

LP16: Microscopies optiques

Alexandre Fafin

27/05/18

Références

- [1] L. Aigouy. *Les nouvelles microscopies : à la découverte du nanomonde*. Belin, 2006.
- [2] S. Houard. *Optique : une approche expérimentale et pratique*. de boeck, 2011.
- [3] J.Ph. Pérez. *Optique : fondements et applications*. Dunod, 2011.
- [4] Sextant. *Optique expérimentale*. Hermann, 1997.

Niveau

L1/L2

Prè-requis

- Optique géométrique
- Optique ondulatoire (diffraction)
- Incertitudes d’Heisenberg

Objectifs

- Intérêt du guidage

— Caractéristiques du guidage (dispersion, modes, confinement)

Table des matières

1	Le microscope à deux lentilles[2, 3]	2
1.1	Description	2
1.2	Puissance et grossissement	2
1.3	Profondeur de champ	3
1.4	Ouverture numérique	3
1.5	Pouvoir de résolution	4
2	Microscopie optique en champ proche	4
2.1	Diffraction d’une onde plane	4
2.2	Ondes évanescentes	5
2.3	Un microscope optique à champ proche[1]	5

Introduction

On souhaite voir loin : télescope (du grec voir loin)pour augmenter la quantité de lumière reçue et agrandir l’image. On souhaite voir petit : microscope (du grec petit observer). Plusieurs techniques de microscopie : optique, à sonde locale (AFM), électronique (MEB, MET...)

Pouvoir de résolution de l'oeil : 1 minute d'arc soit 3.10^{-4} rad. On peut voir un détail de $75 \mu\text{m}$ pour une image située à 25 cm (au punctum proximum).

Le premier instrument optique utilisé est la loupe, soit une simple lentille épaisse convergente, permet un grossissement de l'ordre de 5 à 10. Ainsi le plus petit objet pouvant être vu est de l'ordre de la dizaine de micromètre.

Développons maintenant le microscope à deux lentilles

1 Le microscope à deux lentilles[2, 3]

1.1 Description

Un microscope optique élémentaire se compose essentiellement de 4 parties :

- Le tube optique aux extrémités duquel se trouvent deux systèmes optiques centrés convergents de même axe optique : l'objectif du côté de l'objet et l'oculaire du côté de l'œil ou du capteur
- La platine sur laquelle est fixée l'objet à étudier
- Un système de translation du tube pour la mise au point
- Un système d'éclairage de l'objet : source + condenseur + diaphragme

Avec une loupe on va observer l'objet directement. Ici l'idée est d'utiliser l'image agrandie que donne l'objet par un autre système optique : l'objectif. Le premier microscope date des années 1590 et a été construit par Jansen père et fils.

On va étudier le tube optique. L'oculaire est assimilé à une lentille mince convergente L_2 de distance focale f'_2 . Cette distance focale est très petite, de l'ordre du millimètre. L'objectif, placé proche d'un objet (AB), positionné perpendiculairement à l'axe optique et tel que le point A soit situé sur cet axe, en donne une image réelle intermédiaire (A_1B_1) très agrandie. L'oculaire joue le rôle de loupe et donne de ($A_1 B_1$) une image finale virtuelle ($A'B'$) agrandie.

On se place dans les conditions de Gauss :

- Rayons peu inclinés par rapport à l'axe optique

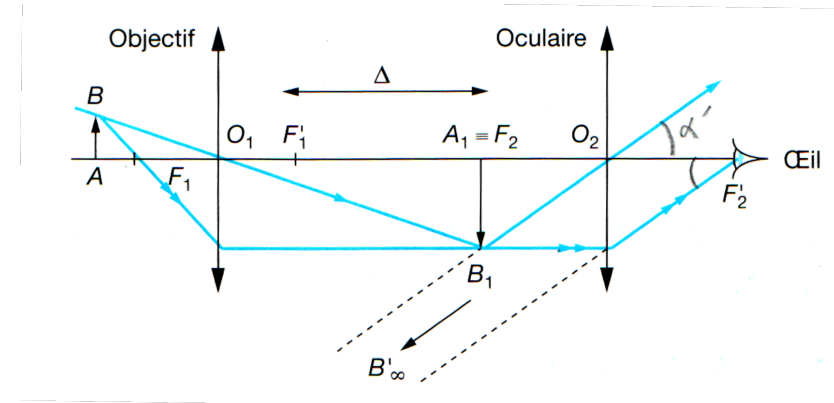


FIGURE 1 – Microscope avec une image à l'infinie

— Rayons peu éloignés de l'axe optique.

Le principe du microscope à deux lentilles est représenté figure 1

1.2 Puissance et grossissement

On veut observer une image sans accommoder (pour éviter la fatigue visuelle). On place notre œil au foyer image de la lentille L_2 .

Grandissement de l'objectif

Le grandissement de l'objectif est défini par :

$$\gamma_{ob} = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_1I}} = -\frac{\Delta}{f'_1} \quad (1)$$

Manip : Étude d'un objectif et détermination de la distance focale [4]

Grossissement de l'oculaire

Pour l'oculaire, l'image étant à l'infini on définit le grossissement comme étant le rapport de l'angle sous lequel on voit l'objet et l'angle sous lequel

on voit l'objet à l'oeil nu. Le grossissement commercial est défini par :

$$G_{c,oc} = \frac{\alpha'}{\alpha_1} = \frac{\overline{A_1 B_1}}{\overline{f'_2}} = \frac{d_m}{f'_2} \quad (2)$$

Grossissement du microscope

Pour observer l'objet à l'infini à travers l'oculaire, il est nécessaire de placer $A_1 B_1$ dans le plan focal objet de L_2 . L'objet est alors vu sous l'angle :

$$\alpha' = \frac{\overline{A_1 B_1}}{\overline{F'_2 O_2}} \quad (3)$$

$$G_c = \frac{\alpha'}{\alpha} = -\gamma_{ob} G_{c,oc} = |\gamma_{ob}| G_{c,oc} \quad (4)$$

Puissance intrinsèque du microscope

La puissance intrinsèque d'un microscope est la valeur absolue du rapport entre l'angle sous lequel on voit l'objet à travers le microscope et la taille de l'objet :

$$P_i = \left| \frac{\alpha'}{\overline{AB}} \right| = \frac{1}{f'_2} |\gamma_{ob}| \quad (5)$$

La puissance intrinsèque s'exprime en dioptrie et vaut généralement quelques centaines à quelques milliers.

1.3 Profondeur de champ

La profondeur de champ ou latitude latérale de mise au point est la plage de distance pour laquelle l'oeil placé au niveau du foyer image de l'oculaire obtiendra une image nette de l'objet.

L'image final doit être située entre le punctum proximum (PP) et le prunctum remotum

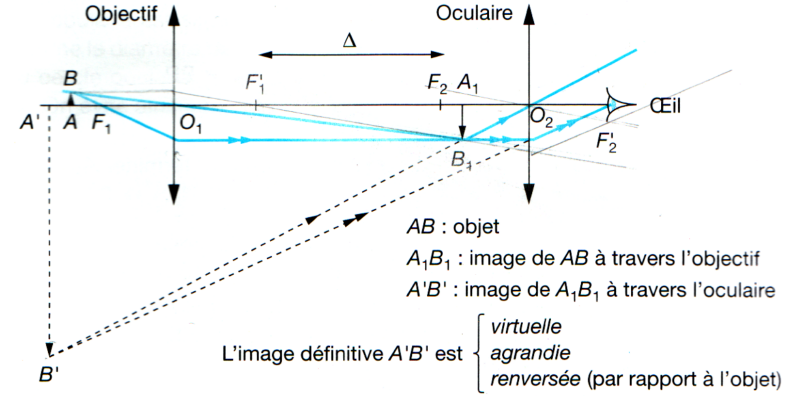


FIGURE 2 – Microscope avec une image virtuelle

Image finale à l'infinie

Avec la relation de conjugaison de Newton :

$$\overline{F_1 A_\infty} \overline{F'_1 A_1} = -f_1'^2 \quad (6)$$

Image finale au PP

$$\overline{F_1 A_m} = -\frac{f_1'^2}{\overline{F'_1 A_m}} = -\frac{f_1'^2}{\overline{F_1 F_2} + \overline{F_2 A_m}} = -\frac{f_1'^2}{\overline{F'_1 F_2} + \frac{f_2'^2}{d_m}} \quad (7)$$

Ainsi

$$\overline{A_\infty A_m} = \frac{f_1'^2 f_2'^2}{\Delta(\Delta d_m + f_2'^2)} = \frac{\Delta}{P_m^2(\Delta d_m + f_2'^2)} \quad (8)$$

Voir les applications numérique dans [2]

1.4 Ouverture numérique

L'objectif est la pièce maitresse du microscope. L'objectif contribue au grossissement mais surtout détermine le pouvoir de résolution du micro-

spectre, c'est-à-dire sa capacité à distinguer 2 objets. Le pouvoir de résolution est directement lié à l'ouverture numérique définie par :

$$O.N = n \sin \theta \quad (9)$$

avec n l'indice optique du milieu et θ l'angle maximum par rapport à l'axe optique.

Manip : Détermination expérimentale de l'ouverture numérique.

1.5 Pouvoir de résolution

L'image d'un point par un instrument d'optique n'est pas un point mais une tâche appelée tâche d'Airy. Nous étudierons particulièrement ces tâches lorsque nous traiterons la diffraction des ondes lumineuses.

Critère de Rayleigh : Deux points A et B sont résolus si les tâches d'Airy entourant les points images A' et B' ne se recouvrent pas à plus de leur demi-largeur.

On peut montrer que :

$$AB_{min} = 1,22 \frac{\lambda}{2O.N} \quad (10)$$

Pour diminuer AB_{min} on peut donc :

- Diminuer la longueur d'onde
- Augmenter l'ouverture numérique : l'indice et l'angle θ . Indice : microscope à immersion. $u \rightarrow$ on ne travaille plus dans les conditions de Gauss. Il faut des éléments pour corriger les aberrations.

Limite d'environ $0,2 \mu m$. Comment améliorer cette limite ? On peut travailler avec un fort indice de réfraction (c'est le principe des microscopes à immersion), en augmentant l'ouverture numérique du système optique ou encore avec un rayonnement de très petite longueur d'onde (UV, rayon X). Même dans les meilleures conditions la résolution optique reste limitée à la demi-longueur d'onde. Toutes les améliorations du 19ème siècle ont continué à se heurter à l'existence de ce critère.

2 Microscopie optique en champ proche

La microscopie classique a donc une résolution limitée, elle ne détecte que des ondes homogènes diffractées en champ lointain, c'est-à-dire à de grandes distances de l'objet, sans être capable de capter des informations relatives aux structures inférieures à $\lambda/2$. Une technique est apparue, permettant de collecter les ondes évanescentes confinées à la surface de l'objet, c'est la microscopie optique en champ proche.

Le microscope optique en champ proche est apparu dans les années 80

2.1 Diffraction d'une onde plane

La limite de résolution en optique est une conséquence du principe d'incertitude d'Heisenberg (on ne peut pas mesurer avec une bonne précision la position et la vitesse d'une particule).

Exprimons la relation d'incertitude d'Heisenberg et projetons sur l'axe x :

$$\Delta x \Delta k_x > 2\pi \quad (11)$$

Prenons l'exemple d'un microscope classique. A cause de son ouverture numérique, il ne va capter les photons qu'entre $[-\theta, \theta]$. Ainsi :

$$\Delta k_x = k_{x,lim2} - k_{x,lim1} = 2k \sin \theta \quad (12)$$

On arrive donc à :

$$\Delta x \geq \frac{\lambda}{2n \sin \theta} \quad (13)$$

On retrouve à une constante près le critère de Rayleigh. Mais on a maintenant un critère pour Δx . Pour obtenir une grande résolution, c'est-à-dire un Δx très petit, il faut que l'intervalle Δk_x , des valeurs autorisées par k_x soit le plus grand possible. Pour les ondes planes progressives k_x est compris entre $[-\frac{\omega}{c}, \frac{\omega}{c}]$, c'est à dire

$$\Delta k_x \geq \frac{2\pi}{\Delta k_x} = \frac{\lambda}{2} \quad (14)$$

Des objets très petits $\Delta x \ll \lambda/2$ diffractant la lumière, vont permettre d'accéder à des grandes valeurs de Δk_x (schéma)

Un type d'onde est caractérisé par $k_x > \frac{2\pi n}{\lambda}$.

2.2 Ondes évanescentes

Considérons deux milieux diélectriques d'indices n_1 et n_2 avec $n_2 < n_1$. Le vecteur d'onde incident s'exprime par :

$$\vec{k}_i = k_1(\sin \theta_1 \vec{e}_x + \cos \theta_1 \vec{e}_z) \quad (15)$$

avec $k_1 = k_0 n_1$.

Grâce aux lois de réfractions, on exprime le vecteur d'onde dans la partie transmise s'exprime par

$$\vec{k}_t = k_0 n_1 \sin \theta_1 \vec{e}_x + k_0 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1} \vec{e}_z \quad (16)$$

Le terme k_z reste réel tant que l'angle d'incidence de l'onde plane est inférieure à l'angle critique θ_c défini par :

$$\theta_l = \frac{n_2}{n_1} \quad (17)$$

Pour $\theta > \theta_c$ il y a réflexion totale de la lumière sur le dioptré, $k_{t,z}$ devient imaginaire pure. L'onde transmise dans le second milieu est évanescente et on a

$$k_{t,z} = ik_0(n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n_2^2) = ik_z'' \quad (18)$$

Comme $k_{t,z}$ est imaginaire pure, l'amplitude de l'onde évanescente décroît exponentiellement en fonction de z . Le champ électrique peut s'écrire :

$$\vec{E}_t = \vec{E}_{t,0} \exp(k_{t,x}x + k_{t,z}z - \omega t) \quad (19)$$

$$= \vec{E}_{t,0} \exp(-k_z''x) \exp(k_{t,z}z - \omega t) \quad (20)$$

$$(21)$$

L'onde évanescente se propage suivant O_x et voit son amplitude décroître exponentiellement selon Oz .

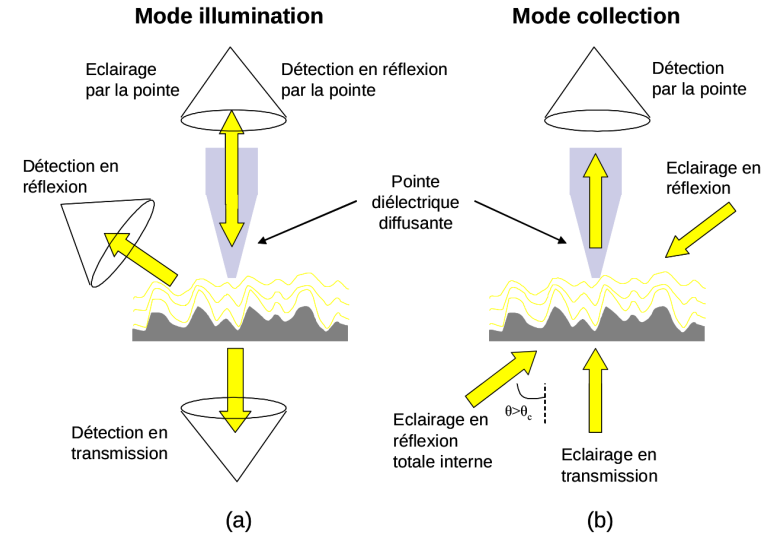
On définit que la profondeur d'atténuation dans le milieu 2 par :

$$\delta = \frac{1}{k_z''} = \frac{\lambda_0}{2\pi \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n_2^2}} \quad (22)$$

2.3 Un microscope optique à champ proche[1]

Pour capter l'onde évanescente, on va se servir du principe de Fermat. Si un objet sub-longueur d'onde peut transformer par diffraction une onde progressive en onde évanescente, il peut réciproquement transformer des ondes évanescentes en onde plane. Il faut alors plonger dans le champ proche optique un objet de dimensions inférieures à la longueur d'onde. Les ondes évanescentes présentes à la surface peuvent être (partiellement) transformées en onde progressive et se propager dans un guide d'onde jusqu'à un détecteur.

On réalise un microscope en champ proche en plaçant une sonde effilée, c'est-à-dire une pointe dont le diamètre est d'une dizaine de nanomètres.



En balayant la point sur la surface on peut obtenir une cartographie des détails de celle-ci, avec une résolution spatiale bien inférieure à la longueur d'onde. La résolution peut-être d'autant plus grande que le détecteur peut s'approcher près de la surface de l'objet. Le microscope à champ proche optique permet d'atteindre une résolution de $\lambda/43$! Le critère de Rayleigh est ainsi surmonté.

Conclusion

Ouverture sur les autres types de microscopie (électronique, à force atomique...)