

## LISTE DE FIGURE

Figure 1.2 : *Système de l'appareil photo*

Figure 2.1 : *Description d'onde électromagnétique*

Figure 2.2 : *Représentation de deux ondes de même fréquence et de même amplitude en un point fixe*

Figure 2-3 : *Représentation de rayon lumineux*

Figure 2-4 : *Représentation d'onde monochromatique plane tombe sur un dioptrre*

Figure 2-5 : *Décomposition d'onde monochromatique plane*

Figure 2-6 : *Onde polarisé rectilignement*

Figure 2-7: *Ondes polarises elliptiquement et circulairement*

Figure 3-1: *Schéma de principe d'un montage qui permet de mettre en évidence l'effet photoélectrique.*

Figure 3.2 : *Le courant photoélectrique est nul jusqu'à la fréquence seuil  $v_0$  ; au-delà, l'énergie cinétique des électrons croît linéairement avec la fréquence.*

Figure 3-3 : *Diffusion par effet Compton*

Figure 3-4 : *Conservation de la quantité de mouvement par l'effet Compton*

Figure5-1 : *Interférence constructive (A) et destructive (B) de deux ondes sinusoïdales de même fréquence et même direction.*

Figure 5-2 : *Diffraction par une petite ouverture. En pointillé, la lumière diffractée.*

Figure 6-2 : *Illustration du principe de Huygens dans le cas d'une onde plane. Le nouveau front d'onde est l'enveloppe de toutes les ondelettes. La direction de propagation est perpendiculaire au front d'onde.*

Figure 6-3 : *Ondes incidente tombant sur un ouverture*

Figure7-1: *Courbe donnant l'intensité de la lumière diffractée par un bord d'écran observée à une distance  $r = 1$  mètre.*

Figue 8-1 : *Diffraction de Fraunhofer par un diahragme plan*

Figure 8-2 : *Ondes parallèles qui superpose dans les plan d'observation*

Figure 8-3: *Image ponctuelle au voisinage de l'axe optique*

Figure 8-4 : *Ondes plane tombant sur un ouverture rectangulaire*

Figure 8-5 : *Image de l'onde diffracté sur un ouverture rectangulaire*

Figure 8-6 : *Représentation de l'amplitude et l'intensité de l'onde diffracté*

Figure 8-6 : *Ouverture circulaire*

Figure 8-8 : *Image de l'onde diffracté par l'ouverture circulaire*

Figure 8-9 : *Répartition de l'intensité donnée par l'ouverture circulaire.*

Figure 9-1 : *Représentation de réseau*

Figure 9-2: *Diffraction par un réseau plan*

Figure 9-3 : *Réseau par transmission*

Figure 9-4: *Réseau par réflexion*

Figure 9- 5 : *Représentation graphique de la relation fondamentale des réseau*

Figure 9-7 : *Une onde plane inclinée (pour dispersion angulaire)*

Figure 9-8: *Une onde plane inclinée (pour minimum de déviation)*

Figure 9-9: *Les différentes pièces du spectroscop*e

Figure 9-10: *Observation de la lumière solaire avec un spectroscop à réseau*

Figure 9-11: *Spectre de la lumière blanche*

Figure 9-11 : *Ondes provenant d'une source ponctuel*

Fig. 9-13 : *Répartition de l'intensité en fonction de coordonnée de position*

Fig.10-1 : *Illustration de la Crête de Tavernier qui se caractérise par l'accroissement de la dose d'irradiation de certains rayonnements,*

Figure 10-2 : *Le coefficient d'absorption total de l'aluminium pour les rayons gamma, et les contributions des trois effets. Ici, l'effet Compton domine.*

Figure 10-3 : *Le coefficient d'absorption totale du plomb pour les rayons gamma, et les contributions des trois effets. Ici, l'effet photoélectrique domine pour l'énergie basse, et la production des paires au-dessus de 5 MeV.*

Figure 11-1 : *Courbe de Bremsstrahlung,*

Figure 11-2 : *Appareil utilise pour analyser un monocristal*

Figure 12-1 : *Le soleil vu dans les ultraviolets par le télescope EIT de SoHO.*

Figure11-2 : *Image du spectre de la lumière visible*

Figure11-3 : *Image infrarouge de longueur d'onde moyenne d'un petit chien en fausse couleur*

Figure 11-4 : *Caméra infrarouge de type FLIR (Forward Looking Infrared Radar), montée sur un hélicoptère UH-1 Huey*

Figure11-5: *Détecteur d'émetteurs d'infrarouge, le plus souvent un missile à guidage de ce type, posé sur un avion militaire, ici un OV-10 Bronco*

Figure 11-6 : *Détecteur de mouvements à infrarouge*

Figure 11-7: *Télécommande à infrarouge*

Figure 11-8: *Billet de 10 euros à l'infrarouge (à gauche)*

Figure 12-1 : *Antennes HF sur un navire*

Figure 12-2 : *Antenne HF multibande radioamateur*

Figure 12-3 : *La propagation par onde réfléchie entre ciel et terre.*

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1-1 : Radiation électromagnétique

Tableau 1-2 : Quelques exemples de vitesse de la lumière dans la matière

Tableau 13-1 : Longueurs d'ondes de la lumière visible

Tableau 12-1 : Ondes Hertziennes avec leur utilisation

Tableau 12-2 : Utilisation d'ondes courtes en publiques

Tableau 12-3 : Utilisation publique moyenne

Tableau 12-4 : Quelques émetteurs autour du monde

# **SOMMAIRE**

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	01
<b>PREMIERE PARTIE : NATURE DE LA LUMIERE.....</b>	02
CHAPITRE 1 : NOTIONS FONDAMENTAUX DE LA LUMIERE.....	03
I-1 Introduction .....	03
I -1-1 Sources primaires.....	03
I-1 -2 Sources secondaires.....	03
I-2 Définition de la lumière.....	03
I-2-1 Définition de la lumière visible.....	05
I- 2-2 Définition de la lumière blanche.....	05
I-3 Propagation de la lumière.....	06
I-4 Ombre et lumière.....	06
I-5 Nature de l'énergie lumineux.....	06
CHAPITRE II: NATURE ONDULATOIRE DE L'ENERGIE LUMINEUSE (onde électromagnétiques).....	08
II-1 Généraliste.....	08
II-1-1 Définition d'onde.....	08
II-1-2 Type d'ondes.....	08
II-1-3Définition d'onde électromagnétique.....	09
II-1-4-Dimensionnalité.....	09
II-1-5 Description.....	10
II-1-6 Les comportement ondulatoires des ondes lumineuses.....	11
II-1-7 Exemple de représentation de deux ondes sinusoïdales de même fréquence et même amplitude en un point fixe.....	11
II- 2 :Propagation des ondes lumineuses.....	12
II-2-1 Propagation dans le vide.....	12
II-2-1-1 Nature électromagnétique de l'onde lumineuse.....	12

II-2-1-2 Structure de l'onde monochromatique plane.....	13
II-2-2 Propagation dans un milieu matériel.....	13
II-2-2-1 Milieu matériel.....	14
II-2-2-2 Milieu matériel non homogène.....	14
II-2-3 Réflexion et rétraction d'un onde monochromatique.....	15
II-2-3-1 Loi de Shell Descartes.....	15
II-2-4 Polarisation des onde lumineuses.....	16
II-2-4-1 Onde polarisée rectilignement .....	16
II-2-4-2 Onde polarisée elliptiquement et circulairement.....	17
II-2-5 La fonction d'onde.....	19
II-2-6 Conclusion.....	20
<b>CHAPITRE III : NATURE CORPUSCULAIRE DE L'ENERGIE LUMINEUSE.....</b>	<b>21</b>
III-1 Etude photoélectrique.....	21
III-1-1Définition.....	21
II-1-2 Montage expérimentale.....	21
II-2 Interprétation de l'effet Compton photon.....	24
III-3-Comment concilier l'aspect corpusculaire avec l'aspect ondulatoire de la lumière.....	27
<b>CHAPITRE IV : VITESSE DE LA LUMIERE.....</b>	<b>29</b>
IV-1Vitesse de la lumière dans le vide.....	29
IV-2 Vitesse de la lumière dans la matière.....	29
IV-3 Limite de la vitesse de la lumière.....	30
<b>DEUXIEME PARTIE : DIFFRACTION DES ONDES LUMINEUSES.....</b>	<b>31</b>
<b>CHAPITRE V : DEFINITION.....</b>	<b>32</b>
V-1 L'interférence.....	32
V-2 Diffusion.....	32
V-3Surface d'onde.....	33

V-4 Existence des phénomènes de diffraction.....	33
CHAPITRE VI : PRINCIPE DE HUYGENS FRESNEL.....	34
VI-1 Enoncé.....	34
VI-1-1 La contribution de Huygens.....	34
VI -1-2 La contribution de Fresnel.....	34
VI-2 Exemple de principe de Huygens Fresnel.....	34
VI-3 Expression mathématique.....	34
VI-4 Facteur de transmittance.....	35
CHAPITRE VII: DIFFRACTION DE FRESNEL.....	36
VII-1 Définition.....	36
VII-2 Expression de l'amplitude de l'onde Diffractée .....	36
CHAPITRE VIII : DIFFRACTION DE FRAUNHOFER.....	37
VIII-1 Définition.....	37
VIII-2 Diffraction de Fraunhofer par le diaphragme plan.....	37
VIII-2-1 Approximation de Fraunhofer plan.....	37
VIII- 2-1-1 Formule fondamentale.....	38
VIII-2-1-2 Interprétation de terme de phase linéaire.....	38
VIII-2-1-3 Expression en fonction de l'amplitude des coordonnées.....	39
VIII-2-2 Fréquences spatiales.....	39
VIII-2-2-1 Définition.....	39
VIII-2-2-2 Relation entre fréquence spatiale(UV) et les angles d'inclinaison.....	39
VIII-2-2-3 Cas de petit angle.....	40
VIII-2-3 Répartition de l'éclairement dans le plan d'observation.....	40
VIII-2-4 Impotence physique de l'approximation de fréquence (image ponctuel au voisinage de l'optique).....	40
VIII-3 Diffraction par une ouverture rectangulaire.....	41
VIII-3-1 Condition d'observation.....	41

VIII-3-2 Amplitude de l'onde dans le plan d'observation.....	42
VIII-3-3 Intensité de l'onde dans le plan d'observation.....	42
VIII-4 Diffraction par une fente.....	43
VIII-4-1 Expérience.....	43
VII-4-2 Expression de l'amplitude.....	43
VIII-4-3 Expression de l'intensité.....	44
VIII-4-4 Condition minimum.....	44
VIII-4-5 Le condition maximum.....	44
VIII-4-6-Représentation de la répartition de l'amplitude $E(u)$ et l'intensité $I(u)$ .....	45
VIII-5 Diffraction par une ouverture circulaire.....	45
VIII-5-1 Amplitude de l'onde dans le plan de l'observation.....	46
VIII-5-2 Intensité de l'onde dans le plan de l'observation.....	46
<b>CHAPITRE IX : APPLICATIONS DE PHENOMENES DE DIFFRACTION .....</b>	<b>48</b>
IX-1 Définition et réalisation de réseaux.....	48
IX-1-1 Définition.....	48
XI-1-2 Réalisation.....	48
IX2 :Diffraction de Fraunhofer par un réseau de fente .....	48
IX-2-1 Relation fondamentale de le réseau par transmission.....	49
IX-2-2 Relation fondamentale de le réseau par réflexion.....	50
IX-2-3 Représentation géométrique de la relation fondamentale de le réseau.....	50
IX-2-4 Amplitude d'onde diffractée par réseau.....	51
IX-2-4-1 Rappel de l'amplitude de l'onde diffractée.....	51
IX-2-4-2 Contribution de toutes les fentes .....	52
IX-3- Répartition de l'intensité de l'onde diffractée.....	52
IX-4 Propriété de réseaux.....	53
IX-4-1 Dispersion angulaire.....	53

IX-4-2 Minimum de déviation.....	53
IX-5 Spectromètres à réseaux.....	54
IX-5-1 Définition et prestation du spectroscope.....	54
IX-5-1-1 Définition.....	54
IX-5-1-2- Présentation du spectroscope.....	54
IX-5-2 Utilisation.....	55
IX-5-3 Interprétation.....	56
IX-5-4 Réception des diverses radiation.....	56
IX-5-5 Pouvoir de relation d'un spectroscope à réseau.....	56
IX-5-6 Applications des réseaux à la comparaison de deux longueurs d'onde.....	58
<b>TROISIEME PARTIE: LE SPECTRE LUMINEUX.....</b>	<b>60</b>
Définition du spectre électromagnétique.....	61
<b>CHAPITRE X : LES ONDES DES FREQUENCES LES PLUS ELEVEES.....</b>	<b>61</b>
X-1 Rayons gamma.....	62
X-1-1 Définition.....	62
X-1-2 Caractéristiques.....	62
X-1-3 Danger.....	62
X-1-4 Interaction avec la matière.....	63
X-1-4-1 Effet photoélectrique.....	64
X-1-4-2 Diffusion de Compton.....	64
X-2 RAYON X.....	65
X-2-1 Définition.....	65
X-2-2 Utilisation.....	65

X-2-3 Production de rayon X.....	65
X-2--4 Propriétés de rayon X.....	67
X-2-4-1 Effet sur la santé.....	67
X-2-4-2 Détection.....	67
X-2-4-3 Rayons X en cristallographie .....	68
CHAPITRE XI : LES ONDES DE FREQUENCES INTERMEDIAIRES.....	70
XI-1-ULTRAVIOLET.....	70
XI -1-1 Définition.....	70
XI -1-2 Généralités sur l'ultraviolet et effets sur la santé.....	71
XI -1-3 Effets sur la santé .....	71
XI -1-4 L'indice UV .....	71
XI -1-4-1 Interactions UV- atmosphère .....	72
XI -1-4-2- La différence entre UV-A, UV-B et UV-.....	72
XI-1-4-2-1 Les UV-A ( $4000\text{\AA} > \lambda > 3150\text{\AA}$ ).....	73
XI-1-4-2-2 Les UV-B ( $3150\text{\AA} > \lambda > 2800\text{\AA}$ ).....	73
XI -1-4-2-3 Les UV-C ( $2800\text{\AA} > \lambda > 136\text{\AA}$ ).....	73
XI-1-5 Protection... .....	74
XI-1-6 Astronomie.....	74
XI-1-7 Utilisation.....	74
XI-2- LUMIERRE VISIBLE.....	75
XI-2-1 Définition.....	75
XI-2-2 Figure de spectre de la lumière visible.....	76
XI-2-3 Caractéristiques de la lumière blanche.....	77
XI-3 INFRAROUGE.....	77
XI-3-1 Définition.....	77

XI-3-2 Généralités.....	78
XI-3-3 Utilisations.....	78
XI-3-3-1 Chauffage.....	78
XI-3-3-2 Vision nocturne.....	79
XI-3-3-3 Guidage.....	79
XI-3-3-4 DéTECTEURS d'intrusion.....	80
XI-3-3-5 Communication.....	80
XI-3-3-6 Spectroscopie.....	81
XI-3-3-7 Banque.....	81
CHAPITRE XII : LES ONDES DES FAIBLES FREQUENCES (RADIATIONS HERZIENNES)	82
XII-1 Définition.....	82
XII-2 Emission et réception d'ondes hertziennes.....	82
XII-3 Utilisation.....	82
XII-4 L'onde Radio :	83
XII-4-1 L'Ondes courtes.....	83
XV-4-1-1 Utilisation.....	84
XII-4-1-1-1 Radiodiffusion.....	84
XII-4-1-1-2 Organisations diverses.....	84
XII-4-1-1-3 Maritime.....	84
XII-4-1-1-4 Aéronautique.....	85
XII-4-1-5 Amateurs.....	85
XII-4-1-6 Antennes.....	85
XII-4-1-7 Mode de propagation.....	86
XII-4-1-8 Utilisations publiques.....	87
XII-4-2 Ondes moyennes.....	91

XII-4-2-1 Définition.....	91
XII-4-2-2 Utilisation publique.....	91
XII-4-3 Grandes Ondes.....	94
XII-4-3-1 Définitions.....	94
CONCLUSION : Vision d'ensemble de spectre.....	99
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>100</b>

## **INTRODUCTION GENERALE**

La lumière a des divers rôles très importants dans la nature, surtout dans la vie quotidienne des êtres humains, des animaux, etc.... On a choisi ce thème « LA LUMIERE ET SES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES » dans le but d'expliquer les phénomènes physiques de la lumière et de donner une connaissance assez large à ceux qui veulent connaître l'importance de son spectre.

Cet ouvrage comprend un texte important, de nombreux schémas et des calculs intéressants, ce qui permettrait aux lecteurs de connaître l'importance de la lumière dans la vie quotidienne et d'expliquer les phénomènes physiques de la lumière.

Le lecteur trouvera dans ce mémoire aussi bien la nature de la lumière, dans la première partie, les diffractions des ondes lumineuses dans la deuxième partie et les spectres de la lumière dans la troisième partie.

Dans la première partie, on a l'intérêt d'expliquer la notion fondamentale de la lumière, de présenter la nature ondulatoire et corpusculaire des ondes lumineuses et de donner la vitesse de la lumière. Dans la deuxième partie, on expose le principe de Huygens Fresnel, la diffraction de Fresnel, la diffraction de Fraunhofer, l'application de ce phénomène : Réseaux. La dernière partie concerne les spectres lumineux : partant de la lumière à laquelle l'œil est sensible, elle traite également des radiations invisibles et aussi l'utilisation des diverses radiations.

## **PREMIERE PARTIE**

*NATURE DE LA LUMIERE*

# CHAPITRE I :

## NOTIONS FONDAMENTALES DE LA LUMIERE

### I-1 Introduction

Il existe deux sortes de source de la lumière :

- La source primaire,
- La source secondaire.

#### I-1-1 Les sources primaires

Les sources primaires produisent de la lumière par elles-mêmes.

**Exemples :** Notre étoile, le soleil, est une source primaire de la lumière. Il transforme une partie de son énergie nucléaire en énergie lumineuse. Le soleil émet de la lumière blanche ou lumière visible mais aussi d'autres rayonnements appartenant au spectre électromagnétique comme les rayonnements infrarouges et les ultraviolets. Bougie, électrique (lampe, enseignes), biochimique (verres luisants).

Il existe deux sortes de sources primaires. Les unes rayonnent par incandescence et les autres par luminescence. Dans le premier cas, le rayonnement est émis parce que l'objet est chaud (étoile, lampe, bougie..). Dans le deuxième cas, de la lumière dite froide est émise quand le rayonnement provient de transformations qui ont lieu à l'intérieur des atomes. Par exemple, les atomes du gaz néon transforment l'énergie électrique reçue en énergie lumineuse.

#### I-1-2 Sources secondaires

Les sources secondaires ou objets diffusants sont des objets dont la surface éclairée renvoie dans toutes les directions une partie de la lumière qu'elle reçoit.

**Exemples :** La lune est une source secondaire de la lumière. Si elle émet de la lumière, c'est parce que le soleil l'éclaire. Les planètes, les objets qui nous entourent sont des sources secondaires de lumière. Une tomate (rouge) est éclairée par la lumière blanche d'une lampe. Elle absorbe toutes les couleurs de la lumière sauf le rouge qu'elle diffuse dans toutes les directions. C'est un objet diffusant ou source secondaire.

### I-2 Définition de la lumière

**La lumière** est émise par la matière et se manifeste par son action sur la matière. C'est un phénomène transportant de l'énergie. Elle peut être reçue par l'œil ou par un autre récepteur qui l'absorbe, au moins partiellement en étant le siège d'un échauffement, d'un déplacement d'électrons, d'une réaction chimique ou d'une rémission de lumière.

Le nom de radiation appliquée aux diverses lumières rappelle que leur énergie (qui est dite rayonnante) se propage le long de rayons. Les ensembles de tels rayons forment des pinceaux ou des faisceaux. La vitesse a, dans le vide, même valeur pour toutes les lumières, soit  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .

**La puissance** que transporte un faisceau de lumière est appelée son flux d'énergie ; on emploie souvent aussi le mot intensité lorsqu'il s'agit de valeurs relatives des divers flux.

**La périodicité** se manifeste par des phénomènes d'interférence et de diffraction. On en conclut que la propagation se fait par ondes : dans un milieu isotrope, les rayons sont constamment normaux aux surfaces d'ondes.

Donc la lumière est constituée par des ondes électromagnétiques.

**Une lumière quelconque est le plus souvent complexe**, c'est-à-dire assimilable à une somme de lumières de périodes diverses, dont chacune est dite simple ou monochromatique (d'une seule couleur pure et elle est formée d'une radiation de longueur d'onde bien déterminée ou par extension, d'une bande très étroite de longueurs d'ondes).

**Une lumière simple** peut être caractérisée, en même temps que par son flux d'énergie, par sa période  $T$  ou ce qui revient au même par sa fréquence  $v$ , ou par sa longueur d'onde  $\lambda$  dans le vide, ou enfin par son nombre d'ondes  $\sigma$ .

**La longueur d'onde**  $\lambda$  est la distance entre deux maxima ou minima successifs de l'onde à un instant donné :

Son unité est en mètres ou en  $\mu$  ( $10^{-6}$ m) ou en angström ( $\text{\AA}=10^{-10}$ m) et même en m  $\text{\AA}$  dite en unité x.

**La période**  $T$  est la plus petite durée que met l'onde pour reprendre en même temps, la valeur maximale :  $T$  en (s).

Il existe une relation très importante entre la période  $T$  et la longueur d'onde  $\lambda$  :

$$\lambda = \text{c} \cdot T$$

(La longueur d'onde représente la distance parcourue par l'onde en une période).

**La fréquence**  $v$  est le nombre de périodes par seconde.  $v$  est en  $s^{-1}$  qu'on appelle Hertz (symbole Hz).

Période et fréquence sont, l'une l'autre, inversement proportionnelle, c'est-à-dire que si l'une est multipliée par x, l'autre est divisée par x et inversement :

$$v = \frac{1}{T}$$

Si la période est en secondes, la fréquence est en  $s^{-1}$ . On en déduit les relations :

$$\lambda = \frac{c}{v} \text{ ou } v \cdot \lambda = c$$

**$\sigma$  c'est le nombre d'ondes par unité de longueur :**

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} \text{ ou } \frac{1}{c \cdot T} = \frac{v}{c}$$

(Il est généralement exprimé en  $\text{cm}^{-1}$ .)

Chaque vibration simple est une fonction sinusoïdale du temps, de pulsation :  $\omega = 2\pi v$

et son intensité est proportionnelle au carré de l'amplitude vibratoire :  $I = (E_0)^2$

L'unité internationale d'intensité lumineuse est la Candela.

L'unité de flux lumineux ou puissance d'énergie est le Lumen = Candela stéradian.

**Exemple:** Une ampoule électrique courante (15 watts de basse consommation ou 75 watts à incandescence classique) produit environ 1500 lumens.

## I-2-1- Définition de la lumière visible

On appelle lumière visible la partie du spectre des ondes électromagnétiques qui est perceptible par l'œil humain. Il s'agit d'une bande de fréquence limitée par les valeurs suivantes :  $3,8 \cdot 10^{-14}$  Hz et  $7,5 \cdot 10^{-14}$  Hz.

La bande du visible est divisée en plusieurs parties inégales qui correspondent aux différentes couleurs perçues. En général, la lumière est constituée d'un ensemble de fréquences diverses. C'est à dire les radiations visibles ont des longueurs d'onde comprise entre 400 et 780 millimicrons (environ), leurs couleurs s'échelonnant du violet au rouge comme l'indique le tableau 1-1 . Il existe aussi des radiations de longueurs d'onde plus courtes (rayons ultraviolets, rayons x, rayons γ, rayons cosmiques) ou plus longues (rayons infrarouges, rayons hertziens) que l'œil ne perçoit pas, mais que peuvent recevoir certains récepteurs physiques et qui obéissent, en ce qui concerne leur émission et leur propagation, à des lois analogues à celles qui régissent les rayonnements visibles.

## I-2-2-Définition de la lumière blanche

La lumière blanche est un mélange de longueur d'ondes visibles. Bien qu'il n'y ait pas de limite précise entre les domaines des longueurs d'ondes, on peut considérer que la limite inférieure des longueurs d'ondes des radiations ultraviolettes est de 400nm. Les radiations infrarouges qui produisent un rayonnement thermique, ont des longueurs d'ondes comprises entre 700nm et 1000μm.

**Tableau 1-1- RADIATION ELECTROMAGNETIQUE**

Quantum $\epsilon$ (eV)	Fréquence $\nu$ (Hz)	Nombre d'ondes σ (cm <sup>-1</sup> )	Longueur d'onde (m) (Autre unité)
$1,24 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{22}$	$10^{12}$	$10^{-14}$
$1,24 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{21}$	$10^{11}$	$10^{-13}$
$1,24 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{20}$	$10^{10}$	$10^{-12}$
$1,24 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{19}$	$10^9$	$10^{-11}$
$1,24 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{18}$	$10^8$	$10^{-10}$
$1,24 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{17}$	$10^7$	$10^{-9}$
124	$3 \cdot 10^{16}$	$10^6$	$10^-8$
12,4	$3 \cdot 10^{15}$	$10^5$	$10^-7$
1,24	$3 \cdot 10^{14}$	$10^4$	$10^-6$
$1,24 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{13}$	$10^3$	$10^-5$
$1,24 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{12}$	$10^2$	$10^-4$
$1,24 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{11}$	$10$	$10^-3$
$1,24 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{10}$	$1$	$10^-2$
$1,24 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^9$	$10^{-1}$	$10^-1$
$1,24 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^8$	$10^{-2}$	$10$
$1,24 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^7$	$10^{-3}$	$10$
$1,24 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^6$	$10^{-4}$	$10^2$
$1,24 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^5$	$10^{-5}$	$10^3$

$\lambda(\text{\AA})$	ULTRAVIOLET	$\lambda(\mu)$	VISIBLE	$\lambda(\mu)$	INFRAROUGE
136		400		0,78	
500 Millikan		440	Violet	1,4	Proche
1200 Ly man		500	Bleu	3	Moyen
1850 Schuman		560	Vert	1000	Lointain
2800 Lointain		590	Jaune		
3150 Moyen(B)		610	Orange		
4000 Proche (A)		780	Rouge		

### I-3 Propagation de la lumière

La lumière se propage dans le vide et dans la matière, c'est-à-dire, dans les milieux transparents (eau, verre, plastique, transparent, air...). Dans le vide et dans les milieux homogènes, la lumière se propage en ligne droite. Les rayons lumineux sont des segments de droite.

Le système de l'appareil photographique en est une preuve. Sur l'illustration, le fond d'une boîte noire a été remplacée par un papier calque. La face opposée a été percée. L'image inversée et réduite de l'arbre se forme sur le fond. Ce phénomène s'explique par la propagation rectiligne de la lumière. Dans un appareil photographique, le calque est remplacé par un film et une lentille convergente est placée dans le trou pour concentrer les rayons sur une plus petite surface. On représente le chemin de la lumière par une droite appelée rayon lumineux. La flèche indique le sens de propagation de la lumière. Un faisceau lumineux est un ensemble de rayons lumineux.

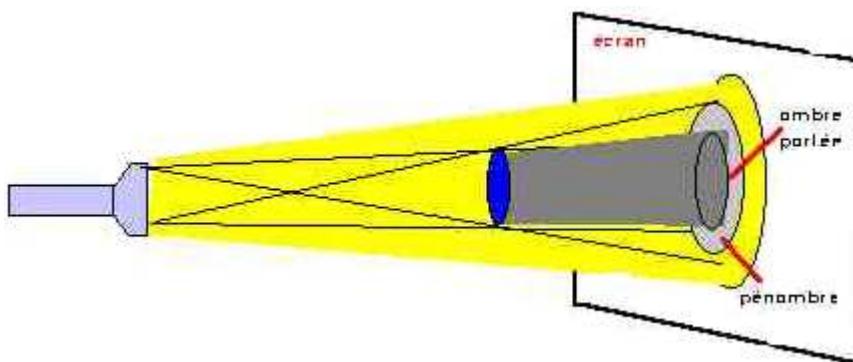


Figure 1.2 : Système de l'appareil photo

### I-4 Ombres et lumières

Comme la lumière se propage en ligne droite, elle crée une ombre quand elle rencontre un obstacle. Si la source lumineuse est très petite, l'ombre portée a des contours très nets. Si elle est grande, l'ombre portée a des contours flous. La zone entre l'ombre portée et la lumière s'appelle la pénombre. Cette zone ne reçoit qu'une partie de la lumière de la source. Lors d'une éclipse de Soleil, l'ombre de la lune est projetée sur la Terre. Les personnes dans l'ombre portée sont dans l'obscurité totale. Ceux qui se trouvent dans la pénombre connaissent une éclipse partielle.

### I-5 Nature de l'énergie lumineuse

L'énergie lumineuse a une double nature rayonnante : elle peut être considérée comme flux de particules énergétiques, les photons, ou comme trains d'ondes transversales ou longitudinales.

- ❖ **Le concept de photon** est utilisé pour expliquer les interactions entre la lumière et la matière lorsqu'elles conduisent à un changement de nature de l'énergie, comme dans l'effet photoélectrique.
- ❖ **Le concept d'onde** est généralement utilisé pour expliquer la propagation de la lumière et certaines des phénomènes liés à la formation des images. Les ondes lumineuses, comme les autres ondes électromagnétiques, créent en chaque point de l'espace des champs électriques et magnétiques qui sont orthogonaux, perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde.

**CHAPITRE II :**  
**NATURE ONDULATOIRE DE LA LUMIERE**  
(*Ondes électromagnétique*)

**II-1-Généralités**

**II-1-1- Définition d'onde**

Une onde est une perturbation qui se propage dans un milieu ; la grandeur perturbée peut correspondre à une caractéristique matérielle du milieu ou à un champ. L'onde permet un transport d'énergie sans transport de matière.

**II-1-2-Types d'ondes**

On distingue deux types principaux d'ondes :

- Les ondes mécaniques ;
- Les ondes électromagnétiques.

Les ondes peuvent être longitudinales ou transversales.

- Les ondes longitudinales, où les points du milieu de propagation se déplacent localement selon la direction de la perturbation (exemple type : la compression ou la décompression d'un ressort, le son dans un milieu sans cisaillement : eau, air...)
- Les ondes transversales, où les points du milieu de propagation se déplacent localement perpendiculairement au sens de la perturbation, de sorte qu'il faut faire intervenir une grandeur supplémentaire pour les décrire (exemple type : les vagues, les ondes des tremblements de terre, les ondes électromagnétiques). On parle pour décrire ceci de polarisation.
- Le milieu de propagation d'une onde peut être tridimensionnel (onde sonore, lumineuse, etc.), bidimensionnel (onde à la surface de l'eau), ou unidimensionnel (onde sur une corde vibrante).
- Une onde peut posséder plusieurs géométries : plane, sphérique, etc. Elle peut également être progressive, stationnaire ou évanescante . Elle est progressive lorsqu'elle s'éloigne de sa source. Elle s'en éloigne indéfiniment si le milieu est infini, si le milieu est borné, elle peut se réfléchir sur les bords, sur la sphère (comme la Terre par exemple) ; les ondes peuvent revenir au point de départ en faisant en tour complet.
- D'un point de vue plus formel, on distingue également les ondes scalaires qui peuvent être décrites par un nombre variable dans l'espace et dans le temps (le son dans les fluides par exemple), et les ondes vectorielles qui nécessitent un vecteur à leur description (la lumière par exemple), voire des ondes tensorielles (d'ordre 2) pour les ondes gravitationnelles de la relativité générale.
- Si l'on définit les ondes comme associées à un milieu matériel, les ondes électromagnétiques sont exclues ! Pour éviter de les exclure, on peut définir les ondes comme des perturbations d'un milieu, au sens large, matériel ou vide. Dans ce dernier cas, c'est une perturbation électromagnétique.

### **II-1-3-Définition de l'onde électromagnétique**

On appelle onde électromagnétique les champs électromagnétiques variable se propage dans l'espace.

-La lumière est une onde électromagnétique ; elle consiste en la propagation dans l'espace d'un champ électrique  $\vec{E}$  et champ magnétique  $\vec{B}$  sinusoïdaux et vibrant en phase. La vitesse de propagation d'une onde électromagnétique, notée comme c vaut  $3.10^8$  m/s dans le vide.

Les champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  caractérisant l'onde lumineuse sont, dans le vide, constamment perpendiculaires l'un à l'autre et perpendiculaires à la direction de propagation.

La mécanique quantique a montré que les particules élémentaires pouvaient être assimilées à des ondes et vice versa, ce qui explique le comportement parfois ondulatoire et parfois corpusculaire de la lumière. Le photon peut être considéré à la fois comme une onde et comme une particule.

La notion d'onde électromagnétique est complémentaire de photon. En fait, l'onde fournit une description plus pertinente de la radiation pour les faibles fréquences, (c'est-à-dire les grandes longueurs d'onde) comme les ondes radio.

En fait, l'onde électromagnétique représente deux choses :

- ✓ La variation macroscopique du champ électrique et du champ magnétique ;
- ✓ La fonction d'onde du photon, c'est-à-dire que la norme au carré est la probabilité de présence d'un photon.

Les ondes électromagnétiques sont des ondes qui sont transversales dans le vide ou dans des milieux homogènes. En revanche, dans des milieux particuliers, comme par exemple le plasma, les ondes électromagnétiques peuvent être longitudinales, transversales ou parfois les deux à fois. L'optique est un cas particulier de propagation dans des milieux diélectriques, tandis que la propagation dans un métal correspond à un courant électrique en mode alternatif.

### **II-1-4-Dimensionnalité**

Soient  $\vec{u}$  le déplacement de l'énergie et la vitesse de l'onde :

- $\vec{u} \parallel \vec{v}$  : l'onde est longitudinale  $\vec{v}$

Exemple : Ressort à boudin. Si on déplace brutalement une spire d'un tel ressort tendu entre deux supports, on voit se former une onde de compression des spires. Dans ce cas, le mouvement des spires se fait dans la même direction que la propagation de l'énergie, suivant la droite que constitue l'axe de symétrie du ressort. Il s'agit d'une onde longitudinale à une dimension.

- $\vec{u} \perp \vec{v}$  : l'onde est transversale

Exemples : Lorsqu'on frappe un tambour, on crée sur sa peau une onde transverse à deux dimensions, comme dans le cas de la surface de l'eau. Lorsqu'on déplace des charges électriques, les champs magnétiques et électriques locaux varient pour s'adapter à la variation de position des charges produisant une onde électromagnétique. Cette onde est transverse et peut se propager dans les trois directions de l'espace. Dans ce cas, l'onde n'est pas un déplacement de matière.

- Une onde peut être à la fois longitudinale et transversale.

Exemple : Sur la mer, une vague est créée par un vent qui provoque une variation de la hauteur d'eau. Il en est de même pour les ronds dans l'eau provoqués par la chute d'un caillou. Dans ce cas, on peut facilement voir que la propagation de l'onde se fait dans les deux dimensions de la surface de l'eau.

Les ondes électromagnétiques dépassant les frontières du visible chez l'être humain : de fréquence supérieure au violet sont désignées jusqu'à une certaine limite par le terme d'ultraviolet ou U.V; celles qui sont de fréquence inférieure au rouge sont appelées infrarouges. La largeur de bande de lumière visible par les animaux peut varier considérablement par rapport aux capacités visuelles des êtres humains.

### II-1-5-Description

Comme toutes les ondes, une onde électromagnétique peut s'analyser en utilisant l'analyse spectrale ; on peut décomposer l'onde en ondes dites « monochromatiques ».

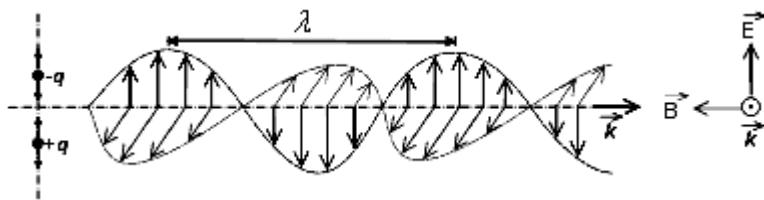


Figure 2.1 : Description d'onde électromagnétique

Onde électromagnétique : oscillation couplée du champ électrique et du champ magnétique, modèle du dipôle vibrant (Le trièdre ( $\vec{k}$ ,  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$ ) doit être direct).

Les variations des champs électrique et magnétique sont liées par les équations de Maxwell. L'amplitude  $E_1(x, t)$  du champ électrique à l'espace r et l'instant t est donnée par :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \sin(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi) \quad (2.1)$$

C'est une équation générale d'une onde plane monochromatique.

**$\vec{E}_0$  : est la valeur maximale de l'amplitude  $E_1(x, t)$**

**$\omega$**  : est la pulsation et vaut  $\frac{2\pi c}{\lambda}$

**$\vec{r}$**  : est le vecteur position du point considéré ;

**$\vec{k}$**  : est le vecteur d'onde dont la norme vaut  $\frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda$  étant la longueur d'onde.

Dans le cas de la lumière, nous considérons le champ  $\vec{E}$  comme représentatif de l'onde électromagnétique, car les effets de  $\vec{B}$  sont très faibles sur la rétine de l'œil et sur les autres détecteurs de lumière. Donc, on peut représenter l'onde par un seul de ces champs, en général le champ électrique.

En un point X et à l'instant t donné, la relation (2.1) peut s'écrire :

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 \sin(\omega t - kX + \varphi) \quad (2.2)$$

L'intensité I de l'onde lumineuse est proportionnelle au carré de l'amplitude maximale  $\vec{E}_0$  ; on a :

$$I = |E_0|^2 \quad (2.3)$$

L'amplitude  $\vec{E}_0$  et la fréquence  $\nu$  sont des caractéristiques essentielles de l'onde lumineuse. On utilise aussi fréquemment la forme complexe :

$$\vec{E}(\mathbf{x}, t) = \vec{E}_0 e^{-i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \phi)} \quad (2.4)$$

## II-1-6- Les comportements ondulatoires des ondes lumineuses

Les comportements ondulatoires des ondes lumineuses sont :

### ❖ Propagation

Dans un milieu homogène et isotrope, l'onde électromagnétique se propage en ligne droite. Lors de la rencontre avec un obstacle, il y a diffraction ; lors d'un changement de milieu, il y a réflexion et réfraction, il y a aussi réfraction si les propriétés du milieu changent selon l'endroit (hétérogénéité).

### ❖ Réflexion

Lors d'un changement de milieu de propagation, une partie de l'onde électromagnétique repart vers le milieu d'origine, c'est la réflexion. Le cas le plus connu de la réflexion est le miroir, mais celle-ci concerne également les rayons X (miroir à rayons X) et les ondes radio : réflexion sur l'ionosphère des ondes megahertz, antenne parabolique...

### ❖ Réfraction

Lors d'un changement de milieu de propagation, si le second milieu est transparent pour l'onde, celle-ci se propage dans le second milieu mais avec une direction différente. Cela concerne la lumière (lentille optique, mirage), mais aussi les ondes radio (réfraction des ondes décamétriques dans la ionosphère).

### ❖ Diffusion

Lorsqu'une onde rencontre un atome, elle se diffuse sur celui-ci, elle change de direction.

### ❖ Interférences

Comme toutes les ondes, les ondes électromagnétiques peuvent interférer. Dans le cas des radiocommunications, cela provoque un parasitage du signal.

### ❖ Diffraction

L'interférence d'ondes diffusées porte le nom de diffraction.

## II-1-7-Exemple de représentation de deux ondes sinusoïdales de même fréquence et même amplitude en un point fixe

Soient  $E_1(x, t)$  et  $E_2(x, t)$  : deux ondes de même fréquence, de même longueur d'onde et de même amplitude peuvent différer par leurs phases  $\phi_1$  et  $\phi_2$  :

$$E_1(x, t) = E_0 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x + \phi_1\right) \quad \text{et} \quad E_2(x, t) = E_0 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x + \phi_2\right) \quad (2.5)$$

Lorsque  $\phi_1 = \phi_2$ , les deux ondes sont dites en phase. Dans le cas contraire, elles sont déphasées : l'une des ondes est alors en avance sur l'autre (fig. 2-2). La différence de phase est donnée par déphasage :

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (2.6)$$

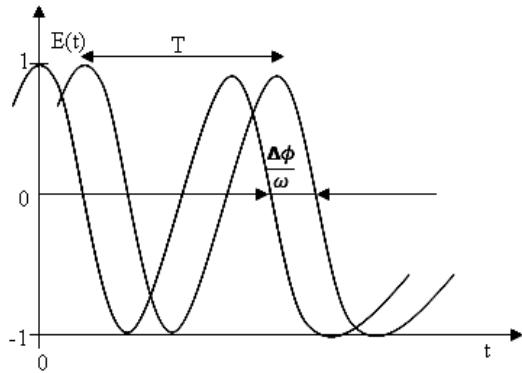


Figure 2.2 : Représentation de deux ondes de même fréquence et de même amplitude en un point fixe

L'onde représentée sans symboles est en retard sur l'autre : ses maxima sont atteints plus tard. Les deux sont déphasées ; la différence de phase  $\Delta\phi$  correspond sur la figure 2.2 à un retard temporel

$$\text{de } \frac{T\Delta\phi}{2\pi} = \frac{\Delta\phi}{\omega}.$$

## II. 2 Propagation des ondes lumineuses

### II-2-1-Propagation dans le vide

#### II-2-1-1-Nature électromagnétique de l'onde lumineuse

Les équations locales, dites de Maxwell, auxquelles satisfont le champ magnétique  $\vec{B}$  et le champ électrique  $\vec{E}$  créé par des sources, sont dans le vide :

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \text{div} \vec{B} &= 0 \\ \text{div} \vec{E} &= 0 & \text{rot} \vec{B} &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{aligned}$$

Où

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ et } \epsilon_0 \text{ telque } \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ en U.S.I}$$

Par convention, on obtient deux équations du second ordre auxquelles satisfont  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} &= \text{rot} \vec{E} \\ \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} &= \frac{\partial}{\partial t} (\text{rot} \vec{E}) \\ &= \text{rot} \left( \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \\ &= \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \text{rot rot} (\vec{B}) \\ &= \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} [\text{grad}(\text{div} \vec{B}) - \Delta \vec{B}] \\ &= -\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \Delta \vec{B} \end{aligned}$$

$$\text{Or } C_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad \text{donc} \quad C_0^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}$$

$$\text{d'où} \quad \mu_0 \epsilon_0 = \frac{1}{C_0^2}$$

Avec  $\mu_0$  : permittivité dans le vide

et  $\epsilon_0$  : relativité dans le vide

$$-\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = -\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \Delta \vec{B} = -C_0^2 \Delta \vec{B}$$

On trouve donc l'équation de propagation de  $\vec{B}$  :

$$\Delta \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = \frac{1}{C_0^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

De même, on établirait l'équation de propagation de  $\vec{E}$  :

$$\Delta \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{C_0^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

Ces champs se propagent à la célérité :

$$C_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 3.10^8 \text{ m.s}^{-1} \quad (2.9)$$

Dans le vide, laquelle est précisément celle de la lumière, ces résultats confrontés à d'autres a permis d'en conclure que la lumière est une onde électromagnétique.

### II-2-1-2- Structure de l'onde lumineuse monochromatique plane

L'onde monochromatique plane, solution des équations précédentes, s'écrit en notation complexe :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp[-i(\omega t - k_0 z - \phi)] \quad (2.10)$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \exp[-i(\omega t - k_0 z - \phi)] \quad \text{avec } C = \frac{\omega}{k_0}$$

Les équations :

$\operatorname{div} \vec{B} = 0$  et  $\operatorname{div} \vec{E} = 0$  entraînent respectivement  $\vec{k}_0 \cdot \vec{E} = 0$  et  $\vec{k}_0 \cdot \vec{B} = 0$  d'autre part,

$$\text{l'équation } -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \operatorname{rot} \vec{E} \text{ donne } \vec{k}_0 \cdot \vec{E} = \omega \vec{B} \quad .$$

Ainsi, les trois vecteurs  $\vec{E}_0, \vec{B}_0, \vec{k}_0$  forment un trièdre trirectangle de telle sorte que :

$$\vec{B} = \frac{1}{C} \vec{k}_0 \wedge \vec{E} \quad (2.11)$$

D'autre part, l'équation d'onde ne contient pas le nombre imaginaire  $i = \sqrt{-1}$ , les champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  oscillent en phase et sont liés par la relation (c'est-à-dire les vecteurs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  sont proportionnels ; leur rapport est égal à la célérité des ondes).

$$\frac{\vec{E}}{\vec{B}} = \frac{\omega}{k_0} = C \quad (2.12)$$

## II-2-2- Propagation dans un milieu matériel

Dans un milieu linéaire, isotrope, non conducteur, transparent et non magnétique, les propriétés ne dépendent pas de la direction de propagation (isotrope) ; il n'y a pas de charges mobiles (non conducteur) et toute onde incidente est au moins partiellement transmise (transparent). Les équations de Maxwell dans le cas rassemblent aux équations précédentes; le coefficient  $\epsilon_0$  est seulement changé (milieu non magnétique). On obtient alors les équations :

$$\Delta E = \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad \text{et} \quad \Delta B = \epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

### II-2-2-1-Milieu matériel

Dans un milieu matériel homogène, ces équations admettent comme solution les ondes monochromatiques planes d'expressions complexes :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp[-i(\omega t - k_0 z - \phi)] \text{ et } \vec{B} = \vec{B}_0 \exp[-i(\omega t - k_0 z - \phi)] \text{ ou } \frac{\omega}{k} = (\epsilon_0 \epsilon_r)^{-1/2} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$\text{La structure de l'onde monochromatique plane est la même que dans le vide, on a : } \frac{E}{B} = v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

L'indice du milieu  $n = \frac{c}{v}$  est alors relié à  $\epsilon_r$  par l'équation :  $n = \sqrt{\epsilon_r}$ .

D'autre part, comme  $\omega$  est indépendant du milieu,  $k_0 v = k_0 c$ . Par conséquent,

$$k = k_0 n \text{ et } \lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{\lambda_0}{n}$$

On retiendra que les milieux matériels « tassent » les longueurs d'ondes et que la longueur d'onde dans le vide : et non la longueur d'onde dans le milieu, caractérise une onde.

### II-2-2-2 -Milieu matériel non homogènes

Dans le milieu matériel non homogène, les expressions des champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  associés à des ondes monochromatiques peuvent se mettre sous la forme :

$$\Psi(r, t) = A(r) * \exp[-i(\omega t - k_0 z - \phi(r))] \quad (2.14)$$

où  $A(r)$ , fonction de la variable d'espace  $r$ , varie lentement comparée à  $\exp[i\phi(r)]$ . La surface d'onde, ensemble des points d'égale perturbation  $\Psi(r, t)$  d'un instant donné s'identifie pratiquement à la surface  $\phi(r) = \text{cte}$ . Comme  $\Psi(r, t)$  satisfait à l'équation :

$$\Delta \Psi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

il vient, en exprimant :

$$\text{grad} \Psi = \text{grad} A + i A \text{ grad} \phi [\exp[-i(\omega t - \phi(r))]] \quad (2.16)$$

en calculant  $\Delta \Psi = \text{div grad} \Psi$ , en posant  $k^2 = \frac{\omega^2}{v^2}$  et en séparant les parties réelle et imaginaire :

$$\text{on obtient } \frac{\Delta A}{A} + [k^2 - (\text{grad} \phi)^2] = 0 \text{ et } A \Delta \phi + 2 \text{grad} \phi \cdot \text{grad} A = 0$$

Si la condition  $k^2 \gg \frac{\Delta A}{A}$  est réalisée, c'est-à-dire si  $\lambda$  est suffisamment faible, on obtient l'équation iconale de l'optique de l'optique géométrique :

$$\frac{\Delta A}{A} + [k^2 - (\text{grad}\phi)^2] = 0 \quad k^2 \gg \frac{\Delta A}{A}$$

$$\Rightarrow k^2 - (\text{grad}\phi)^2 = 0$$

D'où  $k = \|\text{grad}\phi\|$

(2-17)

Localement, l'onde se comporte comme une onde plane ; on dit qu'elle est quasi-plane : les champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  sont alors contenus dans le plan tangent à la surface d'onde et se propagent normalement à plan. On définit le vecteur d'onde  $k$  de l'onde  $k$  de l'onde quasi-plane par :

$$k = \text{grad}\phi \quad (2.18)$$

Ainsi  $k$  est normal à la surface d'onde. La variation de phase, entre deux surfaces d'onde  $\Sigma_1$  et  $\Sigma_2$ , est alors donnée par l'intégrale curviligne :

$$\phi_2 - \phi_1 = \int_{\text{RL}} \vec{k} \cdot d\vec{r} \quad (2.19)$$

Le long d'une courbe tangente à  $k$  c'est-à-dire le long d'un rayon lumineux (RL) dans un milieu isotrope,  $k = k_0 n u$  et  $ds = u \cdot dr$ .

$u$  étant le vecteur unitaire porté par  $k$  et  $ds$  l'élément curviligne sur RL. Par conséquent, la variation de phase s'écrit :

$$\phi_2 - \phi_1 = k_0 \int_{\text{RL}} n ds = k_0 L \quad \text{Puisque } L = \int_{\text{RL}} n ds$$

Ainsi, entre deux surfaces d'ondes, la variation de phase est proportionnelle au chemin optique.

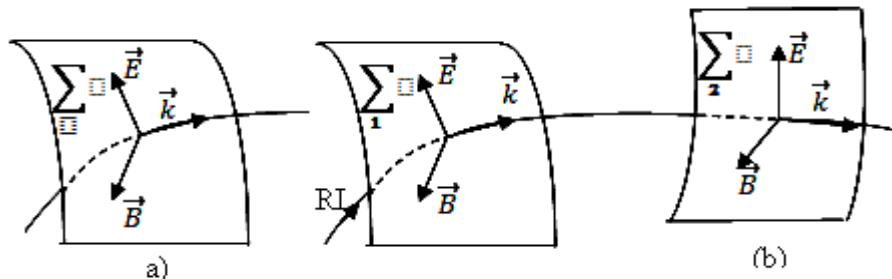


Figure 2-3 : Représentation de rayon lumineux

## II- 2-3-Réflexion et réfraction d'une onde monochromatique

### II-2-3-1-Loi de Snell-Descartes.

Considérons une onde monochromatique plane qui tombe sur un dioptre plan séparant deux milieux diélectriques d'indices respectifs  $n_1$  et  $n_2$ . Cette onde, d'expression :

$$E_{O_1} \exp[-i(\omega t - k_1)] \quad (2.20)$$

se décompose en deux ondes de même pulsation : l'une est l'onde réfléchie

$$E_{O_1} \exp[-i(\omega t - k_1)] \quad (2.21)$$

et l'autre est de l'onde transmise;

$$E_{O_2} \exp[-i(\omega t - k_1)] \quad (2.22)$$

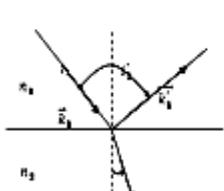


Figure 2-4 : représentation d'onde monochromatique plane tombé sur un dioptrre

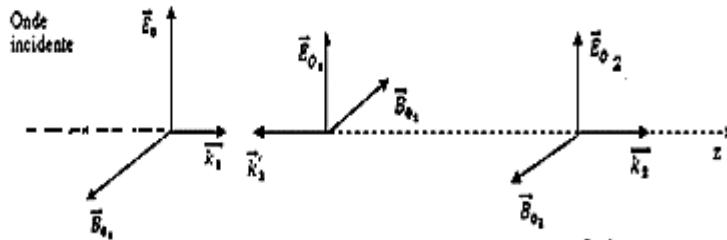


Figure 2-5: Décomposition d'onde monochromatique plane

Pour qu'une relation entre les amplitudes de ces trois ondes puisse exister en tout point  $r$  de la surface de séparation et à tout instant  $t$ , il est nécessaire que les termes de phase soient égaux. Il en résulte que :

$$\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} = \mathbf{k}'_1 \cdot \mathbf{r} = \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} \quad (2.23)$$

Ce qui entraîne, si l'on désigne par  $N$  la normale du dioptrre,

$$\overrightarrow{\mathbf{k}'_1} - \overrightarrow{\mathbf{k}_1} = \mathbf{b}_1 \overrightarrow{\mathbf{N}} \text{ et } \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1 = \mathbf{b}_2 \overrightarrow{\mathbf{N}} \quad (2.24)$$

$\mathbf{b}_1$  et  $\mathbf{b}_2$  étant deux nombres réels, comme les vecteurs  $\overrightarrow{\mathbf{k}'_1}, \overrightarrow{\mathbf{k}_1}$  et  $\overrightarrow{\mathbf{k}_2}$  s'écrivent respectivement  $\overrightarrow{\mathbf{k}_1} = \overrightarrow{\mathbf{k}_1} n_1 \mathbf{U}_1$ .

$$n_1 (\overrightarrow{\mathbf{u}'_1} \cdot \overrightarrow{\mathbf{u}_1}) = \alpha_1 \overrightarrow{\mathbf{N}} \text{ et } n_2 \overrightarrow{\mathbf{u}_2} - n_1 \overrightarrow{\mathbf{u}_1} = \alpha_2 \overrightarrow{\mathbf{N}}$$

En projetant dans le plan du dioptrre, on obtient les relations de la réflexion et de la réfraction de l'optique géométrique.

#### II-2-4-Polarisation des ondes lumineuses

L'onde lumineuse vibre et la vibration perpendiculaire à la direction de propagation s'étend dans toutes les directions, haut, bas, droite, gauche.

Supposons que l'on puisse empêcher l'onde de vibrer dans le sens vertical, on dira que l'onde a été polarisée. La polarisation correspond à la direction et à l'amplitude du champ électrique  $\overrightarrow{\mathbf{E}}$ . Pour onde non polarisée, ou naturel  $\overrightarrow{\mathbf{E}}$ , tourne autour de son axe de façon aléatoire et imprévisible au cours du temps. Polariser une onde correspond à donner une trajectoire définie au champ électrique. Il y a plusieurs sortes de polarisation :

- Polarisation rectiligne,
- Polarisation elliptique,
- Polarisation circulaire.

##### II-2-4-1-Onde polarisée rectilignement

Les ondes lumineuses sont polarisées rectilignement lorsque les champs  $\overrightarrow{\mathbf{E}}$  et  $\overrightarrow{\mathbf{B}}$  gardent des directions fixes ; ces directions sont alors les mêmes en tous les points de l'espace ; le plan défini par le vecteur  $\overrightarrow{\mathbf{E}}$  et la direction de propagation (le vecteur  $\overrightarrow{\mathbf{k}}$ ) est appelé plan de polarisation.

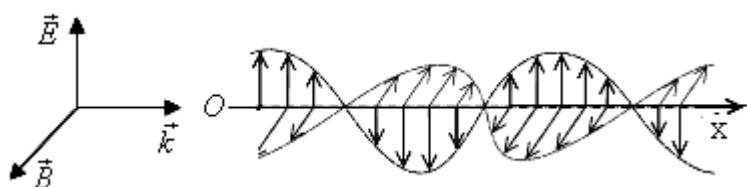


Figure 2-6 : Onde polarisée rectilignement

La direction de propagation est  $Ox$ . On a représenté les valeurs de  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  en tous points de  $Ox$  au même instant.

### II-2-4-2-Ondes polarisées elliptiquement et circulairement

-Les ondes lumineuses sont polarisées elliptiquement lorsque les extrémités des vecteurs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  d'un plan d'onde décrivent chacune une ellipse ; c'est le cas général pour les ondes monochromatiques. La vitesse aréolaire des vecteurs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  est constante ; selon cette rotation par rapport au sens de propagation, la vibration elliptique est droite à gauche. Toute vibration elliptique peut être décomposée en deux vibrations rectilignes par projection sur deux axes perpendiculaires.

-Les ondes lumineuses sont polarisées circulairement lorsque les extrémités des vecteurs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  décrivent chacune un cercle d'un mouvement uniforme. Les vibrations circulaires sont aussi droites ou gauches.

-Ces deux ondes sont caractérisées par des champs électrique et magnétique  $E$  et  $B$  que l'on peut considérer séparément comme la somme de deux champs perpendiculaires qui se propagent suivant la direction normale au plan qu'ils forment :

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = A_1 \vec{e}_x \cos(\omega t - \vec{k}r - \varphi_1) + A_2 \vec{e}_y \cos(\omega t - \vec{k}r - \varphi_2) \quad (2.25)$$

$\vec{e}_x$  et  $\vec{e}_y$  étant deux vecteurs unitaires orthogonaux. En changeant l'origine des temps et en introduisant le retard de phase  $\phi$  de  $\vec{E}_2$  par rapport à  $\vec{E}_1$ ,  $\phi = \varphi_2 - \varphi_1 = \varphi_2 - \varphi_1$ , il vient :

$$\vec{E} = A_1 \vec{e}_x \cos(\omega t) + A_2 \vec{e}_y \cos(\omega t - \phi)$$

L'extrémité M de  $\overrightarrow{OM} = \vec{E}$  décrit généralement une ellipse (fig.2-7). En effet  $\overrightarrow{OM}$  a pour composante dans la base ( $\vec{e}_x, \vec{e}_y$ ) :

$$E_x = A_1 \cos \omega t \quad \text{et} \quad E_y = A_2 \cos(\omega t - \phi) \\ \text{or } \cos(\omega t - \phi) = \cos \omega t \cos \phi + \sin \omega t \sin \phi$$

D'où  $E_y = A_2 (\cos \omega t \cos \phi + \sin \omega t \sin \phi)$

$$\cos \omega t = \frac{E_x}{A_1} \quad \text{et} \quad \sin^2 \omega t = 1 - \cos^2(\omega t)$$

$$\Rightarrow \frac{E_y}{A_2} = \frac{E_x}{A_1} \cos\phi + \left(1 - \frac{E_x^2}{A_1^2}\right)^{\frac{1}{2}} \sin\phi$$

$$\Rightarrow \left(\frac{E_y}{A_2} - \frac{E_x}{A_1} \cos\phi\right)^2 = \left(1 - \frac{E_x^2}{A_1^2}\right) \sin^2\phi$$

$$\frac{E_y^2}{A_2^2} - \frac{2E_x E_y}{A_1 A_2} \cos\phi + \frac{E_x^2}{A_1^2} \cos^2\phi = \sin^2\phi - \frac{E_x^2}{A_1^2} \sin^2\phi$$

$$\frac{E_x^2}{A_1^2} (\cos^2\phi + \sin^2\phi) + \frac{E_y^2}{A_2^2} - \frac{2E_x E_y}{A_1 A_2} \cos\phi = \sin^2\phi$$

or  $\cos^2\phi + \sin^2\phi = 1$

Donc

$$\frac{E_x^2}{A_1^2} + \frac{E_y^2}{A_2^2} - \frac{2E_x E_y}{A_1 A_2} \cos\phi = \sin^2\phi$$

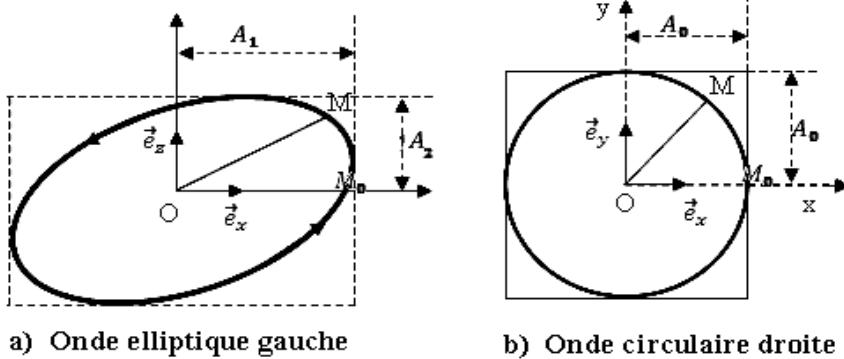


Figure 2-7 : Ondes polarisées elliptiquement et circulairement

On détermine le sens de parcours de l'ellipse en calculant  $\frac{dE_x}{dt}$  et  $\frac{dE_y}{dt}$ .

$$\frac{dE_x}{dt} = -A_1 \omega \sin \omega t ; \quad \frac{dE_y}{dt} = -A_2 \omega \sin(\omega t - \phi)$$

Notons que pour  $\omega t = 0$  ( $M$  et  $M_0$ ),  $\frac{dE_x}{dt} = 0$  et  $\frac{dE_y}{dt} = A_2 \omega \sin \phi$

Ainsi lorsque  $\phi$  est positif, l'ellipse est décrite dans le sens trigonométrique ; l'onde est d'hélicité

positive, ou plus brièvement positive, puisque le sens de description de l'ellipse ( $\vec{e}_x$  vers  $\vec{e}_y$ ) est relié au sens de propagation ( $\vec{e}_x$ ) par la règle du trièdre direct. En optique, on dit que l'onde est polarisée elliptiquement à gauche car, pour un observateur vers lequel l'onde se propage, l'ellipse est décrite vers la gauche. Lorsque  $\phi$  est négatif, l'ellipse est décrite dans le sens des aiguilles d'une montre ; l'onde est d'hélicité négative ou plus brièvement négative. En optique, on dit que l'onde est polarisée elliptiquement à droite ;

Dans le cas particulier où  $\phi = \pm \frac{\pi}{2}$  et  $A_1 = A_2 = A_0$ , l'onde est polarisée circulairement, respectivement à gauche ou à droite d'équation :  $\frac{E_x^2}{A_0^2} + \frac{E_y^2}{A_0^2} = 1$

### **Remarque**

On trouve le cas des ondes polarisées rectilignement en faisant  $\phi = 0$  ou  $\pi$ . L'équation généralement de l'ellipse devient en effet :

$$\left( \frac{E_x^2}{A_1^2} + \frac{E_y^2}{A_2^2} \right)^2 = 1 \quad \text{d'où} \quad \frac{E_y}{E_x} = \pm \frac{A_2}{A_1} \quad (2.26)$$

### **II -2-5-La fonction d'onde**

La description de l'état d'une particule à l'instant  $t$  se fait au moyen d'une fonction complexe  $(x, y, z, t)$ , appelée fonction d'onde, dont le carré du module a pour signification physique la probabilité de trouver la particule à l'instant  $t$  dans l'élément de volume  $dx dy dz$  centré sur  $(x, y, z)$  :

$$dP(x, y, z, t) = |\Psi(x, y, z, t)|^2 dx dy dz \quad (2.27)$$

Toute superposition linéaire de fonction d'onde est une fonction d'onde possible. La notion de fonction d'onde provient de l'équation de propagation des ondes (conséquences des équations de Maxwell) :

$$\Delta \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad \text{pour le champ électrique}$$

$$\Delta \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad \text{pour le champ magnétique}$$

Pour une onde polarisé rectilignement ( $E_x$  noté ;  $E_y = E_z = 0$ ), la densité de l'énergie est proportionnelle à  $|E_x|^2$  ou  $|\Psi|^2$ , elle-même proportionnelle à la densité de photons si on se refait à la densité onde lumineuse photons. On conçoit alors que  $|\Psi(x, y, z, t)|^2$  puisse représenter la densité de probabilité de présence dans l'élément  $dx dy dz$ .

### **Propriétés des fonctions d'ondes**

Dans la suite, il arrivera que l'on utilise le terme « vecteur » pour désigner la fonction d'onde .

1- Une fonction d'onde est définie à un facteur de module 1 près. En effet, soit  $\psi = \exp(i\alpha)$ , où  $\alpha$  est indépendant des variables ( $i^2 = -1$ ) :

$$|\Psi'(x, y, z, t)|^2 = |\exp(i\alpha)|^2 |\Psi(x, y, z, t)|^2 = |\Psi(x, y, z, t)|^2$$

2- La probabilité de trouver la particule dans l'espace est égale à 1. Il en résulte que :

$$\int_{\text{tout l'espace}} |\Psi(x, y, z, t)|^2 dx dy dz = 1$$

La fonction  $\Psi$  est donc « de carré sommable », de plus, l'intégrale du carré de son module sur tout l'espace étant égale à l'unité, elle est dite norme (ou normalisme). Cela implique que  $\Psi$  tende rapidement vers zéro lorsqu'une des variables  $x, y$  ou  $z$  tend vers l'infini. Lorsqu'un calcul conduira à une fonction d'onde à un coefficient pour que la relation (2.27) soit satisfaite. Cette opération sera désignée sous le nom de normation.

**3-**Lorsque la variable temps n'intervient pas explicitement dans la fonction, on dira que l'on a affaire à un système dans un état stationnaire (ce seront les seules situations envisagées dans la première partie de ce cours ; elles correspondent à des systèmes dont les interactions possibles avec l'extérieur ne dépend pas de temps)

**4-** La notion de fonction d'onde peut être généralisée à d'autre variable que celles définissant la position d'une seule particule.

**5-** Les fonctions d'ondes définissent un espace de Hilbert avec comme définition du produit scalaire :

$$\langle \Psi' | \Psi \rangle = \int_{\text{espace variable}} \Psi^* \Psi' d\tau$$

$\Psi^*$  désigne le conjugué complexe de la fonction  $\Psi$  alors que la relation **(bra|ket)** est appelé notation de Dirac. On peut immédiatement remarquer que  $\langle \Psi' | \Psi \rangle = \langle \Psi | \Psi' \rangle$  et que le carré de la norme est conforme à ce qui a été du plus haut.

$$\langle \Psi | \Psi \rangle = \int |\Psi|^2 d\tau.$$

Formellement, le vecteur  $\Psi$  d'un espace de Hilbert à  $n$  dimension est défini par un ensemble d'un nombre complexe  $x_1, x_2, \dots, x_n$  qui vérifie les propriétés suivantes :

- . Il existe un vecteur nul pour lequel  $x_i = 0$  pour tout  $i$ .
- . Deux vecteurs  $\Psi_1$  et  $\Psi'$  sont égaux si  $x_i = x'_i$  pour tout  $i$ .
- . Les vecteur  $\Psi$  est égale à la somme des deux vecteurs  $\Psi'$  et  $\Psi''$  ( $\Psi = \Psi' + \Psi''$ ) si  $x_i = x'_i + x''_i$  pour tout  $i$ .

Les vecteurs  $\Psi$  est égale à  $\lambda(\Psi' = \lambda\Psi)$  si  $x'_i = \lambda x_i$  pour tout  $i$ .

- . Les  $x_i$  sont appelés composantes du vecteur  $\Psi$ .

## II-2-6-Conclusion

Les phénomènes électromagnétiques en régime variable sont décrits, comme nous l'avons vu, par les équations de Maxwell dont une particularité essentielle est qu'elles peuvent avoir une solution non nulle dans le vide : cela signifie qu'une onde électromagnétique peut parfaitement se propager en l'absence de matière. Les champs correspondants à une telle onde électromagnétique sont nécessairement variables.

## CHAPITRE III :

### NATURE CORPUSCULAIRE DE LA LUMIERE

*(Les insuffisances de la théorie ondulatoire : Le photon)*

La théorie électromagnétique de Maxwell rend parfaitement compte de la propagation des ondes couvrant un vaste domaine, depuis le rayonnement  $\gamma$  jusqu'au-delà des ondes radiodiffusion. Chaque fois, il est possible de mettre en évidence expérimentalement un caractère ondulatoire du phénomène et de déterminer sa longueur d'onde : par diffraction dans les cristaux pour des longueurs d'ondes de  $0.01\text{\AA}$  à quelques  $\text{\AA}$  (rayon  $\gamma$  et le rayon X), par diffraction sur des réseaux plans pour des longueurs d'onde allant jusqu'au millimètre (ultraviolet, visible, infrarouge) ou par ondes stationnaires pour les plus grandes longueurs d'onde (radar, télévision, radiodiffusion).

Cependant, il existe un ensemble de faits expérimentaux qui entre violement et qui conduit nécessairement à une réinterprétation de la nature de rayonnement. En particulier, l'effet photoélectrique et l'effet Compton sont totalement inexplicables dans la théorie ondulatoire.

#### **III-1-Etude de l'effet photoélectrique**

L'énergie transportée par la lumière est quantifiée. On appelle photon le quantum d'énergie, qui est aussi une particule de lumière.

##### **III-1-1-Définition**

On appelle photoélectrique le processus d'interaction du rayonnement électromagnétique avec la substance au cours duquel l'énergie des photons est transmise aux électrons de cette substance.

##### **III-1-2-Montage expérimental**

La figure 3.11 montre le schéma de principe d'un montage qui permet de mettre en évidence l'effet photoélectrique.

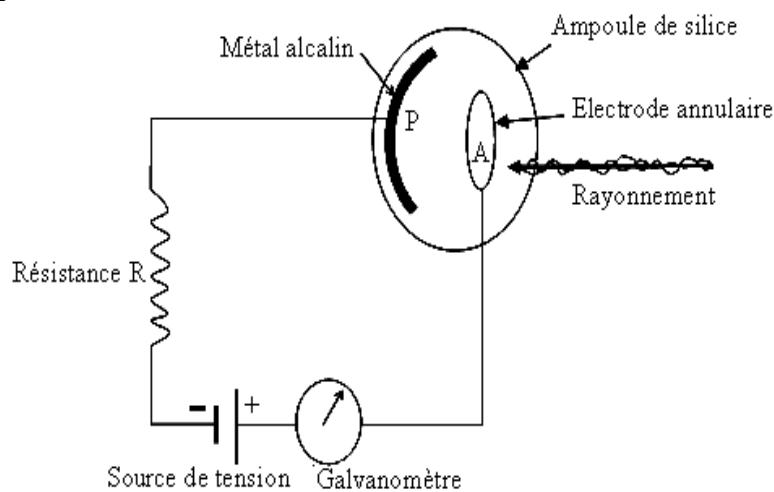


Figure 3-1: schéma de principe d'un montage qui permet de mettre en évidence l'effet photoélectrique.

Dans une ampoule de silice ou de quartz transparente jusque dans l'ultraviolet, on va réaliser un vide aussi parfait que possible. On y place une électrode annulaire A qui peut être une grille à large maille et une plaque P d'un métal alcalin (Potassium ou Césium généralement) réduite le plus souvent à une couche tapissant le fond de l'ampoule. L'anneau A est porté par (de l'ordre de quelques certaines de volts au maximum). Dans l'obscurité, le circuit extérieur n'est pas traversé par un courant ; ce qui est logique puisque l'ampoule constitue en fait un coupe-circuit. Si l'on éclaire par de la lumière violette ou ultraviolet, le galvanomètre décèle alors le passage d'un courant dont l'intensité est de quelques dixièmes de micro-ampères. Ceci implique que des porteurs de charges ont circulé à l'extérieur ont circulé à l'intérieur de l'ampoule, entre P et A. Des expériences de déviation par des champs électriques ou magnétiques appliqués extérieurement montrent qu'il s'agit d'électrons arrachés à la plaque p et attirés par l'anode. Il est instructif d'étudier l'influence des différents paramètres intervenant dans l'expérience :

-Pour l'éclairage donné permettant l'observation de l'effet, le courant est d'abord une fonction croissante de la différence de potentiel appliquée entre P et A, puis on atteint un courant de saturation : tous les électrons émis par p sont alors captés par A ;

-Pour un rayonnement donné, ultraviolet par exemple, pour un métal P donné , la valeur du courant de saturation est proportionnelle à l'énergie de rayonnement reçue par le métal, quelles que soient l'incidence et la polarisation ;

-L'effet photoélectrique est instantané : même pour des flux lumineux très faibles, il commence moins de  $10^{-9}$  seconde après le début de l'éclairement ;

-Pour un métal donné, l'effet photoélectrique n'a lieu qu'une fréquence  $v$  de rayonnement supérieure à un seuil  $v_0$ . On repère généralement les seuils photoélectriques des différents métaux par la longueur d'onde correspondante dans le vide ;

**0,37 μ pour Zn**

**0,26 μ pour Fe et Ag**

**0,50 μ pour Na**

**0,54 μ pour k**

**0,69 μ pour Cs**

On est certes tenté d'interpréter le phénomène en disant que le rayonnement absorbé par la plaque P transmet une partie de son énergie aux électrons libres du métal qui possèdent alors une énergie cinétique suffisante pour s'échapper et être canalisés dans la différence de potentiel appliquée. Mais les faits observés dans le cadre de cette interprétation sont inconciliables avec une théorie ondulatoire de la lumière, admettent un flux continu et constant d'énergie de rayonnement :

-L'effet ne devrait pas alors être instantané et n'apparaîtrait qu'au bout d'un temps d'autant plus long que l'intensité lumineuse serait plus faible ;

-Il n'existerait pas de seuil puisque dans la théorie de Maxwell, l'énergie de rayonnement n'est pas affectée d'un « coefficient de qualité » dépendant de sa longueur d'onde : un joule de lumière rouge. Sortant délibérément de la théorie classique pour échapper à ces difficultés, Einstein suggéra, en 1905, qu'un rayonnement de fréquence  $\nu$  était constitué de « grains d'énergie » transportant chacun l'énergie  $E$ , telle que :

$$E_\nu = h \cdot \nu \quad (3.1)$$

où  $h$  est une constante sur laquelle reviendrons.

De ce transport par grains ou quanta, doivent évidemment résulté des effets entièrement différents de ceux qui résulteraient d'une répartition supposée continue de l'énergie de rayonnement :

On sait bien qu'il n'est pas indifférent de recevoir sur la tête un bloc de pierre d'un tonne ou tonne de sable s'écoulant lentement.

Dès lors, les différentes caractéristiques de l'effet photoélectrique s'interprètent facilement : Un quantum d'énergie de fréquence  $\nu$  arrache un électron si son énergie  $h \nu$  est supérieure à une énergie seuil représentant le travail de sortie de l'électron (la pierre doit être assez grosse !) ; l'excédent par rapport à ce travail de sortie procure à l'électron de masse  $m$  une certaine énergie cinétique :

$$h\nu = W_s + \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.2)$$

-L'effet peut être d'intensité lumineuse très faible (une seule pierre suffit pour arracher un électron !).

Expérimentalement, il est possible de vérifier que l'énergie du quanta est bien proportionnelle à la fréquence, de déterminer la valeur de la constante  $h$  ainsi que la fréquence seuil pour un métal donné. Pour cela, on éclaire la cellule photoélectrique avec une lumière monochromatique dont on sait faire varier la longueur d'onde de façon connue (on utilise des tubes spectraux) et pour chaque fréquence, on détermine la vitesse  $v$  acquise par les électrons en annulant le courant photoélectrique par une différence de tension d'opposition :

$$\frac{1}{2}mv^2 = |e|v \quad (3.3)$$

On trace alors la courbe :

$$\frac{1}{2}mv^2 = |e|v$$

On constate que :

$f(v) = 0$  tant que la fréquence reste inférieure à  $v_0$  que l'on détermine :

$$f(\nu) = h (\nu - \nu_0) \text{ pour } \nu > \nu_0 \quad (3.4)$$

La pente de la droite obtenue dans la seconde phase de l'expérience fournit une valeur de la constante  $h$  ou constante de Planck :

$$h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Joule seconde.} \quad (3.5)$$

On introduisant également la constante  $\hbar$  telle que :  $E_\omega = \hbar\omega$

$$\text{Soit : } \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

La figure 3. 2 représente les résultats qui viennent d'être décrits.

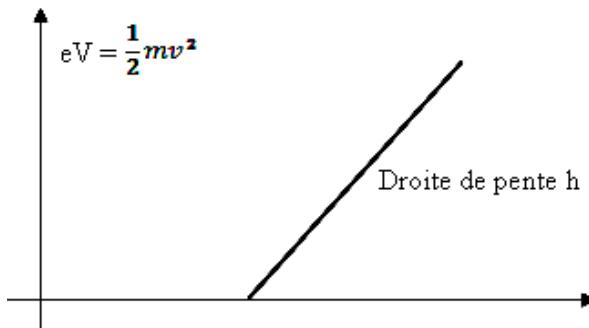


Figure 3.2 : Le courant photoélectrique est nul jusqu'à la fréquence seuil  $\nu_0$  ; au-delà, l'énergie cinétique des électrons croît linéairement avec la fréquence.

### III-2-Interprétation de l'effet Compton le photon

L'effet photoélectrique, tel que nous l'avons écrit et interprété, montre seulement que l'échange d'énergie entre la lumière et la matière se fait par quantum de valeur  $h\bar{\omega}$  : l'idée d'un « corpuscule » transporté par la lumière, ne s'impose pas encore. Il n'en est plus de même lorsqu'on étudie le phénomène de diffusion de rayon X avec changement de longueur d'onde, découvert par Compton en 1923.

L'interprétation soulève en physique classique des difficultés insurmontables, alors que la notion de photon « particule de lumière » fournit une explication simple.

Expérimentalement, on réalise la diffusion Compton en envoyant un faisceau de rayons X sur une substance contenant un certain nombre d'électrons libres (calcite aluminium) ; si la cible est assez mince, on observe, par transmission, des rayons x diffusés en dehors de la direction incidente avec une longueur d'onde légèrement plus élevée, c'est-à-dire une fréquence plus basse.

On explique alors que le photon est entré en collision aux seins de la cible, avec un électron et lui a cédé une partie de son énergie, d'où l'affaiblissement de la fréquence. La théorie élémentaire des collisions élastiques fournit même une interprétation quantitative. Les notions relatives sont cependant rendues nécessaires par le fait que le photon se déplace à la vitesse de la lumière.

Donc on peut définir que l'effet Compton, c'est le changement de la fréquence ou de la longueur d'onde des photons lors de leur diffusion par les électrons et les nucléons.

Le photon est donc introduit sous forme d'une particule possédant l'énergie du « grain » qui est apparue dans l'effet photoélectrique, soit :

$$E = h\nu \quad (3.6)$$

Par ailleurs, nous avons vu en relativité restreinte que l'énergie d'une particule et la quantité de mouvement  $p$  sont liées par les relations :

$$\mathbf{p} = E \cdot \frac{\mathbf{v}}{c^2} \quad (3.7)$$

$$E^2 = c^2 (p^2 + m_0^2 c^2) \quad (\text{après la collision})$$

où  $v$  est la vitesse de particule, avec

$$\mathbf{E} = m c^2$$

et  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

On en déduit immédiatement pour le photon :

$$\mathbf{p} = \frac{\mathbf{E}}{c} = \frac{\mathbf{h} \nu}{c} \quad \text{soit} \quad \mathbf{p} = \frac{h}{\lambda} \mathbf{k} \quad (3.8) \quad m_0 = 0$$

Le fait que la masse du photon au repos soit nulle lui confère un caractère particulier, qu'on ne rencontre pas avec les particules classiques.

### Determination la variation de la longueur d'onde résultant de l'effet Compton.

La figure 3-3 schématisé le phénomène considéré comme un choc.

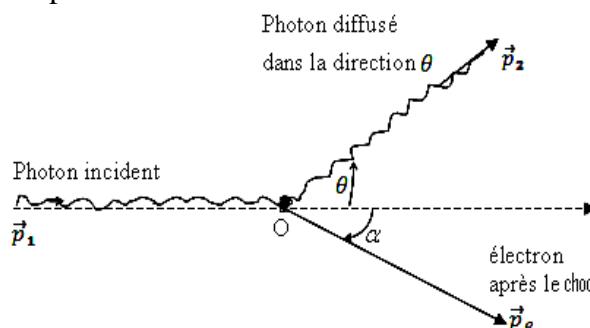


Figure 3.3 : Diffusion par effet Compton

Le photon incident possède la quantité de mouvement  $\vec{p}_1$  suivant une direction  $\mathbf{O}_x$  ; il rencontre en O un électron libre dont la vitesse est si faible devant celle de lumière qu'on peut le supposer au repos. Après le choc, l'électron s'éloigne dans une direction faisant un angle  $\alpha$  avec  $\mathbf{O}_x$ , emportant une quantité de mouvement  $\vec{p}_e$ , le photon, lui est diffusé dans une direction  $\theta$  et il possède alors la quantité de mouvement  $\vec{p}_2$ .

Ecrivons qu'il y a conservation de la quantité de mouvement après choc :

$$\vec{p}_1 = \vec{p}_e + \vec{p}_2 \quad (3.9)$$

Ce qui se traduit sur la figure 3-4

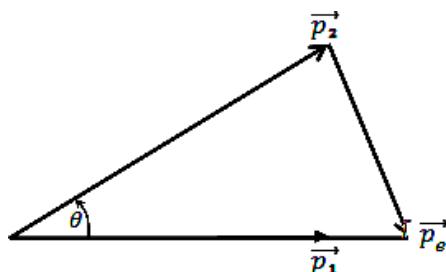


Figure 3-4 : Conservation de la quantité de mouvement par l'effet Compton

La relation trigonométrique dans le triangle permet d'obtenir une équation entre modules à partir de (3.9) :

$$p_e^2 = p_1^2 + p_2^2 - 2p_1 p_2 \cos\theta \quad (3.10)$$

Le choc étant supposé parfaitement élastique, il faut écrire que l'énergie relativiste totale du système se conserve soit :

$$\hbar v_1 + \mu_0 C^2 = \hbar v_2 + C(p_e^2 + \mu_0^2 C^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.11)$$

**$\hbar v_1$**  = Énergie du photon incident

**$\mu_0 C^2$**  = Énergie de l'électron au repos

**$\hbar v_2$**  = Énergie du photon diffusé

**$C(p_e^2 + \mu_0^2 C^2)^{\frac{1}{2}}$**  = **Energie de l'électron déplacé**

**$\mu_0$**  représente la masse au repos de l'électron.

D'après (3.2) :

$$p_1 = \frac{\hbar v_1}{C} \quad \text{et} \quad p_2 = \frac{\hbar v_2}{C}$$

Ceci permet de réécrire (3.10) et de porter la valeur ainsi obtenue de  **$p_e$**  dans (3.11)

D'où :

$$\begin{aligned} \frac{\hbar v_1}{C} + \mu_0 C &= \frac{\hbar v_2}{C} + \left[ \left( \frac{\hbar v_1}{C} \right)^2 + \left( \frac{\hbar v_2}{C} \right)^2 - \frac{2\hbar^2 v_1 v_2 \cos\theta + \mu_0^2 C^2}{C^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \left( \frac{\hbar v_1}{C} + \mu_0 C - \frac{\hbar v_1}{C} \right)^2 &= \left( \frac{\hbar v_1}{C} \right)^2 + \left( \frac{\hbar v_2}{C} \right)^2 - \frac{2\hbar^2 v_1 v_2 \cos\theta + \mu_0^2 C^2}{C^2} \\ \left( \frac{\hbar v_1}{C} \right)^2 + \left( \frac{\hbar v_2}{C} \right)^2 + 2\hbar\mu_0(v_1 - v_2) - \frac{2\hbar^2 v_1 v_2 \cos\theta + \mu_0^2 C^2}{C^2} &= \left( \frac{\hbar v_1}{C} \right)^2 + \left( \frac{\hbar v_2}{C} \right)^2 - \frac{2\hbar^2 v_1 v_2 \cos\theta + \mu_0^2 C^2}{C^2} \\ \Rightarrow 2\hbar\mu_0(v_1 - v_2) - \frac{2\hbar^2 v_1 v_2}{C^2} &= -\frac{2\hbar^2 v_1 v_2 \cos\theta}{C^2} \\ v_1 - v_2 &= \frac{\hbar}{\mu_0 C^2} v_1 v_2 (1 - \cos\theta) \end{aligned} \quad (3.12)$$

En introduisant la longueur d'onde :

$$\lambda_1 = \frac{C}{v_1} \quad \text{et} \quad \lambda_2 = \frac{C}{v_2}$$

On obtient :

$$\begin{aligned} C \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) &= \mu_0 \frac{\hbar}{\lambda_1 \lambda_2 (1 - \cos\theta)} \\ C \left( \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} \right) &= \frac{\hbar}{(\mu_0 \lambda_1 \lambda_2) (1 - \cos\theta)} \end{aligned}$$

Finalement on obtient :

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{2\hbar}{\mu_0 C} \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (3.13)$$

parce que  $1 - \cos\theta = 2\sin^2 \frac{\theta}{2}$

La variation maximale doit être observée dans la direction d'indice, soit  $\theta = \pi$ ,

$$\frac{\hbar}{\mu_e C} = 0,02426 \text{ Å}$$

est homogène à une longueur d'onde : c'est une longueur d'onde Compton.

L'ordre de grandeur de cette quantité montre que l'effet ne sera relativement sensible que dans le domaine des faibles longueurs d'onde ( $\approx 1\text{ Å}$ ) : c'est pourquoi l'on parle de diffusion Compton essentiellement pour les rayons X. Il est remarquable que tous les résultats expérimentaux sont parfaitement interprétés par la formule (3.6), justifiant ainsi l'existence d'un caractère corpusculaire du rayonnement.

Nous n'avons traité ici que l'effet Compton dit du premier ordre. En effet, le photon ayant été diffusé peut de nouveau rencontrer un électron diffusé de nouveau, et ainsi de suite, donnant naissance à des effets Compton d'ordres successifs.

Remarquons, qu'en pratique, il n'existe pas d'électrons libres et immobiles, mais il suffit de prendre des matériaux où des électrons sont presque libres et animés de vitesses faibles. C'est le cas des électrons qui sont périphériques des atomes légers (Li, Al, C) car leur énergie de liaison sont négligeables devant le quantum  $h\nu$  d'une radiation X assez dure (raie k  $\alpha$  du M<sub>0</sub> par exemple,  $\lambda = 0,71 \text{ Å}$ ).

### III-3-Comment concilier l'aspect corpusculaire avec l'aspect ondulatoire de la lumière

Si les effets photoélectriques et de Compton sont inexplicables dans une théorie purement ondulatoire de la lumière, les expériences de diffraction et d'interférences sont totalement incompréhensibles dans une théorie uniquement corpusculaire. Pour expliquer l'ensemble des phénomènes lumineux, il faut également admettre que si ces deux aspects complémentaires coexistent toujours, ils ne se manifestent jamais simultanément : la théorie ondulatoire s'applique pour les interférences, la diffraction, et d'une façon générale, chaque fois que l'énergie lumineuse se conserve ; la théorie corpusculaire ou quantique, intervient lorsqu'il y a échange d'énergie entre la matière et le rayonnement. La conciliation au niveau de l'optique géométrique : les rayons lumineux devient alors les trajectoires des photons.

Il est toutefois possible d'établir des « passerelles » entre les deux formalismes. Dans l'aspect ondulatoire, l'énergie transportée par l'onde est proportionnelle à chaque point au carré de l'amplitude de l'onde :

$$\Psi = \Psi_0 \exp[-i(\omega t - kx)] \quad (3.14)$$

complètement déterminée par  $\Psi_0$ ,  $\omega$  et  $k$ .

Dans l'aspect corpusculaire, l'énergie est proportionnelle au nombre de photons en chaque point. Chaque photon étant complètement déterminé par son énergie  $E$  et sa quantité de mouvement  $p$ .

Une première passerelle existe déjà puisque d'après (3-13) et (3-14) :

$$E = \hbar\omega \quad ; \quad P = \hbar k.$$

Une seconde liaison peut être et doit être établie pour concilier les deux définitions de l'énergie transportée par la lumière : il suffit pour cela d'admettre que la probabilité de

présence de photon en un point, ou la densité de photon en ce point, est proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde en même point. Tout se passe alors comme si l'onde servait de guide pour le photon. Notons que ceci confirme l'absence physique d'une onde monochromatique pour laquelle l'amplitude est constante dans tout l'espace, ce qui rend impossible toute localisation du photon.

## CHAPITRE IV :

### VITESSE DE LA LUMIERE

Dans tout le milieu homogène, la lumière se propage en ligne droite d'un mouvement uniforme : on vérifie bien que les temps de parcours  $t$  est proportionnel aux espaces parcourus  $l$ . Comme ce sont des ondes qui se propagent, et non des particules matérielles, le mot célérité peut être préféré au mot vitesse ; nous emploierons cependant ce dernier conformément à l'usage.

#### **IV-1 Vitesse de la lumière dans le vide**

D'après les théories de la physique moderne et notamment les équations de Maxwell, la lumière visible et même les rayonnements électromagnétiques en général, a une vitesse constante dans le vide ; c'est cette vitesse qu'on appelle vitesse de la lumière. C'est donc une constante physique fondamentale. Elle est notée  $C$ . Elle est extrêmement grande : sa valeur  $C$  dans le vide (la même pour toutes les radiations visibles et invisibles) est voisine de trois cent mille kilomètres par seconde ( $3 \times 10^8$  m/s).

La très grande valeur de la vitesse est  $C = l/t$  conduit à faire intervenir des distances  $l$  plus grandes que les dimensions de la Terre (au moins 300 000 km si l'on veut que le temps  $t$  ne soit pas inférieur à une seconde) ou bien de temps extrêmement petits ( $10^{-4}$  s si l'on veut la distance  $l$  ne soit pas supérieure à 30 km). La célérité est indépendante de la lumière.

**Exemple :** L'année lumière (al) est la distance parcourue par la lumière en une année :

$$1 = C \times t ? \quad 1 \text{ al} = \underbrace{300 \text{ 000}}_{\text{km/s}} \times \underbrace{356}_{\text{j/an}} \times \underbrace{24}_{\text{h/j}} \times \underbrace{60}_{\text{mn/h}} \times \underbrace{60}_{\text{s/m}}$$

1 al =  $9,460 \cdot 10^{12}$  km ou 9 460 milliards de km.

#### **IV-2 Vitesse de la lumière dans la matière**

La vitesse de lumière dans la matière a toujours une valeur  $v$  plus petite que dans le vide. Dans la matière (solide, liquides ou gaz), la lumière se déplace moins vite que dans le vide et cette vitesse dépend de la couleur de la lumière. Dans un milieu biréfringent, la vitesse de la lumière dépend aussi de son plan de polarisation. La différence de vitesse de propagation de la lumière dans des milieux différents est à l'origine du phénomène de réfraction.

. On définit l'indice de réfraction d'un milieu le rapport de la vitesse de la lumière dans le

$$\text{vide sur la vitesse de lumière dans le milieu considéré : } n = \frac{C}{v}$$

L'indice de réfraction  $n$  est un nombre positif, sans unité est toujours supérieur à 1 puisque

$v < C$  L'indice dépend de la fréquence, donnons la valeur de l'indice de quelques milieux pour une fréquence moyenne.

Tableau 1-2 : Quelques exemples de vitesse de la lumière dans la matière

MILIEU	INDICE (n)	VITESSE [V(m/s)]
VIDE	1	3 00 000 000
AIR	1,000293 dans le CNTP. On arrondit souvent à n = 1	3 00 000 000
EAU	1,33	225 563 909,3
VERRE	1,5	200 000 000
DIAMMANT	2,41	124 481 327,8

Plus n est grand, plus le milieu est qualifié de réfringent. Le diamant est le milieu le plus réfringent. Les ondes électromagnétiques ont toutes la même vitesse de propagation C dans le vide.

### IV-3 Limite de la vitesse de la lumière

La limite de la vitesse de la lumière fait en sorte qu'elle ne varie pas même si la source émettrice se rapproche ou s'éloigne ou encore si c'est l'observateur qui se rapproche ou s'éloigne. Il en est de même du son parce que la vitesse du son est toujours constante quelle que soit la vitesse de la source émettrice ou la vitesse de l'observateur. Les deux phénomènes sont identiques.

Continuons le raisonnement plus loin. Que se produit-il lorsqu'un avion dépasse la vitesse du son? Il se produit le bang sonique. Après quoi l'avion peut continuer à augmenter sa vitesse, il peut alors pourquoi, une fusée ne pourrait-elle pas, elle aussi, dépasser la constante de la vitesse de la lumière après avoir franchi le « bang lumineux ».

D'où vient cette idée que rien ne peut aller plus vite que la vitesse de la lumière ? Il n'y a que la lumière qui peut aller plus vite que la lumière comme il n'y a que le son qui peut aller plus vite que le son.

### Conclusion

Pour conclure , on constate que la lumière a une double nature ondulatoire et elle caractérise aussi par sa vitesse de propagation. Mais elle peut diffractée comme tous les ondes.

## **DEUXIEME PARTIE**

# *DIFFRACTION DES ONDES LUMINEUSES*

## CHAPITRE V :

### DEFINITION

On appelle diffraction de la lumière, l'ensemble des phénomènes qui sont dus à la nature ondulatoire de la lumière et sont observés lors de sa propagation dans un milieu avec des hétérogénéités très accusées (par exemple : lors de son passage à travers des orifices faits dans des écrans opaques, au voisinage, des frontières des corps opaques), c'est-à-dire la diffraction est les résultats des interférences des ondes diffusées par chaque point.

#### V-1- L'interférence

Lorsque les ondes lumineuses ne sont pas en phases, leurs intensités au lieu de s'additionner peuvent se soustraire et l'on dit que ces ondes interfèrent. C'est-à-dire une interférence est produite par la superposition en un point de deux ou plusieurs ondes incidentes. A chaque instant, la perturbation totale en ce point est la somme de perturbation des ondes incidentes. Si deux ondes incidentes arrivent en phase en ce point  $\Delta\phi = 0$ , les amplitudes s'ajoutent et l'interférence est dite constructive. Si les deux ondes sont en ce point en opposition de phase ( $\phi = \pi$ ), l'interférence est destructive (fig.5-1). Dans le cas de l'interférence destructive, l'intensité ne sera nulle que si les amplitudes de deux ondes sont égales.

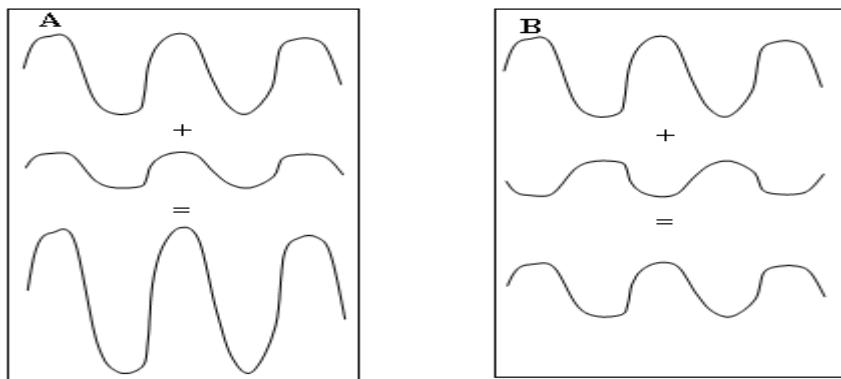


Figure 5-1 : Interférence constructive (A) et destructive (B) de deux ondes sinusoïdales de même fréquence et même direction.

Le cas A se produit lorsque les ondes sont en phase ( $\Delta\phi = 0$ ), et le cas B lorsque les ondes sont en opposition de phase ( $\phi = \pi$ ). Les cas intermédiaires sont évidemment possibles.

#### V-2 Diffusion

On appelle diffusion de la lumière le processus de transformation de la lumière dans la substance, s'accompagnant d'une variation de direction de sa propagation et sa manifestation en luminescence impropre de la substance. La luminescence impropre est due aux oscillations forcées des électrons dans les atomes, les molécules ou les ions du milieu diffusant, produites par la lumière incidente. La diffusion de la lumière a lieu lors de sa propagation dans un

milieu optiquement pur, c'est-à-dire dans le milieu ne contenant pas de particules étrangères quelconques (par exemple : dans les gaz et les liquides, dans les solutions vraies).

La diffraction de la lumière se produit lorsque l'on fait passer un rayon de la lumière dans un petit trou. Si ce trou mesure 3 mm, la lumière qui passera à travers aura un diamètre plus grand que 3 mm sur un écran dans l'obscurité situé de l'autre côté.

### V-3 Surface d'onde

La lumière se propage de proche en proche. L'ensemble des points d'égales perturbations lumineuses est appelé surface d'onde. Chacun des points de cette surface atteints par la lumière se comporte comme une source secondaire qui émet des ondelettes (ondes secondaires) sphériques dans un milieu isotrope. La surface enveloppe de ces ondelettes forme une nouvelle surface d'onde. Dans un milieu isotrope et homogène, la direction de propagation est perpendiculaire à la surface d'onde si la source de l'onde est ponctuelle, les ondes sont sphériques. Si la propagation a lieu dans une seule direction, les ondes sont planes et les fronts d'ondes sont des plans parallèles entre eux et perpendiculaires à la direction de propagation. Des ondes planes forment un faisceau de lumière parallèle, ce qui peut être réalisé pratiquement en plaçant une source lumineuse ponctuelle au foyer d'une lentille convergente.

### V-4 Existence des phénomènes de diffraction

Si on essaie de réduire l'étendue d'un pinceau lumineux, on constate expérimentalement que les lois de l'optique géométrique ne s'appliquent plus. On peut, par exemple, éclairer un écran percé d'un trou O de diamètre variable (diaphragme à iris), au moyen d'une source quasi ponctuelle obtenue en plaçant un autre diaphragme dans l'image d'un charbon d'arc (fig.5-2).

Sur l'écran E placé derrière le diaphragme O, on observe une tache circulaire dont le diamètre diminue d'abord quand on réduit celui de O. Si on continue à réduire le diamètre O, la tache s'élargit et s'entoure d'anneaux moins lumineux : on n'en peut d'ailleurs observer qu'un très petit nombre. Le trou O se comporte comme une source qui enverrait des rayons dans des directions non alignées avec la source de lumière. On dit que la lumière est diffractée par le trou O.

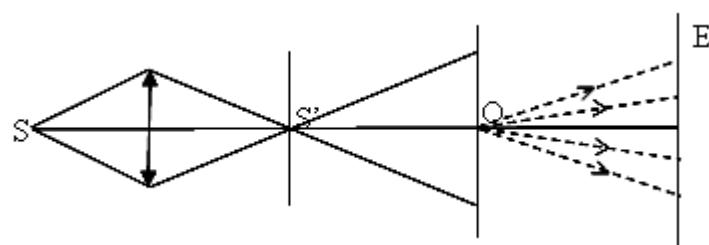


Figure 5-2 : Diffraction par une petite ouverture. En pointillé, la lumière diffractée.

En général, le phénomène de diffraction est observable chaque fois qu'une perturbation locale entraîne une modification de la transparence, ou de l'indice de réfraction d'un milieu.

## CHAPITRE VI :

### PRINCIPE DE HUYGENS-FRESNEL

Le principe de Huygens est à la fois la base ondulatoire de la lumière. Il s'appuie donc sur le concept d'onde.

#### **VI-1- Enoncé**

Son énoncé comporte deux parties.

##### **VI-1-1- La contribution de Huygens**

La lumière se propage de proche en proche. Chaque élément des surfaces atteint par elle se comporte comme une source secondaire qui émet des ondelettes sphériques dont l'amplitude est proportionnelle à cet élément.

##### **VI-1-2-La contribution de Fresnel**

L'amplitude complexe de la vibration lumineuse en un point est la somme des amplitudes complexes des vibrations produites par toutes les sources secondaires. On dit que toutes ces vibrations interfèrent pour former la vibration au point considéré.

#### **VI-2-Exemple de principe de Huygens-Fresnel**

Considérons une onde plane monochromatique arrivant perpendiculairement sur un écran percé d'une étroite fente. Chaque point de la fente est source d'une ondelette (onde secondaire). Si la largeur de la fente est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde, l'onde s'évase visiblement hors de l'ombre géométrique de l'écran : l'onde est diffractée.

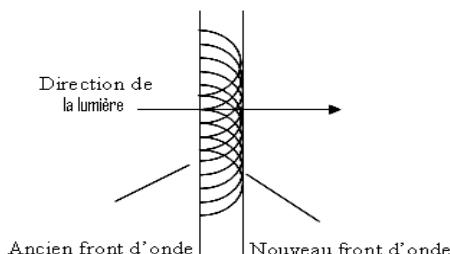


Figure 6-2 : Illustration du principe de Huygens dans le cas d'une onde plane. Le nouveau front d'onde est l'enveloppe de toutes les ondelettes. La direction de propagation est perpendiculaire au front d'onde.

#### **VI-3- Expression mathématique**

On considère une ouverture  $S$  contenue dans le plan  $z = 0$ . Soit  $E(M) = E(x,y)$  l'amplitude de l'onde incidente en un point  $M$  quelconque de l'ouverture, de coordonnées  $(x,y)$ . L'amplitude de l'onde émise par la source secondaire de surface  $ds$  autour de  $M$  et de la forme  $Q E(N) ds$  où  $Q$  est une constante qu'il n'est pas utile de chercher à déterminer ici. Lorsqu'elle arrive au point d'observateur  $P$ , de coordonnées  $(X,Y)$  dans le plan  $z = r'$ , cette onde a pour amplitude , en notation

$$dE(P) = \frac{1}{MP} Q E(M) ds e^{ikMP} \quad (6.1)$$

$$dE(P) = \frac{1}{r} Q E(M) ds e^{i\frac{2\pi}{\lambda} r}$$

Avec  $r$  est la distance de MP, et  $ds$  désigne l'élément de surface entourant le point M et  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ .

L'amplitude totale en P s'obtient en sommant les contributions de tous les points de

$$E(P) = Q \iint_S \frac{E(M)}{r} e^{i\frac{2\pi}{\lambda} r} ds$$

#### VI-4-Facteur de transmission

Les objets diffractant ne sont pas forcement des ouvertures laissant passer 100% de l'onde au niveau de l'ouverture et rien à coté. Il peut s'agir d'objets atténuant l'onde de façon différente suivant le point considéré et/ou d'objets introduisant un déphasage dépendant là aussi du point considéré. Pour prendre en compte ces différentes possibilités, on introduit le facteur de transmission, ou transmission  $t(M) = t(x,y)$ , d'un objet qui est le rapport entre l'amplitude de l'onde juste après l'objet avec celle de l'onde juste avant l'objet.

En notant  $E_0^-(x,y)$  l'amplitude de l'onde juste avant l'objet diffractant, et  $E_0^+(x,y)$  l'amplitude de l'onde juste après l'objet,

$$t(x,y) = \frac{E_0^+(x,y)}{E_0^-(x,y)}$$

Remarque : Cette transmittance est souvent de type binaire, c'est-à-dire que :  $t(x,y) = 1$  pour tout point M à l'intérieur de D et  $t(x,y) = 0$  autrement.

L'amplitude de l'onde diffractée s'écrit alors :

$$E(P) = Q \iint_S \frac{E(M)}{r} t(M) e^{i\frac{2\pi}{\lambda} r} ds \quad (6.2)$$

La transmission étant définie pour tout point P appartenant au plan de l'objet diffractant, les intégrales sont calculées de  $-\infty$  à  $+\infty$ .

#### Exemple

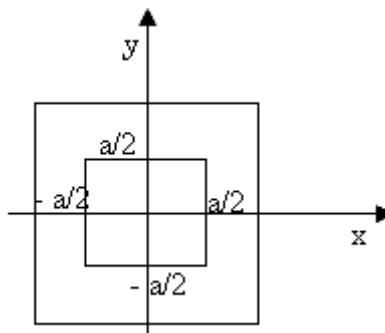


Figure 6.3 : Ouverture carrée

L'ouverture carrée de côté a laissé passer 90% de l'onde.

$$t(x,y) = 0,9 \text{ si } |x| < \frac{a}{2} \text{ et } |y| < \frac{a}{2}$$

$$t(x,y) = 0 \text{ Sinon}$$

## CHAPITRE VII :

### DIFFRACTION DE FRESNEL

#### VII-1-Définition

On appelle diffraction de Fresnel, les effets de diffraction dans lesquels il est impossible de négliger la courbure des surfaces d'ondes des ondes incidentes et diffractées (ou de l'onde diffractée seulement). La diffraction est réalisée dans le cas où la source lumineuse et l'écran (ou seulement l'écran) servant à l'observation de l'image de diffraction se trouvent à distances finies de l'obstacle responsable de la diffraction. Au cours de la diffraction de Fresnel, on obtient sur l'écran l'image de diffraction de l'obstacle.

#### VII-2- Expression de l'amplitude $E(P)$ de l'onde diffractée

Dans les conditions usuelles d'observation, les tailles de l'ouverture et du phénomène de diffraction observée sont petites devant la distance  $r'$  d'observation. On a :

$$r = \|MP\| = \sqrt{r'^2 + (X-x)^2 + (Y-y)^2} \quad (7.1)$$

On peut donc utiliser un développement limité pour écrire :

$$MP = r' \left[ 1 + \frac{1}{2 \left( \frac{(X-x)^2}{r'} \right)} + \frac{1}{2 \left( \frac{(Y-y)^2}{r'} \right)} \right] \quad (7.2)$$

En remplaçant  $MP = r$  par cette expression dans l'exponentiel complexe et  $1/r$  par  $1/r'$  (cette approximation est ici suffisante car  $1/r$  n'est pas une fonction périodique), on obtient alors :

$$E(P) = Q' \iint_S E(M) \exp \left[ \frac{i\pi}{\lambda r'} ((X-x)^2 + (Y-y)^2) dx dy \right] \text{ où } Q' = \frac{Q}{r'} e^{\frac{i2\pi}{\lambda} r'}$$

Cette intégrale est appelée transformation de Fresnel et permet de déterminer la figure de diffraction observée à distance finie de l'ouverture diffractante. Ce genre de diffraction peut par exemple sur les bords de l'ombre géométrique d'un écran, comme illustré ci-dessous.

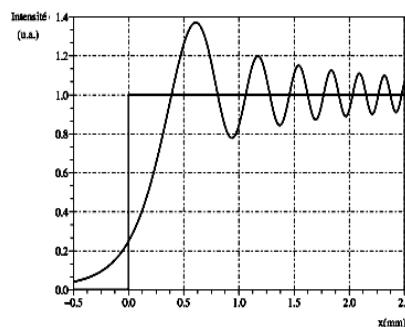


Figure 7-1: Courbe donnant l'intensité de la lumière diffractée par un bord d'écran observée à une distance  $r = 1$  mètre.

La longueur d'onde est  $\lambda = 0,5$  micromètres. On observe que la largeur de la première oscillation est de l'ordre de  $\sqrt{\lambda r}$ , les autres oscillations sont plus rapides et moins marquées. L'intensité que l'on aurait en l'absence de diffraction est représentée en rouge.

## CHAPITRE VIII :

### DIFFRACTION DE FRAUNHOFER

#### VIII-1- Définition

On appelle diffraction de Fraunhofer, la diffraction des ondes planes, autrement dit, les effets de diffraction dans lesquels la source lumineuse et le point d'observation sont infiniment éloignés de l'obstacle responsable de la diffraction. C'est-à-dire la diffraction de Fraunhofer est la diffraction à l'infini ou diffraction à grandes distances parce que le plan d'observation est situé loin de l'objet diffractant. Celui-ci est éclairé par une onde plane (source ponctuelle à l'infini) et défini par son facteur de transmission  $t(x,y)$ .

#### VIII-2-Diffraction de Fraunhofer par le diaphragme plan

Considérons une onde monochromatique tombant sur un diaphragme plan D. L'amplitude complexe de l'onde dans le plan du diaphragme est  $E_0(M)$ . En P, son amplitude complexe est la somme des amplitudes complexes des ondes sphériques, émises par les points tels que M situés à l'intérieur du domaine de D et pondérés par la fonction  $E_0(M)$  nul à l'intérieur de D. Par conséquent

$$E(P) = Q \int_D E_0(M) \frac{Q \exp(ikr)}{r} d\sigma \quad \text{où } r = \|MP\| \quad \text{et } k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

(8.1)

Désignons par Oxy le plan pupillaire, Oz la normale à ce plan et (X, Y, z) les coordonnées du point P. Il vient :

$$r = [(X-x)^2 + (Y-y)^2 + z^2]^{\frac{1}{2}} = [X^2 + Y^2 + x^2 + y^2 + z^2 - 2xX - 2yY]^{\frac{1}{2}} \quad (8.2)$$

En introduisant la norme du vecteur

$$R = (X^2 + Y^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} \text{ du vecteur } \overrightarrow{OP} \quad (8.3)$$

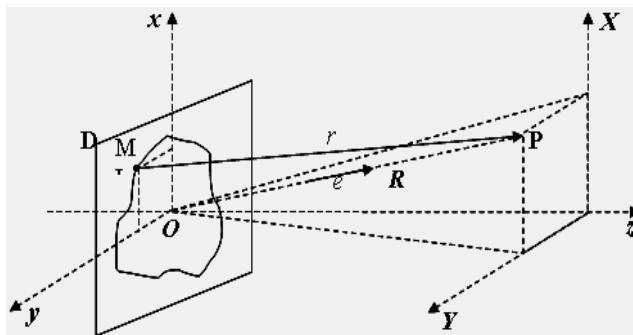


Figure 8-1 : Diffraction de Fraunhofer par un diahragme plan

#### VIII-2-1- Approximation de Fraunhofer

L'approximation de Fraunhofer a supposé R suffisamment grand devant les autres dimensions de telle sorte que le coefficient Q soit une constante et que le développement binomial précédent de r ne contienne que des termes linéaires en x ou y.

$$r = R \left( 1 - \frac{xX + yY}{R^2} \right) = R - \frac{xX + yY}{R} \quad (8.4)$$

Soit  $\mathbf{r} = \mathbf{R} - (\alpha \mathbf{x} + \beta \mathbf{y})$

où  $\alpha$  et  $\beta$  sont les composantes suivant les axes Ox et Oy du vecteur unitaire :

$$\vec{e} = \frac{\overrightarrow{OP}}{OP} \text{ défini par } \overrightarrow{OP} \quad (8.5)$$

$$\alpha = \frac{X}{R} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{Y}{R}$$

Comme  $\overrightarrow{OM}$  a pour composantes (x,y), le développement de  $\mathbf{r}$  s'écrit aussi :

$$\mathbf{r} \approx \mathbf{R} - \mathbf{e} \cdot \overrightarrow{OM} \quad (8.6)$$

### VIII-2-1-1- Formule fondamentale

Substituant, dans l'expression du principe d'Huygens-Fresnel, l'expression approchée précédente de  $\mathbf{r}$ , il vient :

$$E(\mathbf{P}) = Q \int_D E_0(M) \frac{\exp(ikR)}{R} \exp(-i\vec{e} \cdot \overrightarrow{OM}) ds \quad (8.7)$$

soit :

$$E(\mathbf{P}) = Q \frac{\exp(ikR)}{R} \int_D E_0(M) \exp(-i\vec{e} \cdot \overrightarrow{OM}) ds \quad (8.8)$$

$$\text{où } \vec{k} = k \vec{e} = \frac{2\pi \overrightarrow{OP}}{\lambda OP}$$

C'est la formule fondamentale de la diffraction dans l'approximation de Fraunhofer. Le coefficient multiplicatif  $Q \exp(ikR)$  peut être omis lorsqu'on s'intéresse, comme c'est généralement le cas, à des répartitions relatives d'amplitudes ou d'intensités. On montre que le coefficient  $Q$  vaut  $1/i\lambda$ .

#### Remarque

L'approximation donnant  $\mathbf{r}$  n'est pas la même au dénominateur et dans l'exponentiel car le terme de phase linéaire  $\exp(-i\vec{e} \cdot \overrightarrow{OM})$  joue un rôle décisif dans la superposition des amplitudes complexes.

### VIII-2-1-2- Interprétation des termes de phases linéaires

Dans l'approximation de Fraunhofer, les ondes qui se superposent dans le plan d'observation sont véhiculées par des rayons parallèles ; par exemple, les rayons à considérer, issus des point O et M de pupille diffractante, doivent être parallèles fig.(8-2).

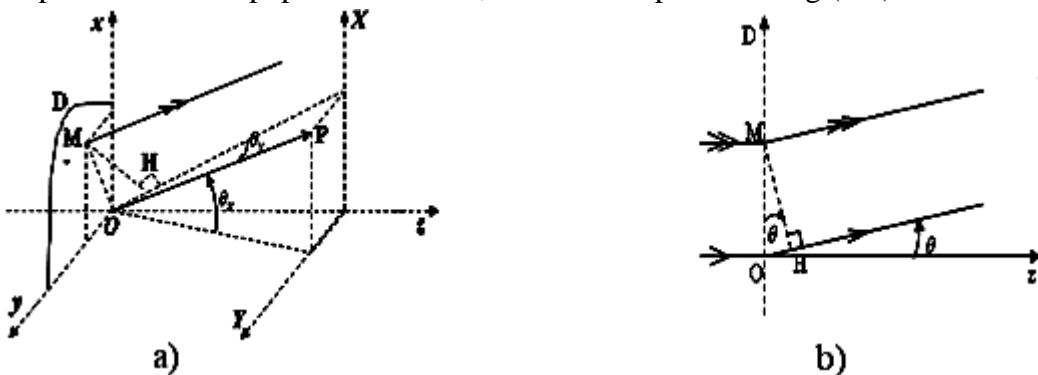


Figure 8-2 : Ondes parallèles qui se superposent dans les plans d'observation

Le terme de phase linéaire  $\exp(-i\vec{k} \cdot \overrightarrow{OM})$ , caractéristique de diffraction de Fraunhofer, s'écrit aussi :

$$\exp(-i\vec{k} \cdot \overrightarrow{OM}) = \exp(-i k \overrightarrow{OH}) = \exp(-i k_r \overrightarrow{OH}) \quad (8.9)$$

$H$  étant la projection orthogonale de  $M$  suivant la direction de vecteur  $\overrightarrow{OP}$  (fig.A2),  $k_o$  le nombre d'onde dans le vide et  $n$  l'indice du milieu.

Dans cette dernière expression, la quantité  $-n\overrightarrow{OH}$  représente la différence de chemin optique entre les rayons parallèles issus de  $M$  et de  $O$ . En effet, les chemins optiques le long de ces deux rayons à partir des points  $M$  et  $H$  étant identiques, la différence de chemin optique vaut :  $-n\overrightarrow{OH}$

### VIII-2-1-3- Expression en fonction des coordonnées

Explicitons l'expression suivante de l'amplitude complexe en fonction des coordonnées  $(x,y)$  de  $M$  et de composantes  $(\alpha, \beta, \gamma)$  de  $e$ . Il vient, en remplaçant  $Q$  par sa valeur  $1/i\lambda$  :

$$E(P) = Q \frac{\exp(ikR)}{i\lambda R} \iint_D E_0(x,y) \exp[-ik(\alpha x + \beta y)] dx dy \quad (8.10)$$

### VIII-2-2-Fréquences spatiales

#### VIII-2-2-1- Définition

On introduit généralement les nouvelles variables suivantes :

$$u = \frac{\alpha}{\lambda} \quad \text{et} \quad v = \frac{\beta}{\lambda}$$

appelées fréquences spatiales en raison de leur dimension physique qui est l'inverse d'une longueur. L'amplitude complexe s'écrit alors :

$$E(u, v) = Q \frac{\exp(ikR)}{i\lambda R} \iint_D E_0(x,y) \exp[-i2\pi(ux + vy)] dx dy \quad (8.11)$$

#### VIII-2-2-2- Relation entre les fréquences spatiales $(u,v)$ et les angles d'inclinaison $\theta_x, \theta_y$

Sur la figure 8.2a, on a explicité les angles  $\theta_x, \theta_y$  qui permettent de définir la direction considérée. Les composantes  $(\alpha, \beta)$  suivant  $O_x$  et  $O_y$  du vecteur unitaire  $\vec{e}$  s'expriment en fonction des composantes  $X, Y$  du vecteur  $\vec{R}$  et des angles  $\theta_x, \theta_y$  :

$$\alpha = \frac{X}{R} = \sin \theta_x \quad \text{et} \quad \beta = \frac{Y}{R} = \sin \theta_y \quad (8.12)$$

Par conséquent, la relation entre les fréquences spatiales  $u$  et  $v$  et les angles  $\theta_x$  et  $\theta_y$  est la suivante :

$$u = \frac{\sin\theta_x}{\lambda} \quad \text{et} \quad v = \frac{\sin\theta_y}{\lambda} \quad (8.13)$$

En fonction de  $(\theta_x, \theta_y)$ , l'amplitude complexe  $E(P)$  s'écrit aussi :

$$E(P) = \frac{\exp(ikR)}{i \lambda R} \iint_D E_0(x, y) \exp\left[-i2\pi \frac{x\sin\theta_x + y\sin\theta_y}{\lambda}\right] dx dy \quad (8.14)$$

La figure 8.2b représente le cas unidimensionnel fréquent où les rayons diffractés font l'angle  $\theta$  avec la direction normale au plan du diaphragme.

### VIII-2-2-3-Cas des petits angles

C'est un cas fréquent en raison de l'intérêt de l'approximation de Gauss en optique géométrique. On a alors  $R \approx z$ , distance entre le plan pupillaire et le plan d'observation :

$$n \sin\theta_x \approx \theta_x \quad \text{et} \quad n \sin\theta_y \approx \theta_y.$$

L'expression de  $E(u, v)$  devient :

$$E(u, v) \cong Q \frac{\exp(ikz)}{i \lambda z} \iint_D E_0(x, y) \exp[-i2\pi(ux + vy)] dx dy \quad (8.15)$$

### VIII-2-3- Répartition de l'éclairement dans le plan d'observation

La répartition de l'éclairement ou de l'intensité de l'onde lumineuse dans la direction définie par  $u$  et  $v$  se déduit aisément de l'amplitude complexe :

$$I(u, v) = |E(u, v)|^2 = \frac{1}{\lambda^2 R^2} \left| \iint_D E_0(x, y) \exp[-i2\pi(ux + vy)] dx dy \right|^2 \quad (8.16)$$

Dans la suite, on omettra parfois le coefficient multiplicatif  $\frac{1}{\lambda R^2}$  qui est sans importance lorsqu'on ne s'intéresse qu'à la répartition relative de l'intensité.

### VIII-2-4- Importance physique de l'approximation de Fraunhofer

*(Image ponctuelle au voisinage de l'axe optique)*

On considère que la formation de l'image d'un point  $B_0$  est située en dehors de l'axe, l'onde incidente qui tombe sur l'écran diffractant est encore plane mais à la sortie, son amplitude complexe ne s'identifie plus à la transmittance. On a, en effet :

$$E_0(x, y) = t(x, y) \exp(i\phi_0)$$

où la phase  $\phi_0$ , caractéristique de l'onde plane incidente, a pour expression :

$$\phi_0 = \vec{k}_0 \cdot \vec{r} = k(\alpha_0 x + \beta_0 y) \quad (8.17)$$

$\alpha_0$  et  $\beta_0$  désignent les composantes du vecteur unitaire  $\left(\frac{\vec{k}_0}{k}\right)$

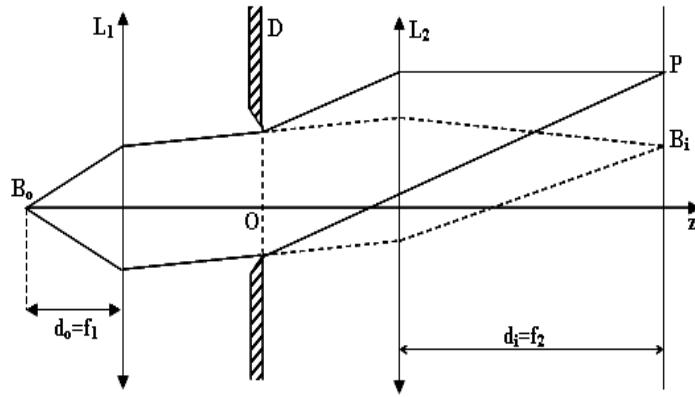


Figure 8-3: Image ponctuelle au voisinage de l'axe optique

Il en résulte que l'amplitude de l'onde diffractée est donnée dans ce cas par l'expression :

$$E(u, v) = \frac{\exp(i \lambda d_i)}{i \lambda d_i} \iint_D t(x, y) \exp\left[-i2\pi\left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\lambda}x + \frac{\beta - \beta_0}{\lambda}y\right)\right] dx dy \quad (8.18)$$

On obtient, pour l'amplitude complexe  $E(u, v)$ , la même expression que précédemment, en posant :

$$u = \frac{\alpha - \alpha_0}{\lambda} \text{ et } v = \frac{\beta - \beta_0}{\lambda} \quad (8.19)$$

On en déduit alors l'intensité :

$$I(u, v) = \frac{1}{\lambda^2 d_i^2} \left| \iint_D t(x, y) \exp[-i2\pi(ux + vy)] dx dy \right|^2 \quad (8.19)$$

### VIII-3- Diffraction par une ouverture rectangulaire

#### VIII-3-1- Condition d'observation

On obtient expérimentalement la figure de diffraction de Fraunhofer, donnée par une ouverture rectangulaire, en interprétant une ouverture entre les lentilles  $L_1$  et  $L_2$  du montage de la (fig.8-4), ou plus simplement en plaçant contre une lentille qui forme l'image d'un point. On peut même l'obtenir sans lentille ; en observant, à l'œil nu, une source lumineuse éloignée (Soleil, lampadaire ...) et en interposant, sur le trajet de la lumière provenant de la source, une petite ouverture rectangulaire (fente formée avec deux doigts, fente formée par tissu de rideaux, etc.).

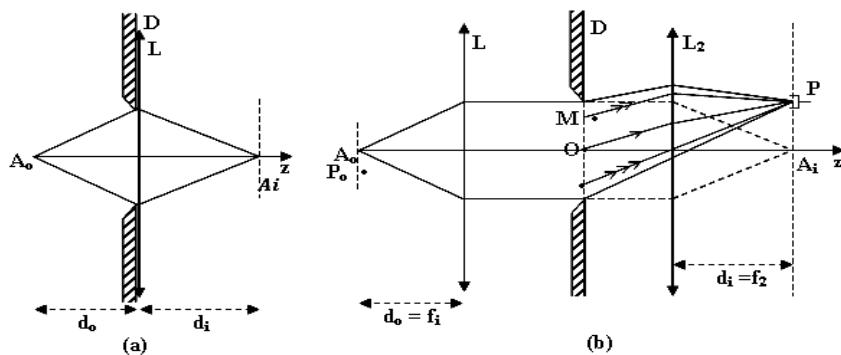


Figure 8-4: Ondes planes tombant sur un ouverture rectangulaire

La figure 8-5 montre l'aspect de l'image que donne une lentille d'un point sur l'axe, lorsque cette lentille est diaphragmée par une ouverture rectangulaire suffisamment petite.

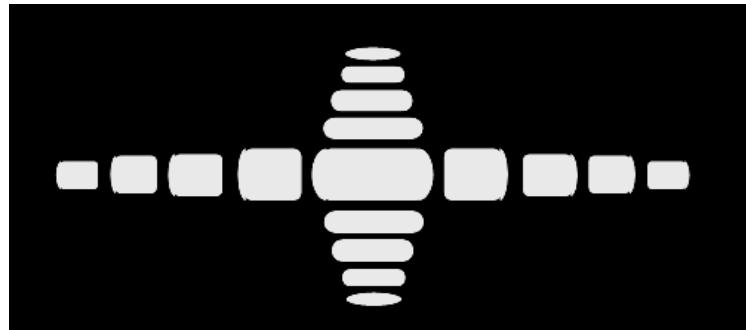


Figure 8-5: Image de l'onde diffracté sur un ouverture rectangulaire

### VIII-3-2- Amplitude de l'onde dans le plan d'observation

Comme la transmittance  $t(x,y)$  d'une ouverture rectangulaire, de dimension  $a$  et  $b$ , est

$$t(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{pour } |x| < \frac{a}{2} \text{ et } |y| < \frac{b}{2} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

définie par :

il vient

$$\begin{aligned} E(u,v) &= \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \exp[-2\pi i (ux + vy)] dx dy \\ &= \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \exp(-2\pi i ux) dx \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \exp(-2\pi i vy) dy \\ &= \left[ -\frac{1}{2\pi i u} \exp(-2\pi i ux) \right]_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} = \left[ -\frac{1}{2\pi i v} \exp(-2\pi i vx) \right]_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \\ &= \left[ -\frac{1}{2\pi i u} (\exp(-2\pi i ua) - \exp(2\pi i ua)) \right] \left[ -\frac{1}{2\pi i v} (\exp(-2\pi i vb) - \exp(2\pi i vb)) \right] \\ &= \left[ \frac{1}{\pi u} \sin(\pi ua) \right] \left[ \frac{1}{\pi v} \sin(\pi vb) \right] \\ E(u,v) &= ab \left[ \frac{\sin(\pi ua)}{\pi ua} \right] \left[ \frac{\sin(\pi vb)}{\pi vb} \right] \end{aligned}$$

Avec

$$u = \frac{\sin \theta_x}{\lambda} \quad \text{et} \quad v = \frac{\sin \theta_y}{\lambda}$$

### IV-3-3-Intensité de l'onde dans le plan d'observation

L'intensité de l'onde se déduit aisément de ce qui précède :

$$I(u,v) = |E(u,v)|^2 = I(0,0) \left[ \frac{\sin(\pi ua)}{\pi ua} \right]^2 \left[ \frac{\sin(\pi vb)}{\pi vb} \right]^2 \quad (8.20)$$

Puisque  $I(0,0) = a^2 b^2$ , la valeur de cette fonction est maximale lorsque  $u$  et  $v$  sont simultanément nuls ; les maxima secondaires sont définis par :

$$u = \frac{m_1 + \frac{1}{2}}{a} \quad \text{et} \quad v = \frac{m_2 + \frac{1}{2}}{b} \quad (8.21)$$

$m_1, m_2$  étant deux entiers positifs, négatifs ou nuls. Entre les maxima, elle s'annule pour :

$$u = \frac{m_1}{a} \quad \text{et} \quad v = \frac{m_2}{b} \quad (8.22)$$

Quant à la largeur totale à mi-hauteur du maximum principal, elle varie en sens inverse des dimensions du diaphragme.

$$\Delta u_{\frac{1}{2}} = \frac{0,89}{a} = \frac{1}{a} \text{ suivant } u \quad (8.23)$$

$$\Delta v_{\frac{1}{2}} = \frac{0,89}{b} = \frac{1}{b} \text{ suivant } v \quad (8.24)$$

### VIII-4-- Diffraction par une fente

Une fente est un cas limite d'une ouverture rectangulaire de côtés  $a$  et  $b$  où  $b$  est beaucoup plus grand que  $a$ .

#### VIII-4-1-Expérience

Reprendons le cas d'une onde plane monochromatique frappant perpendiculairement une fente percée dans une plaque figure 1.1 et étudions la figure de diffraction apparaissent sur l'écran, figures provoquées par les bords verticaux de la fente qui sont très rapprochés. Dans ce qui suit, la largeur  $a$  de la fente sera considérée comme étant beaucoup plus grande que la longueur d'onde  $\lambda$  de l'onde incidente.

La fente est divisée dans le sens de sa largeur  $a$  en  $N$  bandes parallèles de largeur  $\Delta x$ . Si  $N$  est assez grand, les bandes sont suffisamment étroites pour que l'on considère, selon le principe de Huygens, que chacune d'elles est source d'une ondelette d'amplitude  $\Delta E_0$ . Les ondelettes émises vont interférer entre elles et former l'image de diffraction.

Prenons sur l'écran un point  $P$  situé à une distance  $x$  du centre  $O$  de l'écran et à un angle  $\theta$  par rapport à la direction initiale de propagation. Les ondelettes émises par certaines de deux bandes adjacentes séparées par  $\Delta x$  parcourent jusqu'à  $P$  des chemins légèrement différents. En phase dans la fente, les ondes sont donc légèrement déphasées en  $P$ . Ce déphasage  $\Delta\phi$ , dépendant de  $\theta$ , est donné par la différence des chemins parcourus  $\Delta x \sin \theta$  rapportée de la longueur d'onde  $\lambda$  :

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{\Delta x \sin \theta}{\lambda} = 2\pi \frac{a \sin \theta}{N\lambda} \quad (8.25)$$

#### VIII-4-2-Expression de l'amplitude

L'amplitude de l'onde diffractée est égale à :

$$E(u, v) = \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} [\exp[-2\pi i t] (ux + vy)] dx dy \quad (8.26)$$

Faisons le calcul comme à la diffraction rectangulaire. On obtient :

$$E(u,v) = ab \left[ \frac{\sin(\pi ua)}{\pi ua} \right] \left[ \frac{\sin(\pi vb)}{\pi vb} \right] \quad (8.27)$$

mais au cas de la fente, il faut supposer que, a restant fini, b devient très grand. Le second sinus restant fini, tandis que b figure au dénominateur, E est en général nul et n'est différent de zéro que si  $\beta$  est assez petit ( $v = \beta/\lambda$ ). Pratiquement, la diffraction n'a lieu que dans les directions telles que  $\beta = 0$ . Or, tandis que  $\beta$  peut prendre effectivement cette valeur, b reste

$$\frac{\sin(\pi vb)}{\pi vb}$$

quand même fini et  $\beta b$  ou  $(vb)$  est infiniment petit. Le rapport  $\frac{\sin(\pi vb)}{\pi vb}$  vaut sensiblement 1 c'est-à-dire :

$$\frac{\sin\left(\frac{\pi\beta b}{\lambda}\right)}{\frac{\pi\beta b}{\lambda}} \approx 1$$

$$E(u) = a \frac{\sin(\pi ua)}{\pi ua}$$

La valeur de E est ainsi :

La diffraction a lieu seulement dans le plan  $xoz$  ( $\beta = 0$ ).

### VIII-4-3-Expression de l'intensité

$$\text{Puisque } I(u) = |E(u)|^2$$

$$I(u) = I_0 \frac{\sin^2(\pi ua)}{(\pi ua)^2} \quad \text{avec } I_0 = a^2$$

### VIII-4-4-Condition minimum

Les minima d'amplitude et d'intensité apparaissent si le déphasage total est égal à un

multiple à  $2\pi$  c'est-à-dire  $I(u) = E(u) = 0$  et  $\frac{2\pi Nau}{N\lambda} = 2\pi n$  or  $u = \frac{\sin\theta}{\lambda}$  donc

$$\frac{2\pi Nasin\theta}{N\lambda} = 2\pi n$$

$$\sin\theta = \frac{N\lambda}{a} \quad \text{avec } n = \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$$

Le premier minimum de l'intensité donne la dimension de la tache de diffraction centrale, une

$$\text{bande de la demi-largeur angulaire vaut : } \sin\theta = \frac{\lambda}{a}$$

Cette tache est d'autant plus large que la fente est étroite et que la longueur d'onde est grande.

L'angle  $\theta$  reste toujours petit, en tout cas pour le premier minimum, de sorte que

$$\theta[\text{radian}] = \frac{\lambda}{a}$$

### VIII-4-5- Condition de maxima

- Pour le point O, l'angle  $\theta$  est égal et le déphasage  $\Delta\phi$  est toujours nul, les ondelettes sont toutes en phase, l'amplitude totale est maximale, ainsi que l'intensité lumineuse.

C'est-à-dire  $\theta = 0 \Rightarrow E = E_0$  et  $I = I_0$

- Les autres maxima (maxima secondaire) apparaissent pour des valeurs du déphasage total légèrement inférieures à  $\pm 2\pi \left(m + \frac{1}{2}\right)$  avec  $m = 1, 2, 3, \dots$ . En négligeant cette différence, on a donc :  $\Sigma \Delta\phi = \pm 2\pi(m + 1/2)$

$$\frac{2\pi N \sin \theta}{N\lambda} = \pm 2\pi \left(m + \frac{1}{2}\right)$$

Finalement, les positions des maxima sont données par :

$$\sin \theta = \pm \frac{(2m+1)\lambda}{2a}$$

#### VIII-4-6-Représentation de la répartition de l'amplitude E(u) et l'intensité I(u)

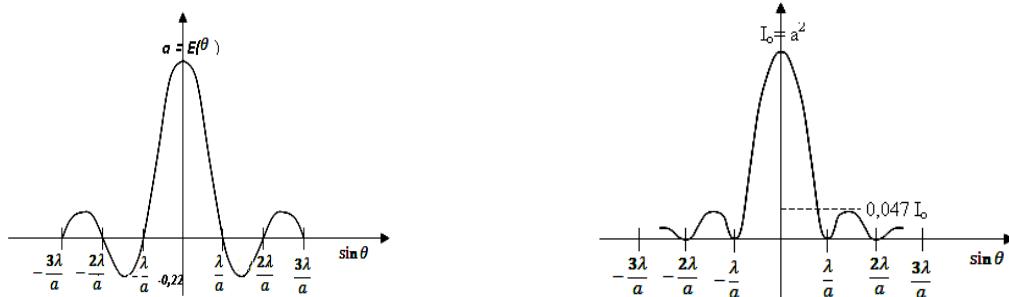


Figure 8-6: Représentation de l'amplitude et l'intensité de l'onde diffracté

Quand  $a = \lambda$ , le premier maximum s'éloigne à l'infini.

Quand  $a \gg \lambda$ , on obtient sur l'écran l'image nette de la source lumineuse.

#### VIII-5-Diffraction par une ouverture circulaire

La diffraction d'une onde plane par une ouverture circulaire est plus difficile à traiter théoriquement que celle due à une fente. La démarche est cependant identique ; la surface circulaire du trou est divisée en éléments infinitésimaux qui émettent chacun une ondelette. La superposition des ondelettes en un point P conduit à une intégration sur toute la surface du trou et fait intervenir une fonction de Bessel.

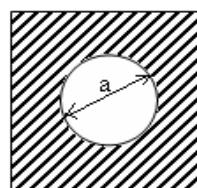


Figure 8-7: Ouverture circulaire

### VIII- 5-1- Amplitude de l'onde dans le plan d'observation

Comme la transmittance  $t(R, \theta)$  [il est ici plus commode d'utiliser les coordonnées polaires  $(R, \theta)$  plutôt que les coordonnées cartésiennes  $(x, y)$ ] d'une ouverture circulaire de

définie par      
$$t(R, \theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } |R| < \frac{D}{2} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$
  
diamètre  $D$  est

il vient :  $E(\rho) = 2E_o \left( \frac{J_1(\eta)}{\eta} \right)$  où     $\eta = \frac{\pi \rho D}{\lambda r}$ , et     $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$

### VIII- 5-2- Intensité de l'onde dans le plan d'observation

Puisque  $I(P) = |E(P)|^2$  donc

$$I(P) = 4I_o \left( \frac{J_1(\eta)}{\eta} \right)^2$$

$I_o$  correspond à l'intensité maximale sur l'écran (au centre et  $J_1(\eta)$  désigne la fonction de Bessel d'ordre 1).

Par symétrie, la tache de diffraction est circulaire et le premier minimum est un cercle obscur.

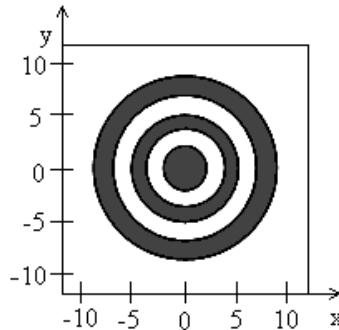


Figure 8-8 : Image de l'onde diffracté par l'ouverture circulaire

La figure 8-8 est une simulation de la figure de diffraction de Fraunhofer obtenue avec une ouverture circulaire de diamètre  $d = 0,2\text{mm}$ . On a pris  $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$  et on s'est placé au foyer image d'une lentille de distance focale  $f = 1\text{m}$ . L'intensité des maxima secondaires a été artificiellement rehaussée afin de les rendre visibles.

Le rayon de la tache centrale est  $\Delta p = \frac{1,22\lambda f}{d} = 3\text{mm}$

En notant le rayon de l'ouverture  $r = \frac{d}{2}$ ; on obtient  $\Delta p = \frac{0,61\lambda f}{r} = 3\text{mm}$ .

La diffraction produite par une ouverture circulaire joue un rôle essentiel dans le pouvoir de résolution ou pouvoir séparateur d'un instrument d'optique. En effet, dans ces instruments, la lumière traverse des lentilles circulaires et/ou est éventuellement réfléchie par des miroirs circulaires, et l'image d'un objet proche est limitée par l'étendue des taches de diffraction. Cette limite est particulièrement sensible pour des petits objets (dans les microscopes) et pour des objets très éloignés (dans les télescopes et les lunettes astronomiques).

La figure 8-9 montre la répartition de l'intensité donnée par l'ouverture circulaire.

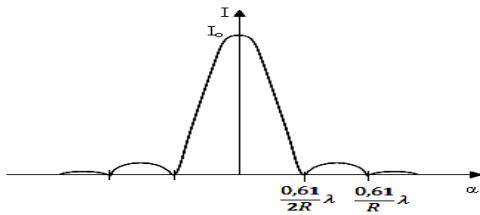


Figure 8-9: Répartition de l'intensité donnée par l'ouverture circulaire.

Le rayon angulaire dans le milieu objet a pour valeur (R étant le rayon de l'ouverture) :

$$\alpha = \frac{0,61\lambda}{R}$$

Cette tache est entourée d'anneaux alternativement clairs et obscurs. Ils ne sont pas rigoureusement équidistants, mais le deviennent pratiquement à partir du second, la distance

de deux anneaux tendent asymptotiquement vers  $\frac{\lambda}{2R}$ . Si  $I_o$  est l'intensité lumineuse au centre, l'intensité dans la direction incliné de  $\frac{\alpha}{2}$  est  $0,37 I_o$ ; dans la direction du premier anneau brillant (angle de diffraction 1,340α), le maximum n'est plus que  $0,0175 I_o$ .

## CHAPITRE IX :

### APPLICATION DES PHENOMENES DE DIFFRACTION : (Réseaux)

#### IX-1- Définition et résolution des réseaux

##### IX-1-1-Définition

On appelle réseaux une petite lame en matière plastique transparente portant une série de rayures parallèles fines et très serrées qu'on ne peut pas distinguer à l'œil nu. (Environ 500 traits par ~~mm~~ 12). La caractéristique fondamentale d'un réseau est sa période  $a$  que l'on donne le plus souvent sous la forme du nombre de traits ou lignes par millimètre.

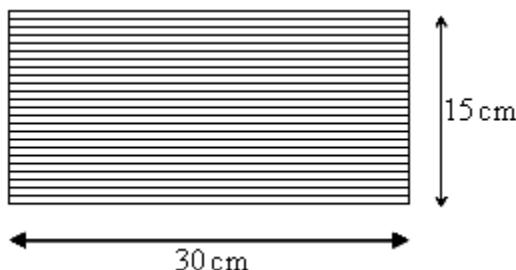


Figure 9-1: Représentation de réseau

##### IX-1-2- Réalisations

En traçant des traits équidistants sur une lame de verre, à l'aide d'une pointe en diamant. Chaque trait diffuse la lumière en dehors de la direction incidente et se comporte ainsi comme une bande opaque. En revanche, les parties situées entre les traits, qui laissent passer la lumière, jouent le rôle de fentes. La qualité de réseaux est directement liée au soin avec lequel les lignes sont tracées de façon périodique. Les défauts de périodicité donnent des figures de diffraction parasites appelées fantômes.

Actuellement, on réalise d'excellents réseaux à partir de l'interférence d'ondes planes : ce sont les réseaux holographiques dans le cas de deux ondes, les réseaux sont sinusoïdaux avec une période  $a$  égale à l'interfrange. La transmittance est proportionnelle à l'intensité de phénomène d'interférence :

$$t(x) = 1 + \cos\left(2\pi \frac{x}{a}\right) \quad \text{avec} \quad a = \frac{\lambda}{2\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (9.1)$$

La plupart des réseaux utilisés en spectrométrie travaillent non pas par transmission, mais par réflexion, ce qui permet d'éviter les défauts qu'occasionne la traversée du support. On dépose sur les bandes d'un réseau holographique original une couche d'aluminium qui réfléchit la lumière incidente ; les zones en dehors de ces bandes ne réfléchissent pas la lumière et se comportent donc comme de parties opaques.

#### IX-2-Diffraction de Fraunhofer par un réseau de fentes

Le réseau est éclairé par une onde lumineuse plane qui est diffractée par les diverses fentes. Nous supposerons leur largeur de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, de telle sorte que l'amplitude de la vibration diffractée varie lentement avec la direction. Les interférences entre les ondes diffractées permettent l'analyse spectrale de l'onde incidente.

Nous limiterons notre étude à l'onde incidente dont la direction de propagation est perpendiculaire aux traits du réseau, et aux phénomènes de diffraction à l'infini. La diffraction se produit alors uniquement dans les plans normaux aux traits (plans de section principale). En fait, on remplace presque toujours la source ponctuelle par une fente parallèle aux traits du réseau qui donne une figure de diffraction formée franges parallèles.

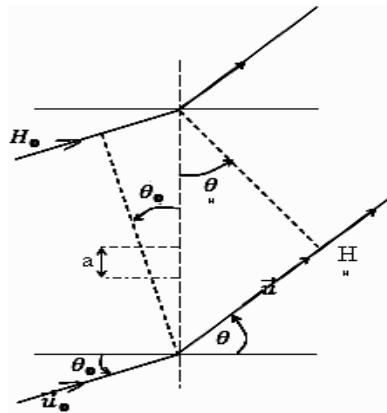


Figure 9-2: Diffraction par un réseau plan

Soient  $\vec{u}_0$  et  $\vec{u}$  les vecteurs unitaires des directions du faisceau incident et du faisceau diffracté étudiés.  $\theta_0$  et  $\theta$  les angles de ces vecteurs avec la normale au plan du réseau. Nous caractérisons le réseau par le vecteur  $\vec{a}$  d'un plan de section principale tel que la translation  $\vec{a}$  fait passer d'une fente à la suivante : son module a est la période du réseau.

### IX-2-1- Relation fondamentale des réseaux par transmission :

L'équation donnant la position des maxima principaux d'intensité est appelée la relation fondamentale des réseaux. La différence de phase entre les ondes véhiculées par deux rayons consécutifs est égale, à un nombre entier de fois  $2\pi$ . Comme les rayons incidents sont parallèles ainsi que les rayons diffractés, la différence de chemin optique entre le rayon passant par le point O et celui passant par le point homologue M vaut, en supposant que le milieu ambiant est l'air, d'indice :

$$\delta = OH - HH_0 = a(\sin\theta - \sin\theta_0) \quad (9.2)$$

D'où la différence de phase :

$$2\pi \frac{a}{\lambda} (\sin\theta - \sin\theta_0) = m 2\pi \quad (9.3)$$

La relation fondamentale des réseaux est donc :

$$a(\sin\theta - \sin\theta_0) = m \lambda \quad (9.4)$$

m étant un nombre entier positif, négatif ou nul. A partir de cette relation, il est possible de dégager la condition sur le rapport  $\frac{\lambda}{a}$  pour que la diffraction de la lumière soit appréciable. En effet adoptant le critère suivant :

$$\begin{aligned} |\sin\theta - \sin\theta_0| &\geq 0,1 , & \text{il vient:} \\ \frac{m\lambda}{a} &\geq 0,1 \quad \text{d'où} \quad \frac{\lambda}{a} \geq \frac{1}{10m} \quad \text{et} \quad \frac{\lambda}{a} = \frac{1}{50} \end{aligned}$$

Si l'ordre  $m$  est égal à 5. Ainsi les rayons X, de longueur d'onde  $\lambda=0,1$  nm, sont diffractés par des réseaux naturels de période  $a = 5$  nm que constituent les cristaux. La relation fondamentale peut se mettre sous une forme vectorielle en introduisant les vecteurs d'ondes

incidents et émergents ( $\vec{k}_0$  et  $\vec{k}$ ) de même norme  $\frac{2\pi}{\lambda}$ , le vecteur diffusion élastique  $\vec{K} = \vec{k} - \vec{k}_0$  et le vecteur période du réseau  $\vec{a} = a\vec{e}_x$  (fig. 9-3).

Comme les composantes de  $\vec{k}_0$  et  $\vec{k}$  suivant  $\vec{e}_x$  sont respectivement  $k_0 \sin \theta_0$  et  $k \sin \theta$ , cette relation s'écrit donc :

$$\vec{a} \cdot \vec{R} = m 2\pi \quad \text{avec } \vec{a} = a\vec{e}_x \quad \text{et} \quad \vec{K} = \vec{k} - \vec{k}_0$$

C'est sous cette forme vectorielle que l'on écrit généralement la relation des réseaux dans le cas de la diffraction des rayons X par les cristaux.

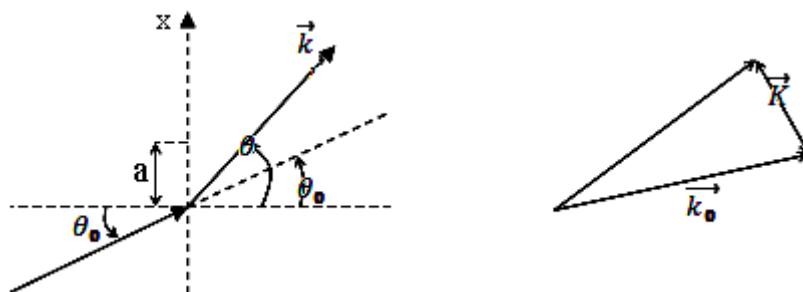


Figure 9-3: Réseau par transmission

### IX-2-2- Relation fondamentale des réseaux par réflexion

La relation fondamentale précédente a été algébriquement avec la même convention d'orientation pour les angles  $\theta_0$  et  $\theta$  (fig 9-4). Pour un réseau par réflexion, l'angle  $\theta_0$  est obtus ; aussi est-il plus commode d'introduire l'angle d'incidence  $i = \theta_0 - \pi$ . La formule des réseaux s'écrit :

$$a(\sin \theta - \sin i) = m \lambda \quad (9.5)$$

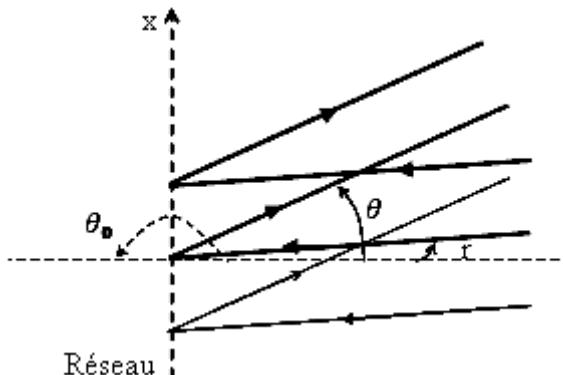


Figure 9-4: Réseau par réflexion

### IX-2-3-Représentation géométrique de la relation fondamentale des réseaux

La relation fondamentale des réseaux peut être représentée géométriquement en traçant un cercle trigonométrique et le réseau suivant l'axe des ordonnées (fig9-5-a) ; on porte

successivement  $\sin\theta_0 \cdot \frac{m\lambda}{a}$  et la somme qui vaut  $\sin\theta$  ; on en déduit aisément l'angle  $\theta$  :  
 $\sin\theta = \sin\theta_0 + \frac{m\lambda}{a}$ , par réflexion la construction est analogue (fig 9-5-b) :  
 $\sin\theta = -\sin i + \frac{m\lambda}{a}$

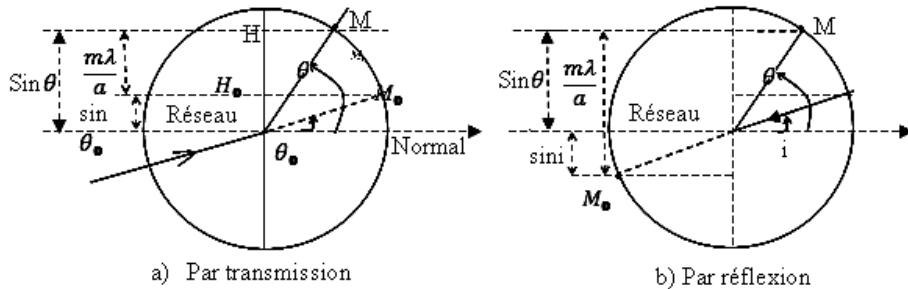


Figure 9- 5 : Représentation graphique de la relation fondamentale des réseau

#### IX-2-4- Amplitude de l'onde diffractée par le réseau

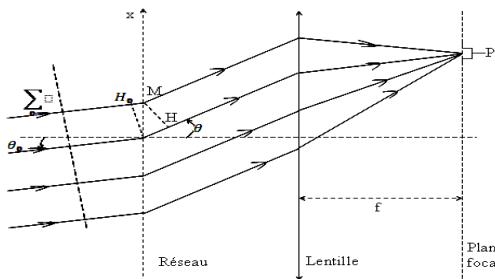


Figure 9-6: Ondes planes tombant sur un réseau

Proposons-nous d'évaluer l'amplitude complexe de l'onde émergente au point P du plan d'observation (fig. 9-6). Dans la direction émergente qui fait l'angle  $\theta$  avec la normale au réseau, l'amplitude complexe de l'onde résultante est la somme des amplitudes complexes des ondes véhiculées par les rayons inclinés du même angle  $\theta$  par rapport à la normale au réseau.

##### IX-2-4-1-Rappel de l'amplitude de l'onde diffractée par une fente

On a vu que l'amplitude complexe de l'onde diffractée par une fente de largeur  $\epsilon$ , centrée sur l'origine était proportionnelle à l'intégrale :

$$E_\epsilon(u) = \int_{-\frac{\epsilon}{2}}^{\frac{\epsilon}{2}} \exp(-i2\pi x) dx = \epsilon \frac{\sin(\pi u \epsilon)}{\pi u \epsilon} \quad \text{où } u = \frac{\alpha - \alpha_0}{\lambda} \quad (9.6)$$

$\alpha$  et  $\alpha_0$  étant les cosinus directeurs, suivant l'axe des x du réseau, des directions diffractée et incidente. En fonction de l'angle d'incidente  $\theta_0$  et de l'angle de diffraction  $\theta$ , u a pour expression, puisque  $\alpha = \sin\theta$  et  $\alpha_0 = \sin\theta_0$  :

$$u = \frac{\sin\theta - \sin\theta_0}{\lambda} \quad (9.7)$$

### IX-2-4-2- Contribution de toutes les fentes

Si le réseau comporte N fentes numérotées de  $-n$  à  $n$ , de transmittance éventuellement complexe, l'amplitude complexe de l'onde diffractée par le réseau s'écrit :

$$E = \int t(x) \exp(-i2\pi ux) dx \text{ avec } t(x) = \sum_{m=-n}^{m=n} t_m(x - x_m) \quad (9.8)$$

Où  $x_m = ma$  désigne la coordonnée de la fente de rang  $m$ . Introduisant la variable  $X = x - x_m$ , il vient :

$$\begin{aligned} E &= \sum_{m=-n}^{m=n} \exp(i2\pi ux_m) \int t_e(X) \exp(-i2\pi ux) dX \\ &= \sum_{m=-n}^n \exp(-i2\pi u a) E_e(u) \\ E &= E_e(u) \sum_{-n}^n \exp(-im\phi) \text{ avec } \phi = 2\pi ua \end{aligned} \quad (9.9)$$

Soit

On trouve en introduisant le nombre total de lignes  $N=2n+1$  :

$$\begin{aligned} E &= \frac{E_e(u) \exp(in\phi) (1 - \exp(-in\phi))}{1 - \exp(i\phi)} \\ &= E_e(u) \frac{\sin\left(\frac{N\phi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)} \end{aligned}$$

Finalement,  $E$  s'écrit

$$\begin{aligned} E &= NE_e(u) \frac{\sin(N\pi ua)}{N \sin(\pi ua)} \\ E &= N\epsilon \frac{\sin(\pi ue)}{\pi ue} \frac{\sin(N\pi ua)}{N \sin(\pi ua)} \end{aligned}$$

### IX-3- Répartition de l'intensité de l'onde diffractée

Comme  $E = EE^*$ , il vient :

$$\begin{aligned} I &= N^2 |E_e(u)|^2 \left[ \frac{\sin(N\pi ua)}{N \sin(\pi ua)} \right]^2 \\ &= N^2 \epsilon^2 \left[ \frac{\sin(\pi ue)}{\pi ue} \right]^2 \left[ \frac{\sin(N\pi ua)}{N \sin(\pi ua)} \right]^2 \end{aligned}$$

En remplaçant  $E_e(u)$  par son expression, la répartition relative de l'intensité est donc caractérisée par la figure de diffraction donnée par le motif, ici une fente, et par la fonction réseau  $R(u)$  suivante :

$$R(u) = \left[ \frac{\sin(N\pi ua)}{N \sin(\pi ua)} \right]^2 \quad (9.10)$$

Cette fonction est paire et périodique ; sa période, égale à  $a^{-1}$  permet de retrouver la relation fondamentale des réseaux, puisque l'intensité de la lumière est maximale pour :

$$u = \frac{m}{a} \quad \text{soit} \quad \frac{\sin\theta - \sin\theta_0}{\lambda} = \frac{m}{a} \quad (9.11)$$

## IX-4- Propriété des réseaux

### IX-4-1- Dispersion angulaire

Considérons deux ondes planes voisines  $\lambda$  et  $\lambda+d\lambda$ , qui tombent sur un réseau, en faisant, le même angle d'incidence  $\theta_0$ . L'écart  $d\theta$ , entre les angles que font les ondes diffractées, est obtenue à partir de la relation :

$$a(\sin\theta - \sin\theta_0) = m\lambda \quad (9.12)$$

La dispersion angulaire  $D_a$  du réseau, dans le voisinage de l'ordre  $m$ , est la quantité :

$$D_a = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{a \cos\theta_m} = \frac{1}{\lambda} \frac{\sin\theta_m - \sin\theta_0}{\cos\theta_m} \quad (9.13)$$

La dispersion est donc plus forte lorsque l'ordre est élevé ( $m$  grand) et le pas faible (réseau serré).

#### Remarque

Pour  $\theta \approx 0$  la dispersion ne dépend pas de  $\theta$  au premier ordre :

$$D_a = \frac{m}{a} . \text{ La variation de } D_a \text{ avec } \lambda \text{ est alors linéaire.}$$

Exemple : On observe normalement ( $\theta \approx 0$ ) au foyer  $L$  d'une lentille  $L$ , de distance focale  $f=20\text{cm}$  l'ordre 2 de la diffraction d'un réseau éclairé par une onde plane inclinée (fig. 9-6).

Si le réseau a 5000 traits par cm,  $a = 2\mu\text{m}$ ; d'où la dispersion normale  $D_a = fD_a = 0,2 \text{ nm}$ .

La relation fondamentale donne :  $-ast\sin\theta_0 = 2\lambda$ . Par conséquent, si  $\lambda=578\text{nm}$ ,  $\theta_0 = -35,31^\circ$ .

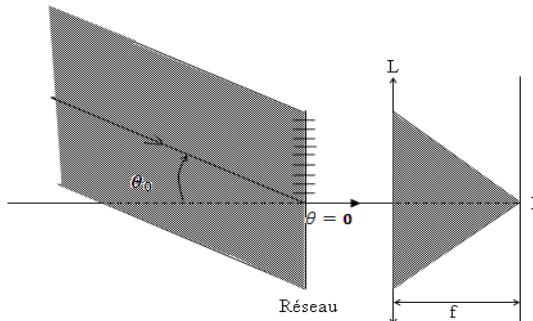


Figure 9-7: Une onde plane inclinée (pour dispersion angulaire)

### IX-4-2- Minimum de déviation

Dans un réseau par transmission, la dérivation de l'onde incidente,  $D = \theta - \theta_0$ , passe par un minimum.

En calculant :

$$\frac{dD}{d\theta_0} = \frac{d\theta}{d\theta_0} - 1 \quad (9.14)$$

Comme  $a(\sin\theta - \sin\theta_0) = m\lambda$ ,  $m, \lambda$  et  $a$  étant déterminés, on a :

$$\frac{dD}{d\theta} = \frac{\cos\theta}{\sin\theta}$$

et

$$\frac{d^2D}{d\theta^2} = \frac{-\cos\theta\sin\theta + \cos^2\theta\tan\theta}{\sin^2\theta}$$

Il en résulte que  $\frac{dD}{d\theta} = 0$  pour  $\theta = -\theta_0$  (le cas  $\theta = \theta_0$  correspond au rayon non diffracté) ;  
en ce point  $\frac{d^2D}{d\theta^2} = -2\tan\theta_0 > 0$ . La dérivation est donc minimale pour  $\theta = -\theta_0$  et vaut :  
 $D = 2\theta_0$

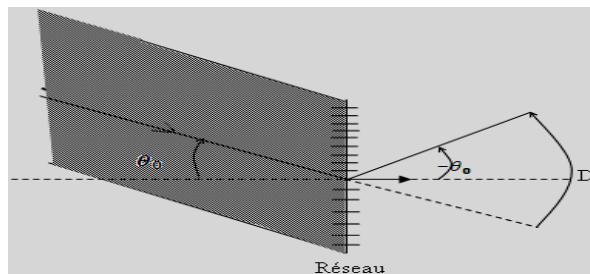


Figure 9-8: Une onde plane inclinée (pour minimum de déviation)

## IX-5- Spectromètres à réseau

### IX-5-1-Définition et présentation du spectroscope

#### IX-5-1-1-Définition

On appelle spectre d'une lumière complexe un ensemble d'images (ou de faisceaux) formées à l'aide des divers constituants monochromatiques de cette lumière, et qu'il est possible d'observer ou d'utiliser séparément.

De manière générale, l'instrument de mesure permettant d'obtenir un spectre est appelé spectroscope, c'est-à-dire la spectroscopie est l'étude expérimental du spectre de la lumière (sa décomposition) et aussi l'étude, au point de vue de leurs longueurs d'onde, des divers radiations monochromatiques émises par une source, ou encore transmises, réfléchies ou diffusées par une substance. On analyse par spectroscopie non seulement la lumière visible, mais aussi le rayonnement électromagnétique dans toutes les gammes de fréquences, les ondes élastiques comme le son ou les ondes sismiques, ou encore des particules ou des masses.

#### IX-5-1-2- Présentation du spectroscope

Le spectroscopie à réseaux est constitué de trois parties : une porte fente, un tube et un porte réseau. Les figures 9.9 ci-après montrent les schémas d'un spectroscopie à réseau et ses différentes pièces constitutives.

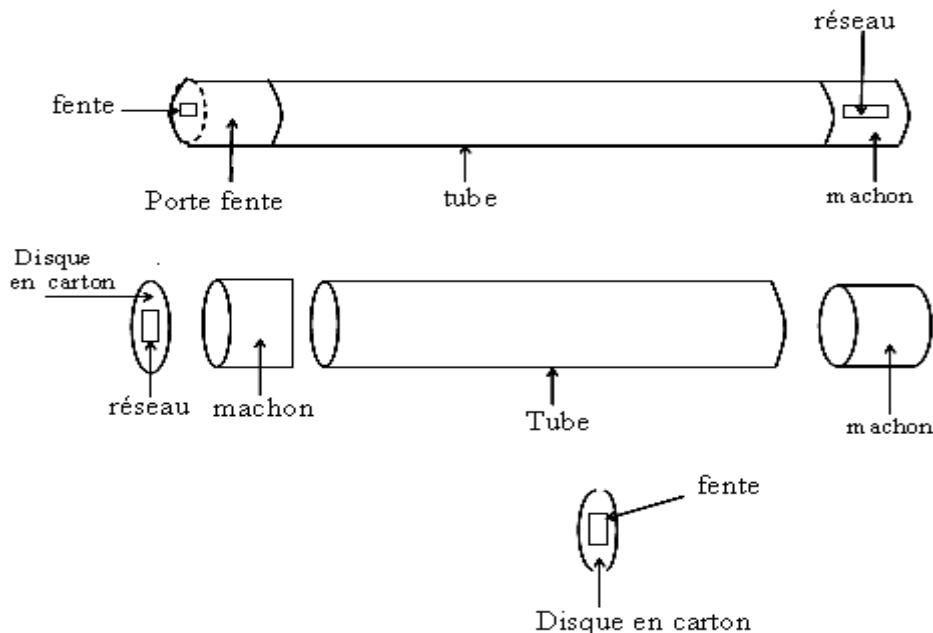


Figure 9-9: Les différentes pièces du spectroscope

### Remarque

On prend ici comme exemple l'utilisation du spectroscope de la lumière visible, mais il y aussi des spectroscopes des radiations invisibles (infrarouge, hertzienne, ultraviolet, rayon X ...).

### IX-5-2- Utilisation

Ce matériel peut être utilisé pour pouvoir observer le spectre de la lumière et décrire sa composition. De ce fait, il est utilisé d'une source de la lumière blanche comme une porte ou fenêtre ouverte ou une flamme de bougie ou une lampe incandescence.

La manipulation de ce matériel est très simple (cf. figure 9-10) :

- Placer l'œil du réseau et diriger la fente vers la source de lumière à observer en la gardant horizontale.
- Orienter l'appareil en le faisant tourner à gauche ou à droite dans la position voulue jusqu'à ce que l'observateur voie une bande colorée (multicolore) à l'intérieur du spectroscope. Cette bande multicolore présentant les couleurs de l'arc-en ciel (allant du violet au rouge) s'appelle spectre de la lumière blanche émise par la source. (figure 9-10)

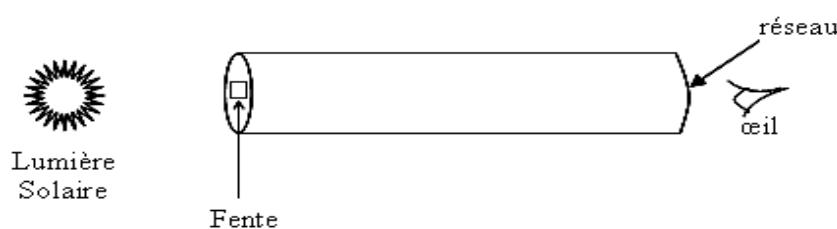


Figure 9-10: Observation de la lumière solaire avec un spectroscope à réseau

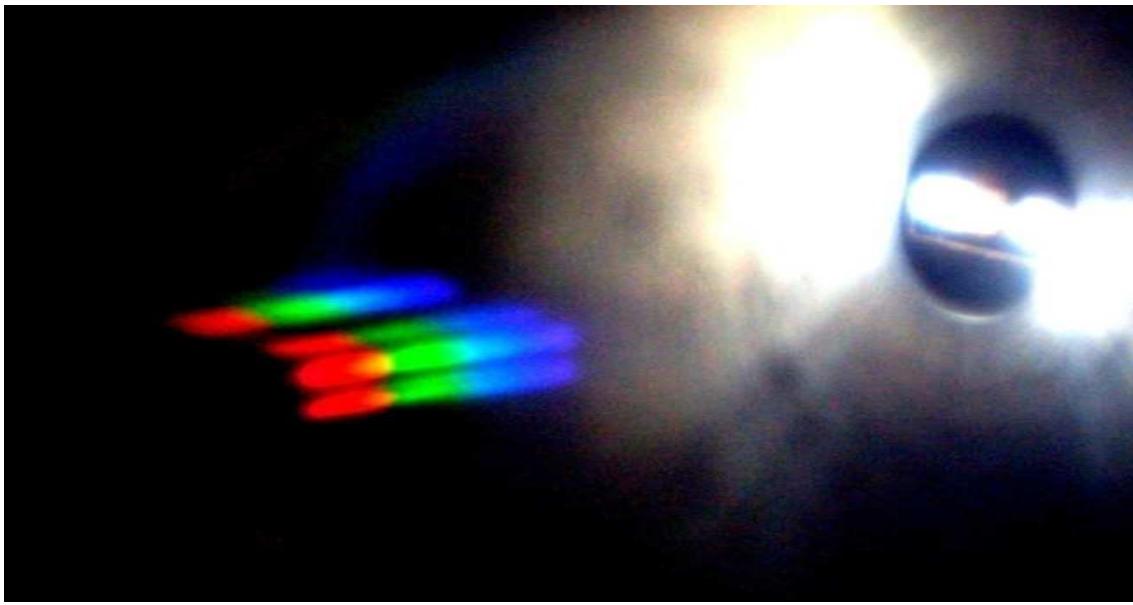


Figure 9-11: Spectre de la lumière blanche

#### IX-5-3- Interprétation

Un réseau permet de décomposer le passage de la lumière à travers une fente finie puis à travers un réseau provoque les dérivations de celle-là. Les dérivations provoquées par le réseau sont différentes entre eux selon la nature des radiations. Les radiations les moins déviées sont les violettes, et celles les plus déviées sont les rouges. C'est pourquoi la superposition des radiations constituant la lumière visible : Violet, Bleu, Vert, Jaune, Orange, Rouge.

#### IX-5-4- Réception des diverses radiations

Le récepteur d'un spectroscope ou spectrographe pour les radiations visibles, ultraviolettes ou infrarouges, est, suivant le cas, l'œil, une émission photographique, une cellule photoélectrique ou un petit dispositif thermométrique noir ci. Rappelons que le domaine de sensibilité de l'œil s'étend d'environ 400 à 750m $\mu$  , les limites inférieures n'étant souvent pas atteintes, à cause de la pauvreté relative des sources usuelles de lumière en radiations de courtes longueurs d'onde ; d'autre part, l'œil ne sépare deux images voisines, supposées fines et assez lumineuses que si leur écart angulaire est l'ordre de minute.

-Les émulsions photographiques permettent l'enregistrement, en un temps parfois très court de tout spectre que l'on étudie à loisir après développement et fixation.

-Les récepteurs photoélectriques, de plus en plus employés, peuvent être des cellules photoémissives ordinaires ou mieux des photomultiplicateurs à grande sensibilité. Leurs dimensions obligent généralement à les placer en arrière de fente isolant, dans le spectre, les radiations à étudier. Pour l'infrarouge plus lointain, on a recours à des photodiodes au germanium ou à des cellules photoconductrices au sulfure ou au tellurure de plomb.

-Les récepteurs thermiques sont, le plus souvent, des thermophiles ou des baromètres ou encore des thermomètres monomériques. On doit les associer, comme les précédents, à un monochromateur. Ils ont avantage, sur lequel nous reviendrons, de ne pas être « sélectifs » c'est-à-dire que leur réponse est déterminée uniquement par la puissance de rayonnement absorbé, quelle que soit sa longueur d'onde. Mais ils sont souvent bien choisis, ce qui fait limiter leur **emploi en spectroscopie** à l'étude de l'infrarouge lointain, pour laquelle ni les émulsions photographiques, ni les cellules photoélectriques ne conviennent.

### IX-5-5-Pouvoir de résolution d'un spectroscope à réseau

Le montage utilisé est généralement celui de la figure (IV 5 1) : la source ponctuelle (infiniment finie), placée dans le plan focal d'une lentille, éclairée le réseau sous un angle  $\theta_m$ . Une seconde lentille, de distance focale image  $f$ , permet de visualiser dans son plan focal la figure de diffraction du réseau, autour de la valeur  $\theta_m$  correspondant à l'ordre  $m$ .

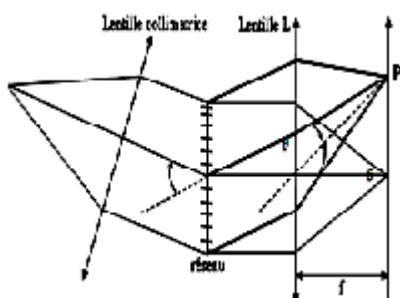


Figure 9-12 : Ondes provenant d'une source ponctuelle

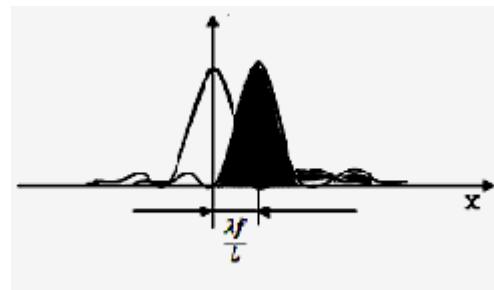


Figure 9-13 : Répartition de l'intensité en fonction des coordonnées de position

Lorsque l'axe de la seconde lentille ne coïncide pas avec la normale au réseau, mais fait  $\theta_m$  avec elle, la largeur des pics de diffraction n'est plus  $\frac{\lambda f}{L}$  mais  $\frac{\lambda f}{(L \cos \theta_m)}$  étant la largeur de la fente diffractante équivalente. On retrouve ce résultat en cherchant le premier O de la fonction  $R(u)$  dans le voisinage de :

$$u = \frac{m}{a} =$$

$$R(u) = 0 \text{ pour } u = \frac{m}{a} + \frac{1}{Na}$$

$$\text{Soit } \Delta u = u - \frac{m}{a} = \frac{1}{Na}$$

$$\text{Or en différenciant } u = \frac{\sin \theta}{\lambda}, \text{ on obtient une autre expression de } \Delta u:$$

$$\Delta u = \frac{\cos \Delta \theta}{\lambda} \approx \frac{\cos \theta_m \Delta \theta}{\lambda}$$

$$\text{d'où } \frac{1}{Na} = \frac{\cos \theta_m \Delta \theta}{\lambda}$$

Il en résulte que :

$$\int \Delta\theta = \int \frac{\lambda}{N \cos\theta_m} = \frac{\lambda f}{L \cos\theta_m} \quad (9.15)$$

Lorsque l'onde plane qui tombe sur le réseau est constituée de deux ondes monochromatiques de longueurs d'onde  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ , chacune de ces ondes donne sa propre figure de diffraction, et les deux figures de diffraction coexistent sur la figure (9-12), on a représenté la répartition de l'intensité en fonction de la coordonnée de position  $X \approx f(\theta - \theta_m)$

Si le plus petit écart en longueur d'onde  $\Delta\lambda$  détectable est défini par la largeur (à mi-hauteur

$\Delta X_1/2$  d'un pic de diffraction, c'est le critère de Rayleigh), alors  $\Delta X_1/2 = \frac{\lambda}{L |\cos\theta_m|}$  puisque tout se passe comme si la fente diffractante avait pour largeur  $L \cos\theta_m$ .

Par conséquent :

$$\begin{aligned}\Delta\lambda &= \frac{\Delta X_1/2}{D_e} = \frac{\Delta X_1/2}{f D_a} = \frac{\lambda f}{L \cos\theta_m} \frac{\cos\theta_m}{f m} \\ &= \frac{\lambda a}{m L} = \frac{\lambda}{m N}\end{aligned}$$

N étant le nombre total de traits du réseau. On en déduit le pouvoir de résolution du réseau :

$$P.R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = m L = \frac{\sin\theta_m - \sin\theta_0}{\lambda}$$

Ordre de grandeur : pour un réseau, de largeur  $L=2,5$  cm ayant 5000 traits par cm, et pour l'ordre 2 avec  $\theta_m = 0$ ,  $P.R=25000$ . si  $\lambda=0,5\mu\text{m}$  alors  $\Delta\lambda = 0,02\text{nm}$

### Remarque

- Le pouvoir de résolution a une valeur maximale. En effet :

$$P.R = m.N = \frac{L}{\lambda(\sin\theta - \sin\theta_0)} \leq \frac{2L}{\lambda}$$

Dans l'exemple précédent,  $P.R \leq 10^5$

- Bien que le pouvoir de résolution soit proportionnel à l'ordre  $m$ , les valeurs choisies pour  $m$  sont généralement petites car l'intensité lumineuse est faible lorsque  $m$  est élevé. On sait réaliser des réseaux qui réfléchissent la lumière pratiquement dans un seul ordre. Leur motif diffère notablement d'une simple fente.

### IX-5-6-Application des réseaux à la comparaison de deux longueurs d'onde

L'utilisation d'un réseau au minimum de déviation permet de comparer deux longueurs d'onde, et donc de déterminer l'une ( $\lambda_1$ ) connaissant l'autre ( $\lambda_2$ ). On se place au minimum de déviation afin de neutraliser l'influence d'une erreur sur la mesure de l'angle d'incidence. Il vient, puisque :

$$\theta = -\theta_0 = \frac{D}{z}$$

$$2\arcsin\left(\frac{D_1}{z}\right) = m\lambda_1 \quad \text{et} \quad 2\arcsin\left(\frac{D_2}{z}\right) = m\lambda_2$$

Par conséquent :

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\sin(D_1/2)}{\sin(D_2/2)}$$

## Conclusion

On constate que Les diffractions de Fresnel et Fraunhofer sont à la fois la base ondulatoire de la lumière. Ils s'appuient donc sur le concept d'onde et le réseau est un preuve de la diffraction des ondes lumineuses. Dans les troisième partie on va voir les différentes des spectres électromagnétiques et leur rôles sur la vie des natures.

## **TROISIEME PARTIE**

*LES SPECTRES*

*ELECTROMAGNETIQUES*

## Définition de spectre électromagnétique

*Le spectre électromagnétique décrit la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur fréquence : les ondes de faible fréquence, de quelques Kiloherz (KHz) à plusieurs Gigahertz (GHz), sont appelées ondes radio ou ondes hertziennes des fréquences plus élevées se trouvent par ordre de fréquence croissant l’Infrarouge la lumière visible, et Ultraviolet. Enfin, aux fréquences les plus élevées, se trouvent le domaine des Rayons X, puis celui des Rayons gamma.*

## **CHAPITRE X :**

### **LES ONDES DES FREQUENCES LES PLUS ELEVEES**

#### **X-1-Rayons gamma**

##### **X-1-1-Définition**

Les **rayons gamma**, symbolisés par la lettre grecque  $\gamma$ , correspondent à une gamme d'énergies du rayonnement électromagnétique : il s'agit de photons de haute énergie (en général *au-delà de 100 keV*). *Ils possèdent une longueur d'onde très courte, inférieure à 1 nanomètre et peuvent être produits par la désintégration  $\gamma$  ou d'autres processus nucléaires ou subatomiques tels que l'annihilation d'une paire électron-positron.*

##### **X-1-2-Caractéristiques**

Les rayons gamma sont plus pénétrants que les rayonnements alpha et les rayonnements bêta, mais sont moins ionisants. Ils sont de même nature que les rayons X mais sont d'origine différente. Les rayons gamma sont produits par des transitions nucléaires tandis que les rayons X sont produits par des transitions électroniques provoquées en général par la collision d'un électron avec un atome, à haute vitesse. Comme il est possible pour certaines transitions électroniques d'être plus énergétiques que des transitions nucléaires, il existe un certain chevauchement entre les rayons X de haute énergie et les rayons gamma de faible énergie.

##### **X-1-3-Danger**

Les rayons gamma provenant de retombées radioactives seraient probablement le plus grand danger dans le cas d'une guerre nucléaire. Si les rayons gamma sont moins ionisants que les rayons alpha ou bêta, ils demandent des épaisseurs de blindage beaucoup plus importantes pour s'en protéger (de l'ordre de quelques mètres d'épaisseur de béton armé). Ils peuvent produire des dégâts similaires à ceux produits par les rayons X et les autres rayonnements ionisants, tels que brûlures (effet déterministe), cancers et mutations génétiques (effets stochastiques)

#### X-1-4-Interaction avec la matière

Distribution de la dose versus la profondeur pour différents types de radiations dans un corps vivant

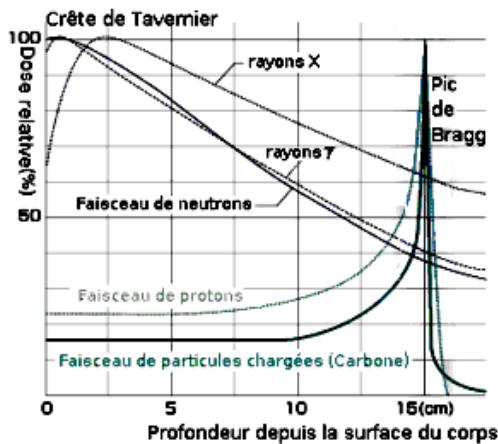


Figure 10-1 : Illustration de la Crête de Tavernier qui se caractérise par l'accroissement de la dose d'irradiation de certains rayonnements,

La Crête de Tavernier se caractérise par l'accroissement de la dose d'irradiation de certains rayonnements, dont les rayons gamma, dans l'organisme avant sa décroissance exponentielle. En passant par la matière, les rayons gamma sont absorbés d'une manière exponentielle :

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x) \quad (10.1)$$

ici:

- $\mu = n\sigma$  est le **coefficients d'absorption**, mesuré en  $\text{cm}^{-1}$ ;
- $n$  le nombre d'atomes par  $\text{cm}^3$  dans la matière ;
- $\sigma$  la section efficace d'absorption en  $\text{cm}^2$  est donnée pour un **couple** rayonnement-matière caractérisé par l'*énergie du faisceau incident* et la *nature chimique du matériau cible* (son numéro atomique  $Z$ , au premier ordre) ;
- et  $x$  l'épaisseur du matériau en cm.

En pénétrant une substance, telle la matière vivante, la dose d'irradiation par les rayons gamma passe d'abord par un maximum ou "Crête de Tavernier", du nom du physicien belge Guy Tavernier qui découvrit ce phénomène en 1948, avant de décroître exponentiellement avec la profondeur. Ce maximum se situe à environ 1 cm de profondeur pour les rayons gamma et l'intensité de ce rayonnement gamma est fort dépendante de la longueur de diffusion valable pour la substance pénétrée.

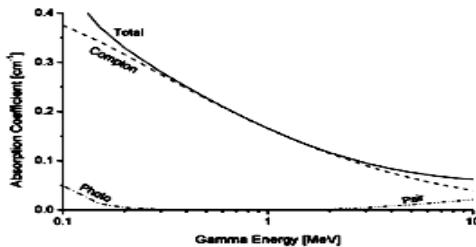


Figure 10-2 : Le coefficient d'absorption total de l'aluminium pour les rayons gamma, et les contributions des trois effets. Ici, l'effet Compton domine.

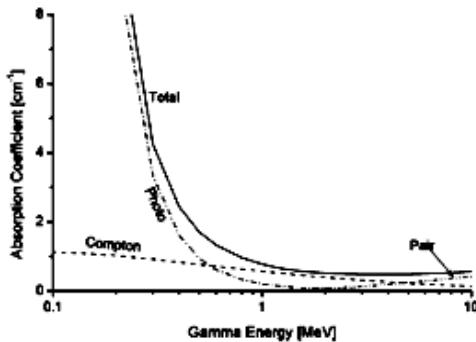


Figure 10-3 : Le coefficient d'absorption totale du plomb pour les rayons gamma, et les contributions des trois effets. Ici, l'effet photoélectrique domine pour l'énergie basse, et la production des paires au-dessus de 5 MeV.

Les rayons gamma interagissent avec la matière via trois mécanismes principaux : l'effet photoélectrique, la diffusion Compton, l'effet des rayons X.

#### X-1-4-1-Effet photoélectrique

Dans l'effet photoélectrique, un photon gamma interagit avec la matière en transférant l'intégralité de son énergie à un électron d'orbitale qui est alors éjecté de l'atome auquel il était lié. L'énergie cinétique de ce *photo*-électron est égale à l'énergie du photon gamma moins l'énergie de liaison de l'électron. L'effet photoélectrique est supposé être le mécanisme principal de transfert d'énergie des rayons X et des rayons gamma d'énergie inférieure à 50 keV, mais est beaucoup moins important à plus hautes énergies. Sa plage d'énergie dépend du numéro atomique.

#### X-1-4-2-Diffusion Compton

Dans le cas de la diffusion Compton, le photon gamma possède une énergie plus que suffisante pour arracher un électron d'orbitale ; l'énergie restante est réémise sous forme d'un nouveau photon gamma de moindre énergie et dont la direction d'émission est différente de la direction incidente du photon gamma d'origine. L'efficacité de la diffusion Compton diminue avec l'augmentation de l'énergie des photons ; on pense que c'est le principal mécanisme d'absorption des rayons gamma dans la gamme d'énergie entre 100 keV et 10 MeV, qui est

celle qui inclut la plus grande part de radiations gamma provenant d'une explosion nucléaire. La diffusion Compton est relativement indépendante du numéro atomique de la matière absorbant les photons gamma.

## **X-2-Rayons X**

### **X-2-1-Définition**

Les rayons X sont une forme de rayonnement électromagnétique à haute fréquence dont la longueur d'onde est comprise approximativement entre 0,01nanomètre et 10 nanomètres. L'énergie de ces photons va de quelques eV (electronvolt), à plusieurs dizaines de MeV. C'est un rayonnement ionisant utilisé dans de nombreuses applications dont l'imagerie médicale (« radiographie conventionnelle » et la cristallographie).

Le nature ondulatoire de rayons X, non reconnue lors découverte par ROENTGEN (1895) d'où leur nom de rayon X, c'est-à-dire mystérieux, fut démontrée par leur possibilité de diffraction par les cristaux qui permit aussi d'évaluer leur longueur d'onde.

Les rayons X et les rayons gamma sont de même nature ; ils sont constitués de photons, mais sont produits différemment : les rayons X sont produits par des transitions électroniques alors que les rayons gamma sont produits lors de la désintégration radioactive des noyaux des atomes ou d'autres processus nucléaires ou subatomiques. C'est une gamme de rayonnement très utilisée en astrophysique contemporaine.

### **X-2-2-Utilisation**

Les rayons X sont utilisés pour la surveillance aux frontières et dans les aéroports, sur les objets et véhicules. D'autres sont en test ou à l'étude concernant l'humain.

Au début de la radiologie, les rayons X étaient utilisés à des fins multiples : dans les fêtes foraines où on exploitait le phénomène du fluorescence, dans l'industrie où on étudie l'adaptation d'une chaussure au pied des clients grâce au rayonnement et bien sûr, on les utilisait pour la radiographie médicale. Encore là, on fit quelques erreurs, par exemple en radiographiant les femmes enceintes.

Cents ans après leur découverte, on se sert encore des rayons X en radiographie moderne. On les utilise aussi dans les scannes, pour effectuer des coupes du corps humain. Plusieurs autres techniques sont venues compléter les appareils des médecins : les ultrasons, l'imagerie par résonance magnétique nucléaire, la scintigraphie ou encore la tomographie ou par émission de positrons.

Mais on ne sert pas des rayons X seulement en médecine ; les services de sécurité les utilisent pour examiner le contenu des valises ou des conteneurs aériens et maritimes sur écran. Les policiers les exploitent afin d'analyser les fibres textiles et les peintures se trouvant sur le lieu d'un sinistre. En minéralogie, on peut identifier divers cristaux à l'aide de la diffraction des rayons X.

### **X-2-3-Production de rayons X**

Les rayons X sont un rayonnement électromagnétique comme les ondes radio, la lumière visible, ou les infrarouges. Cependant, ils peuvent être produits de deux manières très spécifiques :

a)-Par des changements d'orbite d'électrons provenant des couches électroniques ; les rayons X sont produits par des transitions électroniques faisant intervenir les couches internes, proches du noyau ; l'excitation donnant la transition peut être provoquée par des rayons X ou bien par un bombardement d'électrons, c'est notamment le principe de la spectrométrie de fluorescence X et de la microsonde de Castaing;

b)-Par accélération d'électrons (accélération au sens large : freinage, changement de trajectoire) ; on utilise deux systèmes :

Production de rayons X par Bremsstrahlung.

Le freinage des électrons sur une cible dans un tube à rayons X : les électrons sont extraits d'une cathode de tungstène chauffée, accélérés par une tension électrique dans un tube sous vide, ce faisceau sert à bombarder une cible métallique (appelée anode ou anti-cathode) ; le ralentissement des électrons par les atomes de la cible provoque un rayonnement continu de freinage, dit de Bremsstrahlung. La courbure de la trajectoire dans des accélérateurs de particule, c'est le rayonnement dit « synchrotron ».

Lors de la production de rayons X avec un tube à rayons X, le spectre est composé d'un rayonnement continu Bremsstrahlung, mais aussi de raies spécifiques à l'anode utilisé, et qui sont dus au phénomène de fluorescence.

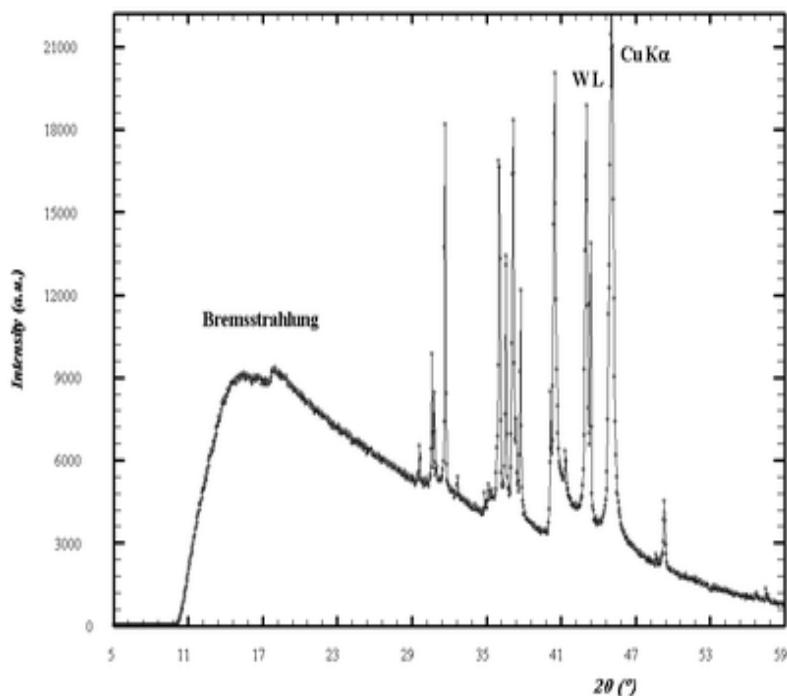


Figure 10-4 : Courbe de Bremsstrahlung,

C'est un spectre de rayons produits avec un tube à rayons X. Le fond continu correspond au rayonnement de Bremsstrahlung et les raies proviennent des transitions électroniques de l'anode. Anecdotiquement, des rayons X peuvent être produits par triboluminescence, décollement d'un ruban adhésif sous vide, et la quantité émise peut alors suffire pour faire une radiographie (de mauvaise qualité) d'un doigt.

## **X-2-4-Propriétés des rayons X**

Historiquement, les rayons X étaient connus pour faire briller certains cristaux (fluorescence), ioniser les gaz et impressionner les plaques photographiques.

Les principales propriétés des rayons X sont les suivantes :

- ils pénètrent facilement la « matière molle », c'est-à-dire la matière solide peu dense et constituée d'éléments légers comme le carbone, l'oxygène et l'azote, et sont facilement absorbés par la « matière dure » (matière solide dense constituée d'éléments lourds) ; c'est ce qui permet l'imagerie médicale (radiographie, scanner) : ils traversent la chair et sont arrêtés par les os ;

- ils sont facilement absorbés par l'air, par l'atmosphère ; de fait, les télescopes à rayons X (qui détectent les rayons X émis par les étoiles) doivent être placés dans des satellites, et les radiographies médicales, la source de rayons X doit être proche du patient ; l'ordre de grandeur de leur longueur d'onde étant celui des distances interatomiques dans les cristaux (métaux, roches...), ils peuvent diffracter sur ces cristaux ; ceci permet de faire de l'analyse chimique, et plus précisément de l'analyse de phase par diffraction de rayons X (ou radiocristallographie).

Du fait de l'énergie importante des photons, ils provoquent des ionisations des atomes, ce sont des rayonnements dits « ionisants » ; ceci donne naissance au phénomène de fluorescence X, qui permet une analyse chimique, mais cela modifie aussi les cellules vivantes.

### **X-2-4-1-Effets sur la santé**

Les rayons X sont des radiations ionisantes. Une exposition prolongée aux rayons X peut provoquer des brûlures (radiomes) mais aussi des cancers. Ces effets ont été réellement pris en compte assez tard. C'est ainsi que dans un ouvrage de 1954, on ne lisait aucune recommandation de sécurité, mais par contre « Il a été montré que les rayons X provoquent un effet, certes peu important, directement sur la rétine, provoquant une légère illumination dans tout le champ de vision ».

Les personnels travaillant avec des rayons X doivent suivre une formation spécifique, être protégés et suivis médicalement (ces mesures peuvent être peu contraignantes si l'appareil est bien « étanche » aux rayons X).

### **X-2-4-2-Détection**

Les rayons X sont invisibles à l'œil, mais ils impressionnent les pellicules photographiques. Si l'on place un film vierge protégé de la lumière (dans une chambre noire ou enveloppée dans un papier opaque), la figure révélée sur le film donne l'intensité des rayons X ayant frappé la pellicule à cet endroit. C'est ce qui a permis à Röntgen de découvrir ces rayons. Ce procédé est utilisé en radiographie médicale ainsi que dans certains diffractomètres (clichés de Laue, chambres de Debye-Scherrer). Il est aussi utilisé dans les systèmes de suivi des manipulateurs : ceux-ci doivent en permanence porter un badge, appelé « film dosimètre », enfermant une pellicule vierge ; ce badge est régulièrement changé et développé par les services de santé pour contrôler que le manipulateur n'a pas reçu de dose excessive de rayons X.

Comme tous les rayonnements ionisants, les rayons X sont détectés par les compteurs Geiger-Müller (ou compteur G-M). Si l'on diminue la tension de polarisation du compteur, on obtient un compteur dit « proportionnel » (encore appelé « compteur à gaz » ou « compteur à flux gazeux ») ; alors que le compteur G-M travaille à saturation, dans le compteur proportionnel, les impulsions électriques générées sont proportionnelles à l'énergie des photons X.

Les rayons X provoquent aussi de la fluorescence lumineuse sur certains matériaux, comme l'iodure de sodium NaI. Ce principe est utilisé avec les « compteurs à scintillation » (ou « scintillateurs ») : on place un photodétecteur après un cristal de NaI ; les intensités des impulsions électriques récoltées par le photomultiplicateur sont elles aussi proportionnelles aux énergies des photons.

De même qu'ils peuvent ioniser un gaz dans un compteur G-M ou proportionnel, les rayons X peuvent aussi ioniser les atomes d'un cristal semi-conducteur et donc générer des paires électron-trou de charges. Si l'on soumet un semi-conducteur à une haute tension de prépolarisation, l'arrivée d'un photon X va libérer une charge électrique proportionnelle à l'énergie du photon. Ce principe est utilisé dans les détecteurs dits « solides », notamment pour l'analyse dispersive en énergie (EDX ou EDS). Pour avoir une résolution correcte, limitée par l'énergie de seuil nécessaire à la création de charges, les détecteurs solides doivent être refroidis, soit avec une platine Peltier, soit à l'azote liquide. Les semi-conducteurs utilisés sont en général du silicium dopé au lithium Si(Li), ou bien du germanium dopé au lithium Ge(Li).

#### X-2-4-3-Rayons X en cristallographie

L'analyse des cristaux par diffraction de rayons X est aussi appelée radio-cristallographie. Ceci permet soit de caractériser des cristaux et de connaître leur structure (on travaille alors en général avec des monocristaux), soit de reconnaître des cristaux déjà caractérisés (on travaille en général avec des poudres polycristallines).



Figure 10-5 : Appareil utilisé pour analyser un monocrystal

Pour travailler avec un monocrystal, on utilise l'appareil ci-contre (Figure 10-5).

- Les rayons X sortent par le tube vertical en haut ; le cristal au centre de la photo est trop petit pour être vu ; il est fixé à l'extrémité d'une fine aiguille de verre manipulée par la tête goniométrique sur la droite (qui ressemble au mandrin d'une perceuse) et permet selon trois axes successifs (un vertical, un à 45° et un horizontal) de tourner le cristal dans toutes les orientations tout en le maintenant dans le faisceau de rayons X ;

- une caméra vidéo (en noir en haut à gauche) permet de contrôler que le cristal est bien centré ;
- un puits en bas au milieu est tenu par une lame : le puits sert à arrêter les rayons X directs qui n'ont pas interagi avec le cristal ;
- un système de refroidissement (à gauche, tube avec des lettres en rouge) permet de refroidir le cristal ;
- n'est pas visible sur la photo le détecteur de rayons X qui est depuis quelques années une caméra CCD permettant de remplacer à la fois les plaques photos et les compteurs ;
- n'est pas visible aussi la source de rayons X et son monochromateur focaliseur qui est composé d'un multicouche miroir à rayons X ;
- n'est pas visible l'informatique d'acquisition des données expérimentales.

Utilisé en géologie et en métallurgie, c'est aussi un outil de biophysique, très utilisé en biologie pour déterminer la structure des molécules du vivant, notamment en cristallogénèses (c'est l'art de fabriquer des monocristaux avec une molécule pure) ; dans ce cadre, un monocristal de la molécule est mis dans un faisceau de rayons X monochromatiques et la diffraction observée pour différentes position du cristal dans le faisceau de rayons X (manipulé par un goniomètre) permet de déterminer non seulement la structure du cristal, mais aussi et surtout la structure de la molécule. C'est notamment par radiocristallographie que Rosalind Franklin, puis James Watson, Francis Crick, Maurice Wilkins et leurs collaborateurs ont pu déterminer la structure hélicoïdale de l'ADN en 1953.

## CHAPITRE XI :

### LES ONDES DES FREQUENCES INTERMDIAIRES

#### XI-1-Ultraviolet

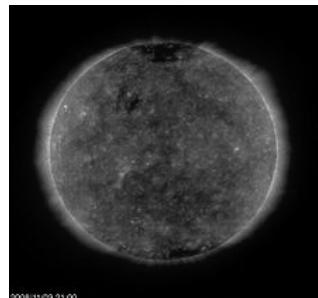


Figure 11-1 : *Le soleil vu dans les ultraviolets par le télescope EIT de SoHO.*

Le rayonnement **ultraviolet** (UV) est un rayonnement électromagnétique d'une longueur d'onde intermédiaire entre celle de la lumière visible et celle des rayons X.

#### XI-1-1-Définition

Le nom signifie « au-delà du violet » (du latin *ultra* : « au-delà de »), le violet étant la couleur de fréquence la plus élevée (et donc de longueur d'onde la plus courte) de la lumière visible.

Les ultraviolets peuvent être subdivisés en :

Ultraviolet proche (A) le domaine pour laquelle  $4000(\text{\AA}) > \lambda > 3150\text{\AA}$

Ultraviolet moyen (B)..... $3150(\text{\AA}) > \lambda > 2800\text{\AA}$

Ultraviolet lointain et extrême (C)..... $2800(\text{\AA}) > \lambda > 136\text{\AA}$

On appelle parfois, du nom des savants qui les ont étudiés :

- UV de SCHUMANN le domaine qui va de 1850 à 1200 $\text{\AA}$ ,
- UV de LYMAN celui de 12300 à 500 $\text{\AA}$ ,
- UV de MILLIKAN CELUI DE 500 0 136 $\text{\AA}$ .

Ces deux derniers ne peuvent être étudiés que dans le vide (l'air étant trop absorbant) et à l'aide de réseaux. Les verres usuels : crown et surtout flints, sont opaques pour l'ultraviolet moyen et lointain, alors que le quartz est transparent jusque vers 1850 $\text{\AA}$ , la fluorine jusque vers 1200. Les ultraviolets sont la cause du bronzage et à haute dose sont nocifs pour la santé humaine. Ils peuvent provoquer des cancers cutanés tel que le mélanome, provoquer un vieillissement prématué de la peau (rides), des brûlures (coup de soleil), des cataractes ...

### **XI-1-2-Généralités sur Ultraviolet**

Près de 5 % de l'énergie du Soleil est émise sous forme de rayonnement UV. Ces rayons UV sont classés dans trois catégories en fonction de leur longueur d'onde : les UV-A, UV-B et UV-C. Toutefois, en raison de l'absorption des UV par la couche d'ozone de l'atmosphère, 99 % de la lumière UV qui atteint la surface de la Terre appartient à la gamme des UV-A.

Les UV traversent l'atmosphère même par temps froid ou nuageux ; ils n'ont rien à voir avec la sensation de chaleur procurée par le Soleil qui est due aux infrarouges. Ils sont plus nombreux entre 12 heures et 16 heures et à haute altitude, car en traversant une plus petite distance dans l'atmosphère, ils ont moins de chance d'être interceptés par des molécules d'ozone. Les UV sont réfléchis par l'eau (5 % des UV réfléchis), le sable (20 % des UV réfléchis), l'herbe (5 % des UV réfléchis) et surtout la neige (85 % des UV réfléchis). Le trou dans la couche d'ozone est potentiellement dangereux en raison de la nocivité importante des ultraviolets.

Les récepteurs servant à l'études de l'ultraviolet sont le plus souvent photographies ou photoélectriques. On utilise une substance fluorescente, transformant le rayonnement en un autre de plus grande longueur d'onde perçu à son tour par un récepteur photoélectrique, ou même par l'œil. Les radiations de courte longueur d'onde ont parfois été dites « chimiques », parce qu'elles favorisent certaines réactions, en particulier de photosynthèse.

Dans la majorité de l'Europe, le soleil de midi, le plus agressif, est en été vers 14 heures, c'est pourquoi il est déconseillé de s'exposer entre 12 heures et 16 heures, tout particulièrement à proximité de l'eau ou de la neige qui réverbèrent une partie des UV ou en montagne où les taux d'UV sont plus importants.

### **XI-1-3-Effets sur la santé**

En faible quantité, le rayonnement UV est bénéfique et indispensable à la synthèse de vitamine D. Les UV servent également à traiter plusieurs maladies, dont le rachitisme, le psoriasis, l'eczéma et l'ictère. En plus de la haute quantité lors d'expositions prolongées au soleil, ils peuvent provoquer des cancers cutanés, un vieillissement prématûr de la peau ainsi que des cataractes.

### **XI-1-4-L'indice UV**

L'indice UV (ou Index UV) est une échelle de mesure de l'intensité du rayonnement UV du Soleil, et du risque qu'il représente pour la santé.

L'indice UV se décline en 5 catégories, correspondant à un niveau de risque :

- 1 - 2 : Faible : port de lunettes de soleil en cas de journées ensoleillées.

- 3 - 5 : Modéré : couvrez-vous, portez un chapeau et des lunettes de soleil. Appliquez un écran solaire de protection moyenne (indice de 15 à 29) surtout si vous êtes à l'extérieur pendant plus de 30 minutes. Cherchez l'ombre aux alentours de midi quand le soleil est au zénith.
- 6 - 7 : Élevé : réduisez l'exposition entre 12 heures et 16 heures. Appliquez un écran solaire de haute protection (indice de 30 à 50), portez un chapeau et des lunettes de soleil, et placez-vous à l'ombre.
- 8 - 10 : Très élevé : sans protection, la peau sera endommagée et peut brûler. Évitez l'exposition au soleil entre 12 heures et 16 heures. Recherchez l'ombre, couvrez-vous, portez un chapeau et des lunettes de soleil, et appliquez un écran solaire de très haute protection (indice + 50).
- 11+ : Extrême : la peau non protégée sera endommagée et peut brûler en quelques minutes. Évitez toute exposition au Soleil, et si ce n'est pas possible couvrez-vous absolument, portez un chapeau et des lunettes de soleil, et appliquez un écran solaire de très haute protection (indice + 50).

#### **XI-1-4-1-Interactions UV- atmosphère**

- **L'absorption** : lors de leur traversée dans l'atmosphère, une partie des rayons UV est absorbée par les molécules de gaz (par les molécules d'oxygène par exemple). Ce phénomène crée de l'énergie capable de provoquer la dissociation de la molécule de gaz en deux autres molécules par exemple.
- **La diffusion** : les rayons ultraviolets peuvent aussi être diffusés par les molécules de gaz contenues dans l'atmosphère. Sachant que plus un rayon lumineux a une courte longueur d'onde plus il est diffusé (cela explique que nous percevons le ciel en bleu qui est la couleur de la lumière visible avec la plus courte longueur d'onde), on en conclut que les rayons UV sont fortement diffusés par les gouttelettes d'eau des différentes couches nuageuses. Mais cela n'entraîne pas forcément une baisse de l'intensité lumineuse : les nuages hauts n'entraînent pratiquement pas de baisse de l'intensité tandis que les nuages bas diffusent une grande partie des rayons UV vers le haut.
- **La réflexion** : les rayons UV sont réfléchis par le sol en fonction de la nature du sol. On mesure cette réflexion par une fraction que l'on appelle l'albédo comprise entre 0 et 1. La réflexion est particulièrement forte sur la neige (albédo de 0,9 ; 0,85 en UV).

#### **XI-1-4-2-La différence entre UV-A, UV-B et UV-C**

Ces trois types de rayonnements UV sont classés en fonction de leur activité biologique et de leur pouvoir de pénétration de la peau. Ils correspondent à trois plages de longueurs d'onde. Plus le rayonnement UV a une longueur d'onde longue, moins il est nocif (il se rapproche de la lumière visible) mais il a un pouvoir de pénétration cutanée plus important. Quand sa longueur d'onde diminue, il possède plus d'énergie, se rapproche des rayons X et donc est plus destructeur.

### **XI-1-4-2-1-Les UV-A (4000Å>λ>3150Å)**

Les UV-A, dont la longueur d'onde est relativement longue, représentent près de 95 % du rayonnement UV qui atteint la surface de la Terre. Ils peuvent pénétrer dans les couches profondes de la peau. Ils sont responsables de l'effet de bronzage immédiat. En outre, ils favorisent également le vieillissement de la peau et l'apparition de rides, en perturbant l'équilibre des synthèses de protéines (en particulier la dégradation du collagène) et dans les cellules ils sont à l'origine de la production de radicaux libres, très dommageables pour celles-ci. Pendant longtemps, on a pensé que les UV-A ne pouvaient être à l'origine de lésions durables. Des études récentes laissent fortement à penser qu'ils pourraient également favoriser le développement des cancers cutanés (ils affectent l'ADN de la cellule)<sup>[1]</sup>.

Les UVA sont dangereux pour les yeux des enfants dont le cristallin ne joue que partiellement son rôle de filtre. 90 % des UV-A atteignent la rétine chez le nourrisson et encore 60 % avant l'âge de 13 ans. Chez l'adulte de plus de 20 ans, le cristallin arrête les UV-A presque à 100 %.

### **XI-1-4-2-2-Les UV-B (3150Å>λ>2800Å)**

Les UV-B, de longueur d'onde moyenne, ont une activité biologique importante, mais ne pénètrent pas au-delà des couches superficielles de la peau, ils sont relativement absorbés par la couche cornée de l'épiderme (mélanine). Une partie des UV-B solaires est filtrée par l'atmosphère. Ils sont responsables du bronzage et des brûlures à retardement. Ils sont capables de produire de très fortes quantités de radicaux libres oxygénés dans les cellules de la peau, responsables à court terme des coups de soleil et de l'inflammation. Outre ces effets à court terme, ils favorisent le vieillissement de la peau en abîmant les fibres de collagène et l'apparition de cancers cutanés.

De fortes intensités d'UV-B sont dangereuses pour les yeux et peuvent causer le « flash du soudeur » ou photokératite, car ils ne sont arrêtés qu'à 80 % par le cristallin de l'adulte. Chez l'enfant, la moitié des UV-B atteint la rétine des nourrissons et 25 % avant l'âge de 10 ans. En revanche, ils peuvent être bénéfiques pour certains types de pathologies de la peau telle que le psoriasis ou la synthèse de vitamine D. Certaines études indiquent en outre que les bénéfices des courtes expositions aux UV-B (10 minutes quelques fois par semaine) seraient plus grands que les risques.

### **XI-1-4-2-3-Les UV-C (2800Å>λ>136Å)**

Les UV-C, de courte longueur d'onde, sont les UV les plus nocifs, mais ils sont complètement filtrés par la couche d'ozone de l'atmosphère et n'atteignent donc pas théoriquement la surface de la Terre. Toutefois, des lampes UV-C sont utilisées en laboratoire de biologie pour les effets germicides, afin de stériliser des pièces ou des appareils (hotte à flux laminaire, par exemple).

La bande spectrale des UV-C est constituée de trois sous bandes:

- UV-C de 280 à 200 nm.
  - V-UV de 200 à 100 nm, c'est-à-dire les UV exploités dans le vide uniquement.
  - X-UV de 100 à 10 nm, transitions électromagnétiques entre les UV et les rayons X.

## XI-1-5-Protection

Pour se défendre contre la lumière UV, le corps, selon le type de peau, réagit aux expositions en libérant le pigment brun de mélanine. Ce pigment absorbe les UV, ce qui permet de bloquer leur pénétration et d'empêcher des dommages aux couches plus profondes et plus vulnérables de la peau. Des antioxydants (vitamines E et C,  $\beta$ -carotène...) peuvent neutraliser les radicaux libres formés par les UV.

Les vêtements et lunettes de soleil arrêtent une partie des UV. Il existe des lotions qui contiennent des filtres ultraviolets bloquant en partie les UV, néanmoins, la plupart des dermatologues recommandent de ne pas prendre de bain de soleil prolongé.

## XI-1-6-Astronomie

En astronomie, les objets très chauds émettent préférentiellement de la lumière UV (loi de Wien). Toutefois, la même couche d'ozone qui nous protège des UV intenses provenant du Soleil cause des difficultés aux astronomes observant à partir de la Terre. C'est pourquoi la plupart des observations UV sont faites à partir de l'espace.

## XI-1-7-Utilisation

Les lampes fluorescentes produisent de la lumière UV dans leur tube contenant un gaz à basse pression ; un enduit fluorescent sur l'intérieur des tubes absorbe les UV qui sont ensuite réémis sous forme de lumière visible. Les lampes halogènes produisent également des UV et ne doivent pas être utilisées sans leur verre de protection.

Des lampes UV sont également utilisées pour analyser des minéraux ou des gemmes ou pour identifier toute sorte de choses, par exemple des billets de banque. Des objets peuvent paraître semblables sous la lumière visible et différente sous la lumière UV. Des colorants fluorescents UV sont employés dans de nombreuses applications (par exemple en biochimie ou dans certains effets spéciaux).

Des lampes UV de longueur d'onde 253,7 nm (lampe à décharge à vapeur de mercure) sont utilisées pour stériliser des zones de travail et des outils utilisés dans des laboratoires de biologie et des équipements médicaux. Puisque les micro-organismes peuvent être protégés de la lumière UV par de petites fissures présentes dans le support, ces lampes sont utilisées seulement comme supplément à d'autres techniques de stérilisation. La lumière UV est employée pour la photolithographie à très haute résolution, comme cela est exigé pour la fabrication des semi-conducteurs.

Les UV sont aussi utilisés pour le séchage des encres et le durcissement de certaines colles. Il est recommandé d'employer des protections pour les yeux lorsqu'on travaille avec de la lumière UV, particulièrement pour les UV de courte longueur d'onde. Des lunettes solaires ordinaires peuvent offrir une certaine protection, mais elles sont souvent insuffisantes.

La vision des insectes, telle celle des abeilles, s'étend dans le spectre de l'ultraviolet proche (UV-A), et les fleurs ont souvent des marques visibles par de tels polliniseurs. Certains pièges à insectes utilisent ce phénomène.

## XI-2- Lumière visible

### XI-2-1-Définition

On appelle lumière visible la partie du spectre des ondes électromagnétiques qui est perceptible par l'œil humain. Il s'agit d'une bande de fréquence limitée par les valeurs suivantes :  $3,8 \cdot 10^{-14}$  Hz et  $7,5 \cdot 10^{-14}$  Hz.

La lumière visible, à laquelle sont sensibles les yeux, constitue une mince fraction du spectre électromagnétique, et comprend les rayonnements de longueurs d'onde comprises entre 440 et 780nm ( $10^{-9}$  m) ; un rayonnement à 440 nm est perçu comme une lumière violette; à 780 nm la lumière est rouge. Les longueurs d'onde intermédiaires sont perçues en bleu, vert, jaune et orange, l'œil humain étant capable de distinguer plusieurs centaines de nuances, en particulier dans le vert, auquel il est sensible comme l'indique le tableau suivant.

Le violet a une longueur d'onde plus courte que le rouge.

Tableau 13-1 : Longueurs d'ondes de la lumière visible

Couleur	Longueur d'onde $\lambda$ en nanomètres (nm):
rouge	780
orange	610
jaune	590
vert	560
bleu	500
violet	440

NB :  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$

**XI-2-2-Figure de spectre de la lumière visible**

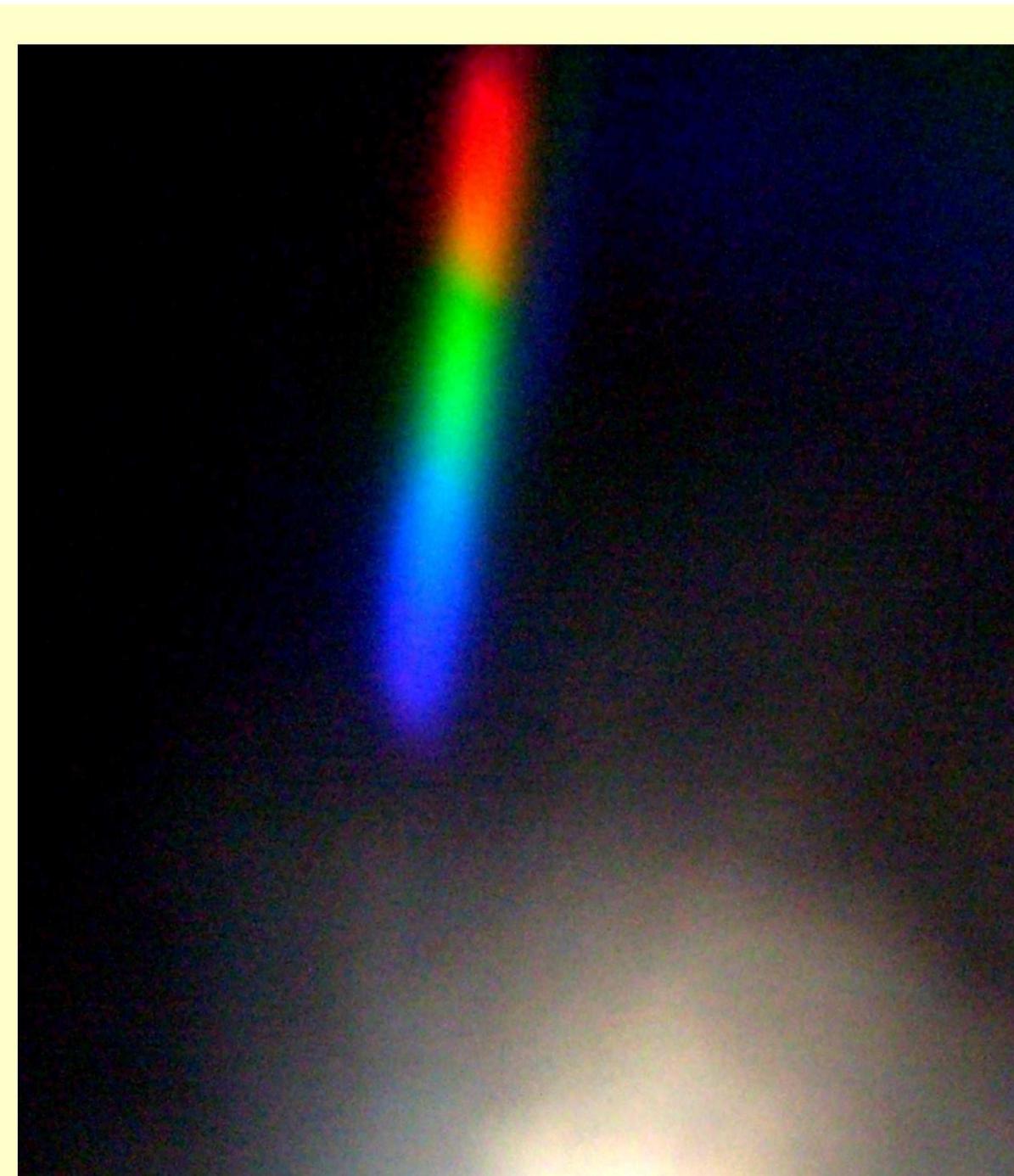


Figure11-2 : *Image du spectre de la lumière visible*

### XI-2-3- Caractéristique de la lumière blanche

Les objets blancs diffusent toutes les radiations lumières qu'ils reçoivent. Un corps noir ne diffuse aucune radiation lumineuse, il les absorbe toutes. La couleur d'un objet dépend non seulement de l'objet lui-même mais aussi de la lumière qui l'éclaire.

### XI-3- INFRAROUGE

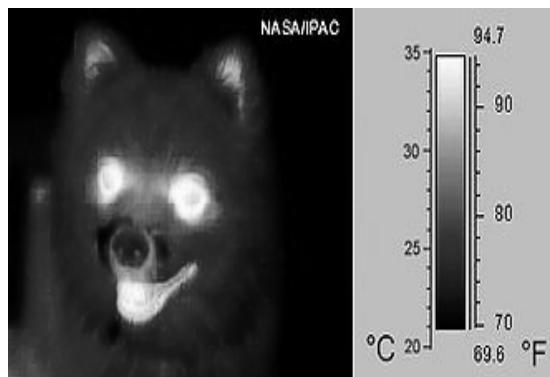


Figure11-3 : *Image infrarouge de longueur d'onde moyenne d'un petit chien en fausse couleur*

Le rayonnement **infrarouge (IR)** est un rayonnement électromagnétique d'une longueur d'onde supérieure à celle de la lumière visible mais plus courte que celle des micro-ondes. Les limites du spectre visible sont mal définies. Dans le rouge extrême, des lumières de longueurs d'onde dépassant  $0,85\mu$  sont perceptibles par certains yeux, pourvu que la puissance qu'elles transportent soit suffisante.

#### XI-3-1-Définition

Le nom signifie « en deçà du rouge » (du latin *infra* : « plus bas »), car l'infrarouge est une onde électromagnétique de fréquence inférieure à celle de la lumière rouge. La longueur d'onde de l'infrarouge est comprise entre 780 nm et 1 000 000 nm (ou encore entre 0,78  $\mu$ m à 1 000  $\mu$ m).

L'infrarouge est subdivisé en :

- Infrarouge proche (ou IR-A) le domaine pour lequel : ( $0,78 \mu\text{m} < \lambda < 1,4 \mu\text{m}$ ),
- Infrarouge moyen (ou IR-B): le domaine sur lequel : ( $1,4 \mu\text{m} < \lambda < 3 \mu\text{m}$ ),
- Infrarouge lointain ou (IR-C) : le domaine lequel : ( $3 \mu\text{m} < \lambda < 1 000 \mu\text{m}$ ).

Cette classification n'est cependant pas universelle : les frontières varient d'un domaine de compétence à l'autre sans que l'on ne puisse donner raison à qui que ce soit. Le découpage

peut être lié à la longueur d'onde (ou à la fréquence) des émetteurs, des récepteurs (détecteurs), ou encore aux bandes de transmission atmosphérique.

L'infrarouge est associé à la chaleur car, à température ambiante ordinaire, les objets émettent spontanément des radiations dans le domaine infrarouge ; la relation est modélisée par la loi du rayonnement du corps noir dite aussi loi de Planck. La longueur d'onde du maximum d'émission d'un corps noir porté à une température absolue  $T$  (en kelvin) est donnée par la relation  $2898/T$  connue sous le nom de loi du déplacement de Wien. Cela signifie qu'à température ambiante ordinaire ( $T$  aux environs de 300 K), le maximum d'émission se situe aux alentours de 10  $\mu\text{m}$ , la plage concernée étant 8-13  $\mu\text{m}$ . Placé à la surface terrestre, un télescope observant dans cette gamme de longueur d'ondes serait donc aveuglé par le fond thermique émis par les objets environnants, c'est pourquoi on envoie les télescopes infrarouges dans l'espace.

Cette association entre l'infrarouge et la chaleur n'est cependant due qu'à la gamme de température observée à la surface de la Terre. Il est parfaitement possible de générer un rayonnement infrarouge qui ne soit pas thermique, c'est-à-dire dont le spectre ne soit pas celui du corps noir ; par exemple, les diodes électroluminescentes utilisées dans les télécommandes « n'émettent pas de chaleur ».

### **XI-3-2 Généralités**

Les sources d'infrarouge les plus utilisées sont, d'une part, l'arc au mercure à enveloppe de quartz, d'autre part, des corps incandescents comme le soleil, l'arc électrique, le bec AUER, les brûlures NERST et globar. La répartition, en fonction de la longueur d'onde, de la puissance émise par un corps incandescent noir à la température absolue  $T$  présente un maximum pour une valeur  $\lambda_m$  de  $\lambda$  telle que  $\lambda_m = 2900\mu.\text{dg}$ .

La désignation de « rayonnement calorifique » était autrefois réservée (à tort) à l'infrarouge, dont l'étude se faisait au mieux à l'aide de récepteurs thermiques, tels que les thermophiles; ces récepteurs sont encore les plus utilisés dans l'infrarouge lointain, mais ils peuvent aussi déceler et mesurer des rayonnements de n'importe quelle longueur d'onde, si la puissance reçue est suffisante. Dans le proche infrarouge, on utilise également des émulsions photographiques et certaines cellules photoélectriques.

### **XI-3-3--Utilisations**

#### **XI-3-3-1-Chauffage**

Les lampes à capteurs infrarouges sont utilisées dans des domaines de la production quotidienne. Les secteurs de l'automobile, l'agroalimentaire, les textiles, la plasturgie, le

formatage des matières, les soins du corps etc. sont concernés par des applications de chauffage de matières. Ces techniques de chaleur particulières et innovatrices permettent un gain de productivité et une économie du coût de production qui se caractérise en temps gagné et en énergie dépensée.

#### **XI-3-3-2-Vision nocturne**



Figure 11-4 : *Caméra infrarouge de type FLIR (Forward Looking Infrared Radar), montée sur un hélicoptère UH-1 Huey*

Les infrarouges sont utilisés dans les équipements de vision de nuit, quand la quantité de lumière est tellement faible, qu'on ne peut même pas l'amplifier suffisamment, pour voir les objets. Le rayonnement est détecté puis affiché sur un écran, les objets les plus chauds devenant aussi les plus lumineux. Il faut également ajouter comme utilisation, en plus de la vision de nuit, tout le domaine de la thermographie infrarouge permettant de voir et de mesurer à distance et sans contact la température d'objets cibles. Dans certains cas, un projecteur d'infrarouge associé au système de vision, permet de visualiser des objets sans chaleur intrinsèque, par réflexion.

#### **XI-3-3-3-Guidage**



Figure 11-5: *Détecteur d'émetteurs d'infrarouge, le plus souvent un missile à guidage de ce type, posé sur un avion militaire, ici un OV-10 Bronco*

Les infrarouges sont également utilisés dans le domaine militaire pour le guidage des missiles air-air ou anti-aériens : un détecteur infrarouge guide alors le missile vers la source de chaleur que constitue le (ou les) réacteur de l'avion cible. De tels missiles peuvent être évités par des manœuvres spéciales (alignement avec le Soleil) ou par l'utilisation de leurres thermiques. Il existe également des détecteurs d'émetteurs de ce type de fréquence infrarouge que l'on pose directement sur la carlingue.

#### **XI-3-3-4-Détecteurs d'intrusion**



Figure 11-6 : *Détecteur de mouvements à infrarouge*

Certains détecteurs de mouvements (associés aux systèmes de détection d'intrusion) appelés IRP (pour Infra Rouge Passif), utilisent le rayonnement en infrarouge émis par l'ensemble des objets du local surveillé (y compris les murs). La pénétration d'un individu provoque une modification du rayonnement. Lorsque cette modification est constatée sur plusieurs faisceaux (découpage du rayonnement total de la pièce par une lentille de Fresnel), un contact électrique envoie une information d'alarme à la centrale.

#### **XI-3-3-5-Communication**



Figure 11-7: *Télécommande à infrarouge*

Une utilisation plus commune est leur usage dans les commandes à distance (télécommandes), où ils sont préférés aux ondes radio, car ils n'interfèrent pas avec les autres signaux électromagnétiques comme les signaux de télévision. Dans ce domaine, il existe plusieurs codages des informations (RC5 pour Philips, SIRCS pour Sony, etc.). Les infrarouges sont aussi utilisés pour la communication à courte distance entre les ordinateurs et leurs périphériques. Les appareils utilisant ce type de communication sont généralement conformes aux standards publiés par l'Infrared Data Association (IrDA).

La lumière utilisée dans les fibres optiques est généralement de l'infrarouge. Pour cette application, on exploite les longueurs d'onde où l'absorption propre du matériau constituant la

fibre est minimale : 1,3 µm et 1,55 µm. Ils sont très utilisés dans le domaine de la robotique ou dans les appareils nécessitant des transmissions de données à courte distance sans obstacle.

### XI-3-6-Spectroscopie

En outre, la spectroscopie infrarouge est une des méthodes utilisées pour l'identification des molécules organiques et inorganiques à partir de leurs propriétés vibrationnelles (les méthodes principales restent la RMN et la spectrométrie de masse). En effet, le rayonnement infrarouge excite des modes de vibration (déformation, élongation) spécifiques de liaisons chimiques. La comparaison entre rayonnement incident et transmis à travers l'échantillon suffit par conséquent à déterminer les principales fonctions chimiques présentes dans l'échantillon.

Le *proche infrarouge* peut être utilisé pour déterminer la teneur en lipides d'aliments ou d'animaux vivants (ex : saumon atlantique d'élevage vivant) par une technique non-destructive <sup>[1]</sup>.

L'astronomie infrarouge est difficile à cause de l'atmosphère terrestre. C'est pour cela que les astronomes envoient des satellites infrarouge : IRAS (1983 ; NASA, Royaume-Uni, Pays-Bas), ISO (1995 ; ESA), Wire (1999 ; USA, échec au lancement), Spitzer (2003 ; ex-SIRTF, USA), ASTRO-F (2006 ; Japon) et Herschel (2009 ; ESA).

### XI-3-7-Banque

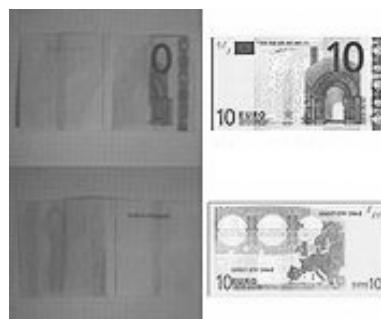


Figure 11-8: *Billet de 10 euros à l'infrarouge (à gauche)*

Aujourd'hui, les rayons infrarouges sont aussi utilisés pour le contrôle d'authenticité de billets de banque. De cette manière, ils se prêtent particulièrement pour la détection de faux billets.

## CHAPITRE XII :

### LES ONDES DE FAIBLE FREQUENCE

*(Radiations hertziennes)*

#### **XII-1-Définition**

Les ondes hertziennes sont des ondes électromagnétiques qui véhiculent des informations (sons, musique, images) sur de grandes distances sans aucun support matériel.

#### **XII-2-Emission et réception d'ondes hertziennes**

Un émetteur d'ondes hertziennes est constitué d'un oscillateur électrique entretenu relié à une antenne émettrice. L'oscillateur crée un courant électrique sinusoïdal qui parcourt l'antenne émettrice. Une partie de l'énergie électrique produite est alors rayonnée par l'antenne. L'émetteur génère des oscillations électriques à une fréquence radio dite fréquence porteuse: c'est l'onde porteuse, qui est modulée en amplitude ou en fréquence.

#### **XII-3-Utilisation**

Les ondes radio sont utilisées non seulement pour la diffusion d'émissions radio-phoniques, mais aussi pour la télégraphie sans fil, la transmission des communications téléphoniques, la télévision, le radar, les systèmes de navigation et les communications spatiales. Dans l'atmosphère, les caractéristiques physiques de l'air entraînent de légères variations dans le mouvement ondulatoire et dans sa propagation, ce qui génère des erreurs dans des systèmes comme le radar. Les orages ou les perturbations électriques produisent également des irrégularités dans la propagation des ondes radio.

Dans une atmosphère uniforme, la propagation des ondes électromagnétiques s'effectue en ligne droite ; la surface de la Terre étant approximativement sphérique, les communications radio sur de longues distances sont permises par réflexion sur la couche de l'ionosphère. Les rayonnements hertziens de longueur d'onde inférieure à 10 m — que l'on répartit en hautes, très hautes et super hautes fréquences (VHF, UHF et SHF) — ne sont normalement pas réfléchis. La réception de ces ondes très courtes ne sera donc possible, en pratique, qu'en des points visibles en droite ligne de l'émetteur (portée optique). Les longueurs d'onde inférieures à quelques centimètres sont absorbées par les gouttelettes d'eau en suspension et par les nuages.

Tableau 12-1: *Ondes Hertziennes avec leur utilisation*

Dénomination	Longueur d'ondes	Fréquence	Usage
EHF: Extremly High Fréquences	1mm à 10mm	100GHz à 10GHz	
SHF: Super High Fréquences	10mm à 100mm	10 GHz à 1 GHz	Communication par satellite, radar
UHF: Ultra-haute Fréquence	100mm à 1 m	1 GHz à 100 MHz	Télévision
THF: Très Haute Fréquence	1m à 10m	100MHz à 10 MHz	Fréquence moyenne
HF: Haute fréquence	10m à 100m	10 MHz à 1MHz	<i>Ondes Courtes</i>
MF: Moyenne fréquence	100m à 1 Km	1 MHz à 100KHz	<i>Ondes Moyennes</i>
BF: Basse Fréquence	1 Km à 10 Km	100KHz à 10KHz	<i>Grandes Ondes</i>

## XII-4- L'onde Radio

En radiocommunication, et ce sera le sens développé dans cet article, le domaine des « hautes fréquences » (« *High Frequencies* » en anglais, abrégé en **HF**), désigne les ondes radio dont la fréquence est comprise entre 3 MHz et 30 MHz. Elles sont également appelées « ondes décamétriques », c'est-à-dire que leur longueur d'onde est comprise entre 10 et 100 mètres. Le terme « ondes courtes » (OC) est aussi encore utilisé, en particulier pour la radiodiffusion mondiale, mais ses limites sont moins précises.

### ***Les différents types d'ondes radio sont:***

Ondes Courtes, Ondes Moyennes, Grandes Ondes.

#### XII-4-1-L'Ondes courtes

Le terme *émission radio à ondes courtes* désigne en général les transmissions radio dans le domaine des hautes fréquences (3 à 30 MHz) sur de longues distances, en particulier pour les communications internationales.

Les radioamateurs se sont vus attribuer des fréquences dans la bande des ondes courtes, mais on leur en affecte également dans celles des ondes moyennes, des très hautes fréquences et des ultra hautes fréquences. Certaines de ces fréquences font l'objet de restrictions afin de les rendre disponibles au plus grand nombre d'utilisateurs. Les radioamateurs ont réalisé des prouesses spectaculaires, comme le premier contact radio

transatlantique (1921) sur ondes courtes, domaine délaissé par les professionnels mais qui se révéla décisif pour le développement de la radiotéléphonie commerciale intercontinentale.

#### **XII-4-1-1-Utilisation**

##### **XII-4-1-1-1-Radiodiffusion**

La radiodiffusion en ondes courtes utilise des bandes spécifiques entre 2 MHz et 25 MHz, repérées par leur dénomination historique de longueur d'onde (exemple: « bande des 41 m »). Chaque programme est émis sur plusieurs fréquences pour permettre sa réception selon la propagation. De par la simplicité et le faible coût des récepteurs, elle est utilisée principalement comme lien avec les expatriés, comme média d'influence ou de rayonnement culturel.

##### **XII-4-1-1-2-Organisations diverses**

Les communications fixes ou mobiles en hautes fréquences sont utilisées comme moyen de liaison de secours (qui peut être sécurisé via certains modes) par les ambassades, certains ministères, les agences de presse (rarement), les services de secours, les militaires et les sociétés, ainsi que comme lien avec les points isolés non couverts par des réseaux terrestres ou satellitaires (régions polaires ou zones isolées). Leur avantage est l'autonomie vis-à-vis des infrastructures, par exemple en cas de conflit ou de catastrophe.

#### **XII-4-1-1-3-Maritime**



Figure 12-1 : Antennes HF sur un navire

Pour le trafic maritime, les liaisons HF utilisent des bandes réparties sur le spectre, la bande de 1,6 MHz à 4 MHz hors du spectre « HF » strict, est souvent appelée MHF (*medium high frequency*), ou « bande marine ». La fréquence 2182 kHz est la fréquence internationale de détresse pour la bande comprise entre 1 605 kHz et 4 000 kHz .

Les communications sont de plus en plus en numérique, mais la BLU reste utilisée pour la sécurité et les contacts ponctuels. De nombreuses stations côtières transmettent

l'évolution des bulletins météorologiques et de circulation et assurent les communications des navires avec la terre.

#### **XII-4-1-4-Aéronautique**

Ces fréquences sont utilisées pour les vols longs courriers, mais l'utilisation est difficile. La portée étant de plusieurs milliers de kilomètres, les communications captées sont très nombreuses. Certains phénomènes, comme les cycles solaires, peuvent rendre toute communication impossible pendant plusieurs heures, soit ainsi, sur des milliers de kilomètres. Ainsi, toutes les liaisons, par exemple, entre Paris et New York font l'objet d'un contrôle aérien assuré par voix via des centres régionaux de part et d'autre de l'Atlantique (Shanwick, Santa Maria, Gander...). De nombreuses stations VOLMET continuent à fournir des prévisions météorologiques pour la plupart des grands aéroports des différents continents. Pour fiabiliser ce mode de communication, un système d'appel SELCAL, émettant un signal lumineux et sonore, permet au pilote d'être informé de l'appel de la station sol, et ainsi de l'avertir d'établir le contact radio.

#### **XII-4-1-5-Amateurs**



Figure 12-2 : *Antenne HF multibande radioamateur*

Les radioamateurs et les cibistes continuent d'utiliser les bandes amateurs en hautes fréquences pour des contacts à longues distances (souvent intercontinentales).

#### **XII-4-1-6-Antennes**

La dimension d'une antenne est directement liée à la longueur d'onde du signal à transmettre ou plus exactement à la moitié de cette longueur d'onde, de 50 m à 5 m pour les HF. Les antennes HF sont donc généralement volumineuses.

Pour des liaisons amateur ou mobiles en dessous de 10 MHz, les antennes sont généralement filaires, au-dessus de cette fréquence les dimensions permettent l'utilisation facile des antennes yagi-uda, quad, delta-loop...

Pour des liaisons fixes ou des centres de transmission, des antennes de type « log-périodique » rotatives, des réseaux de dipôles ou de verticales ou des « losanges », demandent des structures volumineuses ou de grandes surfaces.

Les antennes actives ou les boucles magnétiques, de volume plus réduit, fonctionnent correctement en réception seule.

#### XII-4-1-1-7-Mode de propagation

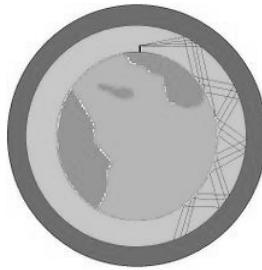


Figure 12-3 : *La propagation par onde réfléchie entre ciel et terre.*

Les ondes décimétriques se propagent par réflexions successives entre le sol ou la mer et les couches E, F, F1 et F2 et par l'onde de sol. Elles peuvent ainsi être reçues à une grande distance de l'émetteur, même en présence d'obstacles (relief) ou même lorsque la courbure de la surface terrestre empêche une liaison en vue directe entre la station émettrice et la station réceptrice.

La propagation des ondes HF dépend donc fortement de la réflexion sur les couches de l'ionosphère. Si celle-ci est davantage ionisée par le rayonnement solaire, elle assure une meilleure propagation des ondes décimétriques. Aussi l'alternance jour-nuit a-t-elle une influence notable sur la qualité de propagation des ondes décimétriques, ainsi que le cycle solaire.

- Pour les radiocommunications intercontinentales, on peut résumer :
- de 50 m à 30 m (6 MHz à 10 MHz) : ce sont des bandes nocturnes pour lesquelles la réception n'est possible à grande distance que lorsqu'il fait nuit entre les lieux d'émission et de réception,
- de 30 m à 20 m (10 MHz à 15 MHz) : ce sont des bandes « mixtes » avec les meilleures réceptions lorsque l'émetteur est dans le jour et le récepteur dans la nuit, ou inversement,
- de 20 m à 12 m (15 MHz à 26 MHz) : ce sont des bandes diurnes, on obtient les meilleures réceptions à grande distance lorsque le parcours entre l'émetteur et le récepteur est éclairé par le soleil.
- Pour les radiocommunications continentales et nationales, on peut résumer :

- de nuit : bandes de 3 MHz à 8 MHz,
- de jour : bandes de 5 MHz à 16 MHz.

Propagation sur ondes courtes.

#### **XII-4-1-1-8-Utilisations publiques**

Les hautes fréquences en Europe, l'ouest du Moyen-Orient, Afrique, le nord de l'Asie (UIT région 1) ont des assignations spécifiques.

*Tableau 12-2 : Utilisation d'ondes courtes en publiques*

Fréquence	Utilisation
2 850 à 3 155 kHz	– Service aéronautique, compagnies, <u>contrôle du trafic aérien</u> , communications entre les aéronefs, <u>VOLMET</u>
3 155 à 3 230 kHz	– <u>bande marine et système de correction auditive personnelle à très courte portée</u>
3 230 à 3 400 kHz	– <u>bande marine et radiodiffusion tropical</u> bande des 90 mètres <i>et détection antivol</i>
3 400 à 3 500 kHz	– Service aéronautique, compagnies, <u>contrôle du trafic aérien</u> , communications entre les aéronefs, <u>VOLMET</u>
3 500 à 3 800 kHz	– Trafic <u>radioamateur</u> bande des 80 mètres <i>et bande marine et Organisations divers fixes et mobiles</i>
3 500 à 3 800 kHz	– Trafic <u>radioamateur</u> bande des 80 mètres <i>et bande marine et Organisations divers fixes et mobiles</i>
3 800 à 3 900 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
3 900 à 4 000 kHz	– <u>Radiodiffusion</u> OC publique longue distance bande des 75 mètres
4 000 à 4 515 kHz	– <u>bande marine</u> des 4 MHz <i>et Organisations</i> divers fixes et mobiles
4 515 à 4 650 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
4 650 à 4 750 kHz	– Service aéronautique, compagnies, <u>contrôle du trafic aérien</u> , communications entre les aéronefs, <u>VOLMET</u>
4 750 à 4 995 kHz	– <u>Radiodiffusion</u> OC publique longue distance bande des 60 mètres
4 995 à 5 005 kHz	– Émission précise de fréquence <i>et d'horaire exact</i> à des fins scientifiques et d'étalonnage
5 005 à 5 060 kHz	– <u>Radiodiffusion</u> OC publique longue distance bande des 60 mètres

5 060 à 5 480 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
5 480 à 5 730 kHz	– Service aéronautique, compagnies, <u>contrôle du trafic aérien</u> , communications entre les aéronefs, <u>VOLMET</u>
5 730 à 6 200 kHz	– <u>Radiodiffusion</u> OC publique longue distance bande des 49 mètres
6 200 à 6 522 kHz	– <u>bande marine</u> des 6 MHz
6 525 à 6 765 kHz	– Service aéronautique, compagnies, <u>contrôle du trafic aérien</u> , communications entre les aéronefs, <u>VOLMET</u>
6 765 à 7 000 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
7 000 à 7 200 kHz	– Trafic <u>radioamateur</u> bande des 40 mètres
7 200 à 7 350 kHz	– <u>Radiodiffusion</u> OC publique longue distance bande des 41 mètres
7 350 à 8 101 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles, détection <u>antivol</u>
8 101 à 8 812 kHz	– <u>bande marine</u> des 8 MHz et <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles, détection <u>antivol</u>
8 815 à 9 040 kHz	– Service aéronautique, compagnies, <u>contrôle du trafic aérien</u> , communications entre les aéronefs, <u>VOLMET</u>
9 040 à 9 400 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
9 400 à 9 900 kHz	– <u>Radiodiffusion</u> OC publique longue distance bande des 31 mètres
9 995 à 10 005 kHz	– Émission précise de fréquence et <u>d'horaire exact</u> à des fins scientifiques et d'étalonnage
10 005 à 10 100 kHz	– Service aéronautique, compagnies, <u>contrôle du trafic aérien</u> , communications entre les aéronefs, <u>VOLMET</u>
10 100 à 10 150 kHz	– Trafic <u>radioamateur</u> bande des 30 mètres et <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
10 150 à 11 175 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
11 175 à 11 400 kHz	– Service aéronautique, compagnies, <u>contrôle du trafic aérien</u> , communications entre les aéronefs, <u>VOLMET</u>
11 400 à 11 600 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles

11 600 à 12 160 kHz	– <u>Radiodiffusion</u> OC publique longue distance bande des 25 mètres
12 160 à 12 230 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
12 230 à 13 187 kHz	– <u>bande marine</u> des 12 MHz
13 200 à 13 360 kHz	– Service aéronautique, compagnies, <u>contrôle du trafic aérien</u> , communications entre les aéronefs, <u>VOLMET</u>
13 360 à 13 570 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
13 570 à 13 870 kHz	– <u>Radiodiffusion</u> OC publique longue distance bande des 22 mètres
13 870 à 14 000 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
14 000 à 14 350 kHz	– Trafic <u>radioamateur</u> bande des 20 mètres
14 350 à 14 990 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
14 990 à 15 010 kHz	– Émission précise de fréquence et <u>d'horaire exact</u> à des fins scientifiques et d'étalonnage
15 010 à 15 100 kHz	– Service aéronautique, compagnies, <u>contrôle du trafic aérien</u> , communications entre les aéronefs, <u>VOLMET</u>
15 100 à 15 800 kHz	– <u>Radiodiffusion</u> OC publique longue distance bande des 19 mètres
15 800 à 16 360 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
16 360 à 17 407 kHz	– <u>bande marine</u> des 16 MHz
16 360 à 17 407 kHz	– <u>bande marine</u> des 16 MHz
17 407 à 17 480 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
17 480 à 17 900 kHz	– <u>Radiodiffusion</u> OC publique longue distance bande des 16 mètres
17 900 à 18 030 kHz	– Service aéronautique, compagnies, <u>contrôle du trafic aérien</u> , communications entre les aéronefs, <u>VOLMET</u>
18 030 à 18 068 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles

18 068 à 18 168 kHz	– Trafic <u>radioamateur bande des 17 mètres</u>
18 168 à 18 900 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
18 900 à 19 020 kHz	– <u>Radiodiffusion</u> OC publique longue distance bande des 15 mètres
18 780 à 19 797 kHz	– <u>bande marine</u> des 18 MHz
19 800 à 19 900 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
19 990 à 20 010 kHz	– Émission précise de fréquence et <u>d'horaire exact</u> à des fins scientifiques et d'étalonnage
20 010 à 21 000 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
21 000 à 21 450 kHz	– Trafic <u>radioamateur bande des 15 mètres</u>
21 450 à 21 850 kHz	– <u>Radiodiffusion</u> OC publique longue distance bande des 13 mètres
21 850 à 21 924 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
21 924 à 22 000 kHz	– Service aéronautique, compagnies, <u>contrôle du trafic aérien</u> , communications entre les aéronefs, <u>VOLMET</u>
22 000 à 22 825 kHz	– <u>bande marine</u> des 22 MHz
22 000 à 23 200 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
23 200 à 23 350 kHz	– Service aéronautique, compagnies, <u>contrôle du trafic aérien</u> , communications entre les aéronefs, <u>VOLMET</u>
23 350 à 24 890 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
24 890 à 24 990 kHz	– Trafic <u>radioamateur bande des 12 mètres</u>
24 990 à 25 010 kHz	– Émission précise de fréquence et <u>d'horaire exact</u> à des fins scientifiques et d'étalonnage
25 010 à 25 070 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
25 070 à 26 210 kHz	– <u>bande marine</u> des 26 MHz

25 210 à 25 550 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
25 550 à 25 670 kHz	– <u>Radioastronomie et radioastronomie amateur.</u>
25 670 à 26 100 kHz	– <u>Radiodiffusion</u> OC publique longue distance bande des 11 mètres
26 100 à 26 310 kHz	– <u>bande marine</u> des 26 MHz
26 300 à 26 500 kHz	– Anciens <u>téléphones sans fil</u> agréés analogiques
26 500 à 26 960 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles, <u>26 600 à 26 880 kHz</u> <u>Radiomessagerie sur site</u>
26 965 à 27 405 kHz	– <u>CB bande des citoyens</u> , dite bande « 27 MHz » et bande des 11 mètres, <u>26 957 à 27 283 kHz Télécommande d'aéromodélisme</u>
27 410 à 28 000 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles
28 000 à 29 700 kHz	– Trafic <u>radioamateur</u> bande des 10 mètres
29 700 à 30 000 kHz	– <u>Organisations</u> divers fixes et mobiles

## XII-4-2-Ondes moyennes

### XII-4-2-1 Définition

On appelle **moyenne fréquence** (MF), *Medium frequency* en anglais, la bande de radiofréquences qui s'étend de 300 à 3 000 kHz (longueur d'onde de 1 km à 100 m). D'autres appellations peuvent être utilisées, comme MW ou PO pour la partie radiodiffusion de 525 à 1 605 kHz ou MHF pour la bande marine de 1 605 à 4 000 kHz.

Le terme « moyenne fréquence » a été aussi utilisé pour désigner la fréquence intermédiaire des récepteurs à changement de fréquence (récepteur superhétérodyne). Le terme « fréquence intermédiaire » est aujourd'hui préféré (FI ou *IF* en anglais). Les ondes moyennes (OM) sont aussi appelées ondes hectométriques, petites ondes (PO) et éventuellement MW ou AM (amplitude modulation). La Gamme de fréquences réservées à la radiodiffusion s'étend de 522 kHz à 1620 kHz en Europe.

Tableau 12-3 : Utilisation publique moyenne

Les bandes de fréquences ont des assignations spécifiques.

Fréquence en kHz	Utilisations
283.5 à 325	Radiophares: RTCM104/DGPS avec 1212.6 GHz; partager avec localisation et positions des orages
325 à 405	Radiophares aéronautiques
410	Fréquence normale de <u>radiogoniométrie</u> en radiotélégraphie (positions des navires)
415 à 423	<u>Radiophares</u> , service maritime, société en radiotélégraphie avec 415 à 495
424	Navtex en Japonais: navigation, météorologie, glaces, pilotage, urgence, détresse, avurnav.
425 à 440	Radiophares, service maritime, société en radiotélégraphie avec 415 à 495
440	Essai balise <u>radioamateur</u>
440 à 456	Radiophares, service maritime, société en radiotélégraphie avec 415 à 495
457	Système international de recherche rapide de victime d'avalanche
458 à 489	Service maritime, armée en radiotélégraphie avec 415 à 495
490	Navtex ( langue nationale ) : météorologie, glaces, avurnav et renseignements urgents
500 kHz	fréquence internationale de détresse et d'appel en radiotélégraphie
501 à 505	Radioamateurs en radiotélégraphie avec 100mW PAR bande des 600 mètres, (sauf en France)
505 à 510	Balises Radioamateurs aux États-Unis en radiotélégraphie lente avec 20 W
512	Fréquence internationale d'appel ( en cas de trafic de détresse sur <u>500 kHz</u> )
513 à 517	Service maritime côtier en radiotélégraphie avec 415 à 495
518	Navtex en anglais: navigation, météorologie, glaces, pilotage, urgence, détresse, avurnav.
519 à 526.5	Service maritime côtier en radiotélégraphie avec 415 à 495
527 à 1602	Radio-microphones expérimentaux sur la bande des petites ondes P maxi 10 mW en A.M.
527 à 1449	Radiodiffusion P.O. canaux en 9 kHz
1458	Essais D.A.B. <u>Digital Radio Mondiale</u> dans le canal de radiodiffusion P.O. 204,5 mètres
1467	Essais D.A.B. <u>Digital Radio Mondiale</u> dans le canal de radiodiffusion P.O. 203,25 mètres
1476	Canal de radiodiffusion P.O. longueur d'onde du canal : 203,25 mètres
1485	Canal de radiodiffusion locale en faible puissance longueur d'onde du canal : 202 mètres en A.M.
1494 à 1575	Radiodiffusion P.O. canaux en 9 kHz
1584	Canal de radiodiffusion locale en faible puissance longueur d'onde du canal : 189

	mètres en A.M.
1593	Canal de radiodiffusion. longueur d'onde du canal : 188 mètres
1602	Canal de radiodiffusion locale en faible puissance canal de 187 mètres en A.M.
1600 à 1720	Sauf en Europe: radiodiffusion P.O. bande des 191 à 174 mètres canaux en 9 et 10 kHz
1607 à 1625	Service maritime côtier, organisation diverse en U.S.B.
1625 à 1635	Évaluation de la position d'un transmetteur à des fins de localisation
1638 à 1797	Service maritime côtier, organisation diverse en U.S.B.
1800 à 1810	Radio goniométrie, Radiophares (et radioamateur sauf en Afrique et en Europe
1810 à 1850	Trafic <u>radioamateur</u> bande des 160 mètres en L.S.B.
1 851 à 2 000	Service maritime (et radioamateur sauf en Afrique et en Europe) en USB et detection antivol
2 000 à 2 042	Service maritime en USB
2 045 à 2 057	Service maritime mobile international P maxi 400W en USB
2 060 à 2 160	Service maritime mobile à Côte P maxi 400W en USB
2 160 à 2 170	Évaluation de la position d'un transmetteur à des fins de localisation.
2170.5	Fréquence internationale d'appel Sélectif Numérique pour les maritimes côtiers P maxi 400 W en Digimodes
2174.5	fréquence internationale de détresse, d'urgence et de sécurité en <u>radiotélélex</u>
2 177	Fréquence internationale d'appel Sélectif Numérique, station côtière a navire, navire à navire en Digimodes
2 182 kHz	<u>Canal international de détresse</u> en <u>radiotéléphonie</u> et d'appel aux heures H + 03 à 29 et de H + 33 à 59 en USB/AM
2187.5	Fréquence internationale d'appel Sélectif Numérique de détresse et sécurité en Digimodes
2189.5	Fréquence internationale d'appel Sélectif Numérique navire à station côtière (avec 2 177 kHz) en Digimodes
2 191	Fréquence internationale d'appel ( en cas de trafic de détresse sur 2 182 kHz ) P maxi 400 W en USB
2 194 à 2 300	Service maritime mobile, Organisation divers, Mobile ( Sauf avions ) en USB/Digimodes/CW
2 303 à 2 494	Maritime mobile entre eux, <u>radiodiffusion</u> tropical bande des 120 mètres en USB/AM/Digimodes/CW

2 498 à 2 502	Émission précise de fréquence et <u>d'horaire exact</u> à des fins scientifiques et d'étalonnage
2 498 à 2 502	Émission précise de fréquence et <u>d'horaire exact</u> à des fins scientifiques et d'étalonnage
2 502 à 2 579	Service maritime mobile à côte, organisation diverse, société, armée, mobile en Digimodes
2 582 à 2 850	Stations côtières maritimes, organisation diverse en USB/Digimodes
2 854 à 3 155	Service aéronautique et renseignement météo en vol en USB/Digimodes

### XII-4-3-Grandes Ondes

La bande radioélectrique des **basses fréquences** ou LF (*low frequency*) est la partie du spectre radioélectrique de fréquence comprise entre 30 kHz et 300 kHz (longueur d'onde de 10 à 1 km).

#### XII-4-3-1-Définitions

L'appellation BF étant utilisée également en acoustique pour désigner les signaux de fréquence 20 Hz à 20 kHz, on préférera le terme "audiofréquence" pour ces applications. Cette bande radioélectrique des basses fréquences est divisée en deux parties distinctes :

- la bande de 30 à 150 kHz est affectée aux signaux de radionavigation, en particulier le LORAN-C et l'ancien système DECCA, ainsi qu'aux émetteurs de diffusion de l'heure ou de météo en radiofacsimilé ;
- la bande de 150 à 300 kHz est utilisée pour la radiodiffusion ondes longues ou GO
- **Radiodiffusion**
- Les *grandes ondes* (GO) ou *ondes longues* (OL), *Long Waves* (LW) en anglais), sont utilisées par les stations de radio en modulation d'amplitude, pour des communications à moyenne distance (500 à 1 000 km). Cependant, depuis quelques années, leur utilisation tend à s'amenuiser, au profit de la bande FM. Les récepteurs radio grand public ne proposent désormais qu'assez rarement cette gamme d'onde.
- Il est encore utile de conserver un récepteur Grandes Ondes qui soit opérationnel aujourd'hui. En cas de catastrophe, la fréquence officielle pour obtenir des informations est France Inter sur la fréquence 162 kHz (émetteur d'Allouis).

Tab 12-4 : Quelques émetteurs autour du monde

Fréque n-ce	Émetteur	Pays	Lieu	Antenne	Puissance	Commen- taires
153 kHz	Deutschlandfu	Allemagne	Donebach	antenne	jour : 500	nuit : 250

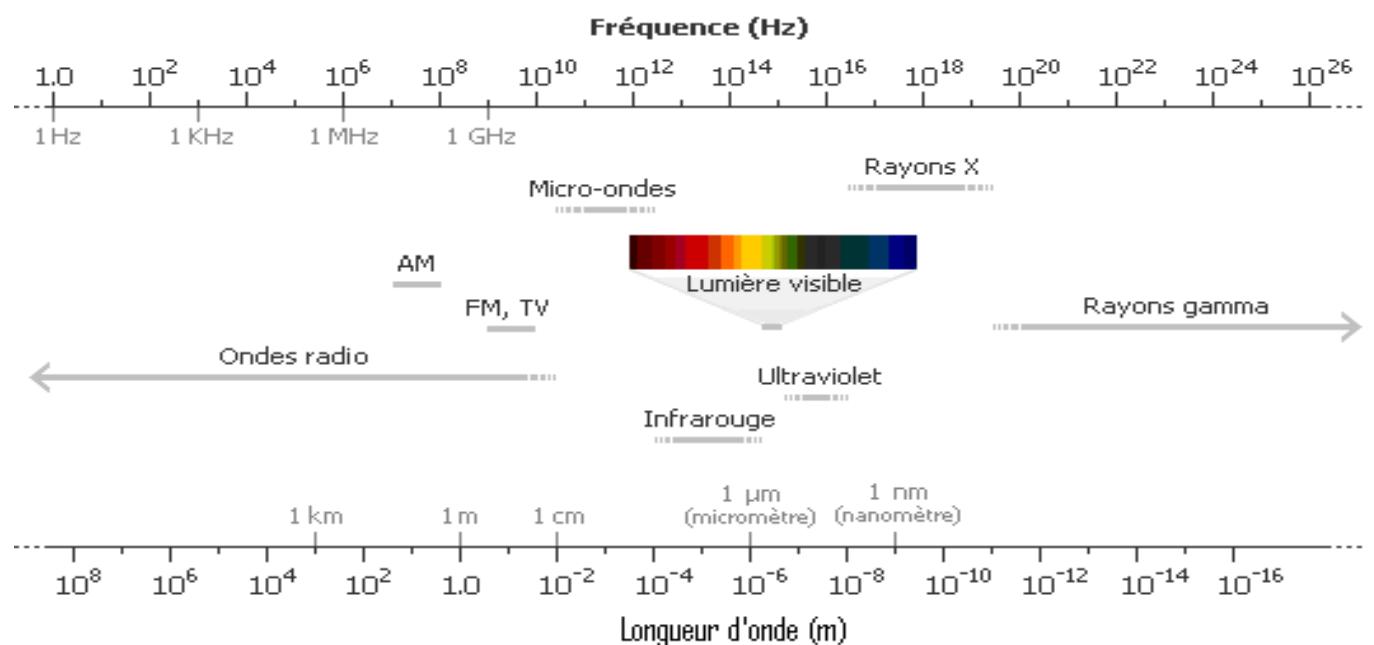
	<u>nk</u>			directionnelle ; deux pylônes haubannés en acier de 363 mètres de haut, alimentés au sommet	kW	kW
153 kHz	<u>Deutschlandfunk</u>	Allemagne	<u>Donebach</u>	antenne directionnelle ; deux pylônes haubannés en acier de 363 mètres de haut, alimentés au sommet	jour : 500 kW	nuit : 250 kW
	Radio Romania	Roumanie	<u>Brasov</u>		1200 kW	
	NRK Finnmark	Norvège	<u>Ingoy</u>	omnidirectionnelle, un pylône de 362 mètres de haut	100 kW	
	Alger chaîne 1	Algérie	<u>Émetteur de BECHAR KENADS A</u>	directionnelle, 3 pylônes d'environ 350 mètres de haut	2000 kW	programmes en Arabe
162 kHz	<u>France Inter</u>	France	<u>Allouis</u>	deux pylônes haubannés; hauteur 350 m, alimentés au sommet	2000 kW	
171 kHz	<u>Radio Medi</u>	Maroc	<u>Nador</u>	directionnelle, trois pylônes haubannés de 380 mètres	2000 kW	programmes en Français et en Arabe
	<u>Radio Rossiya</u>	Russie	<u>Kaliningrad</u>		1200 kW	
177 kHz	<u>Deutschlandradio Kultur</u>	Allemagne	<u>Zehlendorf</u>	grillage aérien sur un pylône	500 kW	depuis le 29 août

				haubané de 359,7 mètres et un triangle à 3150 m sur des mâts haubannés en acier		2005 en émission numérique <u>DRM</u>
183 kHz	<u>Europe 1</u>	Allemagne	<u>Felsberg</u>	antenne directionnelle; 4 pylônes haubanés isolés en acier; hauteurs : 282 m, 280 m, 276 m et 270 m	1500 kW	Programme en français
189 kHz	<u>RÚV</u>	Islande	<u>Hellissandur</u>	omnidirectionnelle, 1 pylône haubané en acier de 412 m	300 kW	
	<u>RAI</u>	Italie	<u>Caltanissetta</u>	omnidirectionnelle, 1 pylône haubané en acier de 282 m	10 kW	inactif depuis août 2004
198 kHz	<u>BBC Radio 4</u>	Royaume-Uni	<u>Droitwich</u>	Antenne en T sur deux pylônes haubanés en acier à 213 mètres	500 kW	<u>BBC World Service</u>
	BBC Radio 4	Royaume-Uni	<u>Burghead</u>	1 pylône haubané en acier	50 kW	
	BBC Radio 4	Royaume-Uni	<u>Westerglen</u>	1 pylône haubané en acier de 152 m	50 kW	
	<u>Radio Polonia</u>	Pologne	<u>Raszyn</u>	1 pylône haubané et isolé à 335 m	500 kW	seulement en journée
	Alger chaîne 1	Algérie	<u>Émetteur d'Ouargla</u>	directionnelle, 3 pylônes d'environ 350 mètres de haut	2000 kW	programmes en Arabe
207 kHz	<u>Deutschlandfunk</u>	Allemagne	<u>Aholming</u>	directionnelle, deux pylônes haubanés en acier de 265 m high,	jour : 500 kW nuit : 250 kW	

				alimentés au sommet		
207 kHz	<u>Radio Nationale Marocaine</u>	Marco	<u>Émetteur d'Azilal</u>	omnidirectionnelle, un pylône haubané en acier,	jour : 400 kW	nuit :
216 kHz	<u>Radio Monte Carlo</u>	France	<u>Roumoules</u>	directionnelle, quatre pylônes haubanés en acier. Trois de 300 et l'autre, omnidirectionnel en secours, de 330 mètres	2000 kW	émetteur extra territorial dépendant de Monaco
225 kHz	<u>Radio Polonia</u>	Pologne	<u>Solec Kujawski</u>	deux pylônes haubanés en acier de 330 m et 289 m	1000 kW	ancien émetteur : <u>Konstantynow</u>
234 kHz	<u>RTL</u>	Luxembourg	<u>Beidweiler</u>	directionnelle, trois pylônes haubanés mis à la terre de 290 m avec cages verticales	2000 kW	émetteur supplémentaire : <u>Junglinster</u>
243 kHz	<u>Danmarks Radio</u>	Danemark	<u>Kalundborg</u>	Alexanderson, soutenue à 118 m par deux tours en aciers	300 kW	Arrêt de la diffusion en janvier 2007
252 kHz	<u>Chaîne 3</u>	Algérie	<u>Tipaza</u>	1 pylône haubané de 355 mètres	1500 kW	Programme francophone ; mi-puissance la nuit
	<u>RTÉ Radio 1</u>	Irlande	Émetteur de Clarkestown	1 pylône haubané et isolé en acier à 248 m	500 kW	autrefois utilisé par <u>Atlantic 252</u> et <u>TeamTalk 252</u> ; augmentation de

						puissance la nuit
261 kHz	<u>Transmitter Burg</u>	Allemagne	<u>Burg</u>	Omnidirectionnel le, cage sur mât haubané en acier à 324 m et un tube d'acier à 210 m, isolé	200 kW	inactive actuellement, anciennement <u>Radio Wolga</u> et <u>Radioropa Info</u>
	Radio Rossiya	Russie	Émetteur de Taldom	2500 kW	émetteur le plus puissant mondiallement	
270 kHz	ČRO 1 - Radiožurnál	République tchèque	Émetteur de Topolna	cage directionnelle (orienté est-ouest) sur deux pylônes haubannés en acier de 257 m	500 kW	
279 kHz	<u>Musicmann 279</u>	Île de Man	$\pm 5$ km de <u>Ramsey</u>	<u>Crossed field antenna</u>	500 kW	Devait émettre début 2002.

## CONCLUSION : vision d'ensemble de spectre



### Vue d'ensemble du spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique regroupe tous les types d'ondes électromagnétiques. Des fréquences les plus élevées aux plus faibles, on trouve : les rayons gamma, les rayons X, les ultraviolets, la lumière visible, le rayonnement infrarouge, les micro-ondes et les ondes radio. La lumière visible, c'est-à-dire l'ensemble des fréquences (ou des longueurs d'onde) que l'œil humain peut percevoir, ne représente donc qu'une toute petite portion du spectre électromagnétique.

## **CONCLUSION GENERALE**

Ce mémoire couvre un domaine très vaste intéressant : toutes les radiations de la lumière servent à la vie de la nature surtout pour la santé des êtres humains et la communication. On admet que les lecteurs possèdent de la notion de bases relatives à la lumière, l'inconvénient et les avantages provoqués par la lumière.

Nous avons trouvé dans la première partie la nature de la lumière qui précise que la lumière a une double nature : d'une part, elle est comme une particule (photons) et d'autre part, elle se comporte comme une onde. Nous avons trouvé aussi que la vitesse de la lumière dans le vide est plus grande que dans les autres milieux. Dans la deuxième partie, nous avons vu que la lumière décompose sa spectre à l'aide de spectroscope à réseau et on constate que les radiations visibles ont des longueurs d'ondes comprises entre 400 et 780 nm, leur couleur s'échelonnant du violet au rouge et il existe aussi des radiations invisibles: rayons  $\gamma$ , rayons X, Ultraviolet, Infrarouge, et les ondes hertziennes. Dans la dernière partie, nous avons trouvé que toutes les radiations ont des rôles très importants à la vie des êtres humains surtout les radiations Ultraviolet, Infrarouge, Rayons X, et les ondes hertziennes.

Nous pensons que cet ouvrage apporte un certain enrichissement pour les lecteurs. Il s'agit de connaissances utiles surtout dans la vie quotidienne.

## **ABSTRACT**

This memoir corner in a very large and interesting domain. All the radiations are very useful to natures, human's life and for the communication.

The first part of this book shows that lights have two natures; in one hand, It is a particle (photons), and in the other hand, it adopts the nature of waves. We saw that the speed of lights in empty space is grater than in others.

In the second part, we explained that lights decompose its spectrum by the spectroscope with network, and visible radiations have wavelength between 400 and 750 nm. Their color are violet to red, there are also some visible rays:  $\gamma$  rays, X rays, ultraviolet, infrared and hertzian waves.

The last part shows that all the radiations have an important impact in human's life, in particular ultraviolet, Infrared, X rays and hertzian waves.

We believe that this book will provide some knowledge for the readers.