

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimy «Bordj Bou Arreridj»

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département des Sciences de la Matière

جامعة محمد البشير الإبراهيمي « برج بوعريرج »

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم علوم المادة



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLOME DE : Master

Filière : Physique

Option : Physique des Matériaux

THÈME :

Focalisation des ondes non-ionisantes comme ondes ionisantes

Préparé par : Bentaleb Mounir

Soutenu le : 11/06/2025

Devant le jury :

Président : Benchiheub Nadjat

M.C.A Université de BBA

Rapporteur : Mameri Samir

M.C.B Université de BBA

Examineur : Imakhlaf Anis

M.C.B Université de BBA

Année Universitaire 2024-2025

DÉDICACE

À mes chers parents,

À ma chère épouse Boussam Hala,

À mes enfants Wassim, Abderahmene et Amir,

À toute ma famille,

À toutes celles et ceux que nous aimons et qui nous aiment,

À ceux qui ont partagé nos joies comme nos peines,

Et à toute la promotion 2024-2025,

Je vous dédie ce travail, fruit d'un chemin parcouru avec patience, foi et solidarité.

Merci pour votre amour, votre soutien et présence.

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu, le Tout-Puissant, pour m'avoir donné la force, la patience et persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens en suite à exprimer toute ma gratitude à mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien moral constant, et pour avoir toujours cru en moi. Leur présence à mes cotés, dans les moments de doute comme dans les réussites, m'a été précieuse au-delà des mots.

Je remercie sincèrement mon encadreur, **Monsieur Mameri Samir**, pour sa disponibilité, ses conseils avisés, sa rigueur et sa bienveillance tout au long de ce mémoire. Son accompagnement m'a permis de progresser et d'enrichir mes réflexions.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail, ainsi qu'à l'ensemble de mes enseignants, qui ont su, au fil des années, transmettre leur savoir avec passion.

Je n'oublie pas mes amis, pour leur présence, leur soutien et leurs encouragements, qui ont souvent allégé la charge de travail et apporter des moments de réconfort indispensables.

Enfin, je remercie toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

À tous, je suis profondément reconnaissant.

ملخص :

يُمثل تركيز الموجات الكهرومغناطيسية تحديًا كبيرًا في العديد من المجالات العلمية والتكنولوجية، وخاصةً في مجالات الاتصالات والتصوير الطبي والرادار والبصريات.

يركز هذا العمل على المبادئ والأساليب الفيزيائية لتركيز الطاقة الكهرومغناطيسية بكفاءة في منطقة محددة من الفضاء.

تستند الدراسة إلى تحليل معادلات ماكسويل، وتكشف تقنيات تركيز مختلفة، مثل استخدام العدسات والمرايا، وغيرها؛ مع إيلاء اهتمام خاص لظواهر الحيود والانكسار والتداخل، بالإضافة إلى القيود الفيزيائية التي تفرضها الطبيعة الموجية للإشعاع الكهرومغناطيسي.

يهدف هذا العمل إلى توفير فهم شامل لآليات التركيز وتقييم أداء مختلف الأساليب في السياقات العملية.

وفي نهاية المطاف، يمكن أن تُسهم هذه المعرفة في تحسين الأنظمة عالية الدقة والموفرة للطاقة

ABSTRACT :

Focusing electromagnetic waves is a major challenge in many scientific and technological fields, particularly telecommunications, medical imaging, radar, and optics.

This work focuses on the physical principles and methods for efficiently concentrating electromagnetic energy in a specific region of space.

The study is based on the analysis of Maxwell's equations and explores various focusing techniques, such as the use of lenses, mirrors, etc.; particular attention is paid to the phenomena of diffraction, refraction, and interference, as well as the physical limitations imposed by the wave nature of electromagnetic radiation.

This work aims to provide a thorough understanding of focusing mechanisms and to evaluate the performance of different approaches in practical contexts.

Ultimately, this knowledge can contribute to the optimization of high-resolution and energy-efficient systems.

Résumé :

La focalisation des ondes électromagnétiques constitue un enjeu majeur dans de nombreux domaines scientifiques et technologiques, notamment en télécommunications, imagerie médicale, radar, ou encore en optique.

On s'intéresse dans ce travail aux principes physiques et aux méthodes permettant de concentrer efficacement l'énergie électromagnétique dans une région de l'espace déterminée.

L'étude repose sur l'analyse des équations de Maxwell et explore diverses techniques de focalisation, telles que l'utilisation des lentilles, miroirs,...; Une attention particulière est portée sur les phénomènes de diffraction, de réfraction et d'interférences, ainsi que sur les limitations physiques imposées par la nature ondulatoire du rayonnement électromagnétique.

Ce travail vise à fournir une compréhension approfondie des mécanismes de focalisation et à évaluer les performances des différentes approches dans des contextes pratiques.

A termes, ces connaissances peuvent contribuer à l'optimisation de systèmes à résolution et à fort rendement énergétique.

TABLE DES MATIÈRES

Dédicace	
Remerciements	
Table des matières	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
INTRODUCTION GÉNÉRALE	5
CHAPITRE I : Optique géométrique.....	17
I -1-Introduction	17
I -2- Rappels théoriques.....	17
I -2-1 Indice de réfraction	17
I -2-2 Phénomènes de réflexion et réfraction	17
I -2-3 Dispersion	18
I -2-4 Les lentilles.....	19
I -2-5 La distance focale.....	19
I -2-6 Les lentilles sphériques minces.....	20
I -2-7 Grossissement.....	22
I-2-8 Défauts des lentilles :.....	22
I -2-9 Diaphragme (fentes):.....	23
I -2-10 la lentille à échelons de Fresnel.....	23
I-2-11 superlentille	23
I -2-12 Application et logiciel pour optimise la focalisation ...	25
CHAPITRE II : Optique Ondulatoire	26
II - 1 Phénomène Diffraction.....	26
II -2 Interférences	27
II -3 onde électromagnétique.....	28
II- 4 Approche mathématique.....	29
II-5 Notation complexe.....	29
II-6 Le spectre électromagnétique	30
II-7 Bilan énergétique.....	33

II-8 Domaine d'application.....	35
CHAPITRE III : Modélisation et Simulation	32
CONCLUSION GENERAL.....	45
BIBLIOGRAPHIE	50

Liste des tableaux

1-Tableau d'équivalence des faisceaux.....	37
--	----

Liste des figures

Figure 1 : Différents types de faisceaux	13
Figure 2 : Focalisation par fente et miroir.....	12
Figure 3 : Convergence de faisceaux lumineux.....	12
Figure 4 : Différent forme de rayon De lumière de simulation cosmol physique.....	12
Figure 5 : Model Focalisation télescope cosmol physique.....	12
Figure I- 6 : Rayon lumineux et faisceau de lumière.....	13
Figure I- 7 : Réflexion	14
Figure I- 8 : Réfraction.....	14
Figure I-9 : réflexion totale.....	14
Figure I-10 : Décomposition spectrale.....	15
Figure I-11 : Lentille convergente.....	16
Figure I-12 : Lentille divergente.....	16
Figure I-13 : Prolongement des rayons déviés définit le foyer de la lentille.....	16
Figure I-14 : Dioptries.....	17
Figure I-15 : La construction des images.....	18
Figure I-16 : La construction des images.....	18
Figure I-17 : Diaphragme.....	20
Figure I-18 : La lentille de Fresnel.....	20
Figure I-19 : Cosmol multiphysique Module Ray Optics.....	21
Figure I-20 : Cosmol multiphysique Module Ray Optics.....	22

Figure I-21 : Ansys Zemax OpticStudio.....	23
Figure I-22 : Lighttool.....	23
Figure II-23 : Diffraction.....	25
Figure II-24 : Phénomène diffraction.....	26
Figure II-25 : Diffraction.....	26
Figure II-26 : Interférence	26
Figure II-27 : Interférence	27
Figure II-28 : (EM) Onde électromagnétique.....	27
Figure II-29 Le spectre électromagnétique.....	30
Figure II-30 polarisateur.....	33
Figure II-31 Le spectre électromagnétique	33
Figure II-32 Photolithographie.....	35
Figure II-33 radiothérapie externe.....	36
Figure II-34 collimateur.....	36
Figure II-35 : Solaire photovoltaïque a concentration	37
Figure II-36 : Rayonnement ionisants et non ionisants.....	37
Figure III-37 : Model 1 un point $\lambda=0.5m$ $d=0m$ $a=1$.....	41
Figure III-38 : Model 2 deux points $\lambda=0.5m$ $d=1m$ $a=1$.....	41
Figure III- 39 : Model 3 deux points $\lambda=0.09m$ $d=1m$ $a=1$	42
Figure III- 40 : Model 4 deux points $\lambda=1m$ $d=1m$ $a=1$.....	43
Figure III- 41 : Model 5 trois points $\lambda=0.5m$ $d=1m$ $a=1$.....	43
Figure III 42 : Model 6 trois points $\lambda=0.09m$ $d=1m$ $a=1$.....	44
Figure III-43 : Model 7 trois points $\lambda=0.5m$ $d=1m$ $a=1$.....	44
Figure III-44 : Model 8 quatre points $\lambda=0.5m$ $d=1m$ $a=1$.....	45
Figure III-45: Model 9 quatre points $\lambda=0.5m$ $d=1m$ $a=1$.....	45
Figure III 46 : Model 10 six points $\lambda=0.5m$ $d=1m$ $a=1$.....	46
Figure III 47 : Model 11 cinq points $\lambda=0.5m$ $d=1m$ $a=1$.....	46
Figure III-48 : Model 12 six points $\lambda=0.5m$ $d=1m$ $a=1$.....	47
Figure III-49 : Model 13 neuf points $\lambda=0.5m$ $d=1m$ $a=1$.....	47
Figure III-50 : Model 14 cinq points $\lambda=0.5m$ $d=1m$ $a=1$.....	48
Figure III-51 : Model 15 neuf points $\lambda=0.005m$ $d=1m$ $a=0.001$.....	48

Liste des abréviations

k : vecteur d'onde

h : Constante de Planck 6.23×10^{-34} J.S

m : mètre (m)

t : Seconde

E_C : Energie Joule ou électronvolt ev.

$\vec{E}$: Champ électrique.

ω : Pulsation.

I : Intensité

μ : Perméabilité magnétique effective

λ : Longueur d'onde en mètre (m)

T : Période temporelle en seconde (s)

f : Fréquence en Hertz (Hz)

W : Travail (watt)

C : Célérité en mètre par seconde ($m \cdot s^{-1}$)

$\vec{B}$: Champ magnétique.

OEM : Onde électromagnétique.

ε : Permittivité relative

n : Indice de réfraction

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les ondes sont des phénomènes fondamentaux en physique, traduisant la propagation d'une perturbation à travers un milieu ou dans le vide, accompagnée d'un transfert d'énergie sans déplacement global matière.

Quelles soient mécaniques, acoustiques ou électromagnétiques, les ondes interviennent dans de nombreux processus physiques, allant des vibrations sonores à la transmission de signaux à distance.

Leur étude permet de mieux comprendre l'interaction entre matière et énergie, et offre des perspectives multiples, tant sur le plan théorique que technologique.

Parmi ces phénomènes, les ondes électromagnétiques occupent une place singulière. Issues du formalisme des équations de Maxwell, elles résultent de la variation temporelle et spatiale des champs électrique et magnétique.

Ces ondes peuvent se propager dans le vide ou dans un milieu matériel, ce qui les distingue des ondes mécaniques.

Leur spectre s'étend des basses fréquences (ondes radio) aux hautes fréquences (rayons gamma), en passant par les micro-ondes, l'infrarouge, la lumière visible et l'ultraviolet.

La focalisation des ondes électromagnétiques joue un rôle fondamental dans de nombreux domaines : imagerie optique, microscopie, télécommunications, traitement de faisceaux laser, énergie solaire, ou encore optique quantique.

Focaliser une onde consiste à concentrer son énergie en un point ou une région de l'espace, généralement au moyen de dispositifs optiques comme des lentilles, des miroirs, ou des structures diffractives.

Ce processus est au cœur de toute tentative d'augmenter la résolution spatiale, la puissance localisée, ou la précision d'un système optique.

Ce travail a pour objectif d'étudier certaines méthodes ou techniques permettant de concentrer efficacement l'énergie électromagnétique (lumière) dans une région de l'espace déterminée, chose qui va nous permettre une compréhension approfondie des mécanismes de focalisation et à évaluer les performances des différentes approches dans des contextes pratiques différents.

Ce mémoire est divisé en quatre parties :

Une introduction générale à la focalisation des ondes électromagnétiques qui constitue un intérêt majeur dans de nombreux domaines scientifiques et technologiques, sur leur nature et les lois qui les régissent, suivie d'une problématique qui sera à la base de ce travail.

Dans le premier chapitre, après avoir posé la problématique, nous présentons une image générale de l'optique géométrique.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des phénomènes de diffraction et des interférences des ondes électromagnétiques.

Le troisième chapitre est la partie qui concerne la Modélisation et Simulation des différents systèmes optiques étudiés permettant la focalisation de la lumière.

Enfin, ce mémoire sera achevé par une conclusion générale.

Problématique

La focalisation peut être abordée selon différents régimes physiques. En optique géométrique elle est décrite à l'aide de rayons lumineux et de lois de Snell-Descartes.

En optique physique, elle fait appel à la diffraction et à l'interférence qui sont des phénomènes ondulatoires.

Enfin, une approche plus générale et rigoureuse repose sur les équations de Maxwell, qui permettent de modéliser la propagation et la concentration des champs électromagnétiques, y compris dans les milieux complexes ou anisotropes.

Les enjeux scientifiques liés à la focalisation sont multiples : comment concentrer au maximum un champ lumineux sans dépasser certaines limites physique (comme le critère d'Abbe en microscopie) ?

Quels matériaux ou structures permettent d'améliorer la focalisation, notamment au-delà des limites imposées par la diffraction ?

Quels sont les effets de la polarisation, de la fréquence, ou encore de non linéarités optiques sur ce phénomène notamment dans les domaines des lasers puissants, des fibres optiques, et dans l'étude des matériaux optiques avancés ?

En optique géométrique classique, on considère que tous les rayons lumineux sont identiques.

Le dualisme onde-corpuscule de la lumière nous donne un domaine d'interférence où la différence de marche crée des faisceaux constructifs ou destructifs.

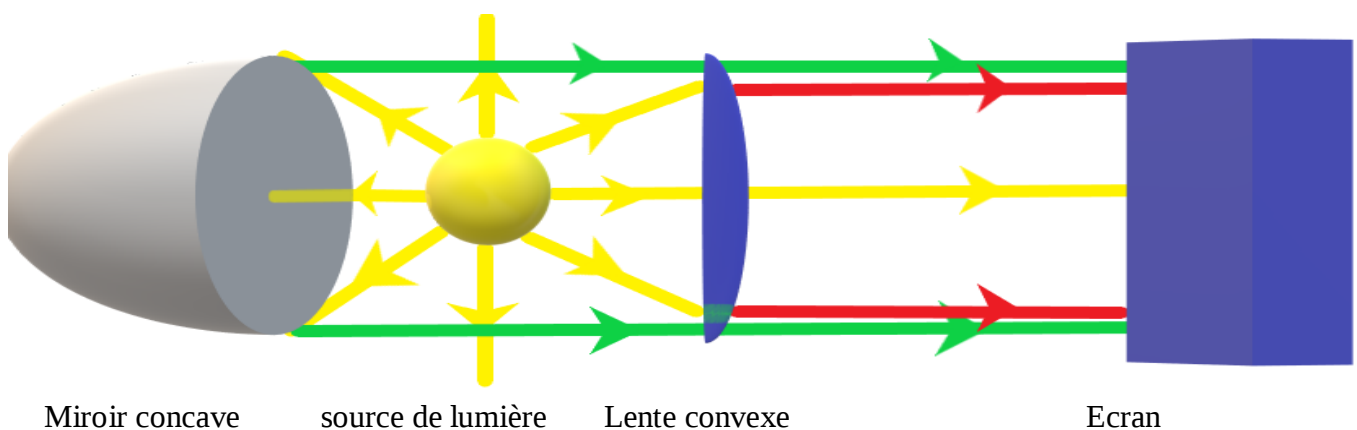


Figure 1 : Différents types de faisceaux

Focalisation

En optique, la focalisation est l'opération qui consiste à concentrer des rayons lumineux provenant d'un point en un autre point. Lorsqu'on est très loin de l'objet observé cela revient à concentrer les rayons en un même point. Ceci se fait soit à l'aide de miroirs, soit à l'aide de lentilles.

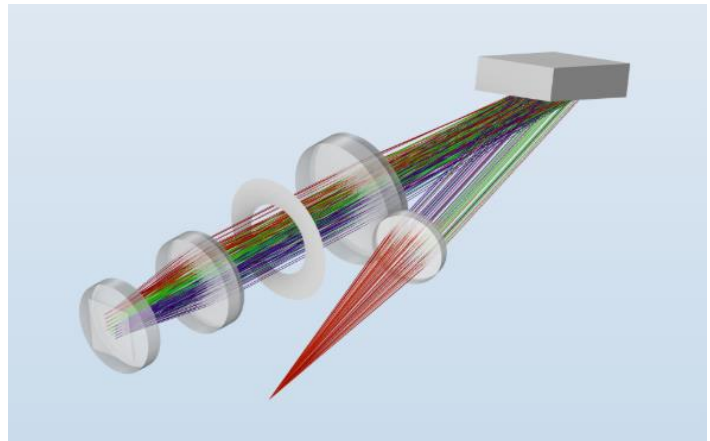


Figure 2 : Focalisation par lentilles et miroir

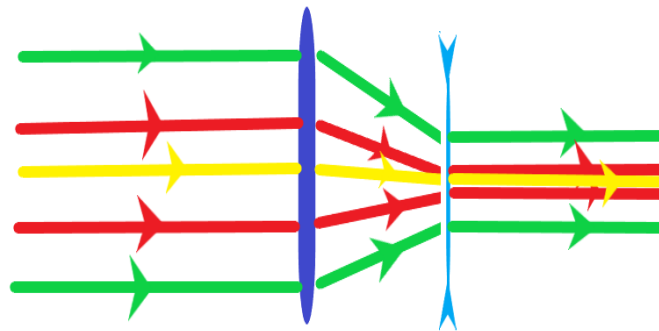


Figure 3 : Convergence de faisceaux lumineux

Ray Release Types

- Grid of points
- Selected domains, boundaries, edges, or points
- Import from data file
- Illuminate selected boundaries
- Solar radiation at specified latitude and longitude
- Directions can be sampled from a sphere, hemisphere, or cone

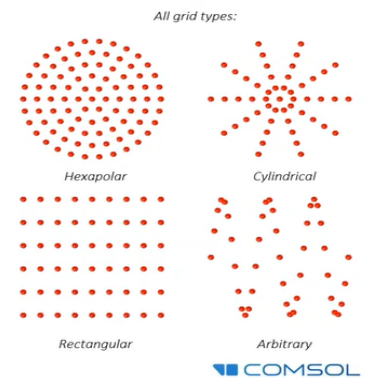


Figure 4 : Différentes formes de rayons lumineux de simulation cosmol multiphysique

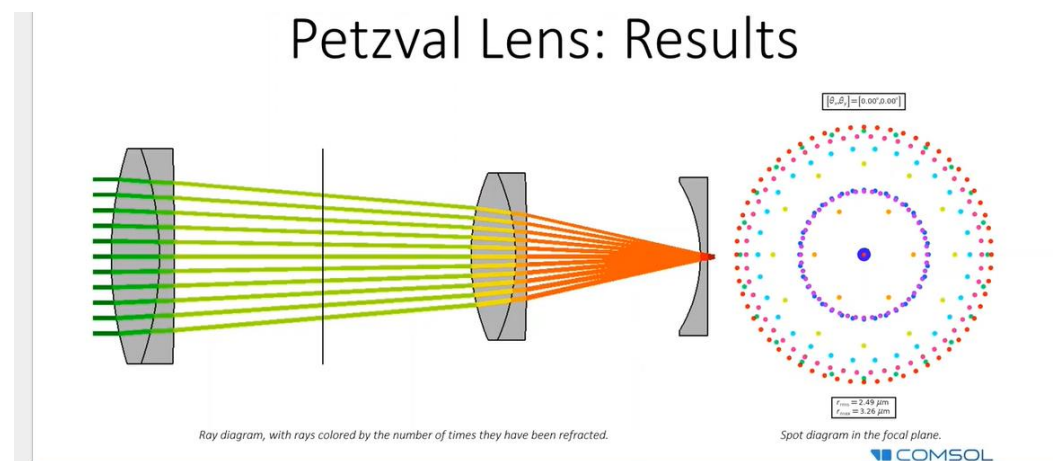


Figure 5 : Model de focalisation télescope cosmol multiphysique.

CHAPITRE I

Optique géométrique

CHAPITRE I : Optique géométrique

I.1 Introduction

L'optique est une partie de la physique qui étudie la propagation de la lumière.

La lumière visible est une onde électromagnétique (OEM) dont le domaine de longueur d'onde est compris entre 400nm et 800nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).

En optique géométrique, on traite les ondes (OEM) comme des rayons et on ignore leur caractère ondulatoire. Ce traitement est correct si les dimensions des obstacles rencontrés par l'onde (lentilles, miroirs,...) sont très grandes comparées à la longueur d'onde.

I-2-Rappels théoriques

I-2-1 Indice de réfraction

$$n_{\lambda} = \frac{c}{v_{\lambda}} \quad (\text{I-6})$$

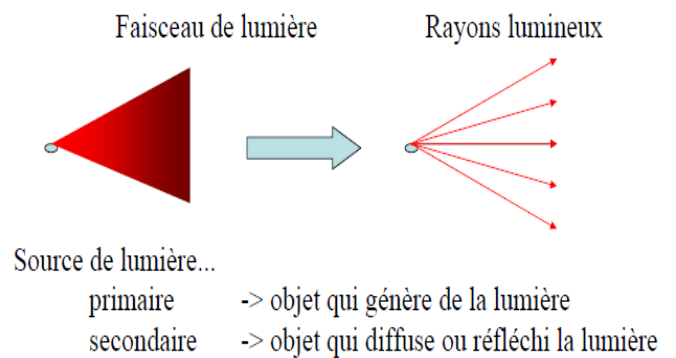


Figure I- 6 : Rayon lumineux et faisceau

Où c : vitesse de la lumière dans le vide;

v_{λ} : vitesse de la lumière de longueur d'onde λ dans le milieu considéré.

L'indice de réfraction n_{λ} indique que la vitesse d'une onde dans un milieu dépend de sa longueur d'onde de lumière.

Ainsi, pour un rayon polychromatique (contenant plusieurs longueurs d'onde),

Chaque onde a une vitesse de propagation différente dans un milieu donné.

I-2-2 Phénomènes de Réflexion et réfraction

Lorsqu'un rayon lumineux rencontre une surface de séparation entre deux milieux optiques différents. Une partie de la lumière revient dans le premier milieu (réflexion) et une partie pénètre dans le second milieu (réfraction).

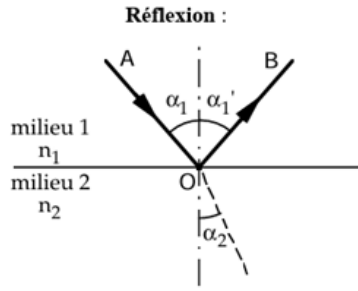


Figure I-7 : Réflexion

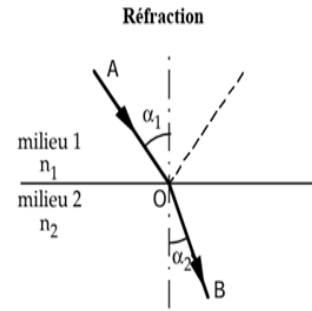


Figure I-8 : Réfraction

(Lois de Snell-Descartes)

Première loi: Rayons réfléchi et réfracté sont Contenus dans le plan d'incidence

(Plan formé par la normale et le Rayon incident)

Deuxième loi: Réflexion : $\alpha_1' = \alpha_1$ (I-2)

Troisième loi: Réfraction : $n_1 \cdot \sin(\alpha_1) = n_2 \cdot \sin(\alpha_2)$ (I-3)

Remarques : Les angles sont mesurés à partir de la normale à la surface de séparation.

La normale à la surface, les rayons incidents, réfléchis et réfractés sont dans un même plan.

Dans le cas où $n_1 > n_2$, il existe un angle d'incidence à partir duquel le rayon ne pénètre plus dans le milieu 2.

$$\alpha_2 = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \sin(\alpha_2) = 1 \quad (I-4)$$

$$\sin(\alpha_1) = \frac{n_2}{n_1} \quad (I-5)$$

Pour $\alpha_2 > \alpha_L$ il n'y a plus de réfraction.

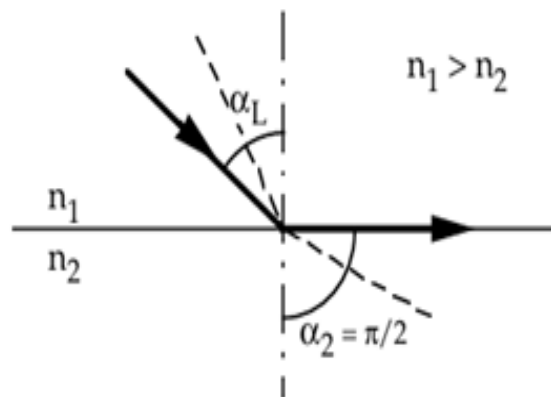


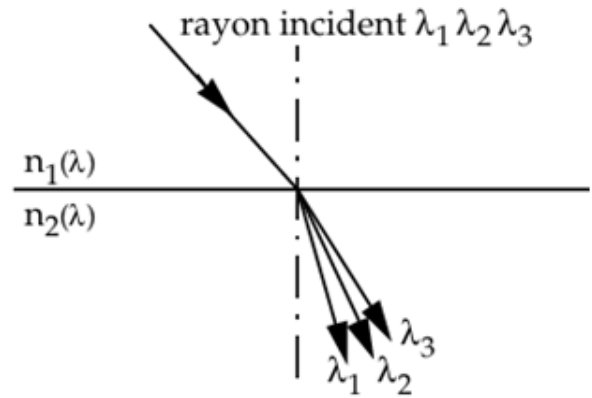
Figure I-9 : Réflexion totale

1-2-3 Dispersion

Puisque l'indice de réfraction d'un milieu optique dépend de la longueur d'onde du rayon lumineux, un faisceau de lumière polychromatique verra chacune de ses composantes réfractées suivant un angle différent (figure I-10).

Ce processus de décomposition spectrale est la dispersion.

Figure I-10 : Décomposition spectrale



I-2-4 Les lentilles

Une lentille sphérique est un corps transparent limité par deux surfaces sphériques.

Les rayons lumineux sont déviés par réfraction sur ses surfaces. On a deux types de lentilles :

a) Lentille convergente (ou convexe) où les rayons parallèles à l'axe optique sont déviés et convergent vers un même point appelé foyer de la lentille.

On symbolise les lentilles convergentes par



Figure I-11 : Lentille convergente

b) Lentille divergente (ou concave), les rayons parallèles à l'axe optique sont déviés et divergent de l'axe optique.

Figure I-12 : Lentille divergente



Le prolongement des rayons déviés définit le foyer de la lentille (Figure I-13).

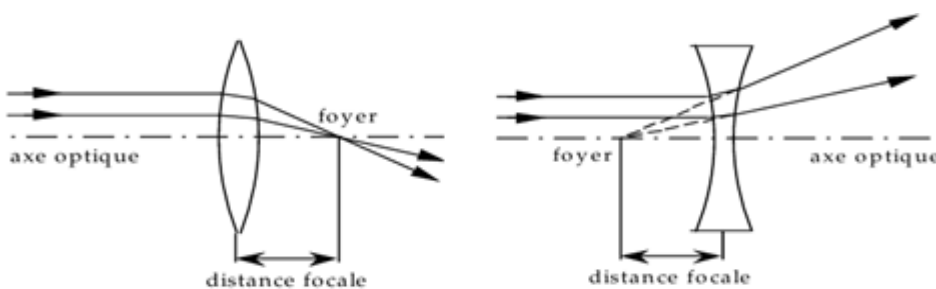


Figure I-13 : Prolongement des rayons déviés définit le foyer de la lentille.

I-2-5 La distance focale

La distance focale d'une lentille dépend de son indice de réfraction (par rapport au milieu extérieur) et de sa forme, c'est-à-dire des rayons de courbure r_1 et r_2 de ses faces.

On utilise les conventions suivantes pour caractériser les surfaces (ou dioptries) d'une lentille :

Une surface convexe a un rayon de courbure positif ($r > 0$).

Une surface concave a un rayon courbure négatif ($r < 0$).

Figure I- 14 : Dioptres

La distance focale f d'une lentille est donnée par :

$$\frac{1}{f} = (n_{lm} - 1) \cdot \left[\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right] \quad (I-6)$$

$$n_{lm} = \frac{n_l}{n_m} \quad (I-7)$$

n_l indice de réfraction de la lentille

n_m indice de réfraction du milieu

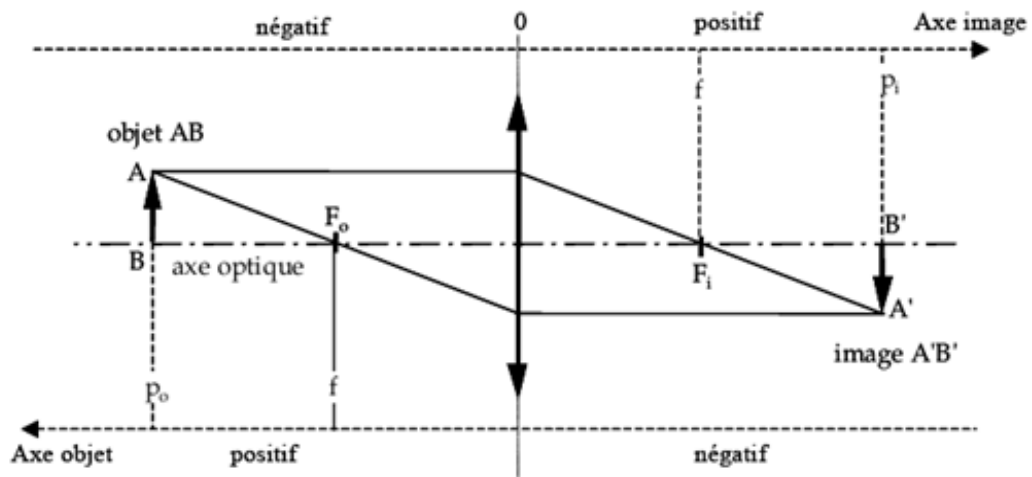
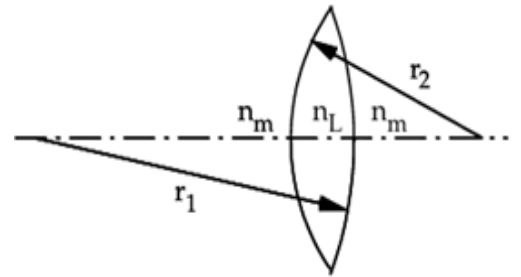


Figure I-15 : La construction des images.

I-2-6 Les lentilles sphériques minces

Dans le cas des lentilles minces, la construction des images se fait de manière géométrique en respectant les deux règles de base suivantes:

- 1) un rayon parallèle converge au foyer image
- 2) un rayon provenant du foyer objet sort de la lentille en rayon parallèle

La figure I-15 illustre la construction de l'image pour une lentille convergente ($f > 0$) lorsque la lumière se propage de gauche à droite.

On introduit deux axes : l'axe image de gauche à droite et l'axe objet de droite à gauche.

La distance focale étant positive on place un foyer objet positif à gauche de la lentille et un foyer image à droite de la lentille.

On effectue alors la construction de l'image en respectant les deux règles énoncées ci-dessus.

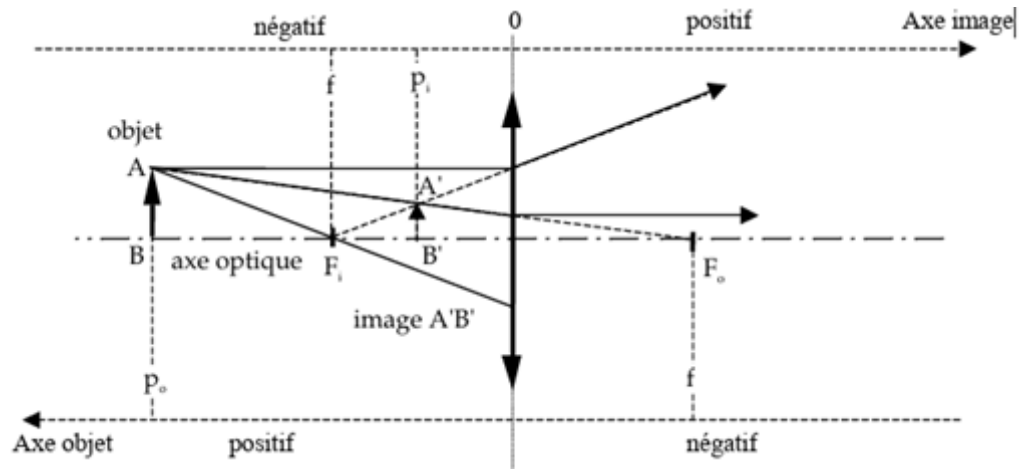


Figure I-16 : La construction des images.

Avec une lentille divergente (Distance focale négative), la position de l'objet et l'image sont inversées mais la construction reste la même.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p_0} + \frac{1}{p_i} \quad (\text{I-8})$$

dans cette expression il faut tenir compte des signes de p_0 , p_i et f

f distance focale (distance lentille – foyer lentille convergente $f > 0$

lentille divergent $f < 0$

p_0 distance objet – lentille Objet réel $p_0 > 0$

Objet virtuel $p_0 < 0$

Dans ce cas on voit que la distance image p_i est négative ce qui indique que l'image est virtuelle (on ne peut pas la visualiser sur un écran).

Loi des foyers conjugués

p_0 , p_i et f sont reliés par une expression appelée loi des foyers conjugués :

p_i distance lentille – image Image réelle $p_i > 0$

Image virtuelle $p_i < 0$

I-2-7 Grossissement

$\overline{AB}$ Hauteur de l'objet et $\overline{A'B'}$ hauteur de l'image

$$\begin{cases} \text{objet et image au-dessus de l'axe } \overline{AB}, \overline{A'B'} > 0 \\ \text{objet et image au-dessous de l'axe } \overline{AB}, \overline{A'B'} < 0 \end{cases}$$

On définit le grossissement par le rapport

$$m = \frac{\overline{AB}}{\overline{A'B'}} = - \frac{P_i}{P_o} \quad (\text{I-9})$$

$m < 0$ image inversée ou $m > 0$ image non inversée

Lentilles accolées

La distance focale d'un système de N lentilles minces accolées est donnée par la relation suivante:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} + \dots + \frac{1}{f_n} \quad (\text{I-10})$$

I-2-8 Défauts des lentilles

1) Aberrations chromatiques :

Elles proviennent du fait que l'indice de réfraction de la matière dont est faite la lentille dépend de la longueur d'onde;

Il y a donc dispersion de la lumière et la lentille a une distance focale différente pour chaque

Couleur : plus petite pour les rayons bleus que pour les rayons rouges.

Les aberrations chromatiques peuvent être fortement réduites en utilisant des lentilles composées.

De telles lentilles sont faites de verres de différents indices de réfraction moyens et de différentes dispersions.

2) Aberration de sphéricité : lorsque la lentille n'est pas mince, elle est plus convergente pour les rayons marginaux que pour les rayons centraux.

Pour les rayons marginaux, l'approximation des petits angles.

Pour remédier à ce défaut, il suffit d'utiliser des surfaces paraboliques plutôt que sphériques.

Malheureusement, de telles surfaces sont plus difficiles à réaliser et sont plus chères.

3) Astigmatisme : si une lentille est fortement inclinée par rapport aux rayons incidents, des rayons initialement parallèles ne convergent plus en un seul point.

I-2-9 Diaphragme (fentes)

Figure I-17 : Diaphragme



Le diaphragme à fentes est un dispositif utilisé pour contrôler et modifier

la forme du faisceau lumineux ou des rayons X. Il permet d'obtenir un faisceau avec une forme spécifique, comme un faisceau rectangulaire ou des rayons parallèles, grâce à la présence de fentes qui limitent la propagation des rayons.

I-2-10 La lentille à échelons de Fresnel

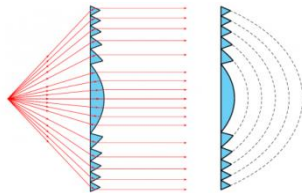


Figure I- 18 : La lentille de Fresnel.

Pour focalise la lumière a grande distance ou petite distance.

I-2-11 superlentille : (ou super-lens) de Pendry : une lentille théorique basée sur un métamatériau avec indice de réfraction négatif, capable de dépasser la limite de diffraction et d'imager des détails plus fins que la longueur d'onde utilisée (résolution sub-longueur d'onde).

$$\varepsilon < 0 \text{ et } \mu < 0 \quad n = \sqrt{\varepsilon\mu} \quad (\text{I-11})$$

I-2-12 Applications et logiciels pour optimiser la focalisation

Cosmol multiphysique Module Ray Optics

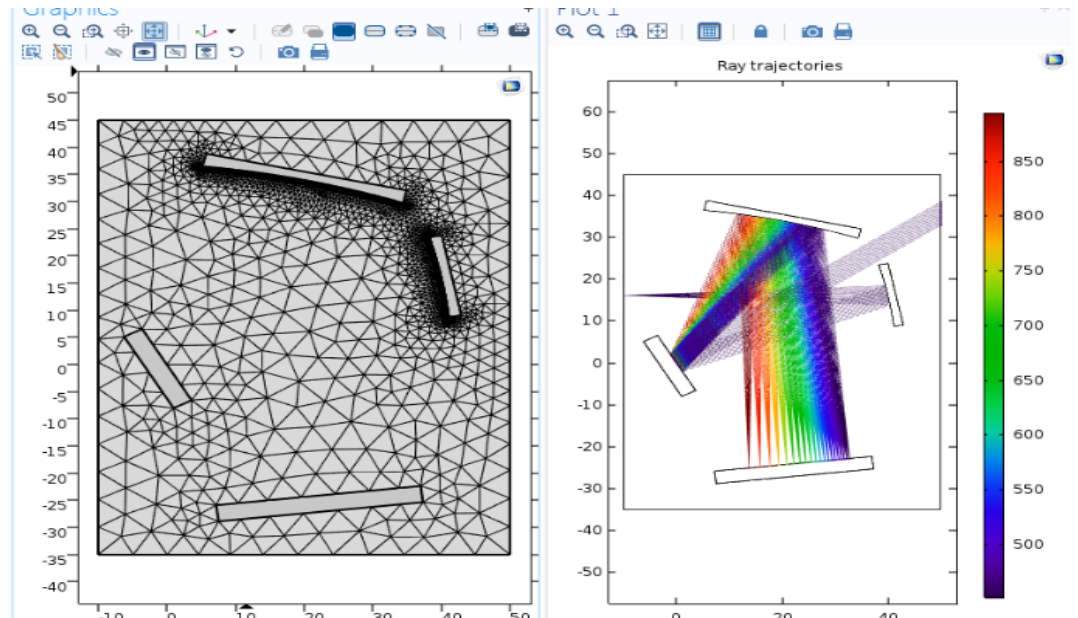


Figure I-19 :
Cosmol
multiphysique
Module Ray Optics.

Figure I- 20 : Cosmol
multiphysique Module Ray
Optics

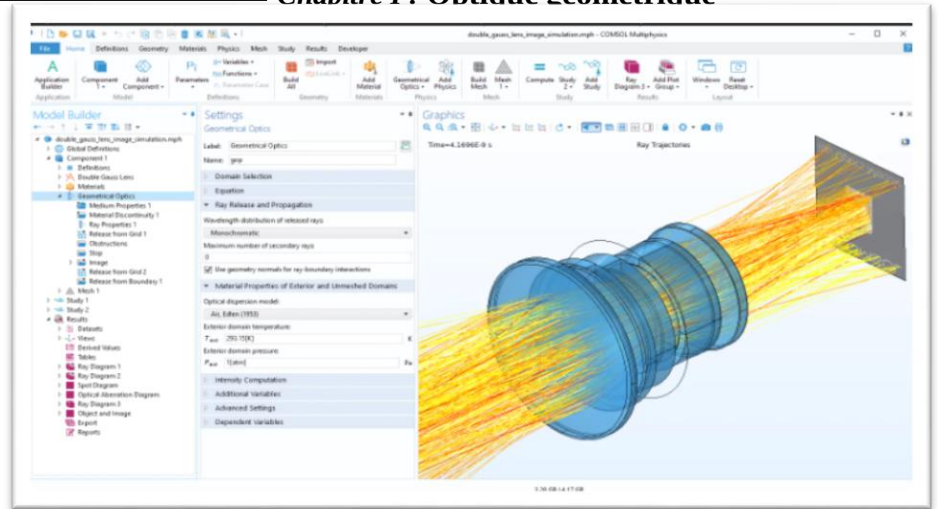


Figure I-21 : Ansys Zemax
OpticStudio

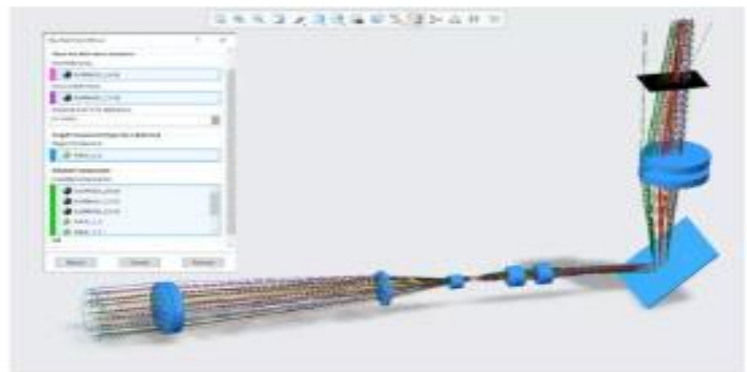
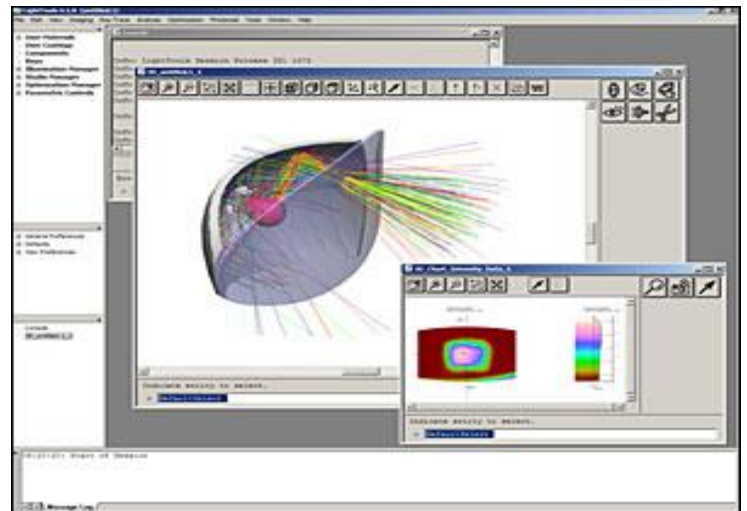


Figure I- 22 : Lightool



CHAPITRE II

OPTIQUE ONDULATOIRER

CHAPITRE II : OPTIQUE ONDULATOIRE

Limite du modèle des rayons lumineux

II-1 Phénomène de diffraction

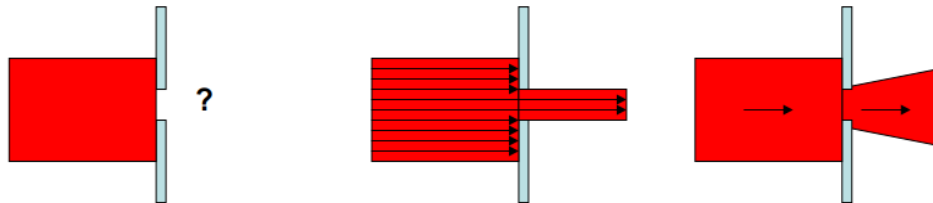


Figure II-23 : Diffraction.

Faisceau lumineux

Incident= Cylindre

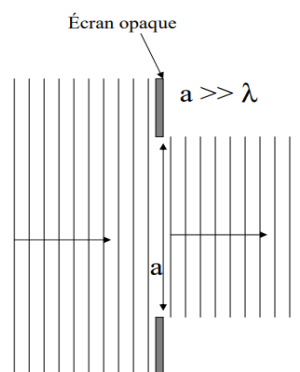
‘optique des rayons’

Ce qui est observe si le

Trou est ‘grand’

Ce que prévoit

l’optique géométrique



ce qui est observé si le

Trou est très ‘ petit’

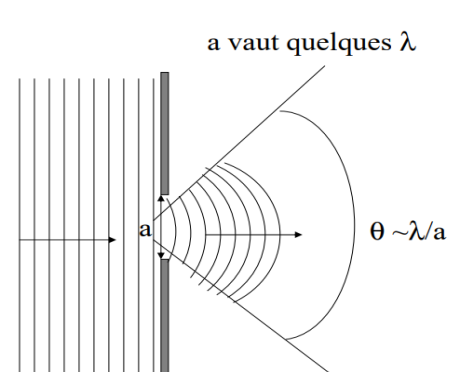


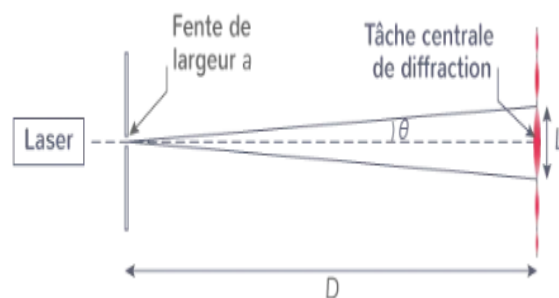
Figure II-24 : Phénomène de Diffraction.

Figure II-25 : Diffraction

$$\theta = \frac{\lambda}{a} \quad \text{Méthode analytique} \quad (\text{II-12})$$

$$\theta = \frac{L}{2D} \quad \text{Méthode géométrique} \quad (\text{II-13})$$

$$\lambda = \frac{aL}{2D} \quad (\text{II-14})$$



II-2-Interférences :

Phénomène qui résulte de la superposition d'ondes de même nature et de fréquences égales (ou voisines), et qui se manifeste par une variation dans l'espace ou dans le temps de l'amplitude de la résultante des ondes.

Figure II-26 : Interférences

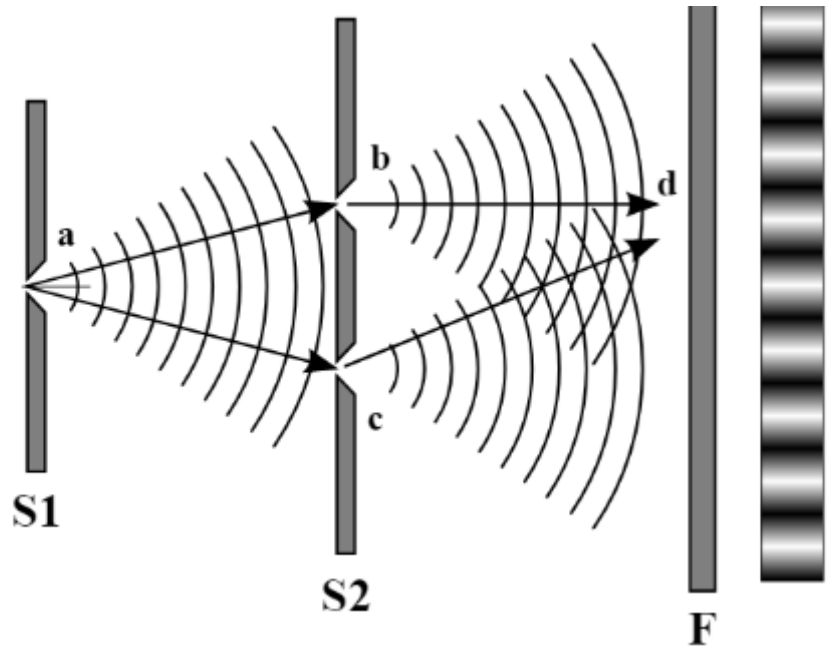
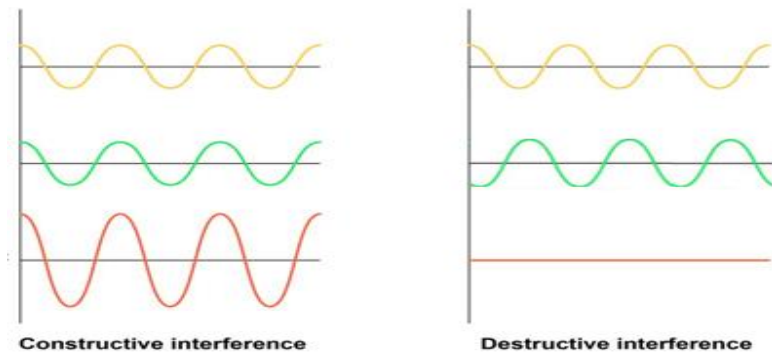


Figure II-27 : Interférence



$$E_1(x, t) = E_0 \cos(k \cdot x - \omega t) \quad (\text{II-15})$$

$$E_2(x, t) = E_0 \cos(k \cdot x - \omega t + \phi) \quad (\text{II-16})$$

la superposition donne :

$$E(x, t) = E_1 + E_2 = 2 \cdot E_0 \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \cos\left(kx - \omega t + \frac{\phi}{2}\right) \quad (\text{II-17})$$

Si $\phi = 0$ (onde en phase) interférence constructive

Si $\phi = \pi$ (onde en opposition) interférence destructive.

Loi de Bragg : $n' \cdot \lambda = 2d \sin(\theta)$ (II-18)

n' : l'ordre de diffraction d : distance entre deux plan cristallins (inter réticulaire)

θ angle de Bragg (angle entre le plan cristallin et l'onde incident).

II-3 Onde électromagnétique

Le champ électrique **E** et le champ magnétique **B** sont des champs vectoriels.

Ils obéissent aux équations de Maxwell qui, dans le vide (loin des sources) prennent la

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad \text{Ou} \quad \overrightarrow{\text{Div}} \vec{E} = 0 \quad (\text{II-19})$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Ou} \quad \overrightarrow{\text{Div}} \vec{B} = 0 \quad (\text{II-20})$$

$$\nabla \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Ou} \quad \overrightarrow{\text{Rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II-21})$$

$$\nabla \wedge \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \text{Ou} \quad \overrightarrow{\text{Rot}} \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{II-22})$$

Pour chaque composante des champs E et B

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = E_0 \cdot \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \vec{e}_u \quad (\text{II-23})$$

Champ électrique **E** vecteur D'onde **K**

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (\text{II-24})$$

$$\mu_0 \epsilon_0 = \frac{1}{c^2} k \quad (\text{II-25})$$

k Direction de propagation e_u Direction de polarisation perpendiculaire à **E** , donc à e_u

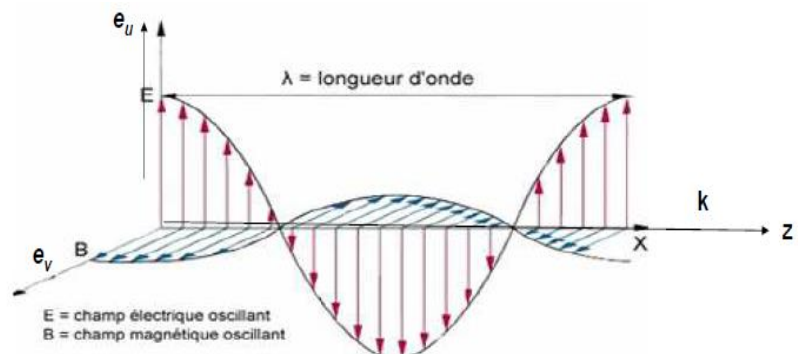
Onde lumineuse = onde transverse

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = B_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \vec{e}_v \quad (\text{II-26})$$

$$B_0 = \frac{E_0}{c} \quad (\text{II-27})$$

k est orthogonal à **B** , donc à e_v , de plus e_v est orthogonal à e_u .

Figure II- 28: OEM



II-4 Approche mathématique

- Perturbation $f(x, y, z, t)$ d'un milieu se comporte comme une onde si $f(x, y, z, t)$ vérifie l'équation de d'Alembert:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{II-28})$$

$$\nabla^2 \vec{E} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{II-29})$$

La direction de propagation de l'énergie électromagnétique est donnée par le Vecteur de Poynting :

$$\vec{\pi} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} \quad (\text{II} - 30)$$

Conséquence :

$\vec{\pi}$ Est orthogonale à $\vec{E}$ et à $\vec{B}$, donc parallèle à $\vec{k}$.

L'énergie se propage dans la même direction que le vecteur d'onde.

Le module de $\vec{\pi}$ représente une puissance par unité de surface I ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

$$\|\vec{\pi}\| = \epsilon_0 \cdot c \cdot E_0^2 \cos^2(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi) \quad (\text{II-31})$$

$$I = \langle \|\vec{\pi}\| \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_0^2 \quad (\text{II-32})$$

Moyenne du carré du champ I est proportionnelle au carré du champ

II-5 Notation complexe

Temporelle de la forme

$$\cos(\omega t + \phi(\vec{r})) = \text{Re}(e^{-i(\omega t + \phi(\vec{r}))}) \quad (\text{II-33})$$

On introduit alors l'amplitude complexe du champ $S(\vec{r}, t)$ telle que

$$S(\vec{r}, t) = \text{Re}(f(\vec{r}, t)) \quad (\text{II-34})$$

Exemple de l'onde plane

$$S(\vec{r}, t) = f_0(e^{-i(\omega t + \phi(\vec{r}))}) \quad (\text{II-35})$$

$$S(\vec{r}, t) = f_0 \cdot \text{Expo}(-i(\omega t \pm \vec{k} \cdot \vec{r} + \phi)) \quad (\text{II-36})$$

$$\vec{k} = k_x \vec{e}_x + k_y \vec{e}_y + k_z \vec{e}_z = k \vec{e}_u \quad (\text{II-37})$$

$$\vec{r} = x \vec{e}_x + y \vec{e}_y + z \vec{e}_z \quad (\text{II-38})$$

$$\|\vec{k}\| = k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{II-39})$$

$$\|\vec{r}\| = r = OM \quad (\text{II-40})$$

Exemple de l'onde sphérique

$$S(\vec{r}, t) = \frac{f_0}{r} \text{expo}(-i(\omega t \pm \vec{k} \cdot \vec{r} + \phi)) \quad (\text{II-41})$$

$$S(\vec{r}, t) = \frac{f_0}{r} (e^{-i(\omega t + \vec{k} \cdot \vec{r} + \phi)}) \quad (\text{II-42})$$

$$\vec{r} = x \vec{e}_x + y \vec{e}_y + z \vec{e}_z \quad (\text{II-43})$$

$$\|\vec{k}\| = k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{II-44})$$

$$\|\vec{r}\| = r = OM \quad (\text{II-45})$$

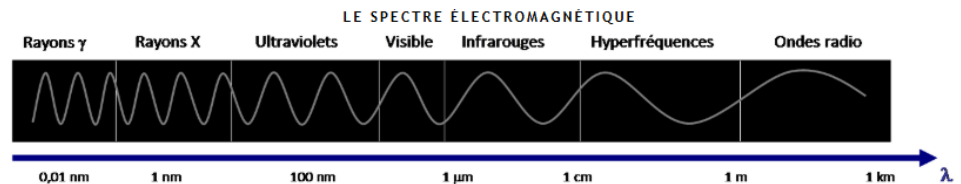


Figure II-29 LE SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

II-6 Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou bien encore de leur énergie (figure ci-dessous).

En partant des ondes les plus énergétiques, on distingue successivement :

- **Les rayons gamma (γ) :** ils sont dus aux radiations émises par les éléments radioactifs. Très énergétiques, ils traversent facilement la matière et sont très dangereux pour les cellules vivantes.

Leurs longueurs d'onde s'étendent d'un centième de milliardième (10^{-14} m) à un milliardième (10^{-12} m) de millimètre.

- **Les rayons X :** rayonnements très énergétiques traversant plus ou moins facilement les corps matériels et un peu moins nocifs que les rayons gamma, ils sont utilisés notamment en médecine pour les radiographies, dans l'industrie (contrôle des bagages dans le transport aérien), et dans la recherche pour l'étude de la matière (rayonnement synchrotron).

Les rayons X ont des longueurs d'onde comprises entre un milliardième (10^{-12} m) et un cent millième (10^{-8} m) de millimètre.

- **Les ultraviolets :** rayonnements qui restent assez énergétiques, ils sont nocifs pour la peau. Heureusement pour nous, une grande part des ultraviolets est stoppée par l'ozone atmosphérique qui sert de bouclier protecteur des cellules.

Leurs longueurs d'onde s'échelonnent d'un cent millième (10^{-8} m) à quatre dixièmes de millième ($4 \cdot 10^{-7}$ m) de millimètre.

- **Le domaine visible :** correspond à la partie très étroite du spectre électromagnétique perceptible par notre œil. C'est dans le domaine visible que le rayonnement solaire atteint son maximum ($0,5 \mu\text{m}$) et c'est également dans cette portion du spectre que l'on peut distinguer l'ensemble des couleurs de l'arc en ciel, du bleu au rouge.

Il s'étend de quatre dixièmes de millième ($4 \cdot 10^{-7}$ m) - *lumière bleue* - à huit dixièmes de millième ($8 \cdot 10^{-7}$ m) de millimètre - *lumière rouge*.

- **L'infrarouge :** rayonnement émis par tous les corps dont la température est supérieure au zéro absolu (-273°C).

En télédétection, on utilise certaines bandes spectrales de l'infrarouge pour mesurer la température des surfaces terrestres et océaniques, ainsi que celle des nuages.

La gamme des infrarouges couvre les longueurs d'onde allant de huit dixièmes de millième de millimètre ($8 \cdot 10^{-7}$ m) à un millimètre (10^{-3} m).

- **Les ondes radar ou hyperfréquences :** Cette région du spectre est utilisée pour mesurer le rayonnement émis par la surface terrestre et s'apparente dans ce cas à la télédétection dans l'infrarouge thermique, mais également par les capteurs actifs comme les systèmes radar.

Un capteur radar émet son propre rayonnement électromagnétique et en analysant le signal rétrodiffusé, il permet de localiser et d'identifier les objets, et de calculer leur vitesse de déplacement s'ils sont en mouvement. Et ceci, quelque soit la couverture nuageuse, de jour comme de nuit.

Le domaine des hyperfréquences s'étend des longueurs d'onde de l'ordre du centimètre jusqu'au mètre.

- **Les ondes radio** : Ce domaine de longueurs d'onde est le plus vaste du spectre électromagnétique et concerne les ondes qui ont les plus basses fréquences. Il s'étend des longueurs d'onde de quelques cm à plusieurs km.

Relativement faciles à émettre et à recevoir, les ondes radio sont utilisées pour la transmission de l'information (radio, télévision et téléphone). La bande FM des postes de radio correspond à des longueurs d'onde de l'ordre du mètre. Celles utilisées pour les téléphones cellulaires sont de l'ordre de 10 cm environ.

Contrairement à l'œil humain qui n'est capable de capter le rayonnement que dans une fenêtre très étroite du spectre électromagnétique, celle correspondant au domaine du visible (longueurs d'onde comprises entre $0,4\mu\text{m}$ et $0,7\mu\text{m}$), les capteurs satellitaires utilisent une fraction beaucoup plus étendue du spectre.

Trois fenêtres spectrales sont principalement utilisées en télédétection spatiale :

- Le domaine du visible
- Le domaine des infrarouges (proche IR, IR moyen et IR thermique)
- Le domaine des micro ondes ou hyperfréquences (pas abordé ici, même si elles ont une importance considérable en télédétection RADAR notamment)

Certains capteurs, peu nombreux, permettent de mesurer l'énergie du rayonnement ultraviolet. Ils sont utilisés principalement en astronomie pour l'étude des atmosphères planétaires ou pour mesurer la quantité d'UV atteignant la surface terrestre. En télédétection aérienne, le rayonnement proche UV 250 - 350 nm est utilisé pour des applications en océanographie, notamment pour l'identification et la cartographie des nappes d'hydrocarbures.

Pour déterminer λ on a :

Les ondes non ionisantes

-Loi de Planck :

$$E_{\lambda} = h f = \frac{h c}{\lambda} \quad (\text{II-46})$$

-Loi de malus : si la lumière incident est polarisée linéairement

$$I' = I \cos^2(\alpha) \quad (\text{II-47})$$

Si $\alpha = \frac{\pi}{2}$ (Polarisation et Analyseur croisés) alors $I' = 0$ (on a l'extinction).

Figure II-30 : Polarisateur

$$a = [a]_{\lambda}^{\alpha} \cdot c_m \cdot L \quad (\text{II-48})$$

a : Pouvoir rotatoire (en degrés) °

L : Epaisseur de substance active traversée dm

C_m : Concentration de la substance dissout g.cm^{-3}

$[a]_{\lambda}^{\alpha}$: Pouvoir rotatoire spécifique ($^{\circ} \text{ dm}^{-1} \text{ g}^1 \text{ cm}^3$)

les ondes ionisantes :

L'effet photoélectrique : $E_c = hf - W \quad (\text{II-49})$

La diffusion Compton : $\Delta\lambda = \frac{h}{m_e \cdot c} (1 - \cos(\theta)) \quad (\text{II-50})$

La création de paire e^+e^- : $E_c = hf + 2m_e \quad (\text{II-51})$

II-7 Bilan énergétique

Pour focalise les ondes no ionisent ver des ondes ionisent on va utiliser le bilan énergétique relatif

$$E_{\text{ionisante}} = N^{\circ} \times E_{\text{non-ionisante}} \quad (\text{II-52})$$

$$\frac{hc}{\lambda_i} = \frac{N^{\circ} \cdot h \cdot c}{\lambda_n} \Rightarrow \frac{N^{\circ}}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda_n} \quad (\text{II-53})$$

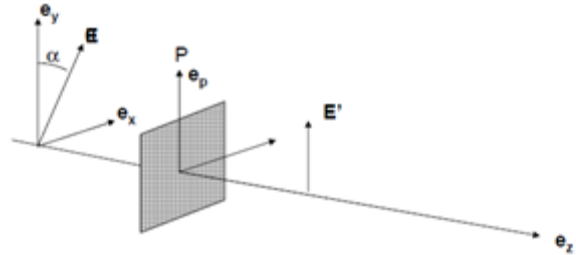
$$h \cdot f_i = h \cdot f_n \cdot N \Rightarrow f_i = f_n \cdot N^{\circ} \quad (\text{II-54})$$

N° : nombre de faisceaux équivalente

On peut utilise la puissance $P_i = E_i \cdot t = P_N = N^{\circ} \cdot E_N \cdot t \quad (\text{II-55})$

t le tempe de exposition

le surface de rayonnement S : $P_i = E_i \cdot t \cdot S = P_N = N^{\circ} \cdot E_N \cdot t \cdot S \quad (\text{II-56})$



S il peut être carré circulaireetc

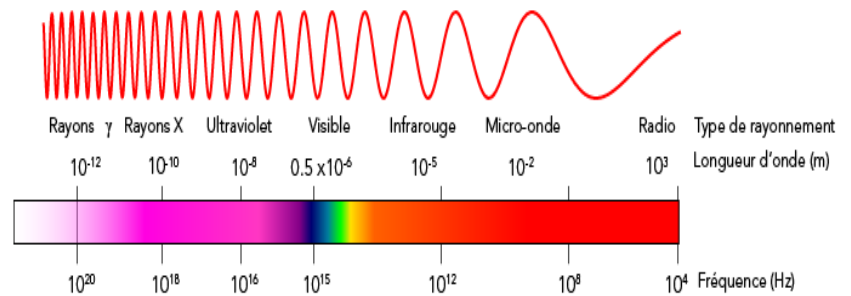


Figure II-31 LE SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE

$$h = 6.626068 \times 10^{-34} \text{ J.s} \quad C = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

II-1 Tableau d'équivalence des faisceaux

f(Hz) N	Rayons γ 10^{20}	Rayon x 10^{18}	ultraviolet 10^{16}	Visible 10^{15}	Infrarouge 10^{12}	Micro- onde 10^8	Radio 10^4
Rayons γ 10^{20}	1	10^{-2}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-8}	10^{-12}	10^{-16}
Rayon x 10^{18}	10^2	1	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-10}	10^{-14}
ultraviolet 10^{16}	10^6	10^2	1	10^{-1}	10^{-4}	10^{-8}	10^{-12}
Visible 10^{15}	10^{15}	10^3	10	1	10^{-3}	10^{-7}	10^{-11}
Infrarouge 10^{12}	10^8	10^6	10^4	10^3	1	10^{-4}	10^{-8}
Micro- onde 10^8	10^{12}	10^{10}	10^8	10^7	10^4	1	10^{-4}
Radio 10^4	10^{16}	10^{14}	10^{12}	10^{11}	10^8	10^4	1

$$A \cdot \cos(\omega' t + \vec{k}' \cdot \vec{r}' + \varphi') = \sum_{i=2}^n a_i \cos(\omega_i t + \vec{k}_i \cdot \vec{r}_i + \varphi_i) \quad (\text{II-57})$$

$$A e^{(-i(\omega' t + \vec{k}' \cdot \vec{r}' + \varphi'))} = \sum_{i=2}^n a_i e^{(-i(\omega_i t + \vec{k}_i \cdot \vec{r}_i + \varphi_i))} \quad (\text{II-58})$$

Si on a la même pulsation ω et la même amplitude a alors :

$$A e^{(-i(\omega' t + \vec{k}' \cdot \vec{r}' + \varphi'))} = \sum_{i=2}^n a \cdot e^{(-i(\omega t))} e^{(-i(\vec{k}_i \cdot \vec{r}_i + \varphi_i))} \quad (\text{II-59})$$

$$A e^{(-i(\omega' t + \vec{k}' \cdot \vec{r}' + \varphi'))} = a \cdot e^{(-i(\omega t))} \cdot \sum_{i=2}^n 1 e^{(-i(\vec{k}_i \cdot \vec{r}_i + \varphi_i))} \quad (\text{II-60})$$

Et si les ondes sont synchrones :

$$A e^{(-i(\omega' t + \vec{k}' \cdot \vec{r}' + \varphi'))} = a \cdot e^{(-i(\omega t))} \cdot \sum_{i=2}^n 1 e^{(-i(\vec{k}_i \cdot \vec{r}_i))} \quad (\text{II-61})$$

$a e^{(-i\omega t)}$: Amplitude équivalent a A .

$\sum_{i=2}^n e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}}$: Différence de marche pour deux sources ponctuelles et pour plus c'est la forme géométrique d'interférence.

Interférence par forme géométrique

Par le modèle renversement temporel

II-8-Domains d'application :

-Photolithographie : La photolithographie est l'ensemble des opérations permettant de transférer une image, généralement présente sur un masque, vers un substrat.

<https://www.asml.com/en/products/euv-lithography-systems>

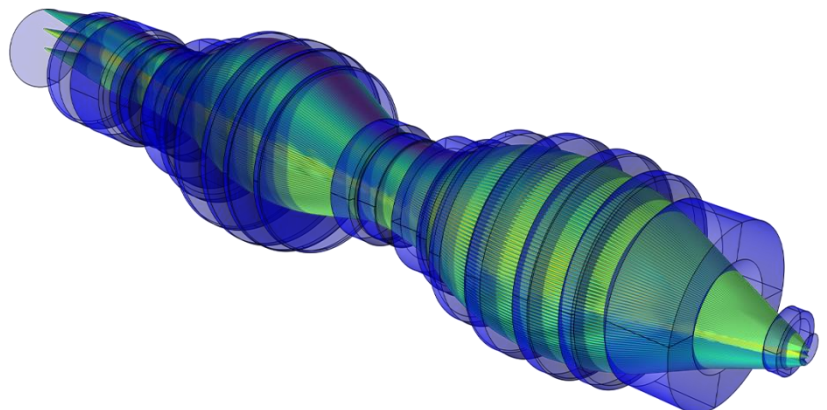


Figure II-32 Photolithographie

Radiographie externe

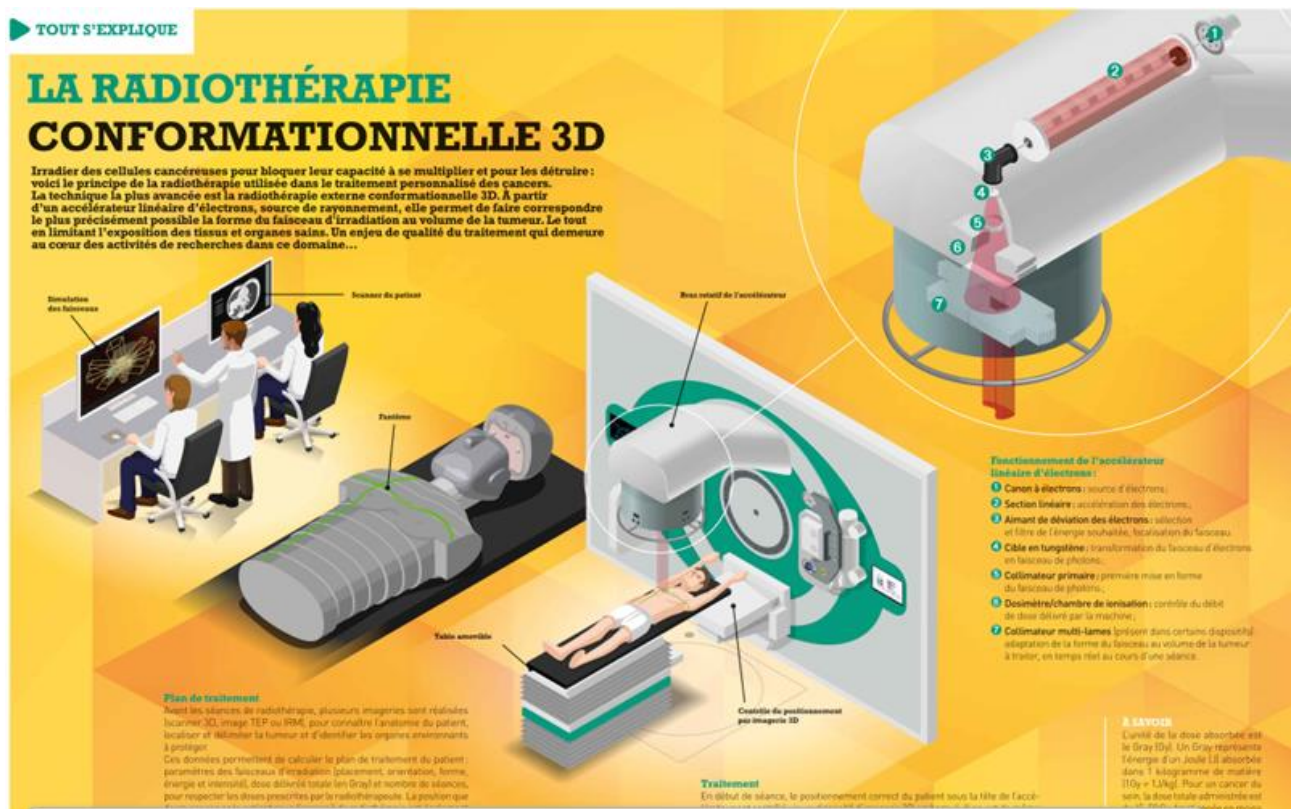


Figure II-33 radiothérapie externe

Le collimateur

Le collimateur est directement fixé sous le tube à rayons X. Il sert à délimiter la zone irradiée qui doit être limitée, au maximum, à la taille du détecteur: cassette ou amplificateur de brillance. Le collimateur sert aussi à simuler le faisceau X grâce à une lampe. Cette puissante lampe crée un faisceau lumineux qui est extérieur au faisceau X, elle ne doit servir qu'au centrage du patient car elle chauffe beaucoup et donc échauffe beaucoup le collimateur.

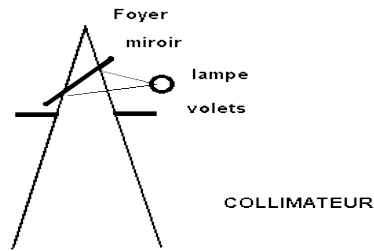


Figure II-34

Le collimateur comprend de volets plombés qui délimitent un champ de forme rectangulaire pour les cassettes ou octogonale (iris) pour les amplificateurs de brillance. Ces volets sont motorisés et asservis, selon les statifs, à la taille du détecteur. Certains collimateurs ont en plus des filtres progressifs qui délimitant le bord du patient vont permettent d'homogénéiser l'image et donc d'éviter les saturations. Cela va autoriser une excellente qualité image sans perte d'information. Ces filtres progressifs sont multiples, positionnables et orientables. Ils vont permettent, par exemple, de cerner le bord extérieur des jambes du patient tout en masquant l'entre jambe.

Le collimateur est un composant fragile comprenant beaucoup de moteurs et de petite mécanique : il faut éviter de le choquer et il ne doit pas servir de poignée pour le patient.

Panne solaire : thermo solaire+panne solaire



Figure II-35 Solaire photovoltaïque à concentration

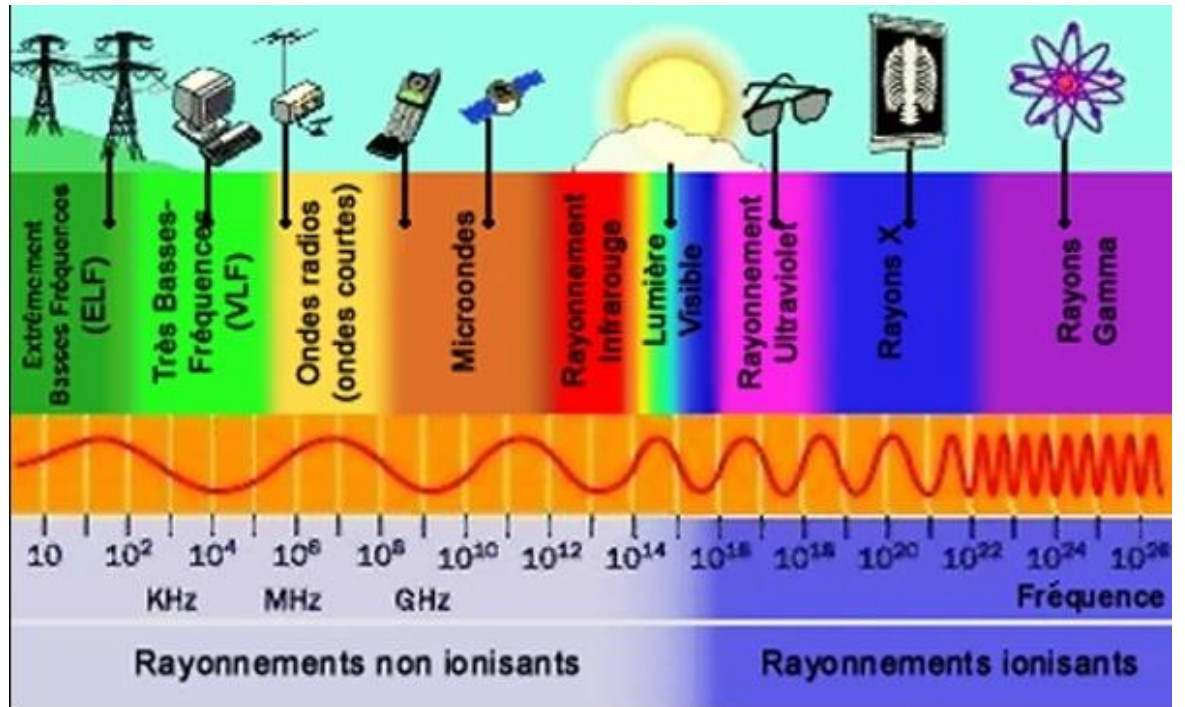


Figure II-36 : Rayonnement ionisant et non ionisant

Chapitre III

Modélisation et simulation

$$A \cdot \cos(\omega t + \vec{k}\vec{r} + \varphi) = a \cdot \sum_{i=1}^n \cos(\vec{k}_i \vec{r}_i + \varphi_i) \quad (\text{III-60})$$

On va modéliser la superposition des n onde par un onde progressive stationner (Independent ou tempe)

On synchronic $\varphi = 0$.

$$E = a \cdot \cos(\vec{k}\vec{r}) \quad (\text{III-61})$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (\text{III-62})$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{III-63}).$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f = \frac{2\pi c}{\lambda} \quad (\text{III-64})$$

On utilise Math lab 2020a comme logiciel de simulation

Model 1 : un point $\lambda = 0.5 \text{ m}$, $d = 0 \text{ m}$, $a = 1 \text{ m}$

Figure III-37

```
clc; clear; close all;
```

```
% Paramètres
```

```
lambda = 0.5; % Longueur d'onde
```

```
k = 2*pi/lambda; % Nombre d'onde
```

```
N = 2; % Nombre de sources
```

```
x = linspace(-5,5,500);
```

```
y = linspace(-5,5,500);
```

```
[X,Y] = meshgrid(x,y);
```

```
% Positions des sources
```

```
sources = [1,1];
```

```
A = 1; % AMPLITUDE;
```

```
% Calcul du champ résultant
```

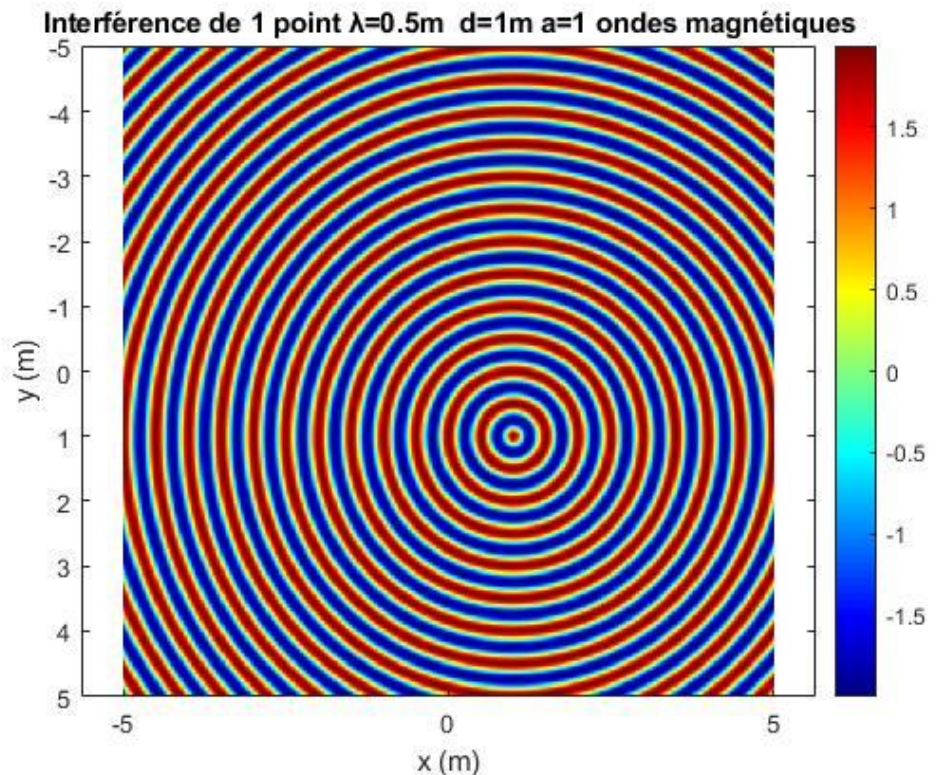
```
E = zeros(size(X));
```

```
for i=1:N
```

```
    r = sqrt((X-sources(1,1)).^2 + (Y-sources(1,2)).^2);
```

```
    E = E + A*cos(k*r);
```

```
End
```



% Affichage

figure ;

imagesc(x,y,E);

colormap jet;

colorbar;

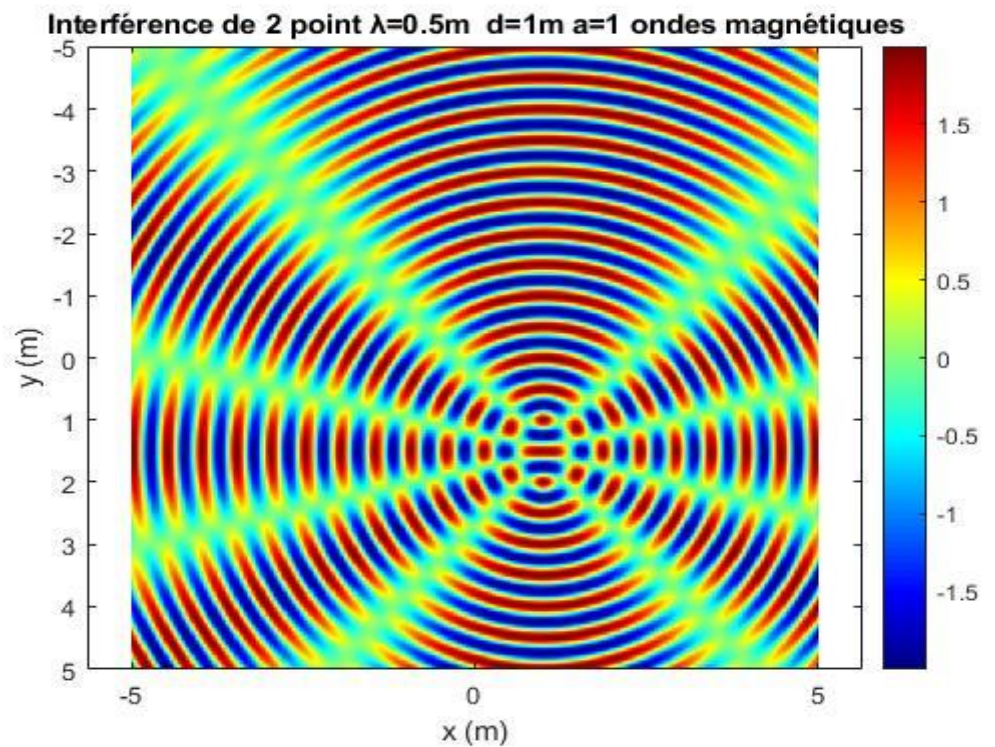
title('Interférence de 1 point $\lambda=0.5\text{m}$ $d=1\text{m}$ $a=1$ ondes magnétiques');

xlabel('x (m)'); ylabel('y (m)');

axis equal;

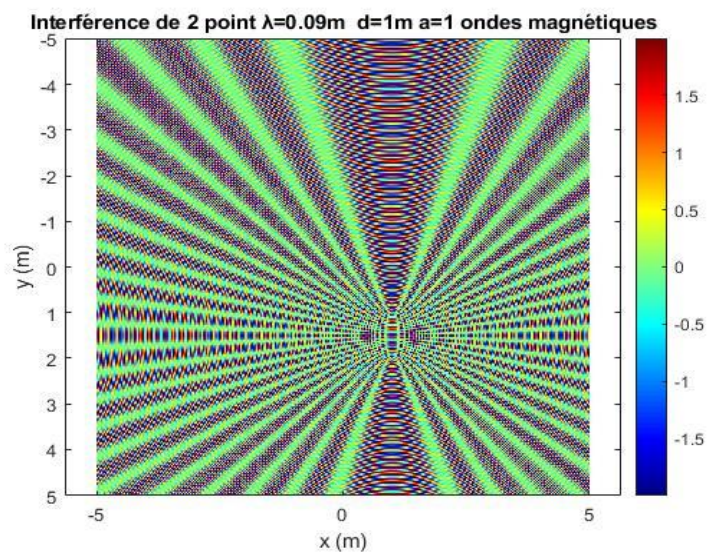
Model 2: deux points $\lambda=0.5\text{m}$, $d=1\text{m}$, $a=1$

Figure III-38 :



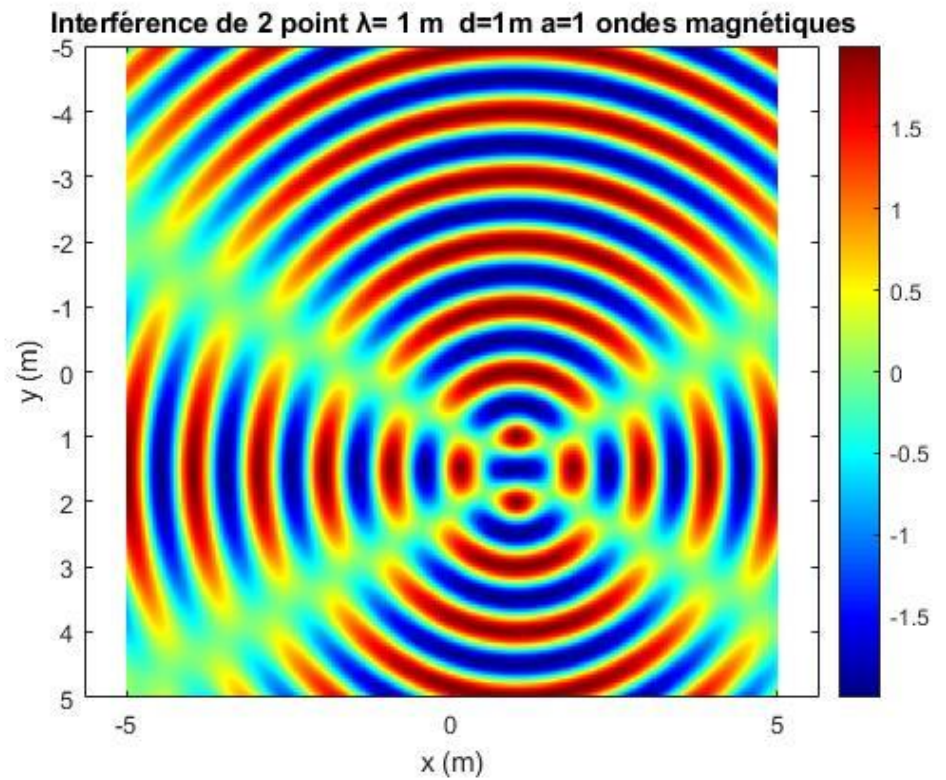
Model 3 : deux points $\lambda=0.09\text{m}$, $d=1\text{m}$, $a=1$

Figure III-39 :



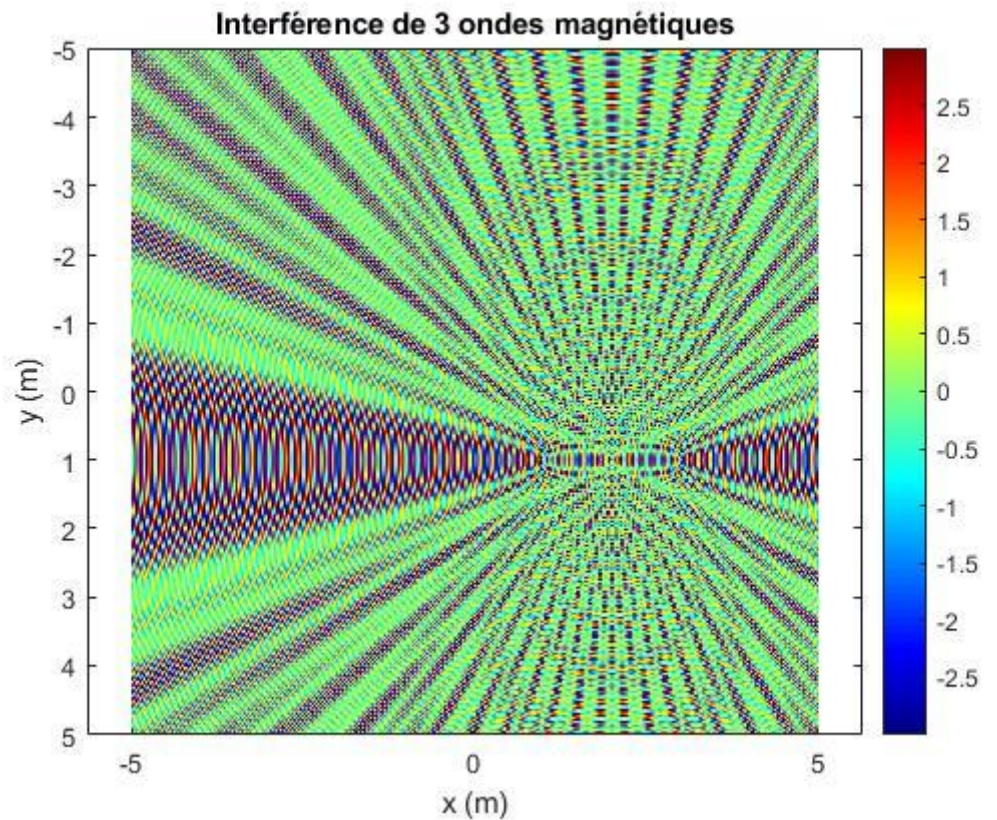
Model 4: deux points $\lambda=1\text{m}$ $d=1\text{m}$ $a=1$

Figure III-40 :



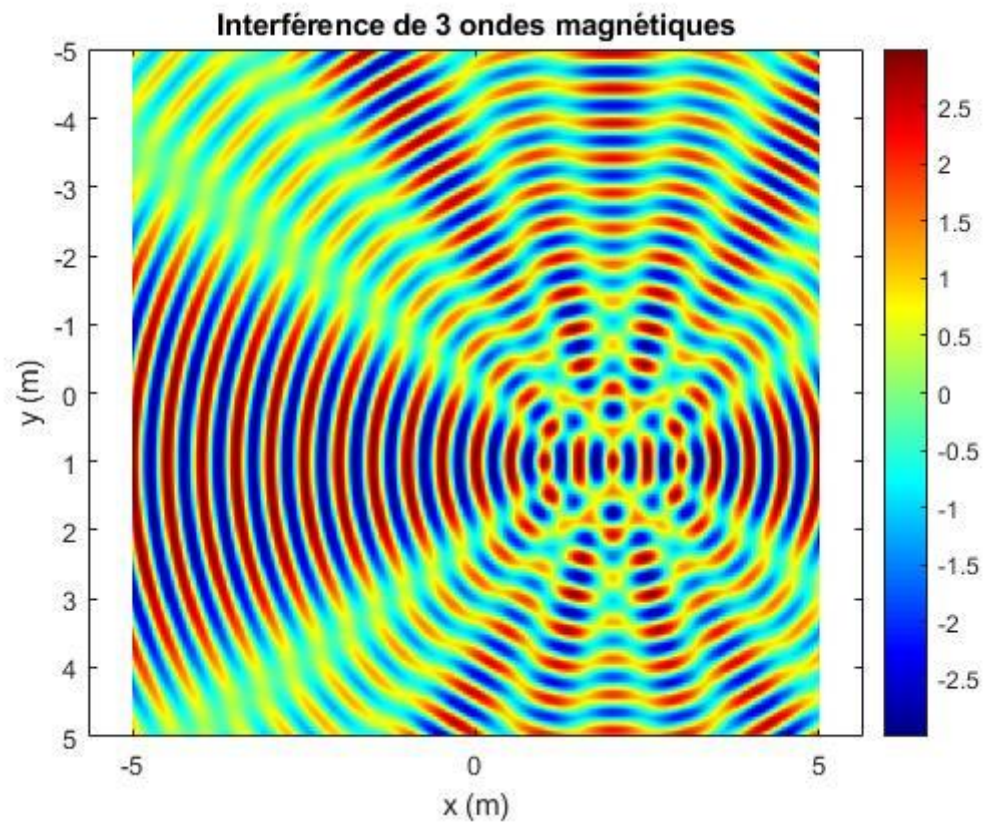
Model 5 : trois points $\lambda=0.5\text{m}$, $d=1\text{m}$, $a=1$ horizontal

Figure III-41 :



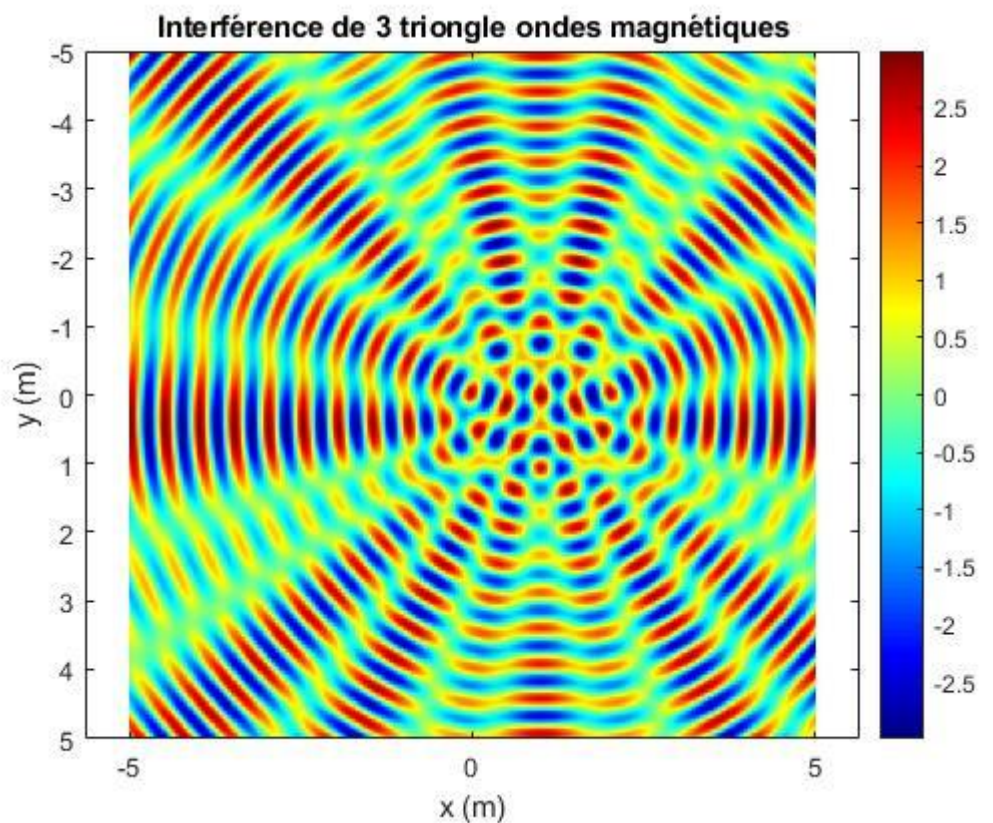
Model 6 : trios points $\lambda=0.09$ m d=1m a=1 horizontal

Figure III-42 :



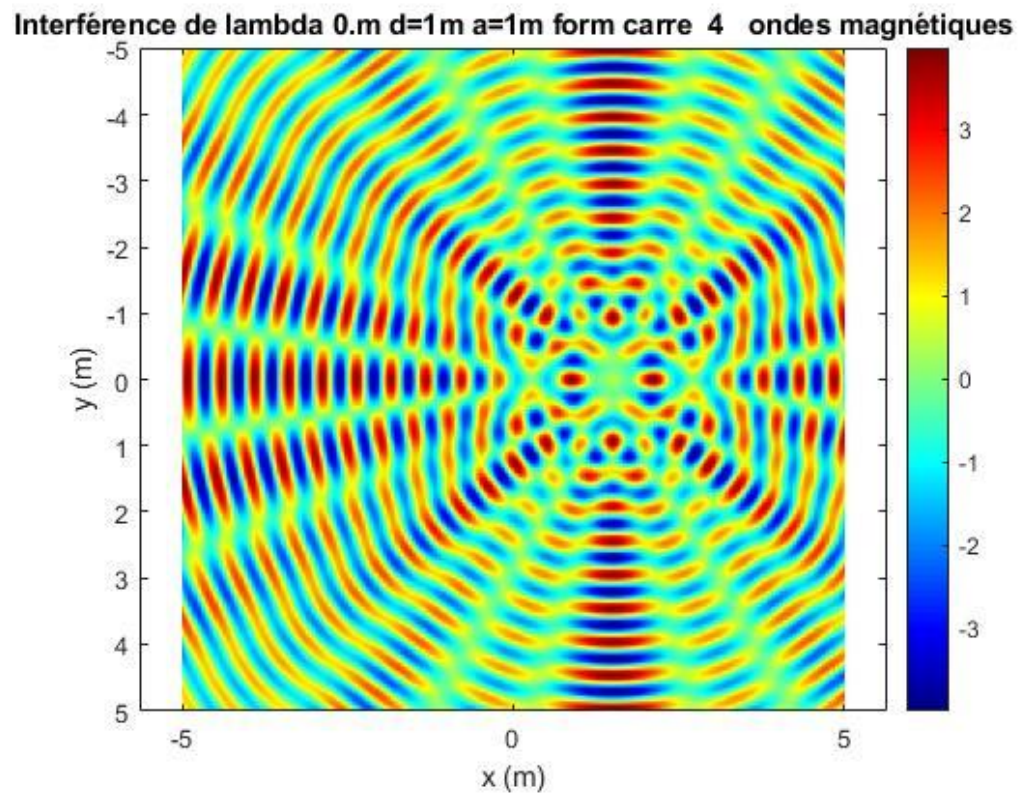
Model 7 : trois points forme triangulaire $\lambda=0.5$ m d=1m a=1

Figure III-43 :



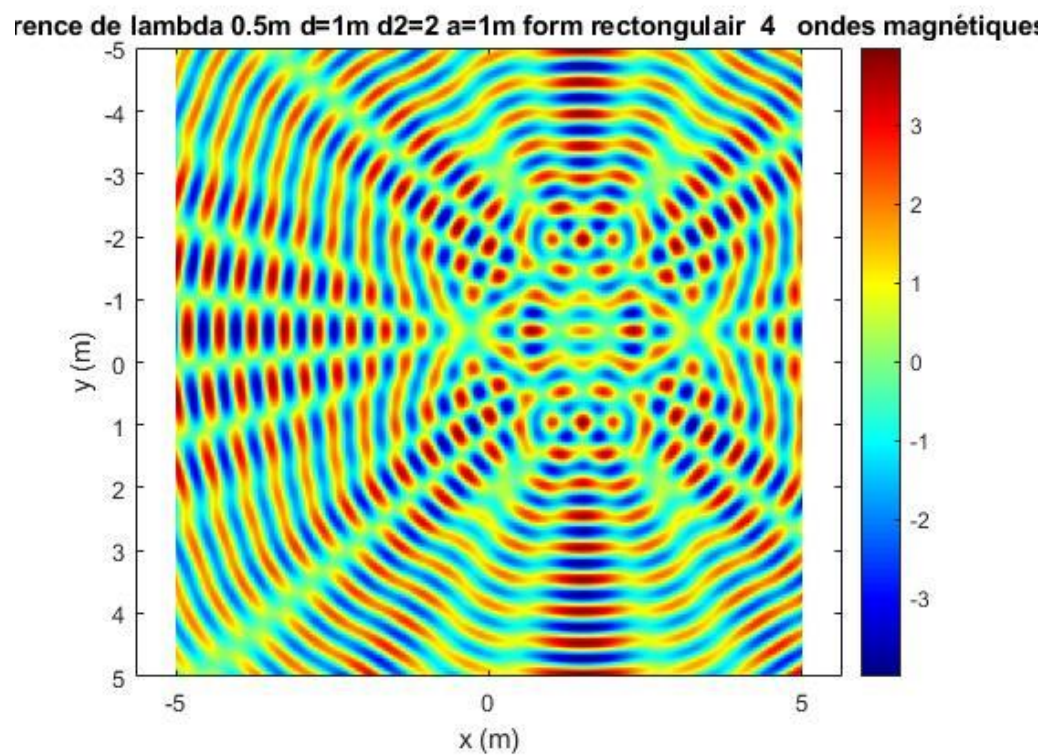
Model 8 : quatre points forme carrée $\lambda=0.5$ m , $d=1$ m, $a=1$

Figure III-44 :



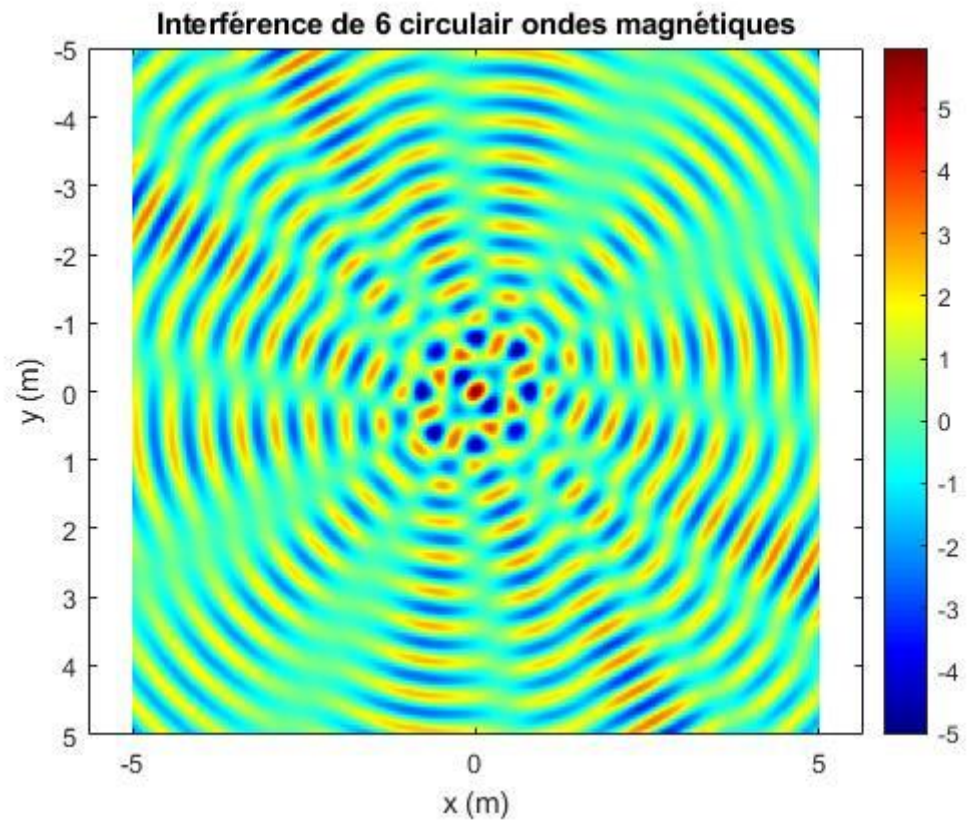
Model 9 : quatre points forme rectangulaire $\lambda=0.5$, $d_1=1$, $d_2=2$, $a=1$

Figure III-45



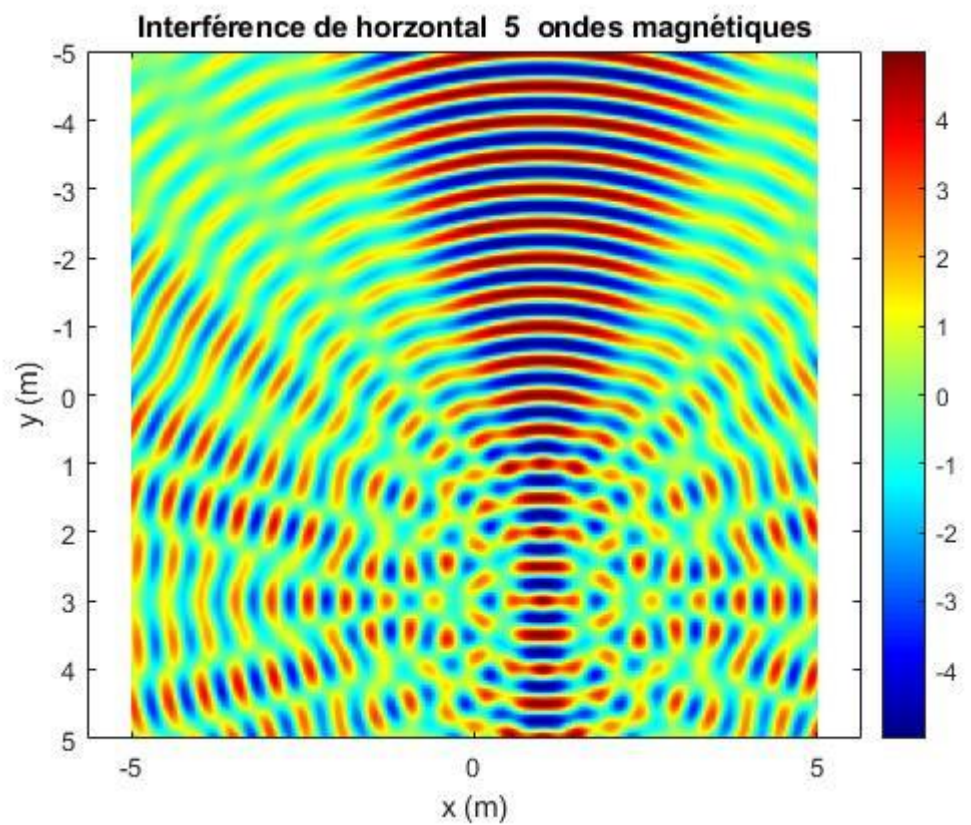
Model 10 : six points $\lambda=0.5\text{m}$ forme circulaire

Figure III-46 :



Model 11 : cinq points verticale

Figure III- 47 :



Model 12 six points forme rectangulaire $\lambda=0.5\text{m}$ $d=1\text{m}$ $a=1$

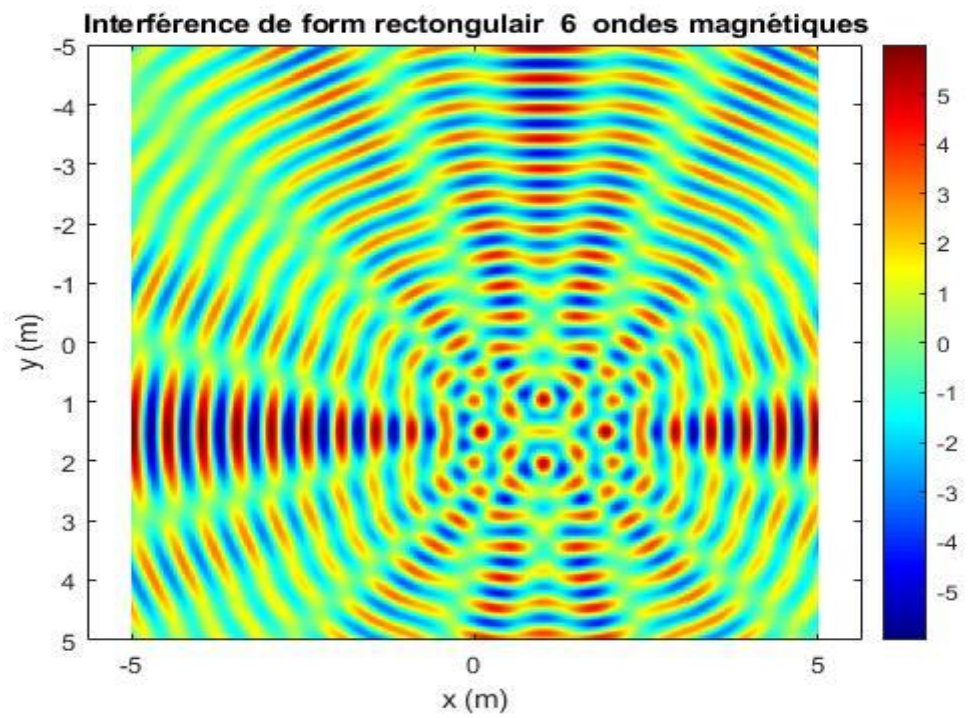


Figure III-48 :

Model 13 : neuf points linéaires $\lambda=0.5\text{m}$ $d=1\text{m}$ $a=1$

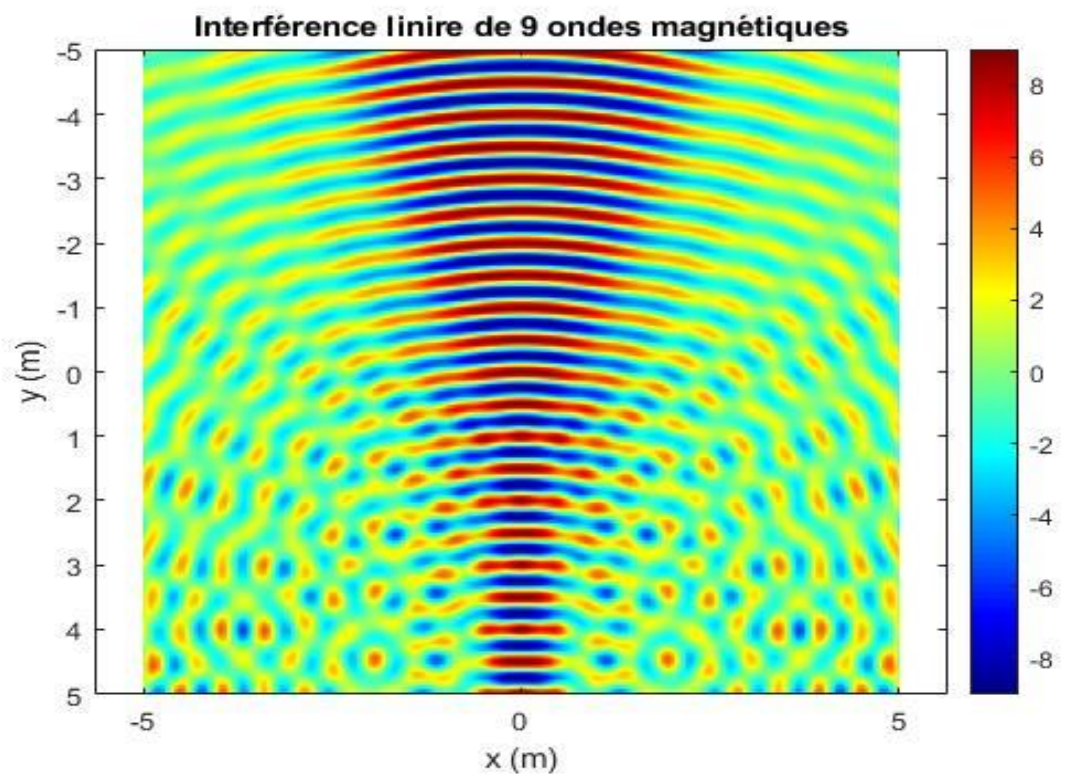
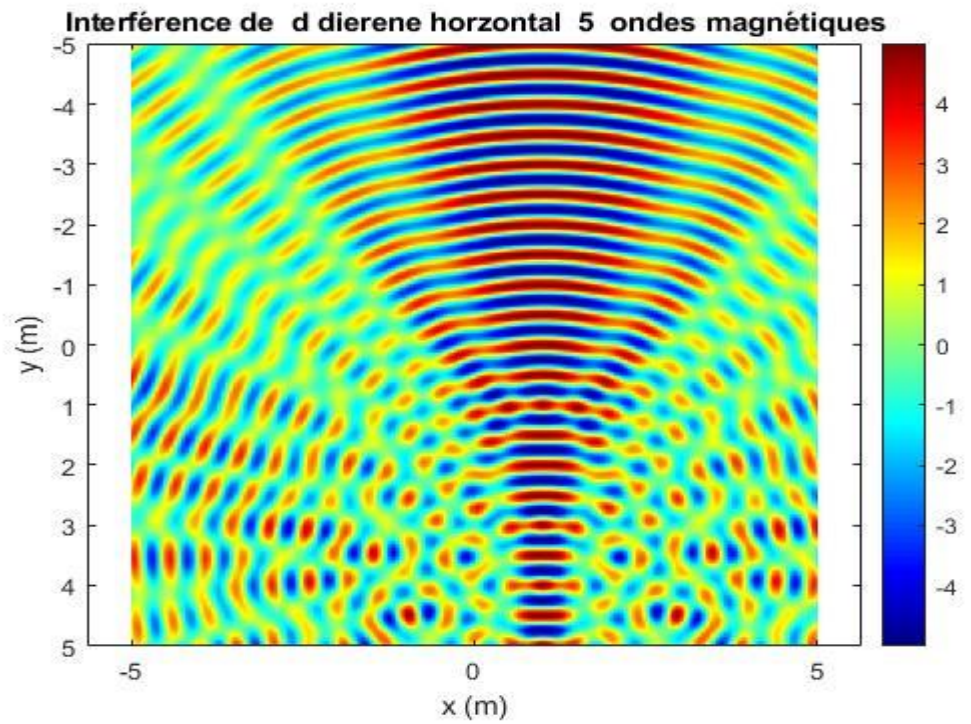


Figure III-49 :

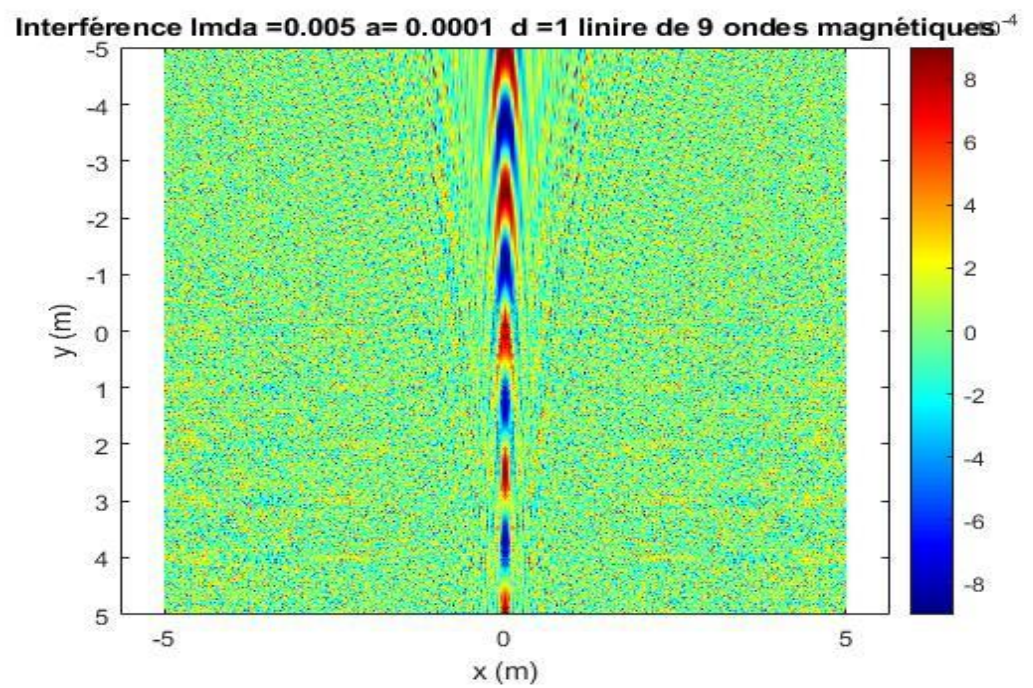
Model 14 :5 points $\lambda=0.5\text{m}$ $d=1\text{m}$ $a=1$

FigureIII- 50:



Model 15: 9 points $\lambda=0.005$ $a=0.001$ $d=1\text{m}$

Figure III-51 :



Conclusion général :

- Ce travail nous a permis de savoir l'intérêt majeur dans les nombreux domaines scientifiques et technologiques que constitue la focalisation des ondes électromagnétiques, notamment en imagerie optique, microscopie, télécommunications, traitement de faisceaux laser, énergie solaire, ou encore optique quantique.
- Une modélisation de différents systèmes optiques a été réalisée afin d'évaluer leur capacité à focaliser les ondes électromagnétiques.
- Les résultats ont montré une efficacité variable selon les configurations optiques, mettant en évidence l'influence cruciale de la géométrie et des conditions de propagation.
- Certains systèmes optiques ont démontré une bonne capacité de focalisation.

D'autres configurations ont présenté des performances limitées, en raison notamment d'aberrations optiques, de pertes de transmission ou de diffractions non négligeables

Index

Cosmol multiphysique, 17
Diaphragme, 16
Diffraction, 19, 20
Focale, 13, 14, 15, 16
Focalisation, 1, 4, 6
Interférence, 4, 22
La lentille à échelons de Fresnel, 16
OpticStudio, 18
Optique géométrique, 9
Optique ondulatoire, 5, 21
Réflexion, 10, 11
Réfraction, 10, 11, 12, 13, 16
Spectre électromagnétique, 27, 28

Bibliographie

- [1] . Mike Goldsmith, Les Ondes, EDP Sciences, 2023.
- [2] . Agnès MAUREL, Gilles BOUCHET, Optique géométrique, éditions Belin Sup, 2002.
- [3] . Agnès MAUREL, Gilles BOUCHET, Optique ondulatoire, éditions Belin Sup, 2003.
- [4] . **Perez, Carles**, Fleckinger, Electromagnétisme : fondements et applications, éditions Dunod, 2001.
- [5] . **Serge Huard**, Polarisation de la lumière, éditions Masson, 1993.
- [6] . Michel Décorps, Imagerie de résonance magnétique Bases physiques et méthodes, éditions EDP Sciences, 2011.
- [7] . <https://www.unige.ch/sciences/physique/tp/tpe/PDF/O1> 11/06/2025 10 :10
- [8] . <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/rayonnement/1-rayonnement-electromagnetique/1-4-spectre-electromagnetique.html> 11/06/2025 10 :10
- [9] . <https://www.comsol.fr/ray-optics-module> 11/06/2025 10 :10
- [10] . <https://www.ansys.com>
- [11] . <https://www.synopsys.com/optical-solutions> 11/06/2025 10 :10
- [12] . <https://www.kartable.fr/ressources/physique-chimie/cours/les-phenomenes-de-diffraction-et-dinterference/52458> 11/06/2025 10 :10
- [13] . <https://unacademy.com/content/neet-ug/study-material/physics/interference-of-light/> 11/06/2025 10 :10