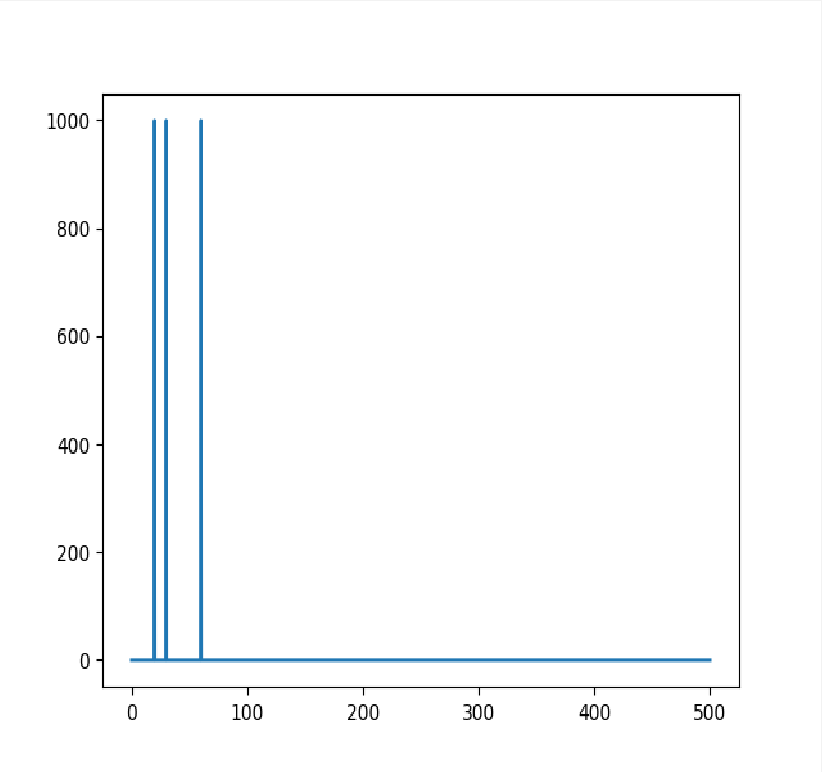
d. IMPLÉMENTATION AVEC PYTHON DU PROCESSUS DE DISTINCTION DU RAYONNEMENT ÉMIS PAR LA FLAMME :

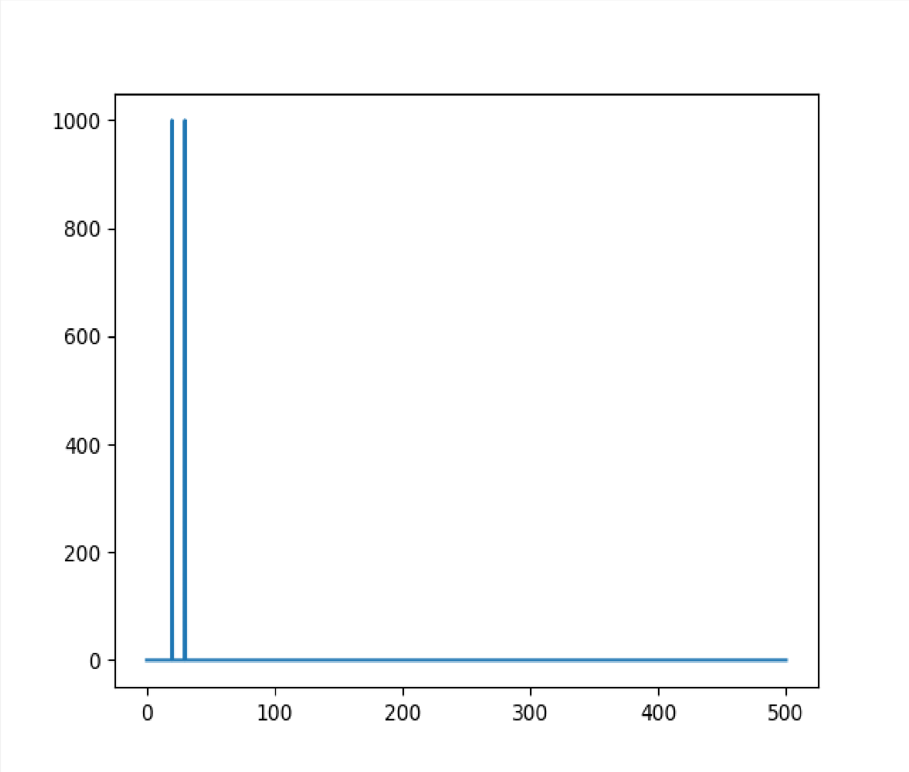


Stimulation d'un rayonnement émis par une flamme (de fréquence égale à 30 Hz pendant 2 secondes.)



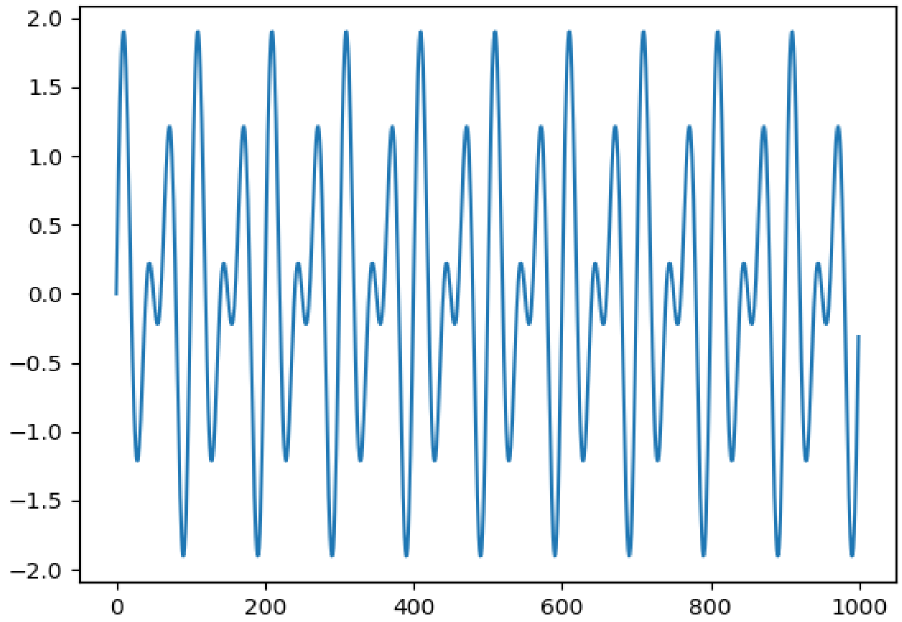
Stimulation de la superposition des rayonnements émis par 3 corps chauds dans l'environnement ambiant .





Transformée de fourrier du signal incident.

Filtrage des fréquences extérieures à la bande passante (de 1Hz à 30Hz).



TRANSFORMÉE DE FOURRIER INVERSE DU SIGNAL OBTENU APRÈS FILTRAGE .

3. La physique du détecteur :

a. Effet photo-électrique :

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 (les photons).

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

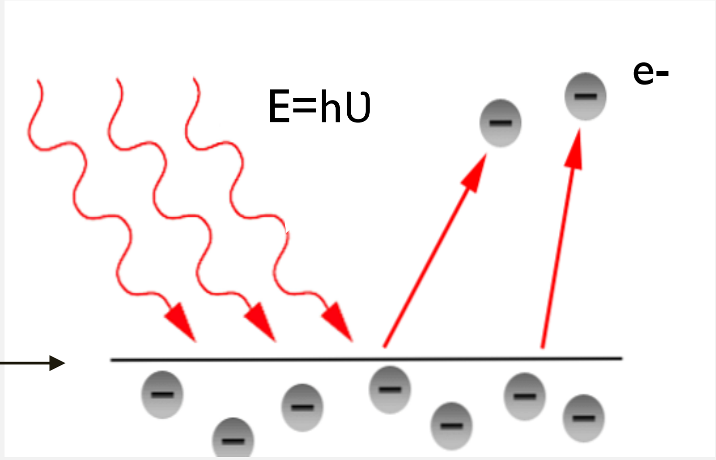
Soit W le travail pour l'extraire de ce métal.

Cet électron sera donc émis avec l'énergie :

$E_c = E - W$

Soit :

$E_c = h\nu - W$



Plaque métallique

b. Modélisation physique d’une photo diode :

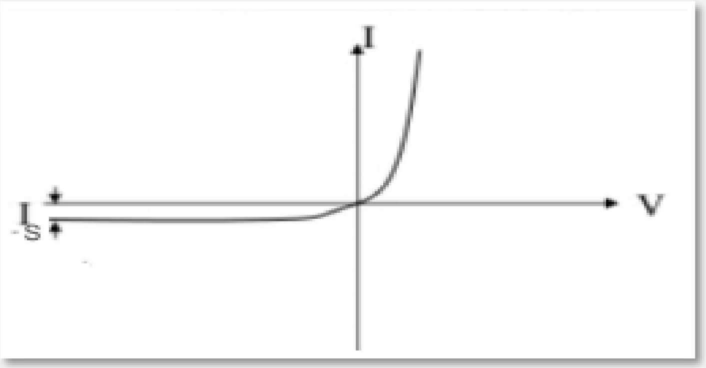
Les détecteurs quantiques (photodiodes) tout en entrant en interaction directe avec les photons captés, créent des paires d’électrodes, puis un signal de courant électrique . les diodes sont caractérisées par:

i. La sensibilité $R = S / \phi$.
ii. La réponse spectrale c’est la réponse à un flux de longueur d’onde .
iii. Le rendement quantique c’est le nombre moyen d’électrons excités par photon incident de longueur onde .
iv. La linéarité.
v. Le temps du réponse c’est le temps caractéristique d’évolution du signal détecté lorsque le flux incident varie brusquement.

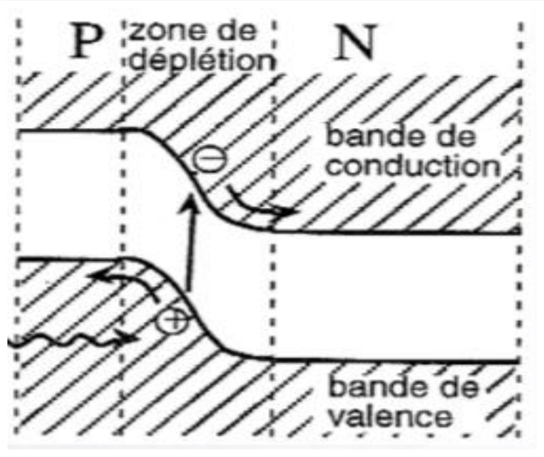
La relation courant-tension idéale d'une diode est:

$$I_d = I_S[e^{(qV/k_BT)} - 1]$$

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 d'électron-trou. Le champ électrique qui règne dans la zone de déplétion sépare les deux porteurs s'ils sont crées à son voisinage.
L'électron photo créé se déplace de la zone P vers la zone N.

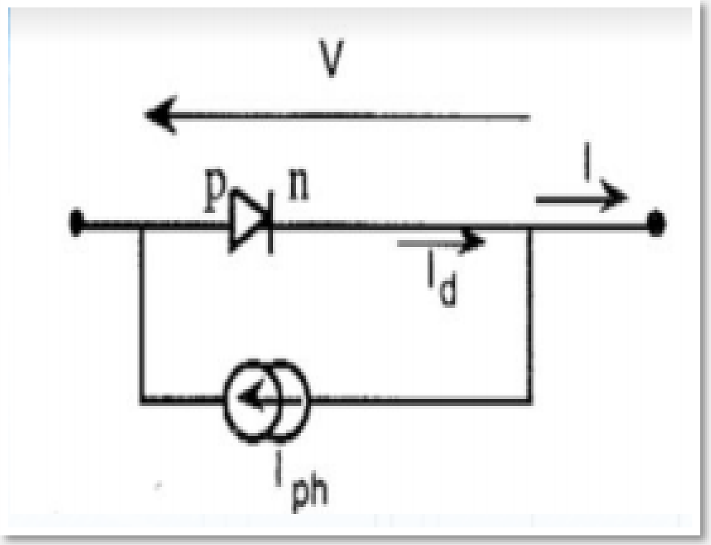


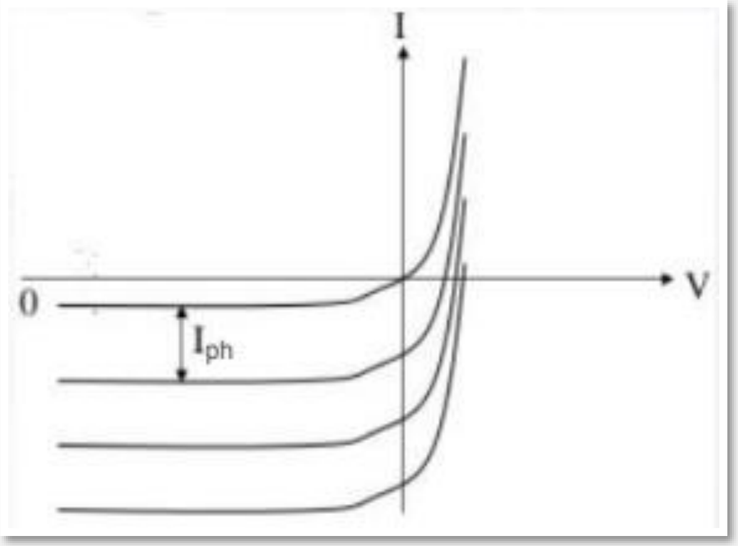
Production de courant électrique :

On a donc un photo courant inverse :

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

Le générateur associé à Iph est en parallèle avec la diode donc le courant dans le circuit extérieur est I=Id-Iph .





FIN.

MERCI POUR VOTRE ATTENTION.

ANNEXE :
CODE 1 :

```
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
h=6.62*10**(-34)
c=3*(10**8)
k=1.38*10**(-23)
def planck(onde,T):
    a=2.0*h*c**2
    b=h*c/(onde*k*T)
    intensité=a/((onde**5)*(np.exp(b))-1.0)
    return (intensité)
```

CODE 2:

```
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt

SAMPLE_RATE = 1000  # Hertz
DUREE = 2  # Secondes

def generer_rayonnement(freq, sample_rate, duree):
    x = np.linspace(0, duree, sample_rate * duree, endpoint=False)
    frequences = x * freq
    # 2pi car np.sin prendss des radians
    y = np.sin((2 * np.pi) * frequences)
    return x, y

# Generer un rayonnement de frequence 30 hertz qui dure 2s
x, y = generer_rayonnement(30, SAMPLE_RATE, DUREE)
plt.plot(x, y)
plt.show()

_, premier_rayonnement = generer_rayonnement(60, SAMPLE_RATE, DUREE)
_, deuxieme_rayonnement = generer_rayonnement(30, SAMPLE_RATE, DUREE)
_, troisieme_rayonnement = generer_rayonnement(20, SAMPLE_RATE, DUREE)

rayonnement_total = premier_rayonnement + deuxieme_rayonnement + troisieme_rayonnement

plt.plot(rayonnement_total[:500])
plt.show()
```

SUITE CODE 2 :

```
from scipy.fft import rfft, rfftfreq

N = SAMPLE_RATE * DUREE
yf = rfft(rayonnement_total)
xf = rfftfreq(N, 1 / SAMPLE_RATE)

plt.plot(xf, np.abs(yf))
plt.show()

points_par_freq = len(xf) / (SAMPLE_RATE / 2)

# la frequence cible est celle extérieure à la bande passante (entre 1Hz et 30Hz) donc 60 Hz
target_idx = int(points_par_freq * 60)
yf[target_idx - 1 : target_idx + 2] = 0

plt.plot(xf, np.abs(yf))
plt.show()

from scipy.fft import irfft

new_sig = irfft(yf)

plt.plot(new_sig[:1000])
plt.show()
```