

UE3-1 : Physique

Chapitre 5 :
**Les ondes
électromagnétiques**
Professeur Eva PEBAY-PEYROULA

Année universitaire 2010/2011

Université Joseph Fourier de Grenoble - Tous droits réservés.

V- Les Ondes électromagnétiques

Finalité du chapitre

- Définition des ondes électromagnétiques, propriétés de propagation, quelques aspects sur les interactions, phénomène de diffraction, superposition de plusieurs ondes

Plan

1. Quelques repères historiques
2. Caractéristiques des ondes électromagnétiques
3. Quelques exemples d'interaction
4. Interférences et diffraction
5. Génération et détection des O.E.M.
6. Les limites de l'électromagnétisme classique

V- Les Ondes électromagnétiques

Exemples d'application

•Lumière visible

- Comprendre le processus de vision, en fonction des caractéristiques de la lumière
- Il existe des récepteurs (protéines avec pigment) capables d'absorber la lumière visible (détection de l'intensité et des couleurs)

Rayonnements UV, X, ou γ

Connaître les caractéristiques pour comprendre les effets nocifs ou au contraire les utiliser de façon positive

Rayons γ : utilisation en scintigraphie avec un radiotraceur

RX: radiographie

UV: utilisation pour stériliser l'eau

V- Les Ondes électromagnétiques

1. Quelques repères historiques

- **Quelques repères historiques**

1819: *Oersted* champ magnétique créé par un courant électrique

1831: *Faraday* champ électrique créé par un champ magnétique variable

1865: *Maxwell* théorie des ondes électromagnétiques

1888: *Hertz* expérience sur la propagation des ondes électromagnétiques

1896: *Marconi* réception d'ondes électromagnétiques (liaison transatlantique)

1895: *Röntgen* découverte des rayons X

V- Les Ondes électromagnétiques

2. Caractéristiques des ondes électromagnétiques

- **Caractéristiques des ondes électromagnétiques**

Pas de support matériel

Propagation d'une variation d'un champ électrique \vec{E} , associée à une variation d'un champ magnétique \vec{B}

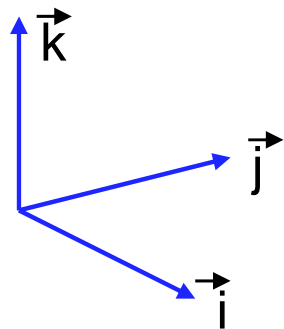
Vitesse de propagation dans le vide C , vitesse de la lumière

Les normes des champs \vec{E} et \vec{B} sont reliées entre elles par : $B = E/C$

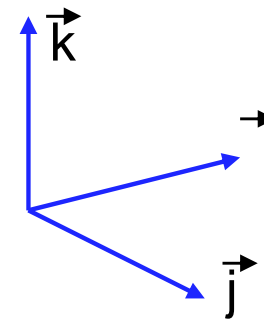
L'onde est transverse: \vec{c} , \vec{E} et \vec{B}

les vecteurs sont perpendiculaires entre eux et forment un trièdre direct

Rappel:
Exemple de
trièdre direct



Exemple de
trièdre non direct

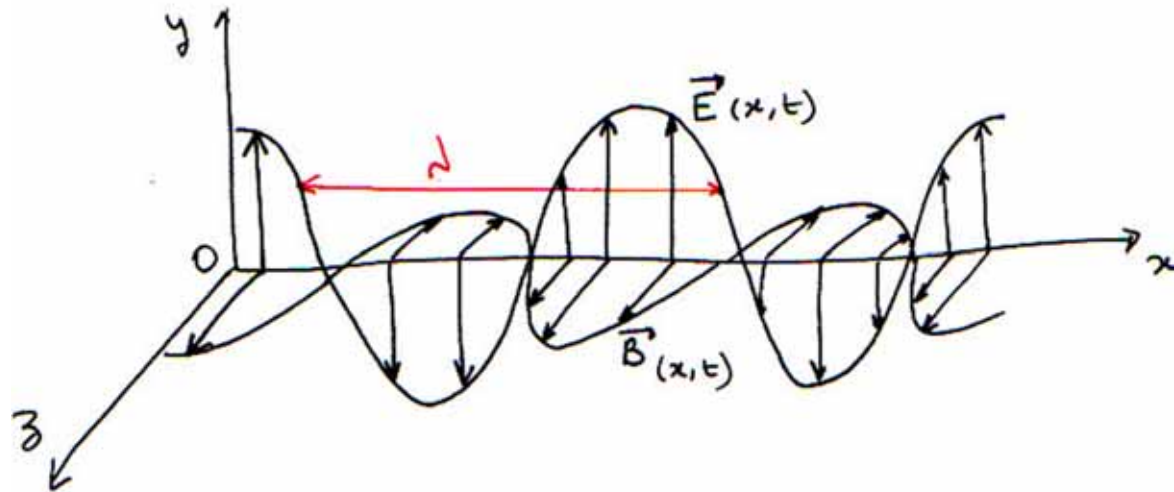


V- Les Ondes électromagnétiques

2. Caractéristiques des ondes électromagnétiques

- **Caractéristiques des ondes électromagnétiques**

Exemple d'une OEM (onde électromagnétique) sinusoïdale particulière



$$\begin{aligned}\vec{E}(x,t) &= E_0 \cos 2\pi\nu(t-x/C) \vec{j} \\ \vec{B}(x,t) &= B_0 \cos 2\pi\nu(t-x/C) \vec{k}\end{aligned}$$

Comme pour les ondes générales, les OEM sont définies par T , ν , ω , k , λ

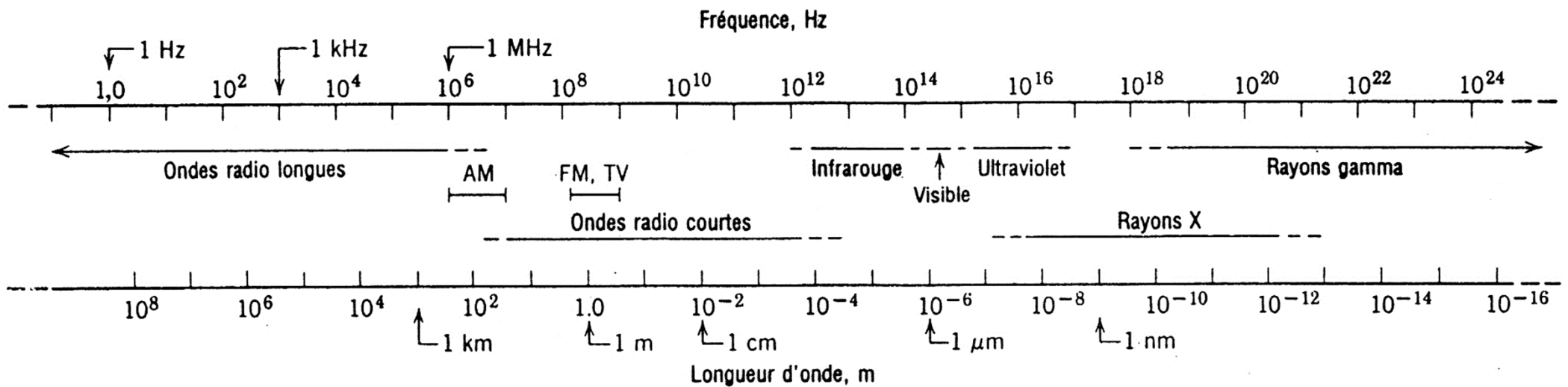
Avec $k = 2\pi/\lambda$, $\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T$

Remarque: cette onde s'appelle « onde plane » car dans un plan perpendiculaire à x , tous les points sont en phase (le parcours de l'onde depuis la source est identique), l'onde ne dépend que de x et t (et non de y et z)

V- Les Ondes électromagnétiques

2. Caractéristiques des ondes électromagnétiques

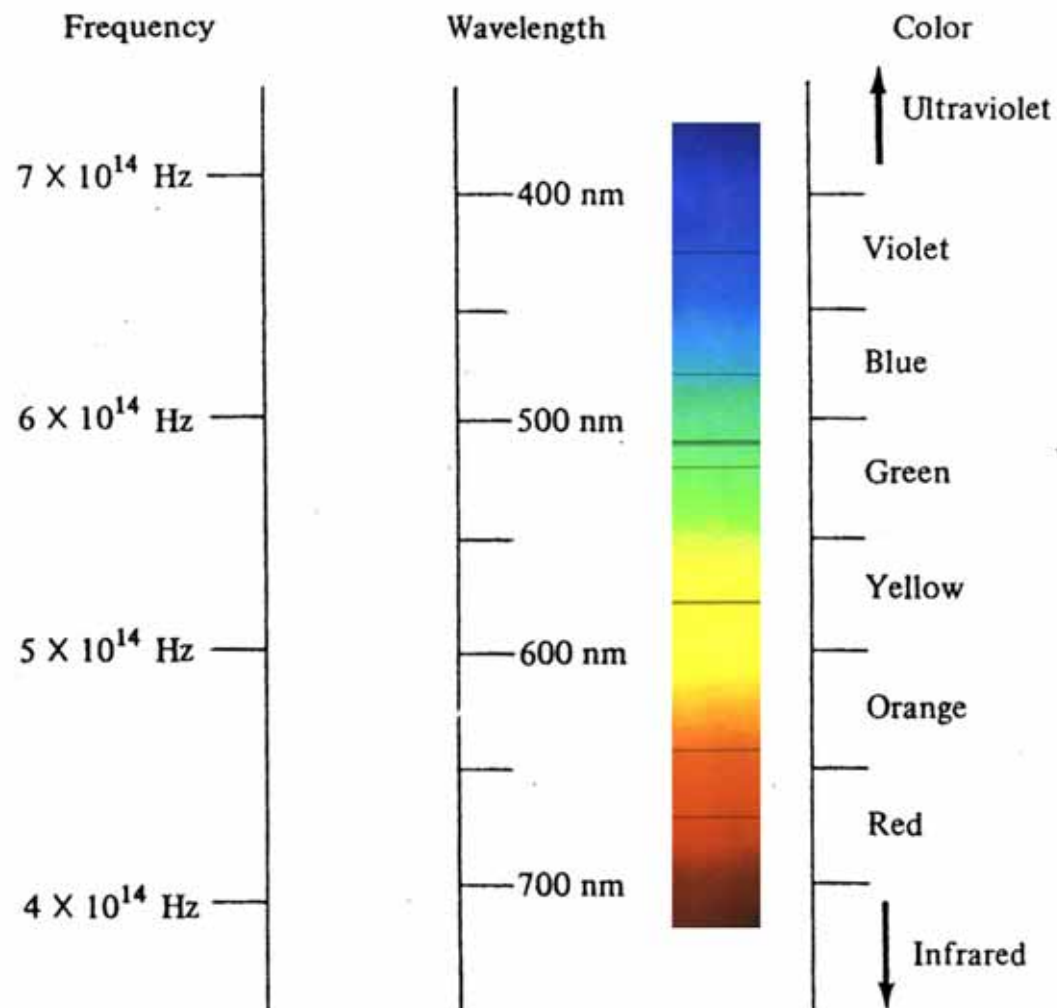
- Le spectre du rayonnement électromagnétique



V- Les Ondes électromagnétiques

2. Caractéristiques des ondes électromagnétiques

- Le spectre du rayonnement électromagnétique (visible)



V- Les Ondes électromagnétiques

3. Énergies transportées par les ondes électromagnétiques

- **Caractéristiques des ondes électromagnétiques**

La densité d'énergie transportée par une OEM sinusoïdale est:

$$e = 1/2 \varepsilon_0 E_0^2 = 1/2 \mu_0 B_0^2 \text{ J/m}^3 \quad (\text{J: Joule})$$

L'intensité moyenne (flux de puissance) associée à l'onde est:

$$I = 1/2 \varepsilon_0 C E_0^2 = 1/2 \mu_0 C B_0^2 \text{ W/m}^2 \quad (\text{W: Watt})$$

Permittivité du vide $\varepsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-12} \text{ SI}$ (*système international*)

Perméabilité du vide $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ SI}$

Lien avec la vitesse de propagation C : $C = (1/\varepsilon_0 \mu_0)^{1/2} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Remarque: nous avons vu que la permittivité traduit la réaction d'un milieu face à un champ électrique, la perméabilité traduit la réaction du milieu face à un champ magnétique.

V- Les Ondes électromagnétiques

2. Vitesse de propagation dans un milieu

- **Caractéristiques des ondes électromagnétiques**

Si la propagation se fait dans un milieu dont l'indice de réfraction est n , la vitesse de propagation est $v = C/n$

Vide $n = 1$

Air (conditions normales) $n = 1,00029$

Gaz CO_2 $n = 1,00045$

Eau $n = 1,33$

Verre $n = 1,5$ à $1,7$

On remplace: ϵ_0 par $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ et μ_0 par $\mu = \mu_0 \mu_r$
où ϵ_r et μ_r sont les permittivité et perméabilité relatives du milieu

$$C = n v \text{ et } C = (1/\epsilon_0 \mu_0)^{1/2} \text{ de même } v = (1/\epsilon \mu)^{1/2} \text{ donc } n = C/v = (\epsilon \mu / \epsilon_0 \mu_0)^{1/2}$$
$$\text{d'où } n = (\epsilon_r \mu_r)^{1/2} > 1$$

V- Les Ondes électromagnétiques

2. Caractéristiques des ondes électromagnétiques

- **Dispersion, Réfraction et loi de Descartes**

L'indice de réfraction n , dépend de la longueur d'onde

Exemple: indice de réfraction du verre

Bleu sombre ($\lambda=0,434 \mu\text{m}$): $n=1,528$

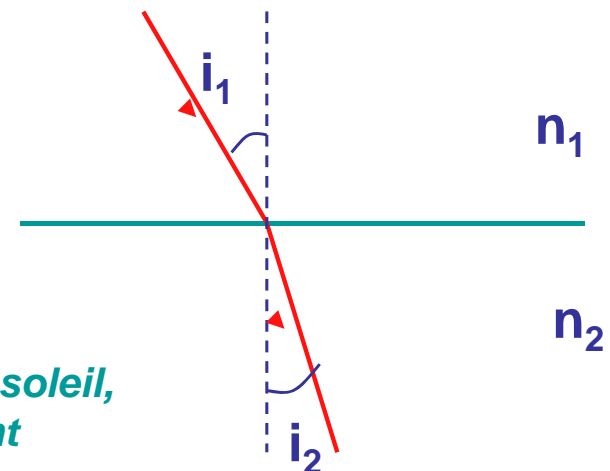
Rouge ($\lambda =0,656 \mu\text{m}$): $n=1,514$

Une onde est réfractée lors d'une discontinuité: passage d'un milieu d'indice n_1 à un milieu d'indice n_2 (changement de direction de propagation)

La loi de Descartes décrit la réfraction:

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

Application: l'arc-en-ciel résulte de la réfraction de la lumière du soleil, pour chaque couleur l'angle de réfraction est légèrement différent



V- Les Ondes électromagnétiques

2. Caractéristiques des ondes électromagnétiques

- **Caractéristiques des ondes électromagnétiques**

Au cours de la propagation dans un milieu, les interactions avec la matière dépendront de la fréquence de l'onde et de la nature de la matière et se feront principalement par:

Absorption résonante, suivie d'une réémission du rayonnement par les atomes du milieu

Absorption dissipative, l'énergie est alors transformée en chaleur

Diffusion élastique non résonante

V- Les Ondes électromagnétiques

3. Quelques exemples d'interactions

- **Quelques exemples d'interaction des OEM**

Ondes radio: énergie transportée trop faible pour résonances atomiques, propagation sans atténuation dans milieux isolants, création de courants induits dans milieux conducteurs

Micro-ondes: énergie peut faire osciller le dipôle électrique des molécules d'eau, transformation en énergie thermique

IR: excitation des vibrations moléculaires, verre ordinaire laisse passer une bonne partie des IR

Visible: absorption feuille papier, réémission en surface, absorption faible pour le verre

UV: absorption et réémission souvent liées à des processus d'ionisation

RX et $R\gamma$: très énergétiques, propagation dans presque tous les milieux avec atténuation d'intensité: $I = I_0 \exp -\mu x$

V- Les Ondes électromagnétiques

4. Interférences et diffraction

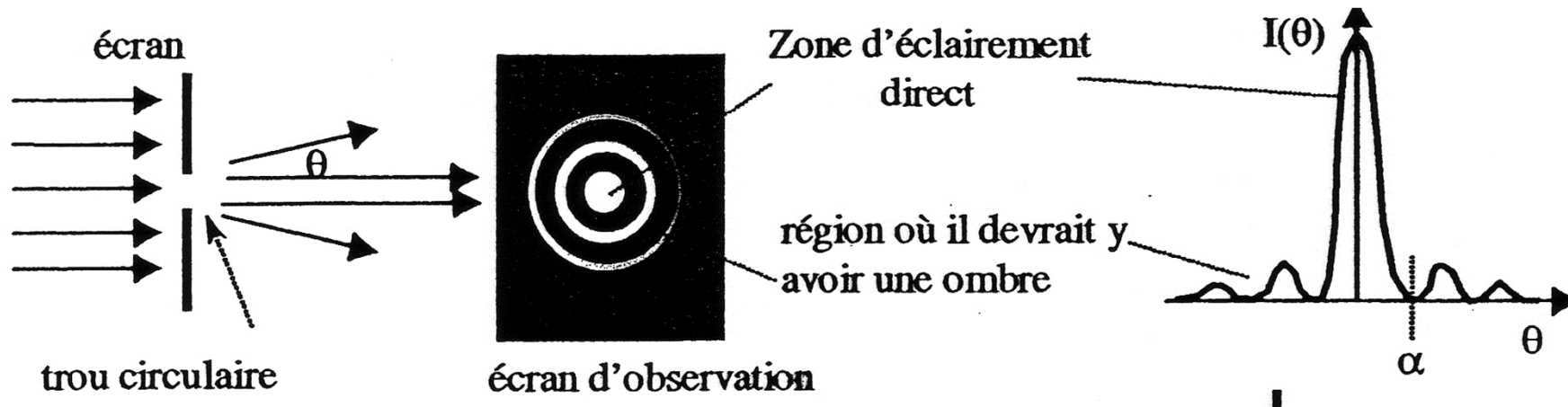
- **Interférences et diffraction**

Phénomène de diffraction:

OEM progressive de longueur d'onde λ arrive sur un obstacle de dimension comparable à λ

Par exemple, OEM passant par une petite ouverture circulaire: éclairément dans des zones où on attendait de l'ombre.

La figure de diffraction a une symétrie autour de l'ouverture.



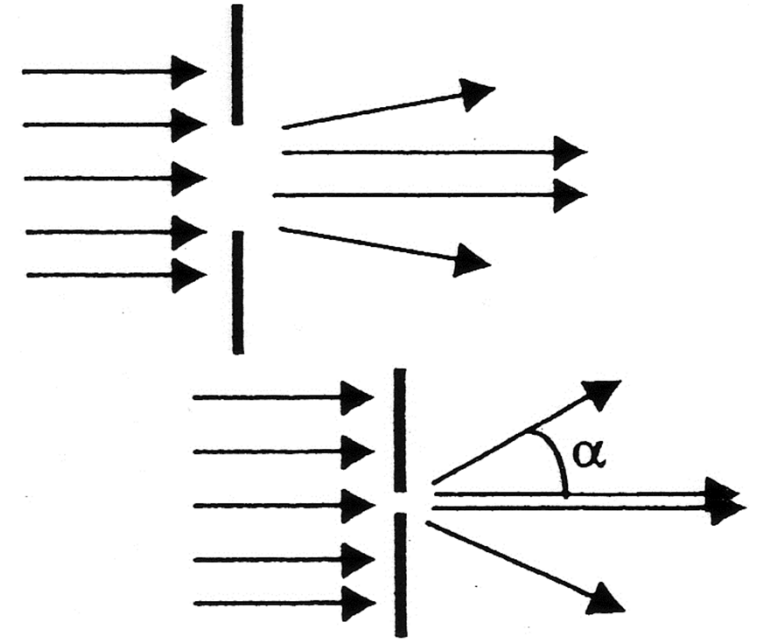
Remarque: ceci est très différent de ce qu'on observe lorsqu'un faisceau de lumière parallèle émis par le soleil éclaire une pièce par une fenêtre. Dans ce cas, la tâche observée sur le mur correspond à la dimension de la fenêtre, il n'y a pas d'élargissement car la longueur d'onde est beaucoup plus petite que la fenêtre.

V- Les Ondes électromagnétiques

4. Interférences et diffraction

- **Interférences et diffraction**

La tâche centrale (tache d'Airy) est très lumineuse, sa dimension est d'autant plus grande que la taille de l'ouverture est petite



On peut montrer que:

$$\alpha = 1,22 \lambda/a$$

a: diamètre de l'ouverture

V- Les Ondes électromagnétiques

4. Interférences et diffraction

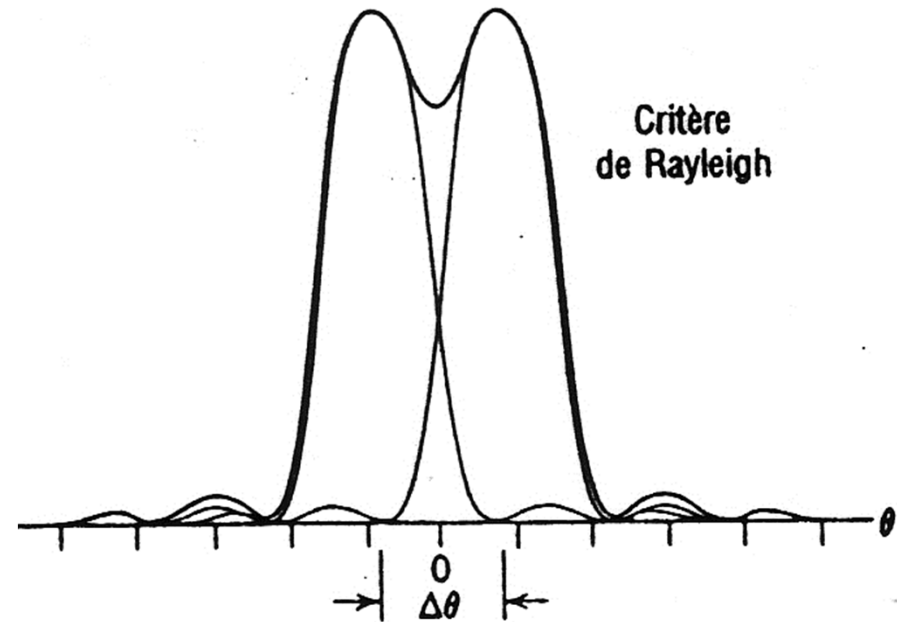
- **Interférences et diffraction**

La taille de cette tache limite le pouvoir de résolution de tous les instruments d'optique.

Le critère de Rayleigh:

Images de 2 sources incohérentes séparées si:

distance angulaire $\Delta\theta$ entre les centres des taches d'Airy est supérieure à α



Exemple: l'observation des éléments d'une cellule est limitée par l'élargissement des images du au phénomène de diffraction. Ainsi l'image d'une mitochondrie dont la taille est d'environ $1 \mu\text{m}$ sera élargie car cette taille est comparable à λ du visible (0.4 à $0.8 \mu\text{m}$). Si 2 mitochondries sont trop proches, les images vues par le microscope se superposent et il n'est plus possible de distinguer 2 mitochondries. Le critère de Rayleigh donne la distance angulaire minimale nécessaire pour que 2 objets apparaissent comme séparés.

V- Les Ondes électromagnétiques

4. Interférences et diffraction

- **Interférences et diffraction**

Phénomène d'interférence:

Superposition de plusieurs ondes provenant de plusieurs sources même fréquence

émission synchrone (différence de phase entre les ondes émises est constante dans le temps)

Par exemple:

Si on réalise l'interférence entre 2 ondes, on observe une suite de franges claires et sombres

V- Les Ondes électromagnétiques

4. Interférences et diffraction

- **Interférences et diffraction**

Phénomène d'interférence avec 2 sources S_1 et S_2

Les 2 sources émettent de façon isotrope avec la même intensité donc de même amplitude

$$E(r, t) = E_0 \cos (\omega(t - r/C))$$

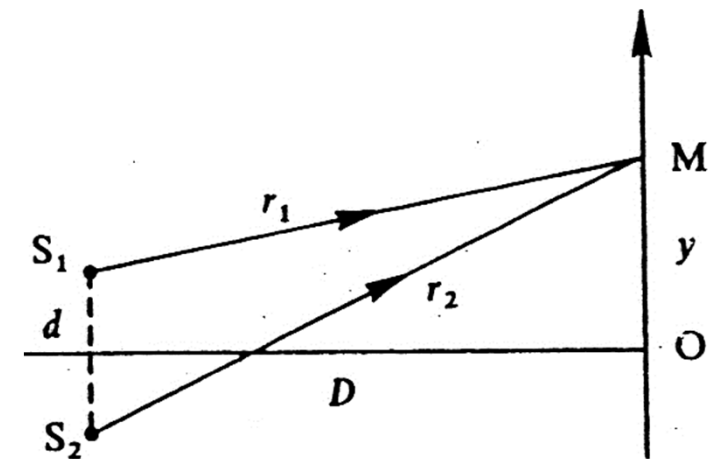
En M, différence de marche des 2 ondes

$$\delta = r_1 - r_2$$

Donc déphasage $\phi = 2\pi \delta/\lambda$

Onde résultante:

$$E(M) = 2 E_0 \cos (\omega (t - (r_1+r_2)/2C)) \cos \pi\delta/\lambda$$



Intensité proportionnelle à l'amplitude au carré: pour l'onde incidente $I_0 = a E_0^2$
L'amplitude de l'onde résultante est $2 E_0 \cos \pi\delta/\lambda$

$$\text{Donc } I(M) = a (2 E_0 \cos \pi\delta/\lambda)^2 = 4 a E_0^2 (\cos \pi\delta/\lambda)^2 = 2 I_0 (1 + \cos (2\pi\delta/\lambda))$$

V- Les Ondes électromagnétiques

4. Interférences et diffraction

- Interférences et diffraction

Phénomène d'interférence avec 2 sources S_1 et S_2

M loin des 2 sources

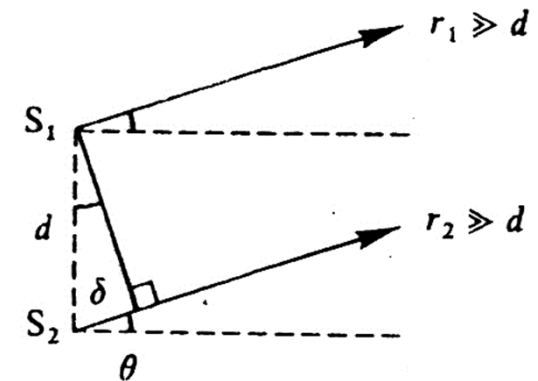
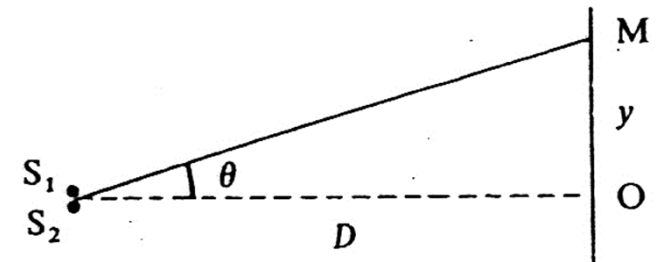
(par rapport à la distance entre les 2 sources)

$$d = S_1 S_2 \ll D$$

rayons issus des sources allant vers M sont presque parallèles

$$\text{alors } \delta = d \sin \theta$$

De plus les franges d'interférences se superposent au phénomène de diffraction par chacune des fentes, donc l'intensité résultante va décroître rapidement avec y , donc on s'intéresse à la petite valeur de l'angle θ



V- Les Ondes électromagnétiques

4. Interférences et diffraction

- Interférences et diffraction

D'où $\sin \theta \sim \tan \theta = y/D$, $\delta = d y/D$ et $\phi = 2\pi d y / (\lambda D)$

Frange brillante si $\cos 2\pi\delta/\lambda = 1$

Alors $I = 4 I_0$, et $2 \pi\delta/\lambda = 2 \pi n$

D'où: $\sin \theta = n \lambda/d$ avec n entier

Pour les angles θ petits, la distance entre franges est:

$\Delta y \sim \lambda D/d$

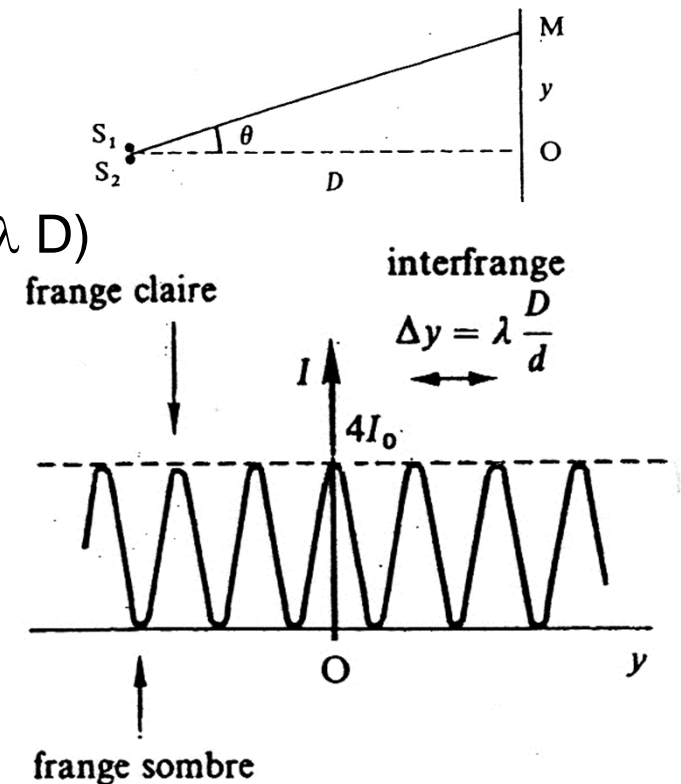
correspond à un intervalle angulaire de $\Delta\theta \sim \lambda/d$

Entre les franges brillantes, se trouvent les franges sombres

$I_0 = 0$

$\sin \theta = (2n - 1) \lambda/2d$

Remarque: en lumière blanche les différentes λ vont faire de systèmes de franges différents



V- Les Ondes électromagnétiques

4. Interférences et diffraction

- Interférences et diffraction

Interférences à N ondes

N fentes étroites, régulièrement espacées de d (réseau)

Les N ondes diffractées par la fente vont interférer

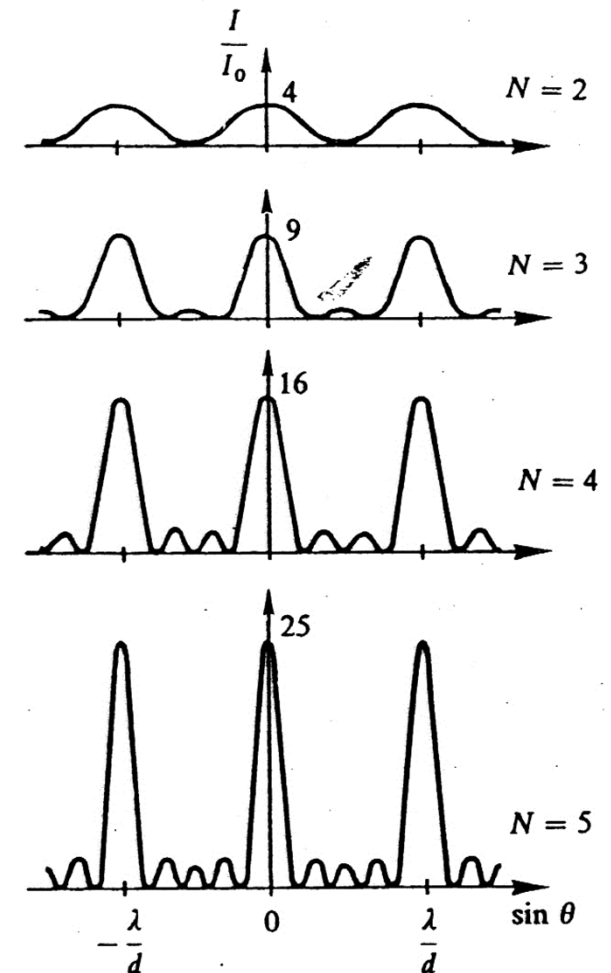
Intensité en M à l'infini pour un angle θ petit:

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin \left(\frac{N \pi d \sin \theta}{\lambda} \right)}{\sin \left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right)} \right)^2$$

I max pour $\sin \theta = n \lambda/d$, n entier

franges plus étroites qu'avec 2 sources

largeur diminue lorsque N augmente



V- Les Ondes électromagnétiques

4. Interférences et diffraction

- **Interférences et diffraction**

Cas particuliers:

RX sur des cristaux de molécules, λ de l'ordre de l'Å, voisine des distances interatomiques (atome ~fente)

Onde incidente interagit avec les atomes

Tous les atomes réémettent (ondes réfléchies)

Ensemble de N ondes qui vont interférer

Le réseau constitué par les atomes est à trois dimensions contrairement aux fentes qui forment un réseau à une dimension

V- Les Ondes électromagnétiques

5. Génération et détection des OEM

- **Exemples de génération**

Origine et génération des ondes électromagnétiques:

Mouvements non uniformes de charges électriques

Antenne, dispositif électronique: ondes Hertziennes

Corps chauffé: rayonnement thermique, visible ou IR

Transitions électroniques (atomes ou molécules):
visible, UV ou RX

Transitions nucléaires: rayons γ

V- Les Ondes électromagnétiques

5. Génération et détection des OEM

- **Exemples de détection**

Lumière visible: l'œil

Visible, IR: cellules photoélectriques

Antennes: ondes hertziennes

Visible, IR, UV, RX: film photographique

...

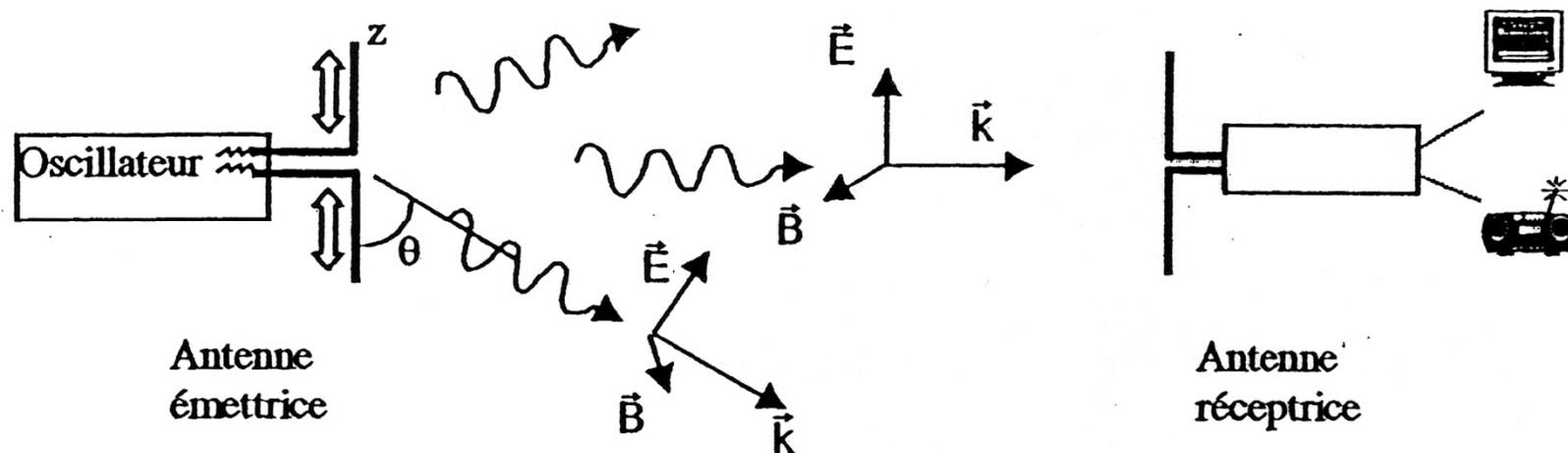
V- Les Ondes électromagnétiques

5. Génération et détection des OEM

- Exemple de l'antenne dipolaire

Oscillateur (courant sinusoïdal) fait vibrer les électrons de l'antenne suivant z
Rayonnement dans toutes les directions de l'espace

La détection se fait par le principe inverse



V- Les Ondes électromagnétiques

6. Les limites de l'électromagnétisme classique

- **Contexte**

Fin 19ème siècle

Nouvelles expériences mettent la théorie de Maxwell sur les ondes électromagnétiques en défaut.

Pour les expliquer, introduction d'un concept totalement différent: quantification de l'énergie.

- le rayonnement émis par un corps chauffé (Planck 1900)
- l'effet photoélectrique (Einstein 1905)
- spectres d'émission atomiques (Bohr 1913)
- effet Compton (Compton et Debye 1923)

V- Les Ondes électromagnétiques

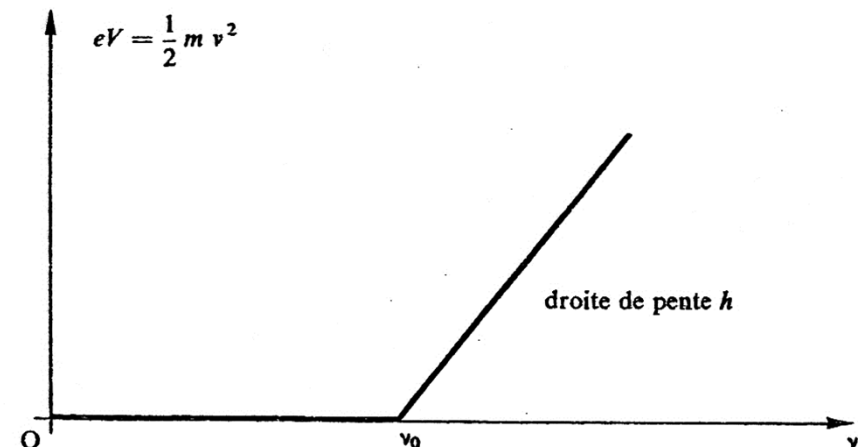
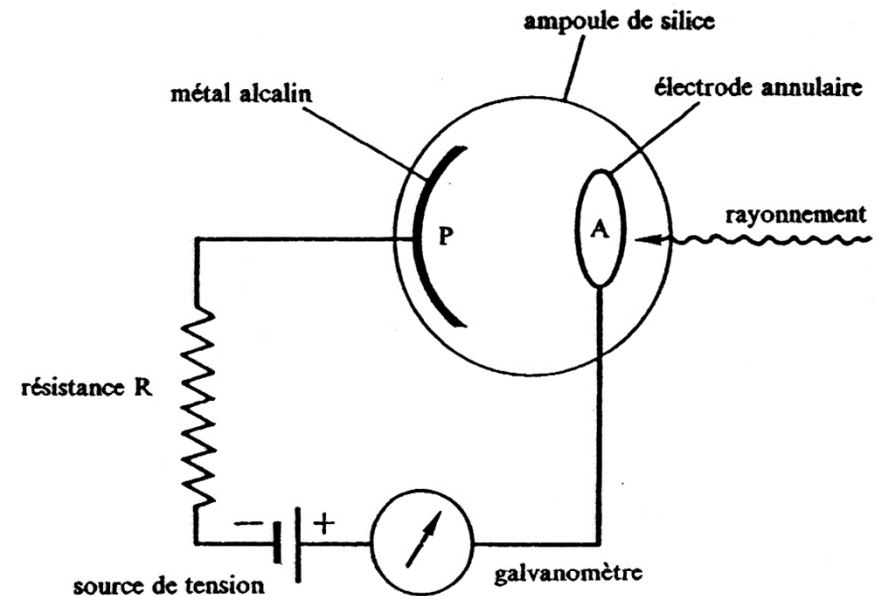
6. Les limites de l'électromagnétisme classique

- **Effet photoélectrique**

Hertz (1887)

Plaque métallique soumise à OEM
Arrachement d'électrons
Passage d'un courant entre anode et cathode

Courant possible si la fréquence du rayonnement est supérieure à un seuil ν_0



V- Les Ondes électromagnétiques

6. Les limites de l'électromagnétisme classique

- **Effet photoélectrique**

Interprétation

OEM constituées de particules, les photons

énergie d'un photon: $h\nu$

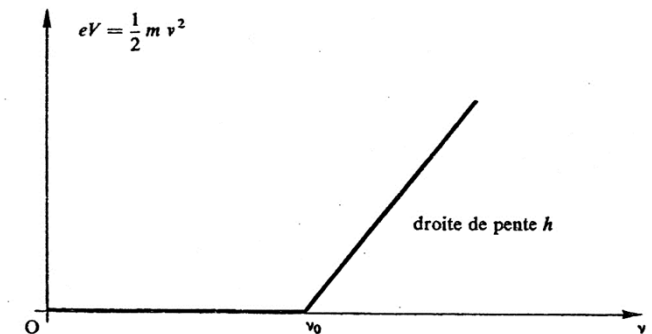
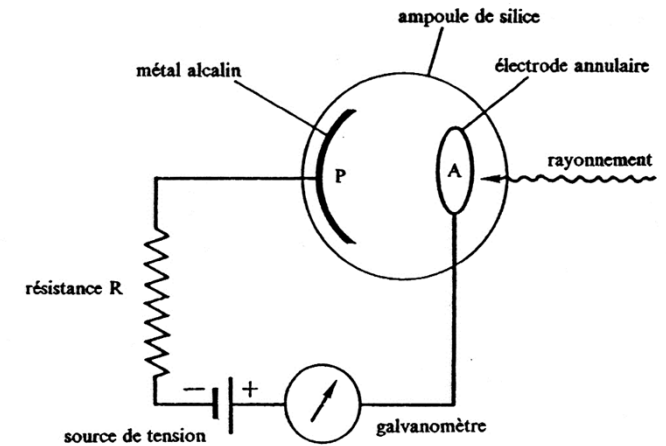
h : constante de Planck, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ SI

Électron collecté par l'anode que si $h\nu$ est suffisant pour l'arracher de la plaque (énergie supérieure à l'énergie de liaison W_s)

L'énergie supérieure à W_s : énergie cinétique de l'électron :

$$h\nu = W_s + \frac{1}{2} m v^2$$

Limite: $h \nu_0 = W_s$ donc $\nu_0 = W_s / h$



V- Les Ondes électromagnétiques

6. Les limites de l'électromagnétisme classique

- **Dualité ondes-corpuscules**

Théorie d'Einstein:

OEM peut présenter à la fois un caractère ondulatoire « classique » et un caractère quantique

Corpuscules sans masse (« grains d'énergie ») appelés **photons**

Conversion possible entre les deux

Généralisation par de Broglie en 1923:

On peut associer une onde à des particules pesantes

Longueur d'onde $\lambda = h/p$

p: quantité de mouvement de la particule

V- Les Ondes électromagnétiques

6. Les limites de l'électromagnétisme classique

- **Dualité ondes-corpuscules**

Exemples:

électrons accélérés par une d.d.p. V

Énergie des électrons: $eV = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{p^2}{2m}$

$$\lambda = h/p = h / (2meV)^{1/2}$$

Si $V = 100 \text{ kV}$, alors $\lambda \sim 4 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 0,04 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 0,1 \text{ nm}$)

V- Les Ondes électromagnétiques

Résumé des notions importantes

- Caractéristiques des ondes électromagnétiques
- **Domaine de fréquences : connaître les limites des grands domaines (gamma, X, UV, visible, IR)**
- Indice de réfraction, relation entre n et vitesses de propagation dans le vide et dans un milieu, ordre de grandeur de n
- **Loi de Descartes**
- Diffraction : description du phénomène, grandeur caractéristique (λ/a), conséquence (critère de Rayleigh)
- **Interférences : savoir décrire l'expérience, poser le problème (comment écrire le champ E en M), et connaître le résultat (franges sombres et claires, distance entre franges), principe de généralisation à N fentes (phénomène observé)**
- Effet photoélectrique : expérience et interprétation, formulation mathématique
- **Dualité ondes-corpuscules : principe, longueur d'onde associée**

Exercices

- Exercice 1

- Les lois de la réflexion et de la réfraction sont les mêmes pour les ondes lumineuses et les ondes sonores, les indices acoustiques des milieux étant inversement proportionnel aux vitesses de propagation des ondes sonores. Avec pour le son $v_{\text{air}} = 345 \text{ m/s}$ et $v_{\text{eau}} = 1500 \text{ m/s}$, calculer l'angle limite pour une propagation du son de l'air vers l'eau.

- Exercice 2

- Une lampe de puissance 50 W émet dans le jaune ($\lambda = 600 \text{ nm}$) de manière isotrope dans toutes les directions de l'espace. Quelle est, en J et en eV, l'énergie associée à chaque photon ? Quel est le nombre de photons émis par seconde ? Combien de photons atteindront par seconde la rétine d'un observateur placé à une distance $d = 100 \text{ m}$ de la lampe (prendre $r = 2 \text{ mm}$ pour le rayon de la pupille). Aura-t-on une impression de continuité pour la perception rétinienne ?

- Exercice 3

- Un atome de cuivre simplement ionisé se recombine avec un électron. Sachant que l'énergie d'ionisation du cuivre est égale à $7,72 \text{ eV}$, en déduire la longueur d'onde la plus courte qui peut être émise lors de la recombinaison (à quel domaine spectral appartient ce rayonnement ?)

- Exercice 4

- La lumière rouge d'un laser He-Ne ($\lambda = 632 \text{ nm}$) tombe sur un écran muni de 2 fentes horizontales très étroites et distantes de $d = 0,2 \text{ mm}$. Une figure d'interférences apparaît sur un écran situé à la distance $D = 1 \text{ m}$. Déterminer les positions en radians et en mm des deux premières franges sombres de part et d'autre de l'axe central, ainsi que la distance à la cinquième frange brillante.

Mentions légales

L'ensemble de ce document relève des législations française et internationale sur le droit d'auteur et la propriété intellectuelle. Tous les droits de reproduction de tout ou partie sont réservés pour les textes ainsi que pour l'ensemble des documents iconographiques, photographiques, vidéos et sonores.

Ce document est interdit à la vente ou à la location. Sa diffusion, duplication, mise à disposition du public (sous quelque forme ou support que ce soit), mise en réseau, partielles ou totales, sont strictement réservées à l'université Joseph Fourier de Grenoble.

L'utilisation de ce document est strictement réservée à l'usage privé des étudiants inscrits en 1^{ère} année de Médecine ou de Pharmacie de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, et non destinée à une utilisation collective, gratuite ou payante.