

Observation de l'effet normal de Zeeman en configuration transversale et longitudinale

Spectroscopie avec étalon de Fabry-Perot

Objectifs expérimentaux

- Observation du triplet de lignes avec un effet de Zeeman normal transversal.
- Détermination de l'état de polarisation des composants du triplet.
- Observation du doublet de lignes avec un effet de Zeeman normal et longitudinal.
- Détermination de l'état de polarisation des composants de doublet.

Bases

Effet de Zeeman normal:

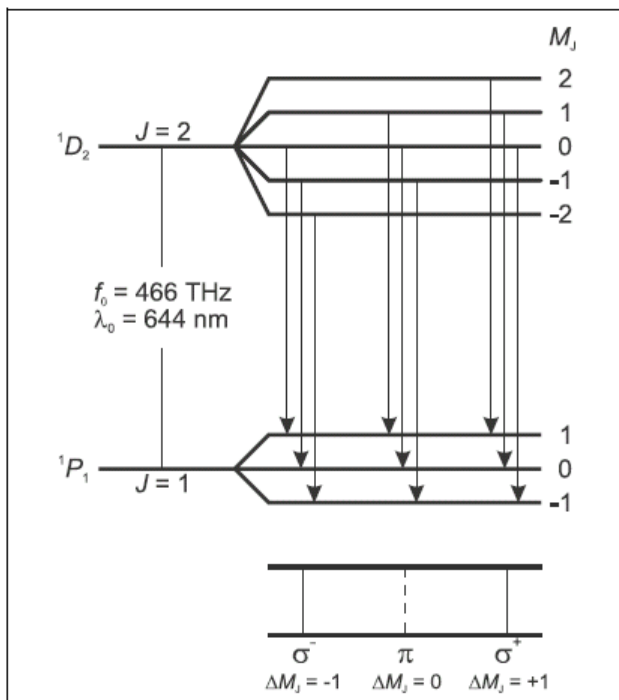


Fig. 1 Dissociation des niveaux et transitions avec un effet de Zeeman normal sur du Cadmium

On entend par effet de Zeeman la dissociation de niveaux d'énergie atomique ou de lignes spectrales sous l'action d'un champ magnétique extérieur. L'effet a été prévu en 1895 par H. A. Lorentz dans le cadre de sa théorie classique des élec-

trons et confirmé expérimentalement l'année suivante par P. Zeeman. Zeeman observa verticalement au champ magnétique au lieu d'une seule ligne spectrale un triplet de lignes et parallèlement au champ magnétique un doublet de lignes. Plus tard, on observa des dissociations plus complexes de lignes spectrales que l'on a appelé effet anormal de Zeeman. En guise d'explication, Goudsmit et Uhlenbeck introduisirent en 1925 l'hypothèse du spin électronique. Il s'avéra que l'effet anormal de Zeeman est la règle alors que l'effet de Zeeman est l'exception.

L'effet normal de Zeeman n'apparaît que sur les transitions entre états atomiques ayant pour spin total $S = 0$. Le moment total $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$ d'un état est alors un moment de bande ($\mathbf{J} = \mathbf{L}$) pur. Pour le moment magnétique qui lui est relié vaut simplement

$$\mu = \frac{\mu_B}{\hbar} \mathbf{J} \quad (I)$$

avec

$$\mu_B = \frac{\hbar e}{2m_e} \quad (II)$$

(m_B = magnéton de Bohr, m_e = masse de l'électron, e = charge élémentaire, $\hbar = h/2\pi$, h = constante de Planck).

Au moment magnétique est lié, dans un champ magnétique extérieur \mathbf{B} , l'énergie

$$E = -\mu \cdot \mathbf{B} \quad (III)$$

La composante du moment dans le sens du champ magnétique peut prendre les valeurs

$$J_z = M_J \cdot \hbar \text{ mit } M_J = J, J-1, \dots, -J \quad (IV)$$

Ainsi, le terme avec le moment J se dissocie en $2J + 1$, des composantes équidistantes de Zeeman qui ne se distinguent pas cette valeur de M_J . Le différentiel d'énergie entre composantes voisines M_J, M_{J+1} est de

$$\Delta E = \mu_B \cdot B \quad (V)$$

Il est possible d'observer par exemple l'effet normal de Zeeman sur la ligne spectrale rouge du Cadmium ($\lambda_0 = 643,8 \text{ nm}$, $f_0 = 465,7 \text{ THz}$). Elle correspond à la transition $^1D_2 (J = 2, S = 0) \rightarrow ^1P_1 (J = 1, S = 0)$ d'un électron de la 5ème couche (cf. fig. 1). Dans un champ magnétique le niveau 1D_2 se dissocie en cinq et le niveau 1P_1 en trois composantes de Zeeman avec la distance calculée par l'équation (V).

Les transitions optiques entre ces niveaux ne sont possibles que sous forme de radiation électrique de dipôle. Dans ce cas s'appliquent les règles de sélection suivantes pour les nombres magnétiques quantiques M_J des états concernés:

$$\begin{aligned} \Delta M_J &= \pm 1 && \text{pour les composantes } \sigma \\ &= 0 && \text{pour les composantes } \pi \end{aligned} \quad (VI)$$

On observe donc au total trois lignes spectrales (cf. fig. 1), dont la composante π n'est pas décalée et les deux composantes σ sont décalées de

$$\Delta f = \pm \frac{\Delta E}{h} \quad (VII)$$

par rapport à la fréquence de départ. ΔE est ici la dissociation énergétique équidistante calculée par (V).

Distribution angulaire et polarisation:

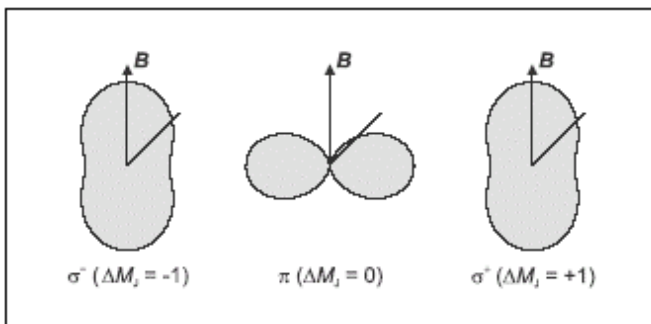


Fig. 2 Distribution angulaire de la radiation électrique de dipôle (ΔM_J : orientation du moment des photons émis dans le sens du champ magnétique)

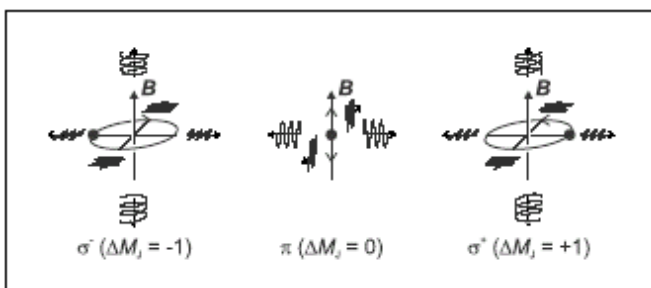


Fig. 3 Vue d'ensemble de la polarisation des composantes de Zeeman

Selon sa composante du moment ΔM_J dans le sens du champ magnétique, les photons émis présentent des distributions angulaires différentes. La fig. 2 montre les distributions angulaires sous forme de diagrammes polaires à deux dimensions. Elles peuvent être observées expérimentalement étant donné que le champ magnétique possède un axe commun pour tous les atomes de Cadmium.

Le cas $\Delta M_J = 0$ correspond dans le tableau classique au dipôle de Hertz oscillant parallèlement au champ magnétique. De petits quanta sont émis dans le sens du champ magnétique, ce qui signifie que la composante π ne peut pas être observée parallèlement au champ magnétique. La lumière émise verticalement au champ magnétique est polarisée de manière linéaire, vecteur E oscillant dans le sens du dipôle ou encore parallèlement au champ magnétique (cf. fig. 3).

Inversement, la plupart des quanta se dirigent dans le sens du champ magnétique dans le cas où $\Delta M_J = \pm 1$. Dans le tableau classique, ce cas correspond à deux dipôles perpendiculaires l'un par rapport à l'autre qui oscillent avec un déphasage de 90° . La superposition des deux dipôles donne un courant circulaire. C'est pourquoi est émis de la lumière polarisée de manière circulaire dans le sens du champ magnétique, et ce dans le sens positif du champ pour $m = 1$ de manière circulaire à droite et pour $m = -1$ de manière circulaire à gauche (cf. fig. 3).

Spectroscopie des composantes de Zeeman

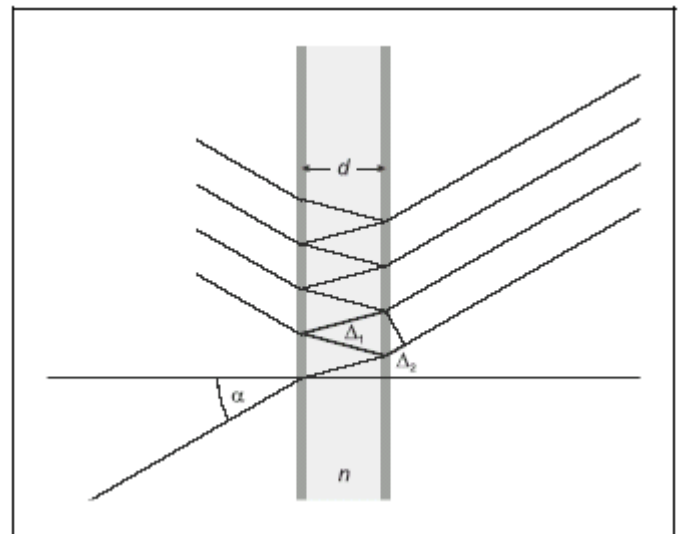


Fig. 4 Etalon Fabry-Perot comme spectromètre d'interférence. Est inscrit le faisceau lumineux pour un angle $\alpha > 0$ par rapport à l'axe optique. Le retard optique de deux faisceaux voisins émis est de $\Delta = n \cdot \Delta_1 - \Delta_2$.

L'effet Zeeman permet la dissociation spectroscopique des composantes polarisées différemment. La mise en évidence du décalage nécessite cependant un appareil spectral avec une résolution très élevée, car les deux composantes σ de la ligne rouge du Cadmium sont par exemple décalées que de

seulement de $f = 14$ GHz ou de $\Delta\lambda = 0,02$ nm pour une densité de flux magnétique $B = 1$ T.

L'expérience utilise un étalon de Fabry-Perot. Il s'agit ici d'une plaque de verre à faces très fortement planes et parallèles et réfléchissante des deux côtés. La lumière légèrement divergente entre dans l'étalon disposé verticalement à l'axe optique et est réfléchi plusieurs fois alors qu'une partie sort à chaque fois (cf. fig. 4). En raison de la couche réfléchissante la partie sortante n'est pas importante, ce qui signifie que de très nombreux rayons sortants peuvent interférer entre eux. Les rayons sortants sont focalisés derrière l'étalon au moyen d'une lentille dans leur plan focal. Avec un oculaire il est possible d'observer à cet endroit pour une longueur d'onde λ un système de cercles concentriques. L'angle d'ouverture d'un cercle est identique à l'angle de sortie α_k des rayons partiels de l'étalon Fabry Perot.

Les rayons sortant avec un angle α_k interfèrent de manière constructive si deux rayons voisins satisfont la condition d'interférence pour les „courbes de même inclinaison“ (cf. fig. 4):

$$\Delta = 2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_k} = k \cdot \lambda \quad (\text{VIII})$$

(Δ = retard optique, d = épaisseur de l'étalon, n = indice de réfraction du matériau en verre, k = ordre d'interférence).

Une modification de la longueur d'onde de $\delta\lambda$ entraîne une modification de l'angle d'ouverture d'un cercle de $\delta\alpha$. Selon la distance focale de la lentille, l'angle d'ouverture α correspond à un rayon r et la variation de l'angle $\delta\alpha$ à une modification du rayon δr . Lorsqu'une ligne spectrale comporte plusieurs composants avec la distance $\delta\lambda$, chaque cercle d'interférence est dissocié en autant de composants avec la distance radiale δr . On reconnaît ainsi un doublet de lignes spectrales sur une structure de doublet et un triplet de lignes spectrales sur la structure de triplet dans les cercles d'interférence.

Appareils

1 Lampe au cadmium pour l'effet de Zeeman	451 12
1 Noyau en U avec culasse	562 11
2 Bobines, 10 A, 480 spires	562 131
1 Paire de masses polaires à grand forage	560 315
1 Etalon Fabry Perot	471 221
2 Lentilles convexes dans un support, 150 mm	460 08
1 Plaque de lame quart d'onde	472 601
1 Filtre de polarisation	472 401
1 Support avec crampons élastiques	460 22
1 Jeu de filtre de couleur, primaire	467 95
ou	
1 Support pour filtre d'interférence	468 41
1 Filtre d'interférence, 644 nm	468 400
1 Oculaire avec échelle graduée	460 135
1 Banc optique avec profil normal, 1 m	460 32
1 Pied de cavalier avec filetage	460 358
7 Cavaliers optiques 60/50	460 351
1 Bobine d'induction universelle pour 451	12451 30
1 Bloc d'alimentation à courant fort	521 55

Câble d'expérience avec un diamètre de 2,5 mm²

Consignes de sécurité

Les câbles électriques d'alimentation de la lampe de cadmium et les résistances des grilles sont librement accessibles.

- Evitez tout contact avec les pièces parcourues par du courant électrique.

Des objets ferromagnétiques mobiles peuvent être fortement attirés par l'électroaimant et endommager l'ampoule de quartz de la lampe de cadmium.

- Contrôlez, avant de mettre en marche le courant de l'aimant, si les pièces polaires sont bien vissées.
- Ne pas manipuler des objets ferromagnétiques à proximité de la lampe de cadmium lorsque le courant de l'aimant est en marche.

L'ampoule de quartz de la lampe de cadmium est détruite en chauffant par tout dépôt de graisses épidermique.

- Ne jamais toucher l'ampoule de quartz de la lampe de cadmium les mains nues.

Dispositif

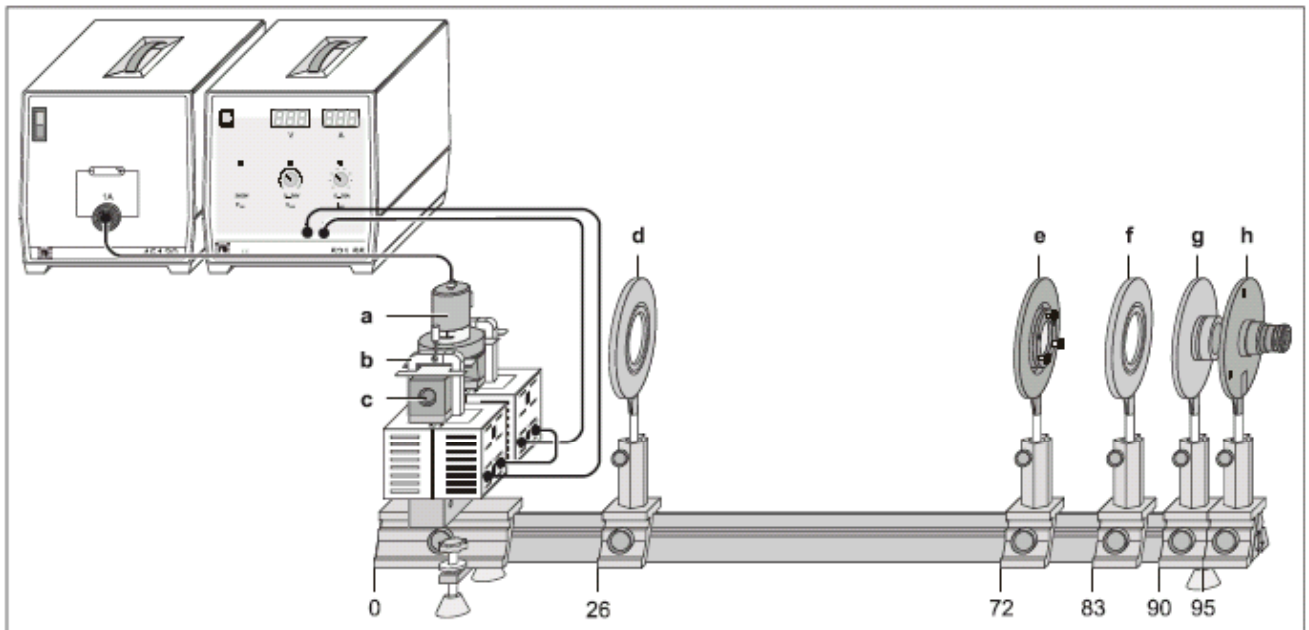


Fig. 5 Dispositif de l'expérience sur l'effet *Zeeman* dans une configuration transversale avec indication de position en cm pour le bord gauche des cavaliers optiques.

- a Lampe de cadmium avec plaque de support
- b Pincettes
- c Pièces de pôles
- d Lentille convexe, $f = 150$ mm (lentille de condensation)
- e Etalon de Fabry Perot
- f Lentille convexe, $f = 150$ mm (lentille de projection)
- g Filtre couleur (rot) dans un support
- h Oculaire avec échelle graduée

Fig. 5 montre le dispositif complet de l'expérience dans une configuration transversale.

Dispositif mécanique et optique:

- Visser la tige filetée dans le pied de cavalier avec filetage.
- Poser le noyau en U de manière à ce qu'il puisse pivoter librement sur la tige filetée sur le pied de cavalier et placer les bobines.
- Monter les pièces de pôle et la plaque de support de la lampe de cadmium au moyen des pincettes de façon à ce qu'il reste distance d'environ 10 mm entre les pièces de pôles et que l'ouverture de la plaque de support pointe vers l'arrière; ne pas encore serrer les vis des pincettes.
- Glisser la lampe de cadmium avec précaution entre les pièces de pôle.

La lampe de cadmium doit se trouver exactement au milieu des pièces de pôle, le point de fonte de l'ampoule de la lampe pointer vers l'arrière et les câbles d'alimentation doivent être éloignés le plus possible de la trajectoire du rayon.

- Rapprocher le cas échéant les pièces de pôle délicatement un petit peu pour travailler plus tard avec un champ magnétique plus important.
- Fixer les pièces de pôle et la plaque de support au moyen des vis des pincettes.
- Monter les composants optiques conformément à la fig. 5.

Raccordement électrique:

- Brancher la lampe de cadmium sur la bobine d'induction universelle; attendre 5 min après la mise en marche jusqu'à l'émission suffisamment forte de lumière.
- Brancher les bobines de l'électroaimant en série et sur l'alimentation à courant fort.

Ajustage de l'optique d'observation:

Remarque: Le montage est ajusté de façon optimale lorsque le motif de cercles d'interférence rouge est clair et contrasté et que le centre du système de cercles se situe sur l'échelle graduée: Ne pas encore placer le filtre de polarisation et la lame quart-d'onde pour l'ajustage pour que l'image observée soit la plus claire possible

- Focaliser l'oculaire sur l'échelle graduée.
- Déplacer la lentille de projection jusqu'à ce qu'on observe une image nette du système de cercles.
- Déplacer la lentille de condensation jusqu'à ce que l'image observée soit éclairée de manière régulière.
- Déplacer par un léger basculement de l'étalon Fabry Perot avec les vis de réglage le centre du système de cercles sur le milieu de l'échelle graduée.

Si le domaine de réglage est insuffisant:

- Tourner l'étalon Fabry Perot avec tout su support ou régler les hauteurs de la lentille de projection et de l'oculaire les l'une sur l'autre.

Pour différencier les composants π et σ :

- Placer le filtre de polarisation dans la trajectoire du rayon (c. fig. 6) et le tourner sur 90° jusqu'à ce que les deux composants extérieurs de la structure de triplet disparaissent.
- Tourner le filtre de polarisation sur 0° jusqu'à ce que le composant médian (non décalé) disparaisse.

b) Observation en configuration longitudinale:

- Pivoter l'ensemble du dispositif de la lampe de cadmium avec les pièces de pôle sur le pied pour cavalier avec filetage de 90° .
- Observer d'abord les cercles d'interférence sans champ magnétique ($I = 0$ A).
- Augmenter lentement le courant de l'aimant à environ $I = 3$ A jusqu'à ce que les cercles dissociés soient bien séparés les uns des autres.

Pour différencier les composants σ^+ et σ^- :

- Placer une lame quart-d'onde supplémentaire entre la lampe de cadmium et le filtre de polarisation dans la trajectoire du rayon (cf. fig. 6) et la tourner sur 0° .

Réalisation

a) Observation en configuration transversale:

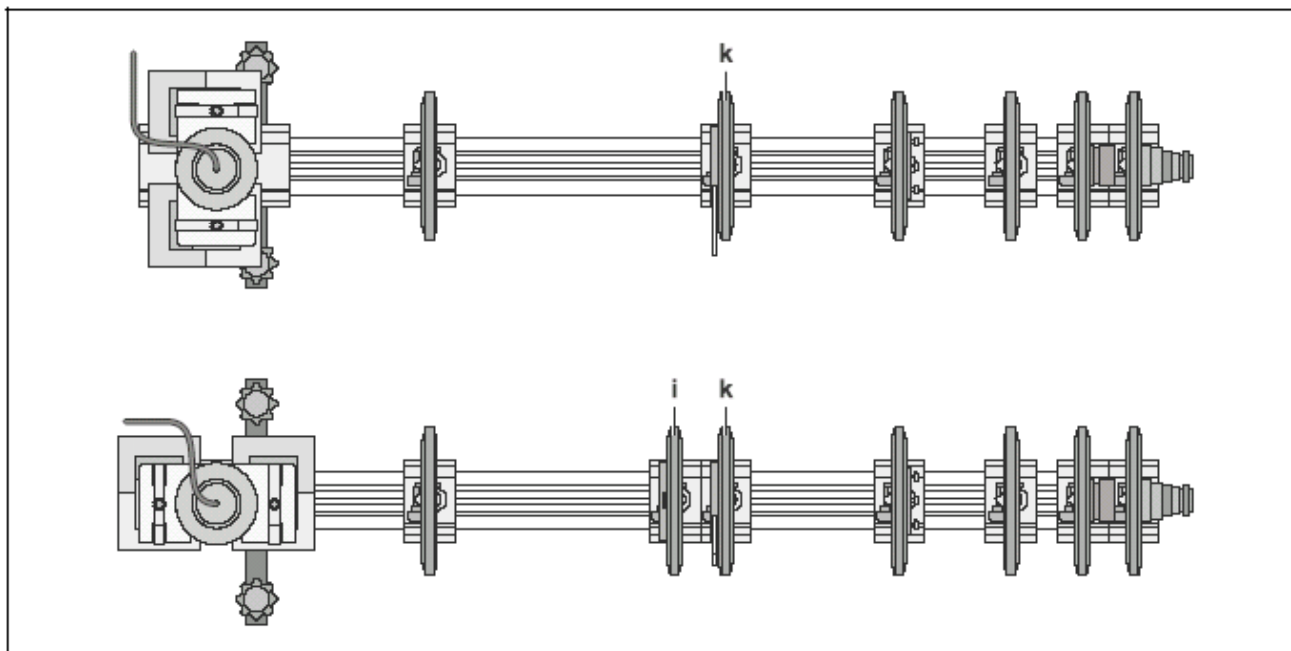


Fig. 6 Dispositif en configuration transversale (en haut) et en configuration longitudinale (en bas), vu d'en haut.

- i** Lame quart-d'onde
k Filtre de polarisation

- Observer d'abord les cercles d'interférence sans champ magnétique ($I = 0$ A).
- Augmenter le courant de l'aimant lentement sur environ $I = 3$ A jusqu'à ce que les cercles dissociés soient nettement séparés les uns des autres.

- Tourner le filtre de polarisation sur $+45^\circ$ et -45° tourner 90° jusqu'à ce que l'un des composants de doublets disparaisse

Exemple de mesure et exploitation des résultats

a) Observation en configuration transversale:

b) Observation en configuration longitudinale:

Fig. 8 Schéma d'interférence de l'effet de Zeeman en configuration longitudinale

- a) sans lame quart-d'onde et filtre de polarisation
- b), c) avec lame quart-d'onde et filtre de polarisation pour la mise en évidence de la polarisation circulaire

Informations complémentaires

L'intensité sommée de tous les composants de Zeeman est la même dans toutes les directions de l'espace. A l'observation transversale, l'intensité du composant π correspond par ailleurs à l'intensité totale des composants σ .

Fig. 7 Schéma d'interférence de l'effet de Zeeman en configuration transversale

- a) sans filtre de polarisation
- b) Sens de polarisation perpendiculaire au champ magnétique
- c) Sens de polarisation parallèle au champ magnétique

Fig. 8 Schéma d'interférence de l'effet de Zeeman en configuration longitudinale

- a) sans lame quart-d'onde et filtre de polarisation
- b), c) avec lame quart-d'onde et filtre de polarisation pour la mise en évidence de la polarisation circulaire

