TP-COURS : POLARISATION DE LA LUMIERE.

I : Polarisation rectiligne.

1°) Polarisation rectiligne d'une onde électromagnétique.

Pour toutes les expériences dites d'optique physique, la lumière se comporte comme une ***onde électromagnétique transverse***, caractérisée par deux vecteurs orthogonaux: son champ électrique $\vec{E}$ et son champ magnétique $\vec{B}$, situés dans un plan perpendiculaire au rayon lumineux, défini par le vecteur d'onde $\vec{k}$. Dans le plan xOy perpendiculaire à $\vec{k}$, $\vec{E}$ peut occuper une direction quelconque: c'est cette direction qui caractérise l'*état de polarisation* de la lumière.

☞ **Expérience n° 1 : Action d'une grille de fils métalliques sur une OEM (Fig 1 et Fig 2):**

Figure 1

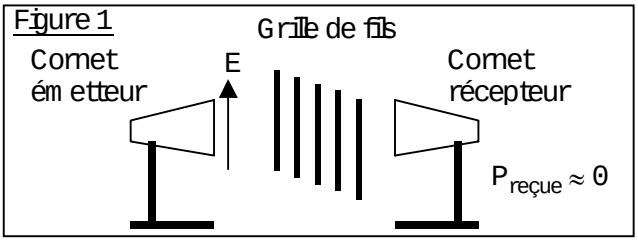
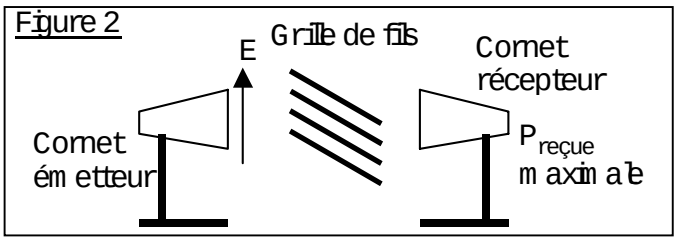


Figure 2



De part la constitution même du cornet, l'onde rayonnée par le cornet émetteur est polarisée rectilignement, le champ $\vec{E}$ étant parallèle au petit côté du cornet.

On place entre les deux cornets un "peigne métallique". Si les fils sont // à $\vec{E}$, l'onde incidente est totalement absorbée (par les électrons des fils créant un courant haute fréquence) et il n'y a plus d'onde transmise (Il y a par contre un faisceau réfléchi intense).

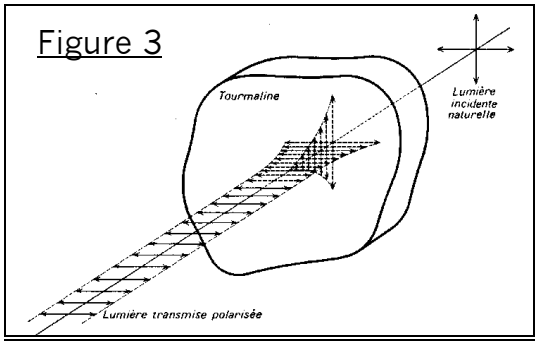
En revanche, si les fils sont placés perpendiculairement à $\vec{E}$, seulement un très faible courant peut prendre naissance dans les fils, et l'onde incidente est transmise sans presque aucune atténuation.

> Le peigne métallique joue le rôle d'un polariseur rectiligne, l'onde transmise étant polarisée suivant la direction perpendiculaire aux fils.

2°) Polariseur; analyseur; Loi de Malus.

- Dans le domaine optique il existe aussi des dispositifs permettant de transformer une lumière non polarisée ou de polarisation quelconque en **lumière polarisée rectilignement**.

Figure 3

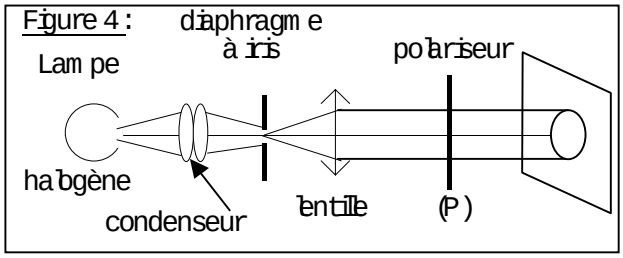


Les polariseurs les plus courants sont formés de lames dites "*Polaroïd*", (inventés par Land en 1938) ne laissant passer, de la vibration lumineuse que la composante parallèle à une certaine direction privilégiée de la lame, dite direction de polarisation (perpendiculaire à l'aiguille indicatrice).

Cette polarisation rectiligne est produite par **dichroïsme**: une substance dichroïque absorbe de manière très inégale les vibrations lumineuses selon leur direction (Voir figure 3).

Comme le phénomène de dichroïsme dépend un peu de la longueur d'onde, on observe généralement une très faible lumière pourpre entre "polaroïds" croisés.

☞ Expérience n° 2: Action d'un polariseur rectiligne sur la lumière naturelle (Fig 4).

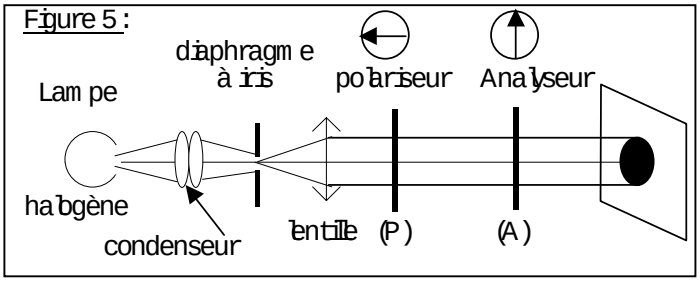


Quelle que soit l'orientation du polariseur rectiligne, l'éclairement garde une valeur constante.

On montre que l'intensité transmise vaut la moitié de l'intensité avant le polaroïd.

On établit ce résultat en décomposant le champ électrique de la lumière naturelle incidente en deux composantes perpendiculaires, de même amplitude, présentant entre elles un déphasage aléatoire.

☞ Expérience n° 3: Action d'un polariseur rectiligne sur une lumière polarisée rectilignement (Fig 5).



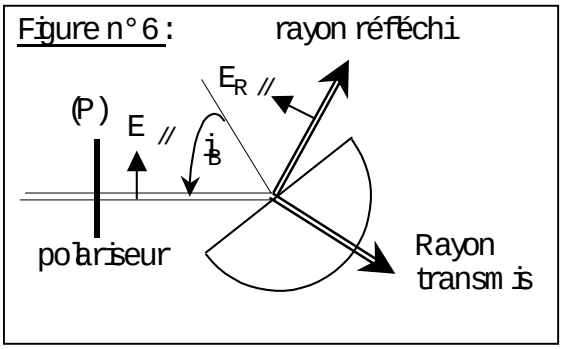
En tournant l'analyseur dans son propre plan, on observe que l'éclairement varie entre un éclairement maximal et l'extinction totale du faisceau transmis. Cette extinction se produit chaque fois que les directions de (P) et (A) sont croisées.

Plus précisément, l'intensité transmise après l'analyseur suit la ***loi de Malus*** :

> Soit une OPPM polarisée ***rectilignement*** éclairant un polariseur rectiligne (P). Si on appelle α l'angle entre la direction privilégiée du polariseur (suivant laquelle il y a transmission) et celle du champ électrique incident, l'intensité transmise après le polariseur varie suivant la loi, appelée ***loi de Malus***: $I_t = I_{max}.\cos^2\alpha$.

3°) Polarisation par réflexion vitreuse.

☞ Expérience n° 4: Polarisation du rayon réfléchi à l'incidence de brewster (Fig 6):



Un pinceau de lumière parallèle éclaie la face plane du demi cylindre de Plexiglas.

On oriente le polariseur (P) de façon que le champ électrtique transmis soit **contenu dans le plan d'incidence (noté $\vec{E}_{//}$)**.

On observe les variations d'intensité du faisceau réfléchi par rotation du demi cylindre : on constate que le rayon réfléchi est totalement éteint pour une incidence particulière, appelée incidence de Brewster (i_B).

> On montre que l'**incidence de Brewster, vérifie** $\tan i_B = \frac{n_2}{n_1}$. A l'incidence de Brewster, les rayons réfléchi et transmis sont perpendiculaires entre eux (on parle d'équerre optique).

II : Lames à retard.

- Certains milieux cristallins (spath d'Islande, quartz ou mica, ...) sont optiquement **anisotropes**, la vitesse de l'onde lumineuse variant avec la direction correspondante du rayon. Parmi ces cristaux, on s'intéresse aux cristaux dits **uniaxes**, qui possèdent du point de vue des propriétés optiques, la symétrie de révolution autour d'un axe Oz appelé **axe optique du cristal**.

Dans une lame uniaxe, cet axe optique est par construction parallèle à la face d'entrée de la lame.

1°) Rayon ordinaire, rayon extraordinaire.

- Un tel milieu anisotrope uniaxe est caractérisé par deux indices de réfraction: n_0 et n_e:

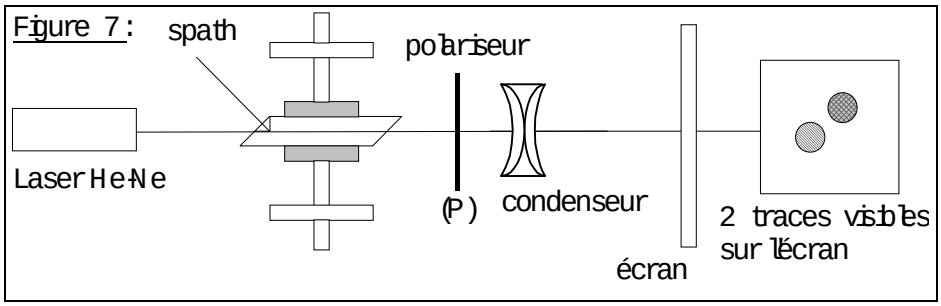
1. **n_0 est l'indice ordinaire:** il correspond à l'indice de réfraction d'une onde polarisée rectilignement dans une direction perpendiculaire à l'axe optique de la lame.

> Les rayons ordinaires obéissent aux lois de Snell-Descartes relatives à la réflexion et la réfraction.

2. **n_e est l'indice extraordinaire:** il correspond à l'indice de réfraction d'une onde polarisée rectilignement dans une direction parallèle à l'axe optique de la lame.

> Les rayons extraordinaires n'obéissent à aucune des lois de Snell-Descartes.

☞ **Expérience n° 5 : double réfraction dans un cristal de spath d'Islande (fig 7):**



On observe la double réfraction dans le spath. Sans le polariseur (P), on obtient deux images décalées D et D' sur l'écran (un condenseur permet une plus nette séparation des deux taches).

On place le polariseur (P): les deux images D et D' sont polarisées rectilignement et perpendiculairement l'une par rapport à l'autre.

La lumière, en traversant le cristal de spath s'est dédoublée, par biréfringence en un rayon dit ordinaire (qui suit les lois de Descartes) et un rayon extraordinaire, qui ne suit aucune de ces lois.

On observe que l'image correspondant au rayon extraordinaire tourne autour de l'image ordinaire.

2°) Modélisation d'une lame à retard de phase.

- Soit une onde lumineuse polarisée rectilignement dans une direction quelconque perpendiculaire à Oz, tombant sous incidence normale sur une lame uniaxe, d'axe optique Ox parallèle à la face d'entrée. On peut décomposer la vibration en :

- une composante perpendiculaire à l'axe optique, l'indice suivant cette direction étant noté n_x,
- une composante parallèle à l'axe optique, l'indice suivant cette direction étant noté n_y.

Ces deux vibrations présentent entre elles la différence de marche $\delta = (n_y - n_x)e$, si e est l'épaisseur de la lame.

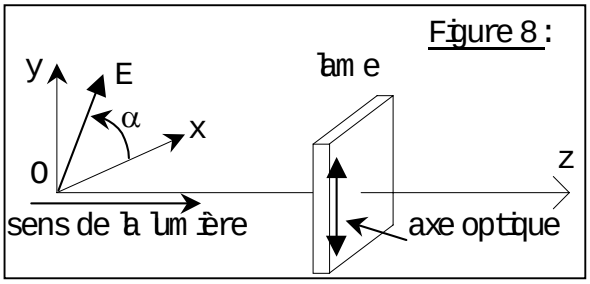
Si pour la vibration monochromatique considérée $|\delta| = \frac{\lambda}{4}$ (à un multiple de λ près), la lame est dite "***quart d'onde***" ou **lame λ/4**.

Si pour la vibration monochromatique considérée $|\delta| = \frac{\lambda}{2}$ (toujours modulo λ), la lame est dite "***demi onde***" ou **lame λ/2**.

Rappel : A une différence de marche δ, correspond la différence de phase: $\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0}\delta$, où λ_0 est la longueur d'onde dans le vide.

3°) Action d'une lame uniaxe sur une lumière polarisée rectilignement:

A la sortie de la lame, la vibration n'est plus rectiligne comme pour la vibration incidente. Dans le cas le plus général, on obtient une vibration polarisée elliptiquement (Fig 8).



Les composantes du champ $\vec{E}$ incident dans le repère Oxyz sont: $E_x = E_0 \cos\alpha \cos(\omega t - kz)$,

$E_y = E_0 \sin\alpha \cos(\omega t - kz)$

$E_z = 0$.

Après traversée de la lame, en notant t le coefficient de transmission en amplitude, le champ s'écrit: $E'_x = t\, E_0 \cos\alpha \cos(\omega t - kz)$,

$E'_y = t\, E_0 \sin\alpha \cos(\omega t - kz - \varphi)$, avec $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0}(n_y - n_x)e$

$E'_z = 0$.

Pour une lame donnée, φ dépend de la longueur d'onde de la radiation lumineuse incidente.

1. Si α = 0 ou α = π/2, la polarisation reste rectiligne quel que soit φ:

Ces directions, l'une parallèle à l'axe optique de la lame, l'autre perpendiculaire sont dites les **lignes neutres** de la lame.

La ligne neutre ***d'indice le plus faible*** est appelée "***axe lent***".

La ligne neutre ***d'indice le plus grand*** est appelée "***axe rapide***".

2. Si |φ| = π/2, dans le cas d'une lame quart d'onde: la polarisation est elliptique, les axes de l'ellipse correspondant aux lignes neutres de la lame.

Dans le cas particulier où ***α = π/4***, la lumière transmise est polarisée ***circulairement*** (droite si φ = π/2 et gauche si φ = - π/2, compte tenu ici de l'écriture de l'onde).

3. Si |φ| = π, dans le cas d'une lame demi onde: la polarisation reste rectiligne et sa direction de polarisation est symétrique, par rapport aux lignes neutres de la lame, de celle de la vibration rectiligne incidente.

III : Interférences en lumière polarisée.

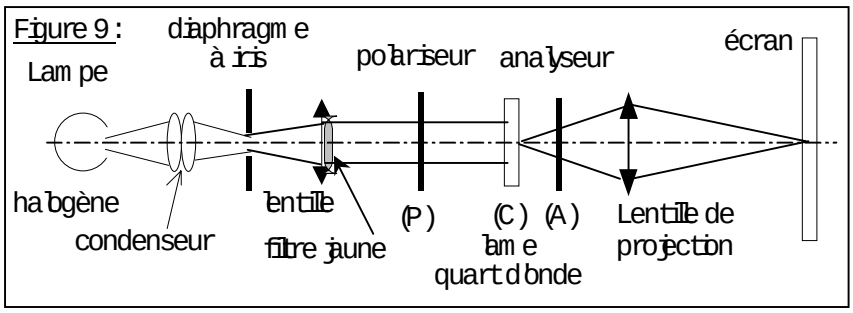
1°) Étude en lumière monochromatique.

Expérience n° 6: Action d'une lame "quart d'onde" sur une lumière polarisée rectilignement (figure 9)

On règle au préalable (P) et (A) à l'extinction, sans mettre la lame (C).

A la sortie de (P), et avant la lame λ/4, la polarisation de la lumière est rectiligne.

On insère la lame quart d'onde entre (P) et (A): la lumière est rétablie.



On vérifie qu'il n'est pas possible de rétablir l'extinction en tournant l'analyseur (A): la lumière transmise par la lame est **elliptique**.

En revanche, en laissant (A) fixe, on constate qu'il est possible, en tournant la lame (C) dans son plan de rétablir l'extinction pour des directions perpendiculaires, notées Ox et Oy (Ces directions déterminent les **lignes neutres** de la lame).

Conclusion:

> Une lame quart d'onde transforme une lumière polarisée rectilignement en une lumière polarisée elliptiquement dont les axes sont confondus avec les lignes neutres de la lame.

☞ **Expérience n° 7 : Action d'une lame demi onde sur une lumière polarisée rectilignement.**

On reprend le montage de la figure 9 en remplaçant la lame λ/4 par une lame λ/2.

> Une lame demi onde transforme une vibration rectiligne en une vibration rectiligne symétrique par rapport à ses lignes neutres.

2°) Étude en lumière blanche.

☞ **Expérience n° 8: Action de la lumière blanche sur une lame mince d'épaisseur constante.**

On reprend le montage de la figure n° 9 (expérience 6) en supprimant le filtre monochromatique. Pour une position quelconque de la lame quart d'onde (C), on constate que la lumière transmise est colorée.

On observe que le maximum de "pureté" de la teinte est obtenu quand les lignes neutres de la lame (C) sont à 45° de (P) et (A), initialement croisés.

Si on tourne (A) dans son plan, on observe que la teinte se lave de blanc et évolue vers la teinte complémentaire quand (A) a tourné de 90°.

☞ **Expérience n° 9 : Action de la lumière blanche sur une lame mince d'épaisseur variable.**

On remplace la lame quart d'onde par un ensemble de bandes de papier adhésif transparent superposées, et placées suivant des directions quelconques.

Au départ, (P) et (A) sont croisés et placés de part et d'autre de la lame. Le retard φ induit par chaque couche de scotch dépend de la longueur d'onde et de l'épaisseur traversée. On peut ainsi éteindre certaines longueurs d'onde du spectre de la lumière blanche: celles pour lesquelles φ est un multiple entier de 2π: l'image présente ainsi des teintes qui variant d'une zone à l'autre.

Tournons maintenant (A) de 90°: (P) et (A) sont parallèles. A une zone donnée, correspond maintenant une couleur complémentaire de celle que nous venons d'observer avec (P) et (A) croisés.

☞ En plaçant entre la couche d'adhésif et l'analyseur une lame quart d'onde, et en l'orientant convenablement, on peut obtenir une palette de couleurs "pastels" reproduisant tout ou en partie l'échelle dite "des teintes de Newton": l'introduction de la lame $\lambda/4$ permet d'augmenter les différences de marche induites par les couches de scotch.

	Δ *en nm*	*Polariseurs parallèles*	*Polariseurs croisés*
premier ordre	0	Blanc.	Noir.
	40	Blanc.	Gris de fer
	97	Blanc jaunâtre.	Gris lavande.
	158	Blanc brunâtre.	Bleu gris.
	218	Brun jaune.	Gris plus clair.
	234	Brun.	Blanc verdâtre.
	259	Rouge clair.	Blanc.
	267	Violet sombre.	Blanc jaunâtre.
	275	Brun rouge sombre.	Jaune paille pâle.
	281	Violet sombre.	Jaune paille.
	306	Indigo.	Jaune clair.
	332	Bleu.	Jaune vif.
	430	Bleu gris.	Jaune brun.
	505	Vert bleuâtre.	Orangé rougeâtre.
deuxième	536	Vert pâle.	Rouge chaud.
	551	Vert jaunâtre.	Rouge plus foncé.
	565	Vert plus clair.	Pourpre.
	575	Jaune verdâtre.	Violet.
	589	Jaune d'or.	Indigo.
	664	Orangé.	Bleu de ciel.
	728	Orangé brunâtre.	Bleu verdâtre.
	747	Rouge carmin clair.	Vert.
	826	Pourpre.	Vert plus clair.
	843	Pourpre violacé.	Vert jaunâtre.
	866	Violet.	Jaune verdâtre.
	910	Indigo.	Jaune pur.
troisième	948	Bleu sombre.	Orangé.
	998	Bleu verdâtre.	Orangé rougeâtre vif.
	1 101	Vert.	Rouge violacé foncé.
	1 128	Vert jaunâtre.	Violet bleuâtre clair.
	1 151	Jaune sale.	Indigo.
	1 258	Couleur chair.	Bleu (teinte verdâtre).
	1 334	Rouge brun.	Vert de mer.
	1 376	Violet.	Vert brillant.
	1 426	Bleu violacé grisâtre.	Jaune verdâtre.
quatrième	1 495	Bleu verdâtre.	Rose (nuance chair).
	1 534	Bleu vert.	Rouge carmin.
	1 621	Vert terne.	Carmin pourpre.
	1 658	Vert jaunâtre.	Gris violacé.
	1 682	Jaune verdâtre.	Bleu gris.
cinquième ordre	1 711	Jaune gris.	Vert de mer.
	1 744	Mauve gris rouge.	Vert bleuâtre.
	1 811	Carmin.	Beau vert.
	1 927	Gris rouge.	Gris vert.
	2 007	Bleu gris.	Gris presqi~e blanc.
	2 048	Vert.	Rouge chair.
	2 338	Rose pâle.	Vert bleu pâle.
	2 680	Vert bleu pâle.	Rose pâle.