



# Polarisation de la lumière – Production et analyse

 **Prérequis** : « Polarisation de la lumière » et « Résumé - Ondes électromagnétiques dans le vide ».

 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.



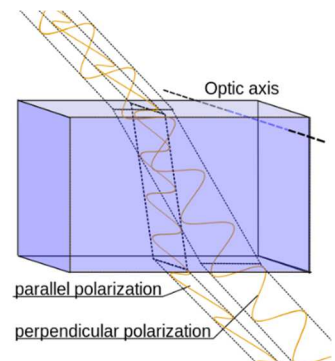
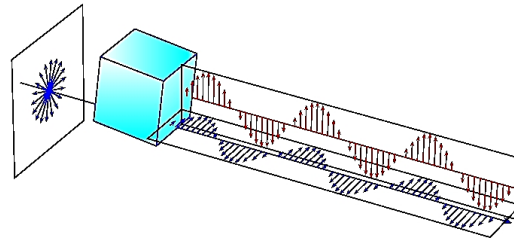
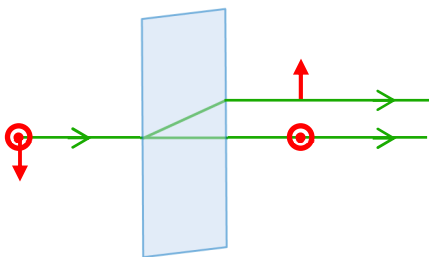
L'un des deux rayons réfractés obéit à la loi de Snell-Descartes pour la réfraction, on appelle indice ordinaire  $n_o$  l'indice correspondant à ce rayon.

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.*

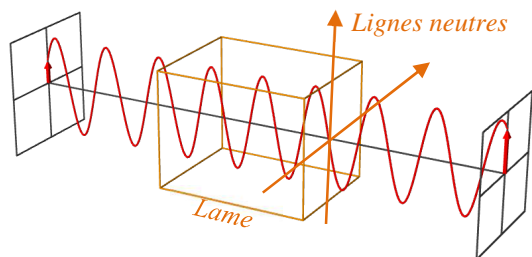
 **Conséquence** : en choisissant le matériau biréfringent et son épaisseur, il est possible de contrôler le déphasage entre les deux ondes polarisées orthogonalement et ainsi de réaliser les polarisations précédemment décrites (cf. page 2).

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*.

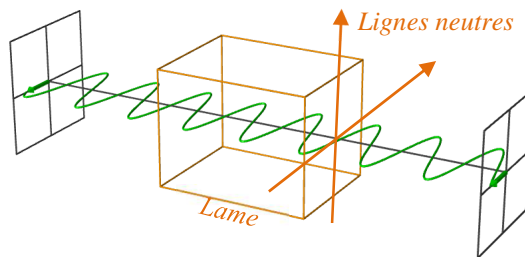
Ces propriétés sont à la base de la réalisation des lames à retard de phase.

**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 une 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  $|\varphi| = \pi/2$ .

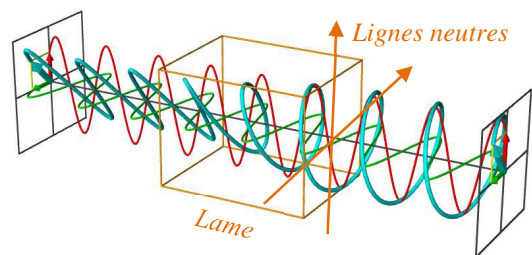
**Lame  $\lambda/2$**  (lame demi-onde) : le déphasage introduit entre les composantes du champ suivant les deux lignes neutres vaut  $|\varphi| = \pi$ .

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  $\lambda/2$ .

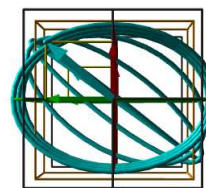
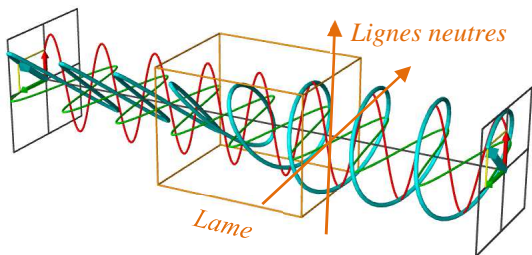
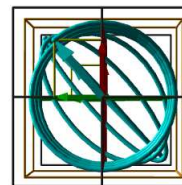
Remarque : en **incidence normale**, ces lames à faces parallèles ne provoquent qu'un **déphasage sans double réfraction**.

**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**

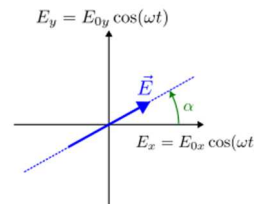
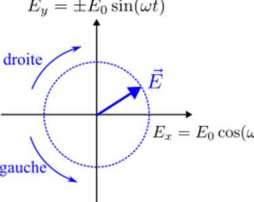
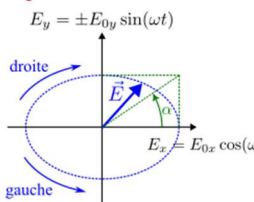
<sup>(\*)</sup> cf. manipulations ci-après

 **Action d'une lame à retard de phase sur une lumière polarisée**

Soit une onde plane harmonique se propageant selon Oz :  $\vec{E} = \vec{E}_0 e^{j(\omega t - kz)}$ .

Cette onde arrive en incidence normale sur une **lame à retard de phase** dont les **lignes neutres** sont **Ox et Oy**.

On note  $\vec{E}'$  le champ émergent de la lame et on suppose (arbitrairement) que le retard est pris en compte dans  $E'_y$ .

Lumière	Lame $\lambda/2$ (déphasage $\pm\pi$ )	Lame $\lambda/4$ (déphasage $\pm\pi/2$ )
Non polarisée (NP)	Non polarisée	
<p><b>Polarisation rectiligne (PR)</b></p> $\vec{E} \begin{cases} E_x = E_0 \cos \alpha \cos(\omega t - kz) \\ E_y = E_0 \sin \alpha \cos(\omega t - kz) \\ E_z = 0 \end{cases}$ 	$\vec{E}' \begin{cases} E'_x = E_0 \cos \alpha \cos(\omega t - kz) \\ E'_y = \\ E'_z = 0 \end{cases}$	$\vec{E}' \begin{cases} E'_x = E_0 \cos \alpha \cos(\omega t - kz) \\ E'_y = \\ E'_z = 0 \end{cases}$
<p><b>Polarisation circulaire (PC)</b></p> $\vec{E} \begin{cases} E_x = E_0 \cos(\omega t - kz) \\ E_y = \pm E_0 \sin(\omega t - kz) \\ E_z = 0 \end{cases}$ 	$\vec{E}' \begin{cases} E'_x = E_0 \cos(\omega t - kz) \\ E'_y = \\ E'_z = 0 \end{cases}$	$\vec{E}' \begin{cases} E'_x = E_0 \cos(\omega t - kz) \\ E'_y = \\ E'_z = 0 \end{cases}$
<p><b>Polarisation elliptique (PE)</b></p> $\vec{E} \begin{cases} E_x = E_{0x} \cos(\omega t - kz) \\ E_y = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \psi) \\ E_z = 0 \end{cases}$ <p>axes <math>\neq</math> lignes neutres (impossible TP)</p>	$\vec{E}' \begin{cases} E'_x = E_{0x} \cos(\omega t - kz) \\ E'_y = \\ E'_z = 0 \end{cases}$	$\vec{E}' \begin{cases} E'_x = E_{0x} \cos(\omega t - kz) \\ E'_y = \\ E'_z = 0 \end{cases}$
<p><b>(PE) cas particulier <math>\rightarrow</math> TP</b></p> $\vec{E} \begin{cases} E_x = E_0 \cos \alpha \cos(\omega t - kz) \\ E_y = \pm E_0 \sin \alpha \sin(\omega t - kz) \\ E_z = 0 \end{cases}$ <p>axes = lignes neutres (TP)</p> 	$\vec{E}' \begin{cases} E'_x = E_0 \cos \alpha \cos(\omega t - kz) \\ E'_y = \\ E'_z = 0 \end{cases}$	$\vec{E}' \begin{cases} E'_x = E_0 \cos \alpha \cos(\omega t - kz) \\ E'_y = \\ E'_z = 0 \end{cases}$

\* ou circulaire si  $\alpha = \pm \pi/4$  ou rectiligne si  $\alpha = 0$  ou  $\pm \pi$  (lignes neutres).

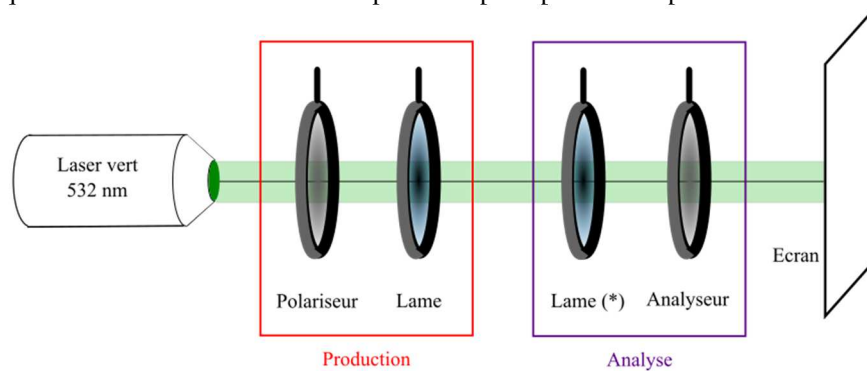
Polarisation lumière	Éclairement $I(\alpha)$ Rotation de $\alpha$ de l'analyseur	
Non polarisée	Indépendant $\alpha^{(*)}$	(aucune direction privilégiée)
Polarisation rectiligne	Minimum nul ( $\alpha_m$ et $\alpha_m + \pi$ )	(analyseur orthogonal à la direction de polarisation)
Polarisation circulaire	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 4 et 5.

🔧 **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

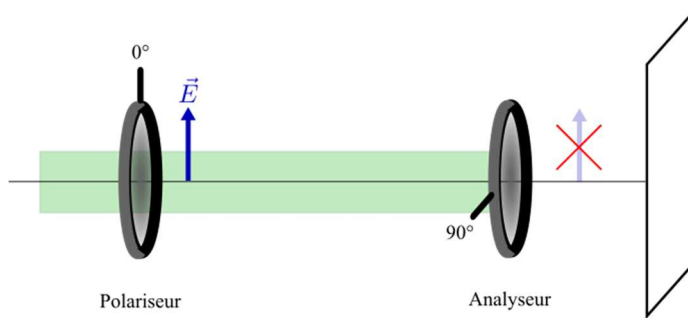
Remarque : il peut exister un décalage entre l'indication de l'index d'un polariseur ou d'une lame et la direction privilégiée qu'il est censé repérer (pivotement de la lame dans son support).

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

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

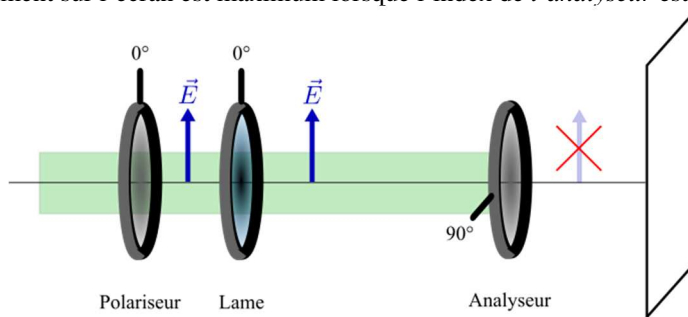
Montage initial : laser vert + polariseur + analyseur + écran

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).

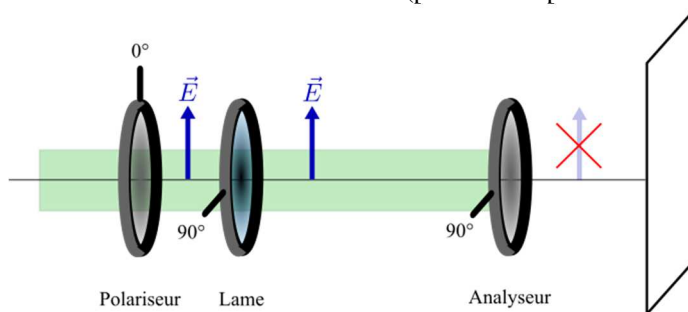


Dans la suite, l'index du polariseur n'est plus modifié.

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).

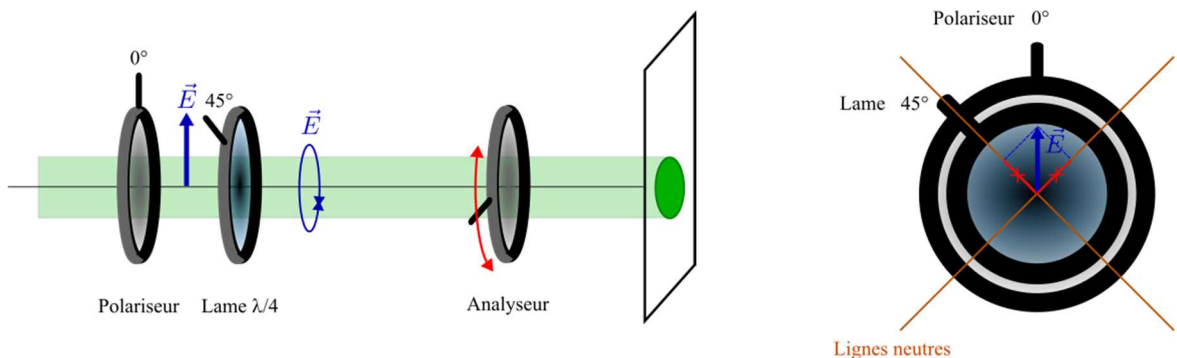


Action d'une lame  $\lambda/4$  - Fabrication et analyse d'une polarisation circulaire

$\lambda/4$   
 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  $315^\circ$ ).

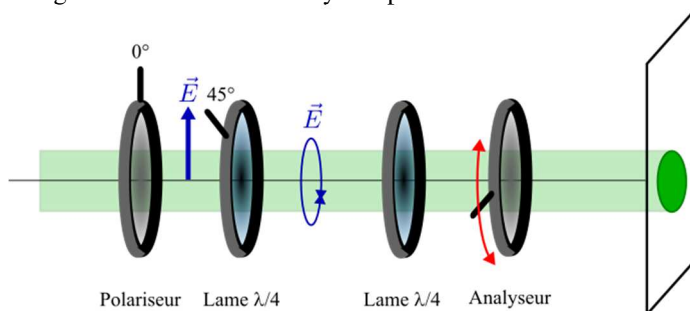


Dans ces conditions (cf. schémas ci-dessus), le champ  $\vec{E}$  est à  $45^\circ$  des lignes neutres de la lame quart d'onde, les deux composantes du champ sur les lignes neutres sont égales en norme (en rouge sur le schéma de droite) et déphasées de  $\pi/2$ , la polarisation obtenue est circulaire.

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.



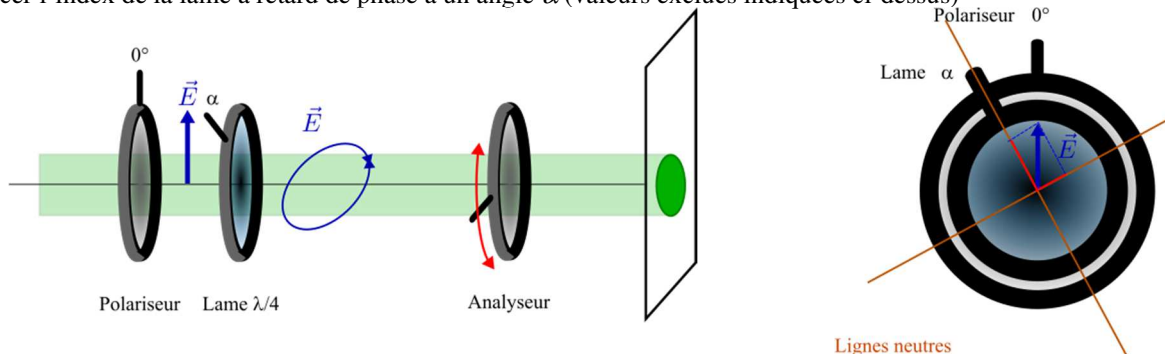
### Action d'une lame $\lambda/4$ - Fabrication et analyse d'une polarisation elliptique

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

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



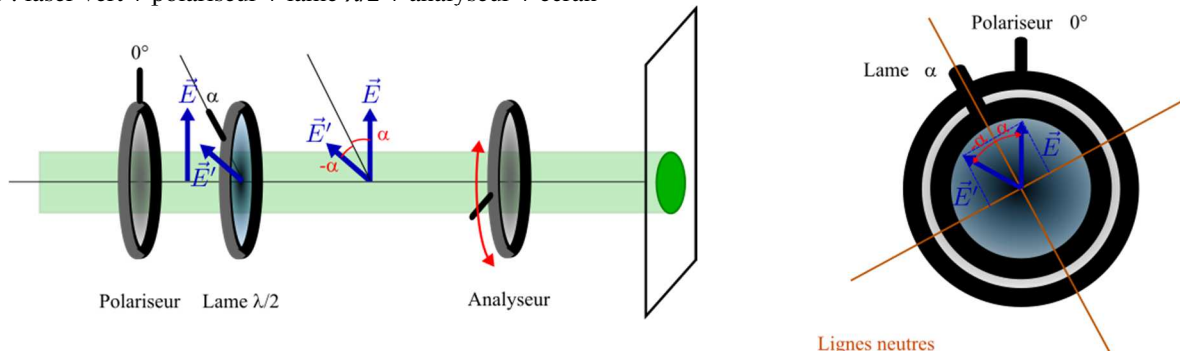
Dans ces conditions (cf. schémas ci-dessus), les projections du champ  $\vec{E}$  sur les lignes neutres de la lame quart d'onde ne sont plus égales et elles sont déphasées de  $\pi/2$ , la polarisation obtenue est elliptique.

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.

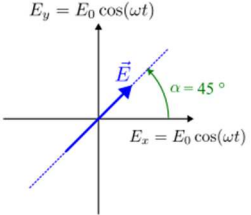
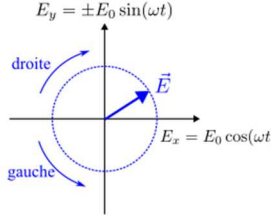
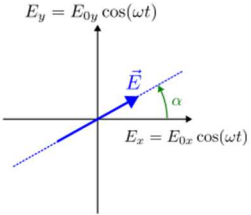
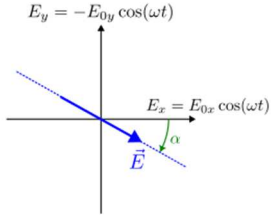
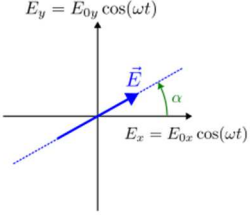
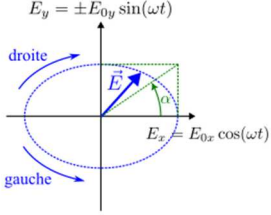
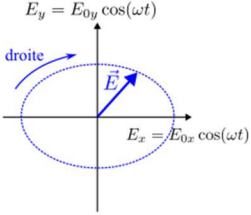
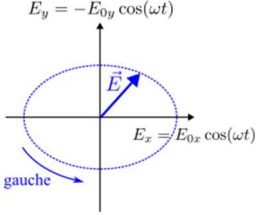
### Action d'une lame $\lambda/2$ sur une polarisation rectiligne

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>                        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>                        polarisation rectiligne                 </p>
<p> <math>E_y = E_{0y} \cos(\omega t)</math>  <math>E_x = E_{0x} \cos(\omega t)</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>                        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>
<p><i>Irréalizable avec le matériel disponible</i></p>	

💡 **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)

