

# Polarisation de la lumière – Production et analyse

Rappel : indice d'un milieu transparent  $n = \frac{c}{v}$  (sans dimension) où  $c$  et  $v$  sont les vitesses de la lumière dans le vide et dans le milieu.

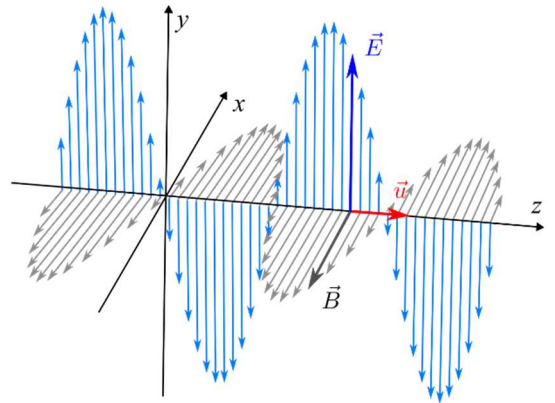
## Onde lumineuse – Polarisation rectiligne

La lumière peut se manifester via des *aspects corpusculaires*, on décrit alors la lumière comme un flux de *photons*, ou bien via des aspects *ondulatoires* et on décrit alors la lumière comme un *champ électromagnétique* c'est-à-dire un *champ électrique*  $\vec{E}$  et un champ magnétique  $\vec{B}$ .

### Exemple de lumière polarisée rectilignement

Un rayon lumineux (axe Oz ci-contre) est associé à une onde lumineuse se *propageant dans la direction z* (vecteur unitaire  $\vec{u}$ ).

Cette onde est *polarisée rectilignement dans la direction y* si le champ  $\vec{E}$  oscille selon cette direction : à tout instant et en tout point, le vecteur  $\vec{E}$  est parallèle à la droite (O, y).



Pour une polarisation rectiligne, la direction du champ électrique  $\vec{E}$  est appelée *direction de polarisation* (ce champ est orthogonal à la direction de propagation c'est-à-dire orthogonal aux rayons lumineux).

Dans la suite, le champ magnétique  $\vec{B}$  ne sera plus représenté car les détecteurs utilisés en optique (et l'œil) sont sensibles au champ électrique.

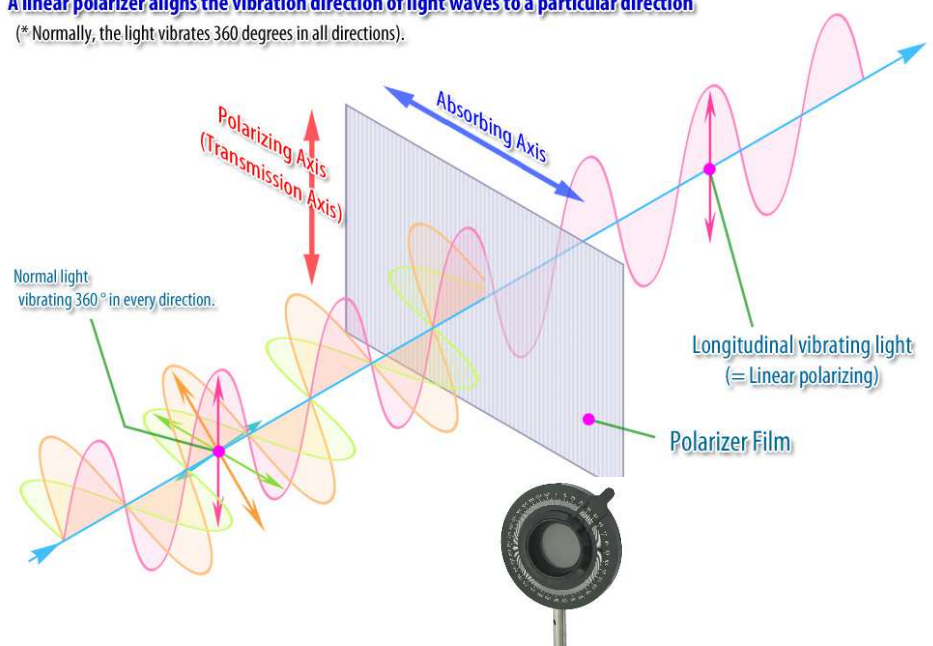
En général, la *lumière « naturelle »* (source thermique de lumière blanche par exemple) est *non polarisée* : en un point d'observation donné, la direction du champ  $\vec{E}$  fluctue aléatoirement à chaque instant.

En pratique, un *polariseur* placé dans un faisceau de lumière non polarisée permet de créer une polarisation rectiligne dans la direction de l'index de celui-ci.

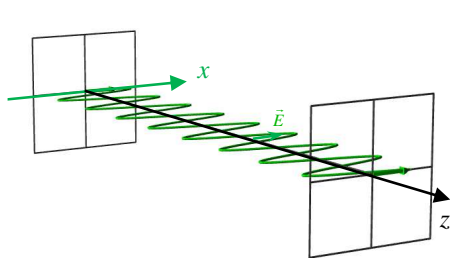
Ci-contre, seul le champ électrique est représenté, les différentes couleurs correspondent à des polarisations différentes superposées dans la lumière non polarisée.

**A linear polarizer aligns the vibration direction of light waves to a particular direction**

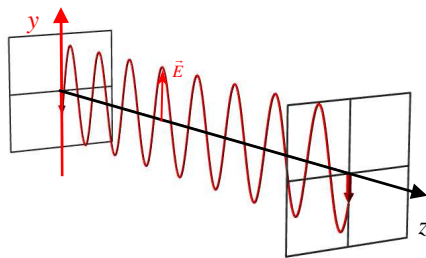
(\* Normally, the light vibrates 360 degrees in all directions).



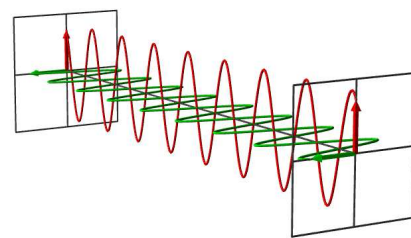
Le champ électrique  $\vec{E}$  associé à une onde se propageant dans la direction (O, z) (direction d'un rayon lumineux) possède deux composantes ou coordonnées dans le plan (xOy) orthogonal à la direction de propagation (les sinusoides représentent les oscillations de l'extrémité du vecteur  $\vec{E}$  au cours de sa propagation) :



Le champ peut osciller selon Ox.



Le champ peut osciller selon Oy.

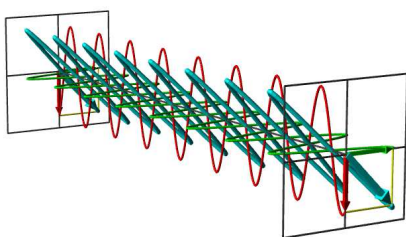


En général, le champ possède deux composantes qui oscillent. Le champ résultant est la **somme** de ces deux composantes.

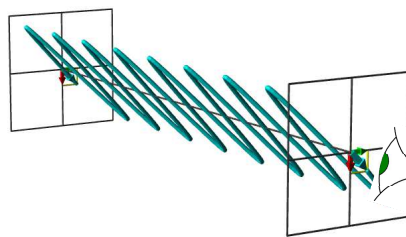
La nature de la polarisation dépend du déphasage  $\varphi$  entre ces deux vibrations (selon les deux directions Ox et Oy).

Il existe trois types de polarisation.

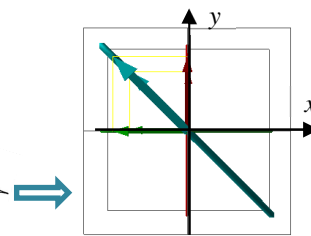
- ✓ La **polarisation rectiligne** : les deux composantes vibrent en **phase** ou en **opposition de phase** ( $\varphi = 0$  ou  $\pm\pi$ ). La direction du champ  $\vec{E}$  reste alors fixe au cours du temps. En un point d'observation donné, l'extrémité du vecteur champ décrit un segment de droite au cours du temps.



En bleu, le champ  $\vec{E}$ , somme des deux composantes en phase ou en opposition de phase, en rouge et en vert.

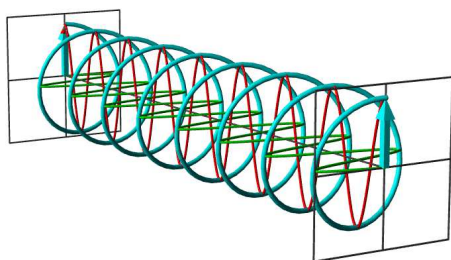


Le champ  $\vec{E}$  (représenté seul).

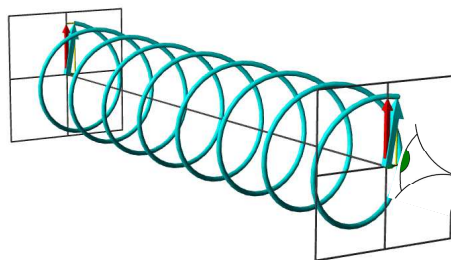


Oscillations de  $\vec{E}$  dans le plan (xOy) orthogonal au rayon lumineux.

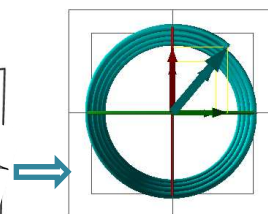
- ✓ La **polarisation circulaire** : les deux composantes de même amplitude vibrent en **quadrature** ( $\varphi = \pm\pi/2$ ). En un point d'observation donné, l'extrémité du vecteur champ décrit un cercle au cours du temps.



En bleu, le champ  $\vec{E}$ , somme des deux composantes de même amplitude et déphasées de  $\pm\pi/2$ .

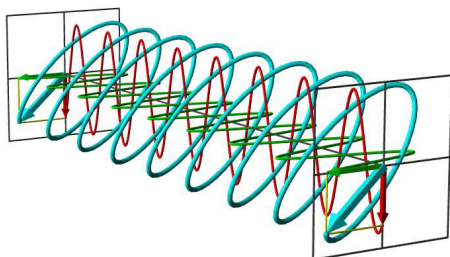


Le champ  $\vec{E}$  (représenté seul).

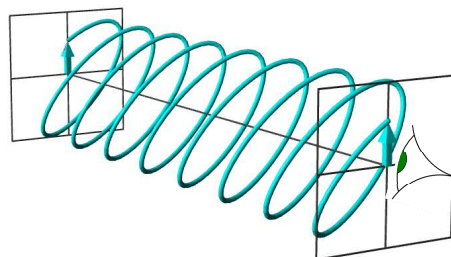


Observation de  $\vec{E}$  dans le plan (xOy) orthogonal au rayon lumineux.

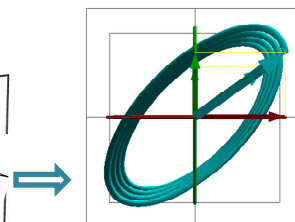
- ✓ La **polarisation elliptique** : le déphasage  $\varphi$  entre les deux composantes est quelconque ( $\varphi \neq 0$ ,  $\varphi \neq \pm\pi$  et  $\varphi \neq \pm\pi/2$ ). En un point d'observation donné, l'extrémité du vecteur champ décrit un cercle au cours du temps.



En bleu, le champ  $\vec{E}$ , somme des deux composantes déphasées d'une valeur quelconque ( $\varphi \neq 0$ ,  $\varphi \neq \pm\pi$  et  $\varphi \neq \pm\pi/2$ ).



Le champ  $\vec{E}$  (représenté seul).



Observation de  $\vec{E}$  dans le plan (xOy) orthogonal au rayon lumineux.

En pratique, une lumière polarisée circulairement ou elliptiquement peut être obtenue grâce à l'utilisation de *lames à retard de phase* réalisées dans un matériau *biréfringent*.

## Phénomène de biréfringence

Certains matériaux sont *biréfringents* : ils possèdent *deux indices de réfraction* différents associés à deux directions de polarisation particulières. Autrement dit, l'indice de réfraction d'un milieu biréfringent n'est pas unique, il dépend de la direction de polarisation de l'onde lumineuse.

Le cristal de spath possède cette propriété à l'état naturel (photographie ci-contre) : les deux images du texte vu à travers le cristal témoignent de cette double réfraction.



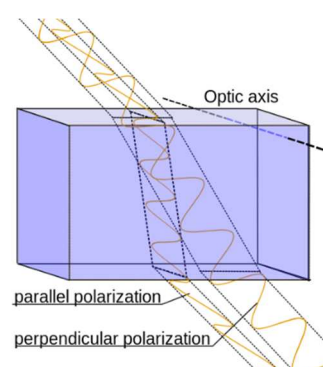
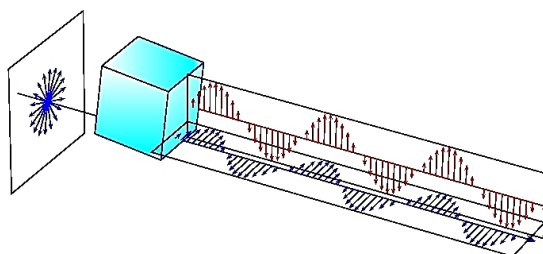
L'un des deux rayons réfractés obéit à la loi de Snell-Descartes pour la réfraction, on appelle indice ordinaire  $n_o$  l'indice correspondant à ce rayon.

L'indice correspondant à l'autre rayon est appelé indice extraordinaire  $n_e$ .

*Les indices étant différents pour les deux ondes associées aux deux rayons, les vitesses de propagation sont différentes, en conséquence les champs électriques associés à ces deux ondes sont déphasés.*

*Les deux rayons réfractés sont polarisés orthogonalement.*

Schématisation du phénomène de biréfringence dans un cristal de spath : un rayon incident et deux rayons émergents polarisés orthogonalement.



### Complément

Si on note  $e$  l'épaisseur du milieu biréfringent, les chemins optiques parcourus par les deux rayons réfractés sont différents :  $n_o e$  pour le rayon ordinaire et  $n_e e$  pour le rayon extraordinaire.

Il existe donc une différence de marche  $\delta = (n_e - n_o) e$  entre les deux ondes.

Le déphasage entre les champs électriques est alors  $\varphi = \frac{2\pi\delta}{\lambda} = \frac{2\pi(n_e - n_o)e}{\lambda}$  où  $\lambda$  est la longueur d'onde dans le vide de la radiation considérée.

Dans cette expression, les indices dépendent de la longueur d'onde dans le vide ( $n = n(\lambda)$ ) et l'épaisseur traversée dépend de l'angle d'incidence ( $e$  est l'épaisseur en incidence normale, en incidence oblique, l'épaisseur traversée est plus grande).

*Le déphasage dépend donc de la longueur d'onde dans le vide et de l'incidence.*

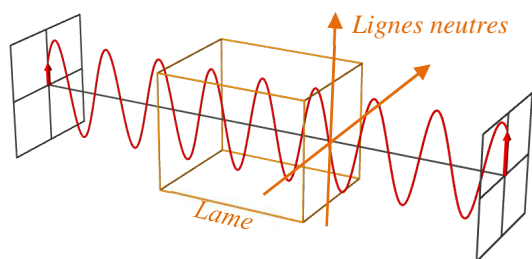
**Conséquence** : en choisissant le matériau biréfringent et son épaisseur, il est possible de contrôler le déphasage entre les deux ondes polarisées orthogonalement et ainsi de réaliser les polarisations précédemment décrites (cf. page 2).

Ce déphasage dépendant de la longueur d'onde dans le vide et de l'incidence, on travaillera donc *en lumière monochromatique* et en *incidence normale*.

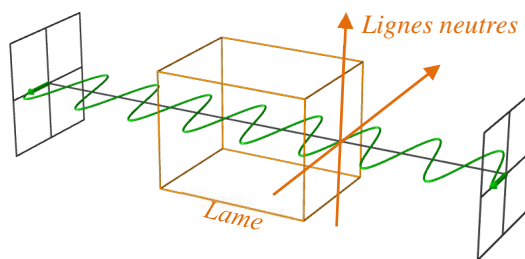
Ces propriétés sont à la base de la réalisation des lames à retard de phase.

**Lame à retard de phase** : lame (à faces parallèles, d'une épaisseur de quelques dixièmes de mm) taillée dans un milieu *biréfringent* caractérisée par deux directions appelées **lignes neutres** de la lame.

Les lignes neutres sont ainsi dénommées car une onde plane *polarisée rectilignement* suivant une ligne neutre émerge de la lame avec une polarisation *inchangée*.



Polarisation rectiligne parallèle à une ligne neutre inchangée



Polarisation rectiligne parallèle à l'autre ligne neutre inchangée

Cependant *les vitesses de propagation d'une onde plane polarisée rectilignement* suivant l'une ou l'autre des lignes neutres sont *différentes* car les *indices* dans ces deux directions sont *différents*.

L'une de ces lignes neutres est appelée **axe rapide** (indice  $n = c/v$  le plus petit) et l'autre **axe lent** (indice le plus grand).

**Action d'une lame à retard de phase** : introduire un déphasage entre les composantes du champ suivant les deux lignes neutres *pour* une longueur d'onde  $\lambda$  donnée.

**Lame  $\lambda/4$**  (lame quart d'onde) : le déphasage introduit entre les composantes du champ suivant les deux lignes neutres vaut  $|\varphi| = \pi/2$ .

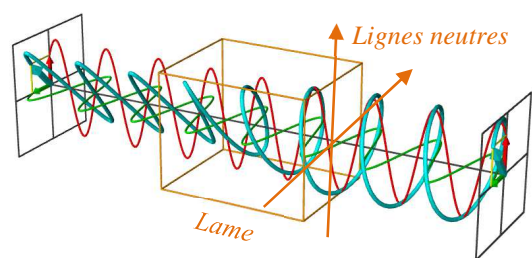
**Lame  $\lambda/2$**  (lame demi-onde) : le déphasage introduit entre les composantes du champ suivant les deux lignes neutres vaut  $|\varphi| = \pi$ .

Le déphasage introduit par la lame entre les composantes du champ suivant les lignes neutres est  $\varphi = \frac{2\pi\delta}{\lambda}$  où  $\delta = \lambda/4$  ou  $\lambda/2$ .

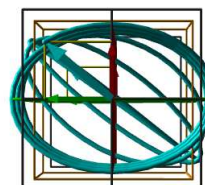
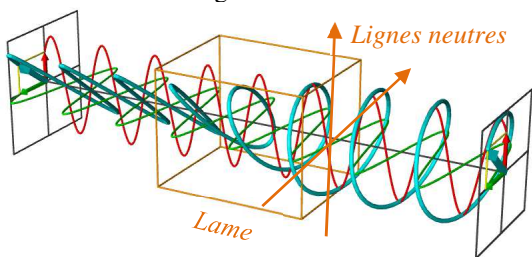
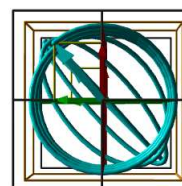
Remarque : en *incidence normale*, ces lames à faces parallèles ne provoquent qu'un **déphasage sans double réfraction**.

**Les lames à retard de phase n'ont aucune action sur la lumière non polarisée.**

### Exemples avec une lame $\lambda/4$



Polarisation rectiligne incidente inclinée à  $\pm 45^\circ$  par rapport aux lignes neutres  $\Rightarrow$  **polarisation circulaire** en sortie



Polarisation rectiligne incidente inclinée d'un angle « quelconque »<sup>(\*)</sup> par rapport aux lignes neutres  $\Rightarrow$  **polarisation elliptique**  
<sup>(\*)</sup> cf. manipulations ci-après

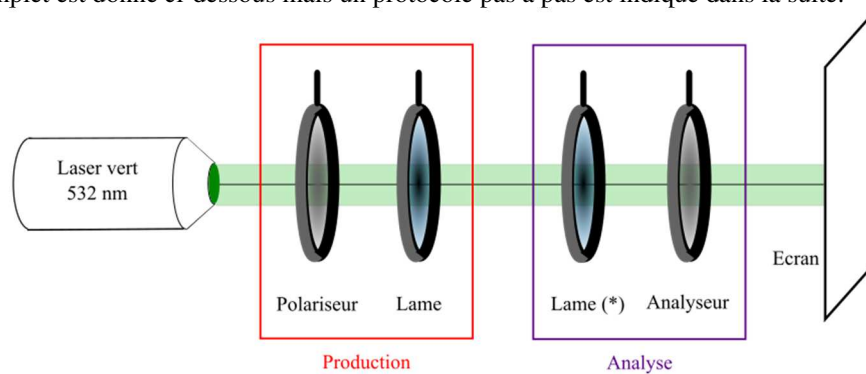
Polarisation lumière	Éclairement $I(\alpha)$ Rotation de $\alpha$ de l'analyseur	
Non polarisée	Indépendant $\alpha^{(*)}$	(aucune direction privilégiée)
Polarisation rectiligne	Minimum nul ( $\alpha_m$ et $\alpha_m + \pi$ )	(analyseur orthogonal à la direction de polarisation)
Polarisation circulaire	Indépendant $\alpha^{(*)}$	(norme du champ constante)
Polarisation elliptique	Minimum non nul ( $\alpha_m$ et $\alpha_m + \pi$ )	(analyseur parallèle au petit axe de l'ellipse)

(\*) On constate que l'utilisation d'un analyseur seul ne permet pas de discriminer lumière non polarisée et polarisation circulaire, cf. protocole polarisation circulaire pages 6 et 7.

### 🔧 Montage et protocole

Certaines lames disponibles sont étiquetées « 560 nm », la source utilisée sera donc un laser vert à 532 nm car il existe en réalité un intervalle de longueurs d'onde admissibles.

Le montage le plus complet est donné ci-dessous mais un protocole pas à pas est indiqué dans la suite.



(\*) Cf. protocole polarisation circulaire ci-dessous

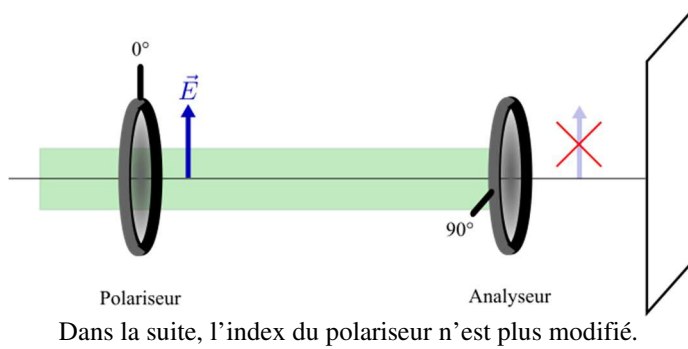
Remarque : il peut exister un décalage entre l'indication de l'index d'un polariseur ou d'une lame et la direction privilégiée qu'il est censé repérer (pivotement de la lame dans son support).

Lignes neutres lames  $\lambda/4$  et  $\lambda/2$  – Polarisation rectiligne

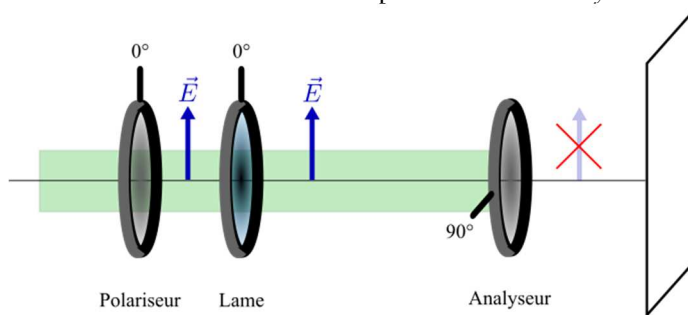
lame  
 Polarisation rectiligne parallèle aux lignes neutres  $\rightarrow$  polarisation rectiligne inchangée

Montage initial : laser vert + polariseur + analyseur + écran

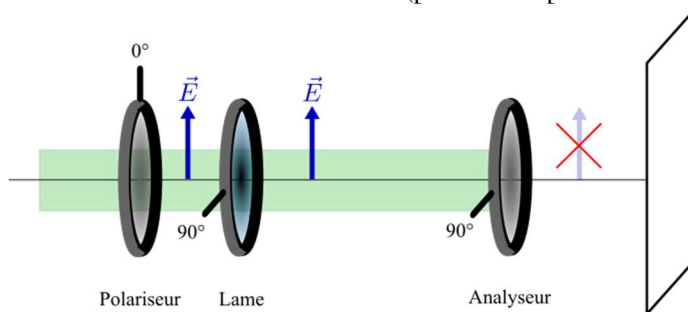
1. Croiser polariseur (index à  $0^\circ$ ) et analyseur (index à  $90^\circ$  ou  $270^\circ$ ) : vérifier que l'écran est sombre (ajuster si nécessaire en agissant sur le polariseur).



2. Interposer une lame à retard de phase entre le polariseur et l'analyseur.
  - 2.1. Placer l'index de la lame à  $0^\circ$  : l'écran doit rester sombre (la polarisation est parallèle à l'une des lignes neutres de la lame, elle n'est donc pas modifiée par la lame). Vérifier que l'éclairement sur l'écran est maximum lorsque l'index de l'analyseur est placé à  $0^\circ$  (ou  $180^\circ$ ).



- 2.2. Placer l'index de la lame à  $90^\circ$  : l'écran doit rester sombre (polarisation parallèle à l'autre ligne neutre de la lame).

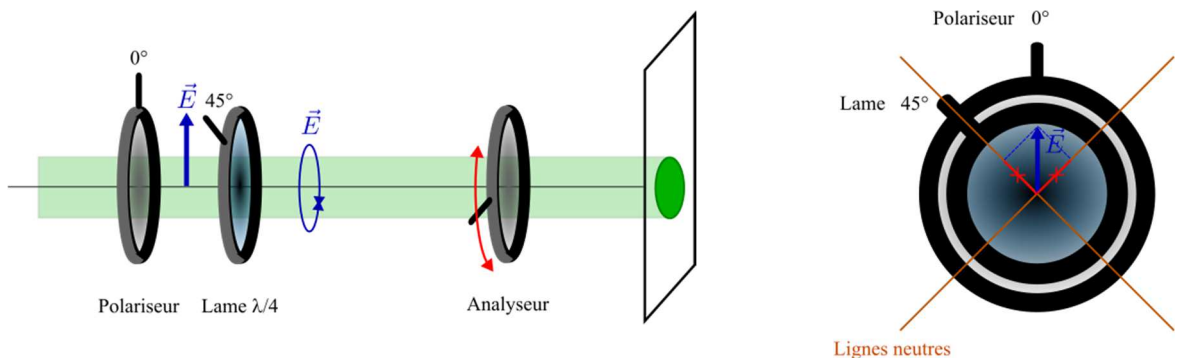


Action d'une lame  $\lambda/4$  - Fabrication et analyse d'une polarisation circulaire

$\lambda/4$   
 Polarisation rectiligne à  $45^\circ$  des lignes neutres  $\leftrightarrow$  polarisation circulaire

Montage initial : laser vert + polariseur + lame  $\lambda/4$  + analyseur + écran

3. Placer l'index de la lame à retard de phase à  $45^\circ$  (ou  $135$  ou  $225$  ou  $315^\circ$ ).

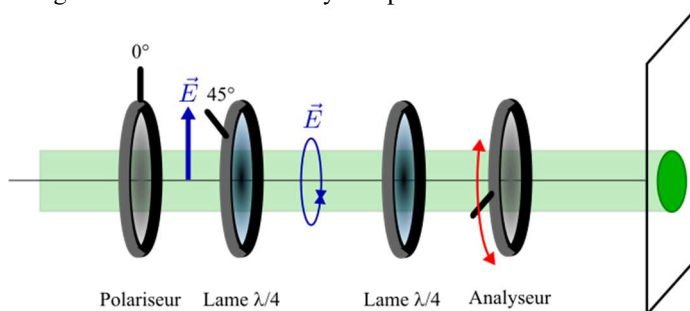


Dans ces conditions (cf. schémas ci-dessus), le champ  $\vec{E}$  est à  $45^\circ$  des lignes neutres de la lame quart d'onde, les deux composantes du champ sur les lignes neutres sont égales en norme (en rouge sur le schéma de droite) et déphasées de  $\pi/2$ , la polarisation obtenue est circulaire.

Vérifier que la polarisation est bien circulaire en tournant l'index de l'analyseur : l'éclairement sur l'écran ne doit pas subir de variations au cours de la rotation de l'analyseur (tourner légèrement la lame si ce n'est pas le cas).

En réalité, cette analyse effectuée à l'aide du seul analyseur serait insuffisante si la lumière était produite par une source inconnue : il pourrait tout aussi bien s'agir d'une lumière non polarisée.

Pour discriminer les deux cas, il faut procéder à une expérience complémentaire à l'aide d'une seconde lame  $\lambda/4$  placée avant l'analyseur : celle-ci n'aura aucune action sur une lumière non polarisée mais elle transformera une polarisation circulaire en polarisation rectiligne. La rotation de l'analyseur permet alors de discriminer sans ambiguïté les deux cas.



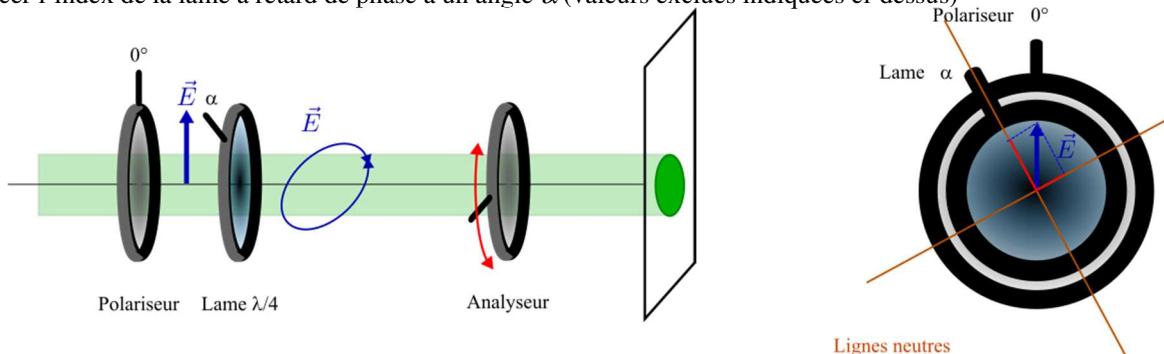
### Action d'une lame $\lambda/4$ - Fabrication et analyse d'une polarisation elliptique

Polarisation rectiligne faisant un angle  $\alpha$  avec les lignes neutres  $\leftrightarrow$  polarisation elliptique

$\alpha$  différent des valeurs précédentes : 0, 180, 90, 270° (sinon polarisation rectiligne), 45, 135, 225, 315° (sinon polarisation circulaire)

Montage : laser vert + polariseur + lame  $\lambda/4$  + analyseur + écran

- Placer l'index de la lame à retard de phase à un angle  $\alpha$  (valeurs exclues indiquées ci-dessus)



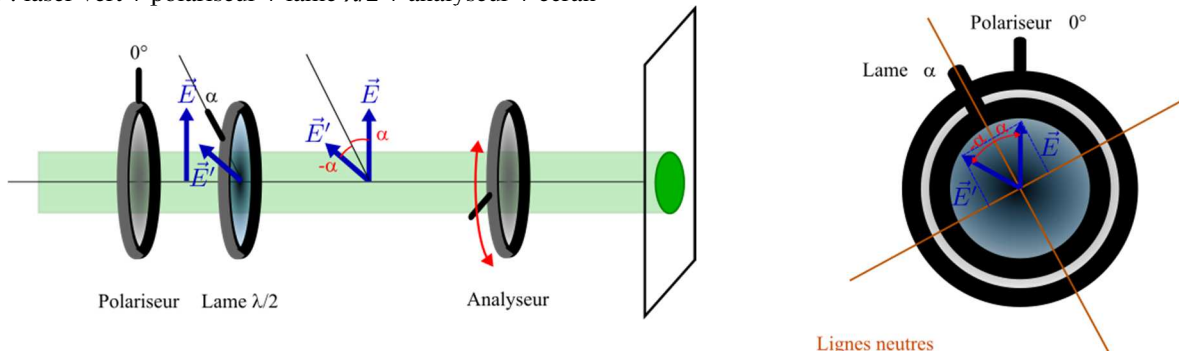
Dans ces conditions (cf. schémas ci-dessus), les projections du champ  $\vec{E}$  sur les lignes neutres de la lame quart d'onde ne sont plus égales et elles sont déphasées de  $\pi/2$ , la polarisation obtenue est elliptique.

Vérifier que la polarisation est bien elliptique en tournant l'index de l'analyseur : l'éclairement sur l'écran passe par des maxima puis par des minima au cours de la rotation de l'analyseur.

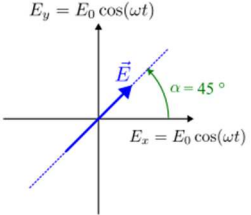
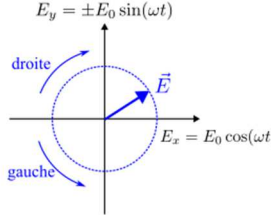
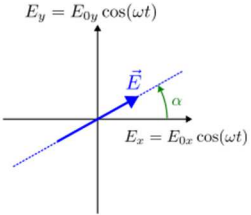
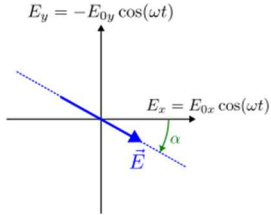
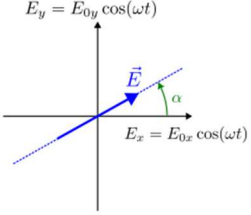
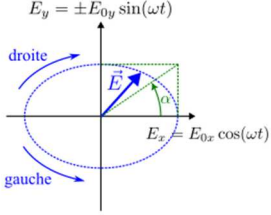
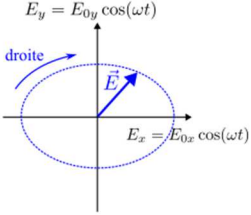
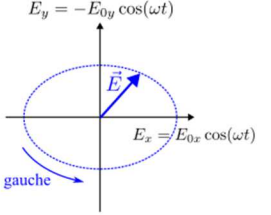
### Action d'une lame $\lambda/2$ sur une polarisation rectiligne

Polarisation rectiligne (angle  $\alpha$  avec l'une des lignes neutres)  $\leftrightarrow$  polarisation rectiligne (angle  $-\alpha$  avec la même ligne neutre)

Montage : laser vert + polariseur + lame  $\lambda/2$  + analyseur + écran



Vérifier que la polarisation est toujours rectiligne en tournant l'index de l'analyseur mais l'éclairement sur l'écran doit s'annuler lorsque l'index de l'analyseur indique  $2\alpha \pm 90^\circ$  (analyseur « orthogonal » à  $\vec{E}'$ ).

Lame $\lambda/4$	Lame $\lambda/2$
<i>lame</i> Polarisation rectiligne parallèle aux lignes neutres $\rightarrow$ polarisation rectiligne inchangée	
<p> <math>E_y = E_0 \cos(\omega t)</math>  <math>E_x = E_0 \cos(\omega t)</math>  <math>\alpha = 45^\circ</math>                        polarisation rectiligne à 45° des lignes neutres                 </p> <p> <math>\xrightarrow{\text{lame } \frac{\lambda}{4}, \varphi = \pm \frac{\pi}{2}}</math> </p> <p> <math>E_y = \pm E_0 \sin(\omega t)</math>  <math>E_x = E_0 \cos(\omega t)</math>                        polarisation circulaire droite ou gauche                 </p>	<p> <math>E_y = E_{0y} \cos(\omega t)</math>  <math>E_x = E_{0x} \cos(\omega t)</math>  <math>\alpha</math>                        polarisation rectiligne                 </p> <p> <math>\xrightarrow{\text{lame } \frac{\lambda}{2}, \varphi = \pm \pi}</math> </p> <p> <math>E_y = -E_{0y} \cos(\omega t)</math>  <math>E_x = E_{0x} \cos(\omega t)</math>  <math>\alpha</math>                        polarisation rectiligne                 </p>
<p> <math>E_y = E_{0y} \cos(\omega t)</math>  <math>E_x = E_{0x} \cos(\omega t)</math>  <math>\alpha</math>                        polarisation rectiligne                 </p> <p> <math>\xrightarrow{\text{lame } \frac{\lambda}{4}, \varphi = \pm \frac{\pi}{2}}</math> </p> <p> <math>E_y = \pm E_{0y} \sin(\omega t)</math>  <math>E_x = E_{0x} \cos(\omega t)</math>  <math>\alpha</math>                        polarisation elliptique droite ou gauche                 </p>	<p> <math>E_y = E_{0y} \cos(\omega t)</math>  <math>E_x = E_{0x} \cos(\omega t)</math>                        polarisation elliptique ou circulaire                 </p> <p> <math>\xrightarrow{\text{lame } \frac{\lambda}{2}, \varphi = \pm \pi}</math> </p> <p> <math>E_y = -E_{0y} \cos(\omega t)</math>  <math>E_x = E_{0x} \cos(\omega t)</math>                        polarisation elliptique ou circulaire                 </p>
<i>Irréalizable avec le matériel disponible</i>	



💡 **Action d'un polariseur** (hors polarisations partielles) :

Polarisation inconnue		Éclairement $I(\alpha)$ <i>Rotation de <math>\alpha</math> de l'analyseur</i>	Expérience complémentaire ( $\lambda/4$ avant analyseur)
Non polarisée	NP	Indépendant $\alpha^{(*)}$	NP + $\lambda/4 \rightarrow$ NP ( indép. $\alpha$ )
Polarisation rectiligne	PR	Minimum nul ( $\alpha_m$ et $\alpha_m+\pi$ )	
Polarisation circulaire	PC	Indépendant $\alpha^{(*)}$	PC + $\lambda/4 \rightarrow$ PR (minimum nul)
Polarisation elliptique	PE	Minimum non nul ( $\alpha_m$ et $\alpha_m+\pi$ )	

🔗 **Organigramme d'analyse** (hors polarisations partielles)

