

Plan du cours 2024

Partie 1: Propagation dans les milieux anisotropes

ellipsoïde des indices, surface des vitesses, constructions de rayons

OBJECTIF 1: Réaliser un tracé de rayons dans un milieu anisotrope uniaxe

Pouvoir rotatoire

Partie 2 : Lumière polarisée

Etats de polarisation: représentations graphiques et matricielles

Composants de polarisation passifs et actifs: fonction et réalisation

pratique: polariseurs, lames retard, isolateur optique, cristaux liquides, ...

OBJECTIF 2: Calculer un état de polarisation à la sortie d'un système

OBJECTIF 3: Analyser un état de polarisation inconnu

OBJECTIF 4: Concevoir un système utilisant les états de polarisation

Partie 3: Interférences en lumière polarisée

connexion avec les interférences vues en optique physique

OBJECTIF 5: Interpréter une expérience d'interférences utilisant de la lumière polarisée

Plan de la partie sur les interférences en lumière polarisée

- I. Interférences entre 2 ondes polarisées: cas général
- II. Interférences à la sortie d'un milieu anisotrope
- III. Meilleures conditions d'observation
- IV. Exemples d'interférences en lumière polarisée
- V. Modification des conditions d'observation
- VI. Interférences en lumière blanche
- VII. Cohérence de polarisation
- VIII. Allure des franges dans des cas plus complexes (incidence non normale)
- IX. Interféromètre en polarisation pour une expérience d'optique quantique

VII. Cohérence de polarisation

Nouveau dispositif expérimental:

La source est non polarisée (par exemple réflexion diffuse d'une lampe de bureau à LED sur un tableau blanc)

Va-t-on voir des interférences si on éclaire un milieu biréfringent, par exemple un Wollaston, avec cette source?

- A. OUI à condition de mettre un analyseur en sortie à 45° des axes du Wollaston**
- B. OUI à condition de mettre aussi un polariseur avant le Wollaston parallèle aux axes du Wollaston**
- C. Oui à condition de mettre aussi un polariseur avant le Wollaston parallèle ou perp aux axes de l'analyseur**

Wollaston W tenu par une pince grise
Polariseur P placé avant W tenu par une pince jaune
Analyseur A placé après W tenu par une pince rose

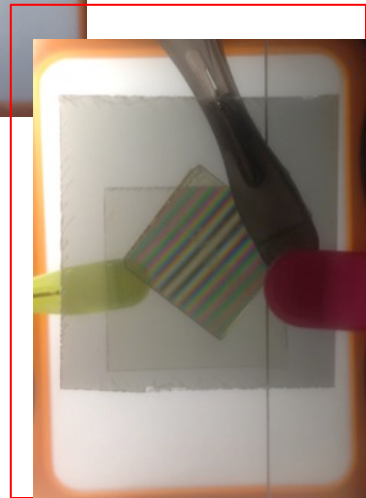
A. OUI à condition de mettre un analyseur en sortie à 45° des axes du Wollaston W



B. OUI à condition de mettre aussi un polariseur avant le Wollaston parallèle aux axes du Wollaston



C. OUI à condition de mettre aussi un polariseur avant le Wollaston parallèle ou perp aux axes de l'analyseur



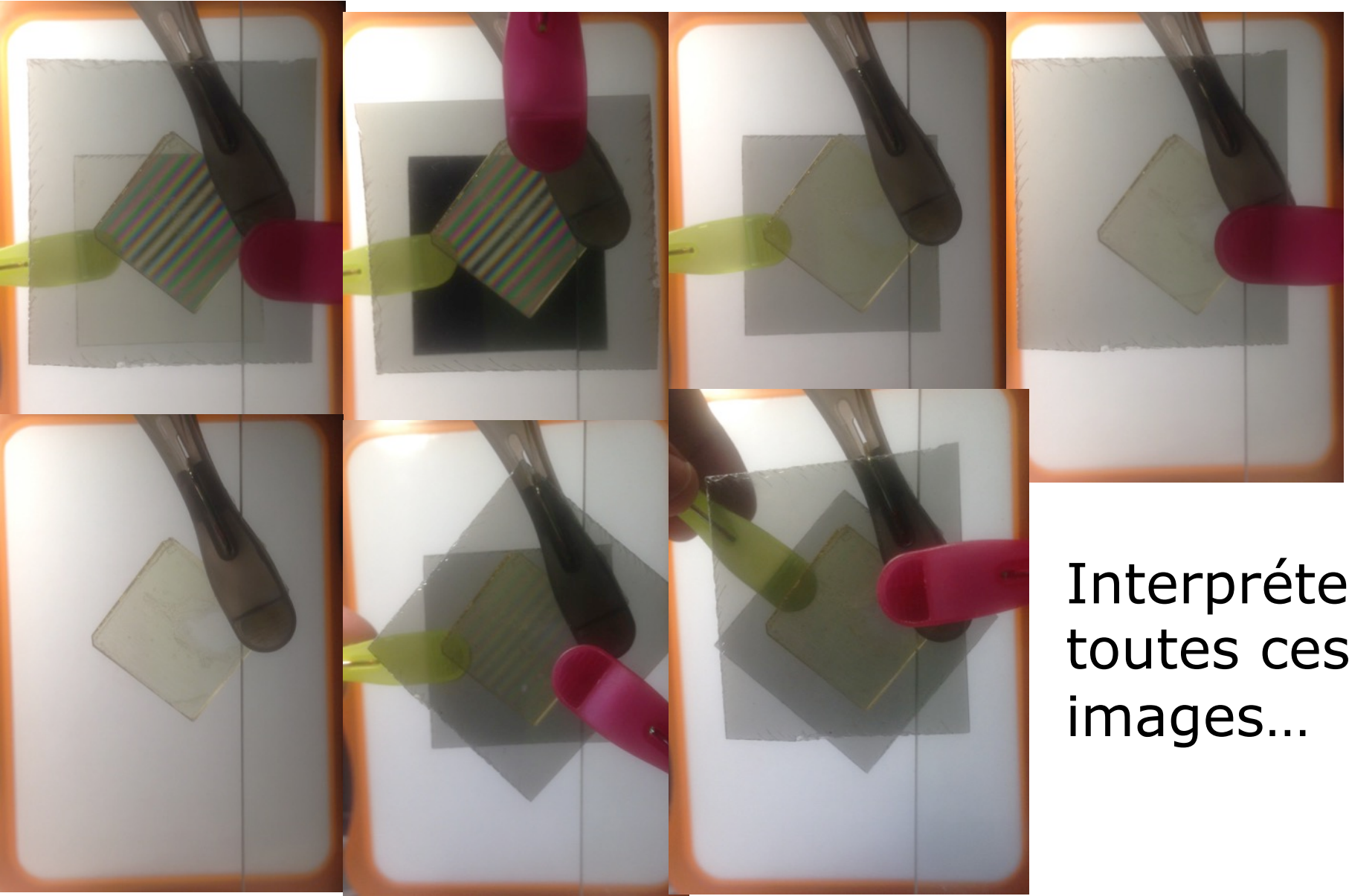
Wollaston W tenu par une pince grise

Polariseur P placé avant W tenu par une pince jaune

Analyseur A placé après W tenu par une pince rose

NW polarisation 1A

5



Interprétez
toutes ces
images...

VII. Cohérence de polarisation

BILAN

Les interférences en lumière polarisée nécessitent à la fois:

- un polariseur avant le dispositif (pour les deux ondes qui vont interférer soient cohérentes entre elles)
- et un analyseur après le dispositif (pour que les deux ondes qui interfèrent soient de polarisation parallèle, en tout cas pas orthogonales).

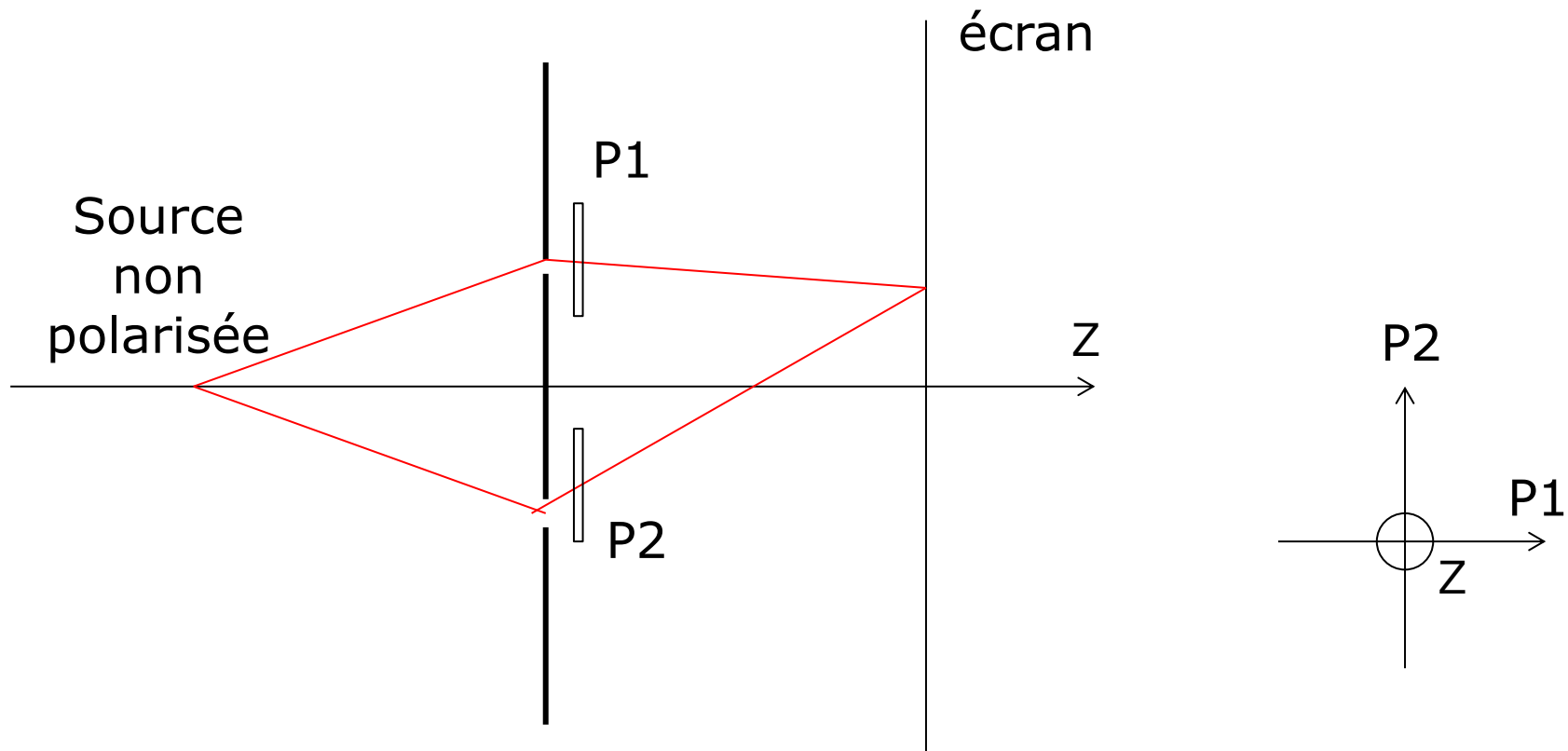
De plus:

P et A doivent être à 45° des axes du dispositif biréfringent, en tout cas pas parallèles ni l'un ni l'autre à ces axes sinon

- seule une onde va se propager dans le milieu (cas où P // l'un des axes)
- ou va être détectée derrière A (cas où A // à l'un des axes).

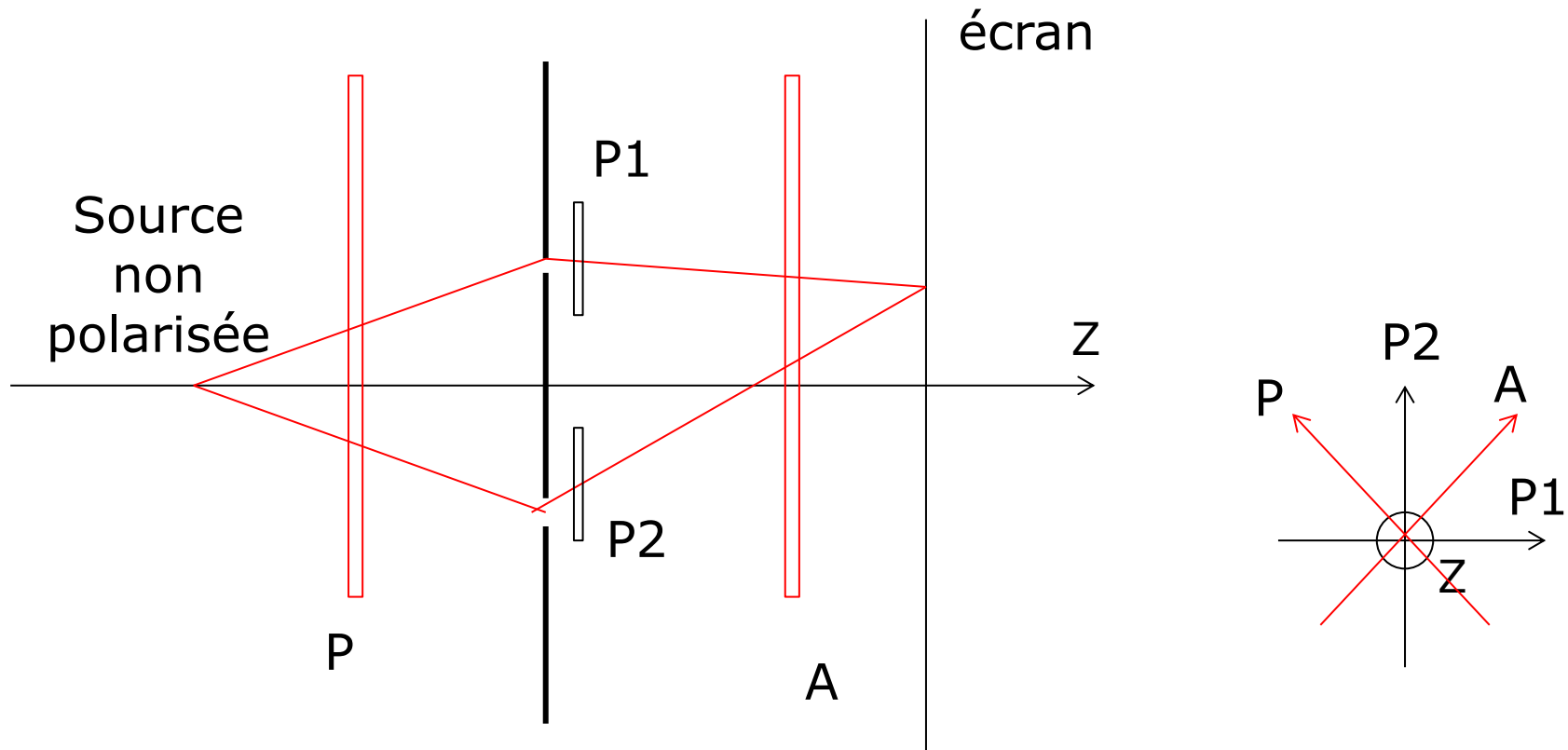
Expérience originale de Fresnel-Arago

On place devant chaque trou d'Young un polariseur, ces deux polariseurs étant croisés entre eux: voit-on encore des franges? Que faut-il ajouter au montage pour les observer?



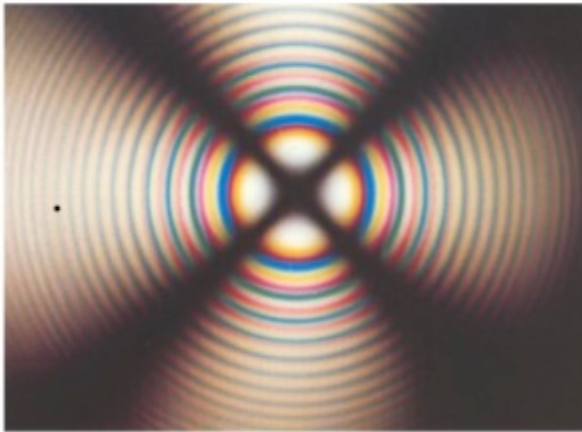
Expérience originale de Fresnel-Arago

On place devant chaque trou d'Young un polariseur, ces deux polariseurs étant croisés entre eux: voit-on encore des franges? Que faut-il ajouter au montage pour les observer?



VIII. Allure des franges dans des cas plus complexes (incidence non normale)

1) lame d'axe optique perpendiculaire aux faces

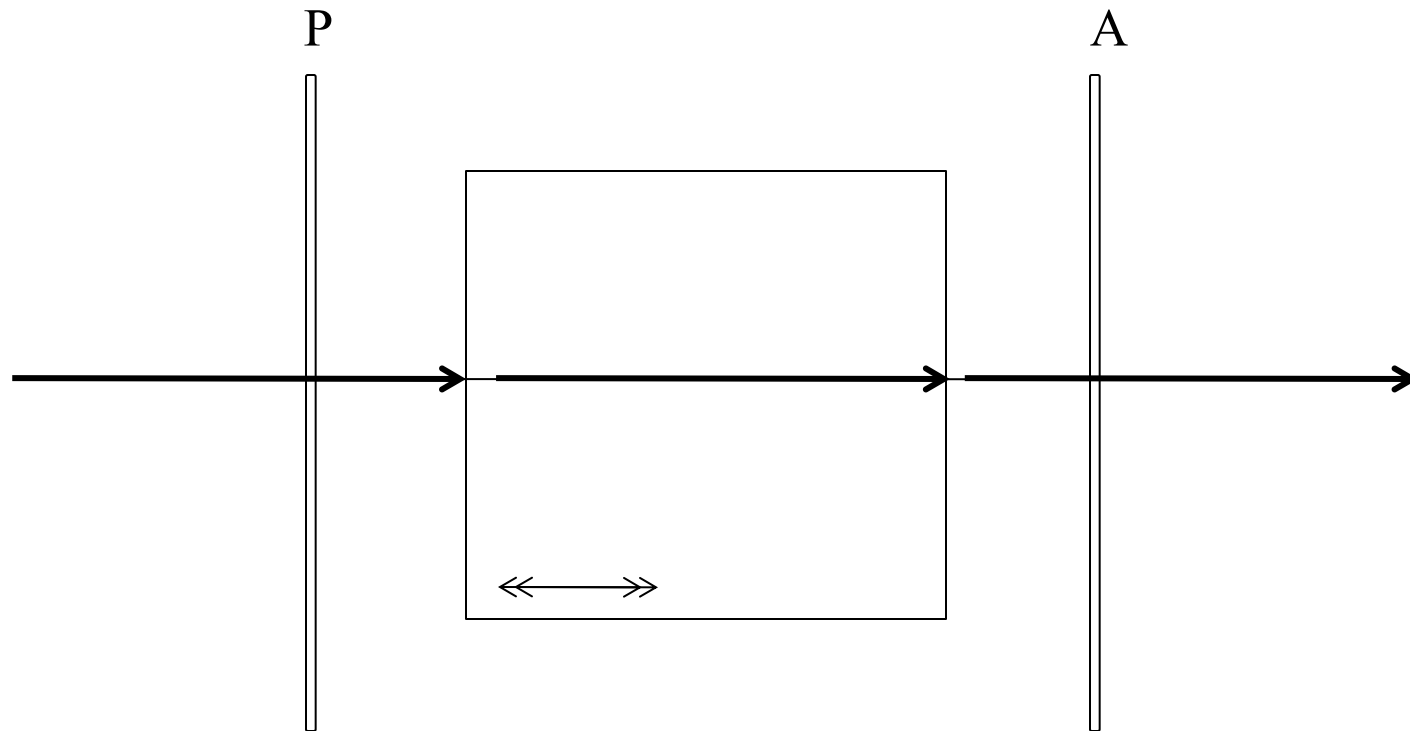


Interférences observées avec

- une lame de spath d'axe optique perpendiculaire à la face d'entrée,
- éclairée par une onde convergente,
- placée entre P et A croisés

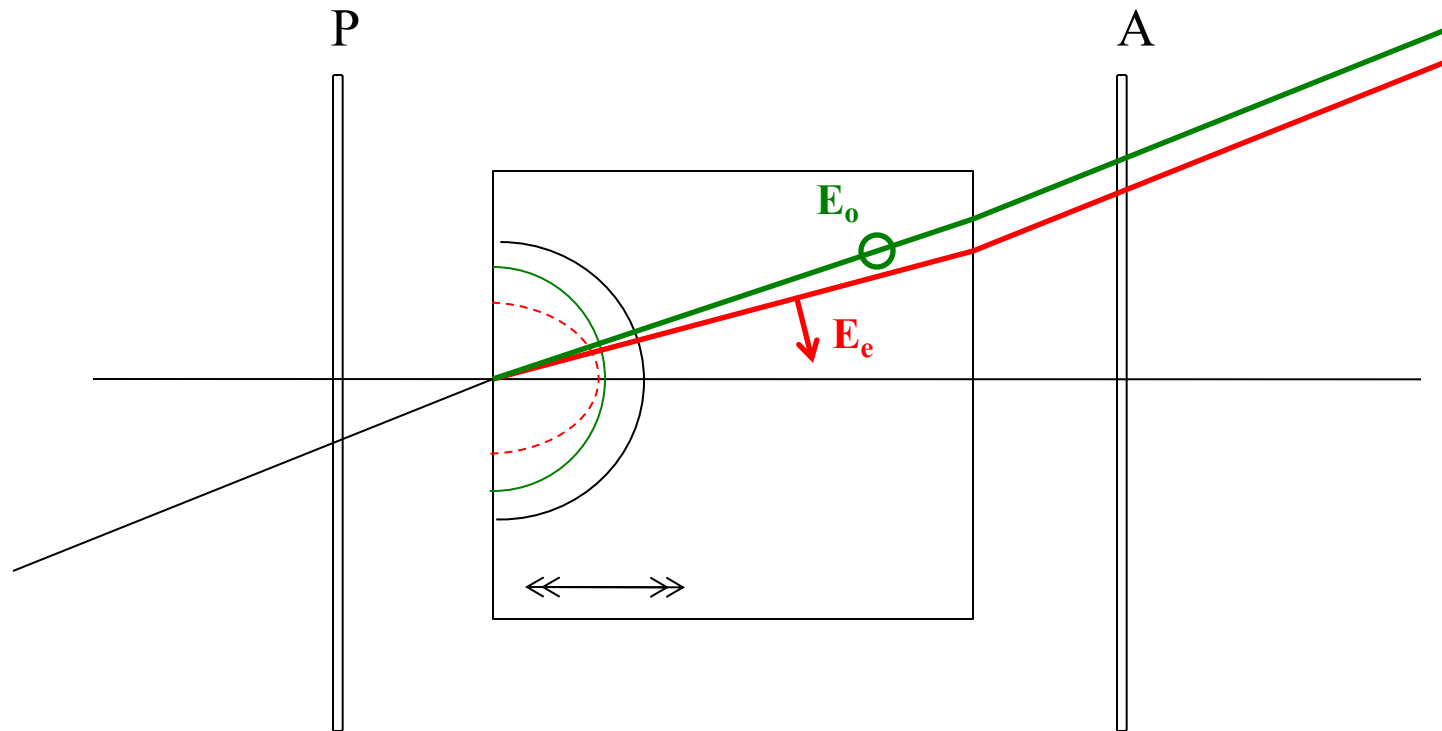
Extraite du site HAL SFO, photo prise à SupOptique par M. Cagnet & al

Interprétation de cette figure d'interférence : **centre noir**



En incidence normale: propagation suivant l'axe
optique, toutes les polarisations voient l'indice
ordinaire, la différence de marche est nulle
⇒ Intensité nulle si P et A sont croisés

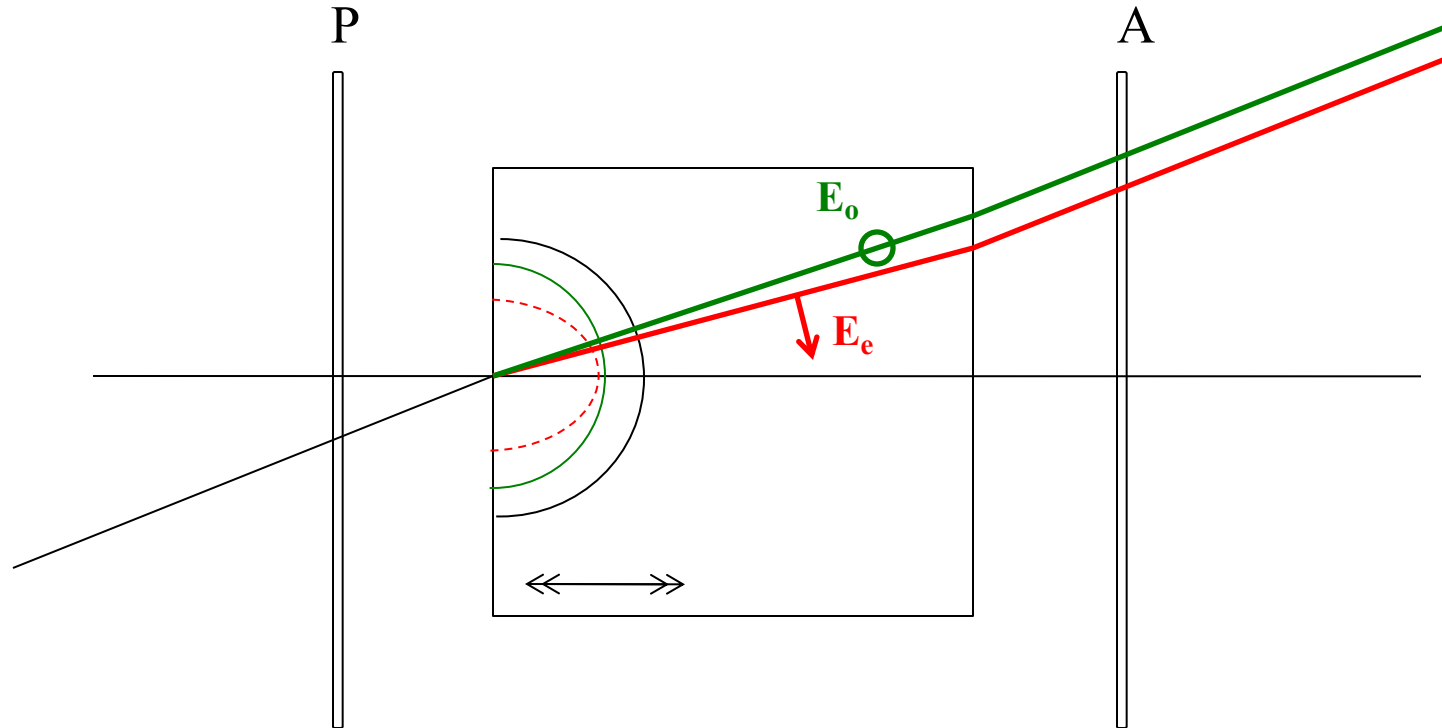
Interprétation de cette figure d'interférence: franges circulaires



Pour un rayon incliné de α : 2 ondes ordinaire (vert) et extraordinaire (rouge) et donc une différence de marche non nulle qui ne dépend que de l'angle α

=> Franges d'interférence circulaires

Interprétation de cette figure d'interférence: d'où vient la croix noire?

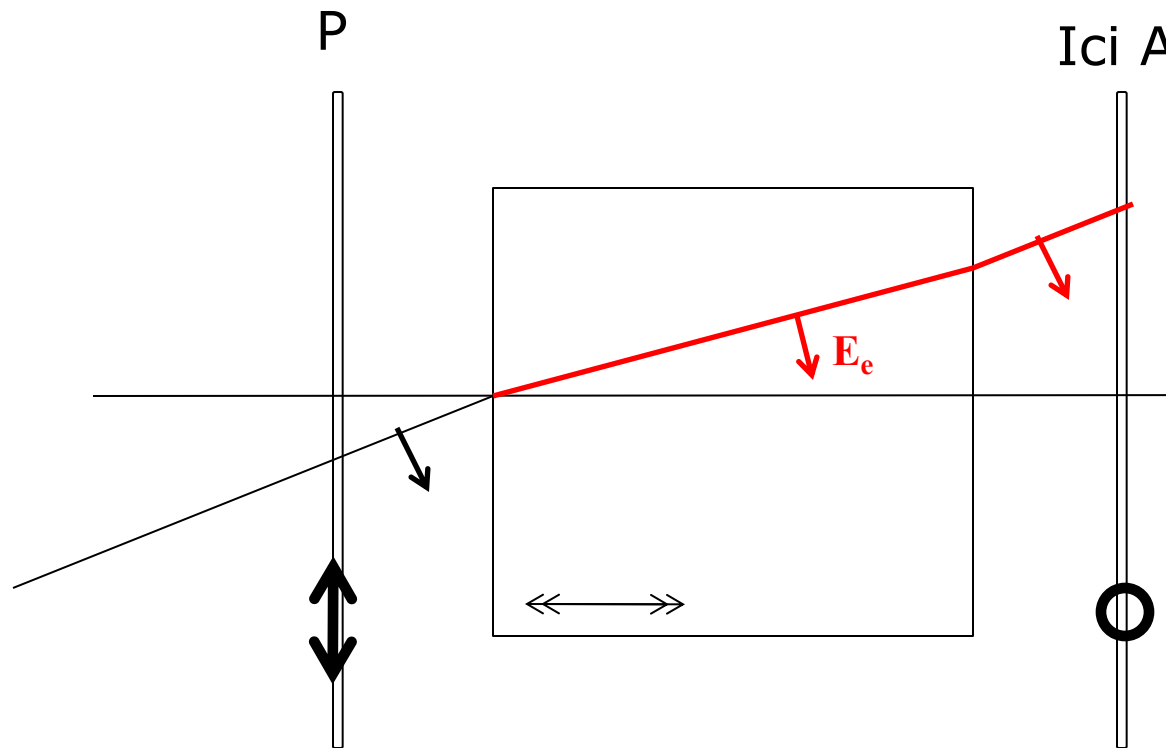


Les polarisations ordinaire et extraordinaire changent avec le plan d'incidence (parallèle et perpendiculaire à ce plan)

Par contre la direction de P et A est fixe

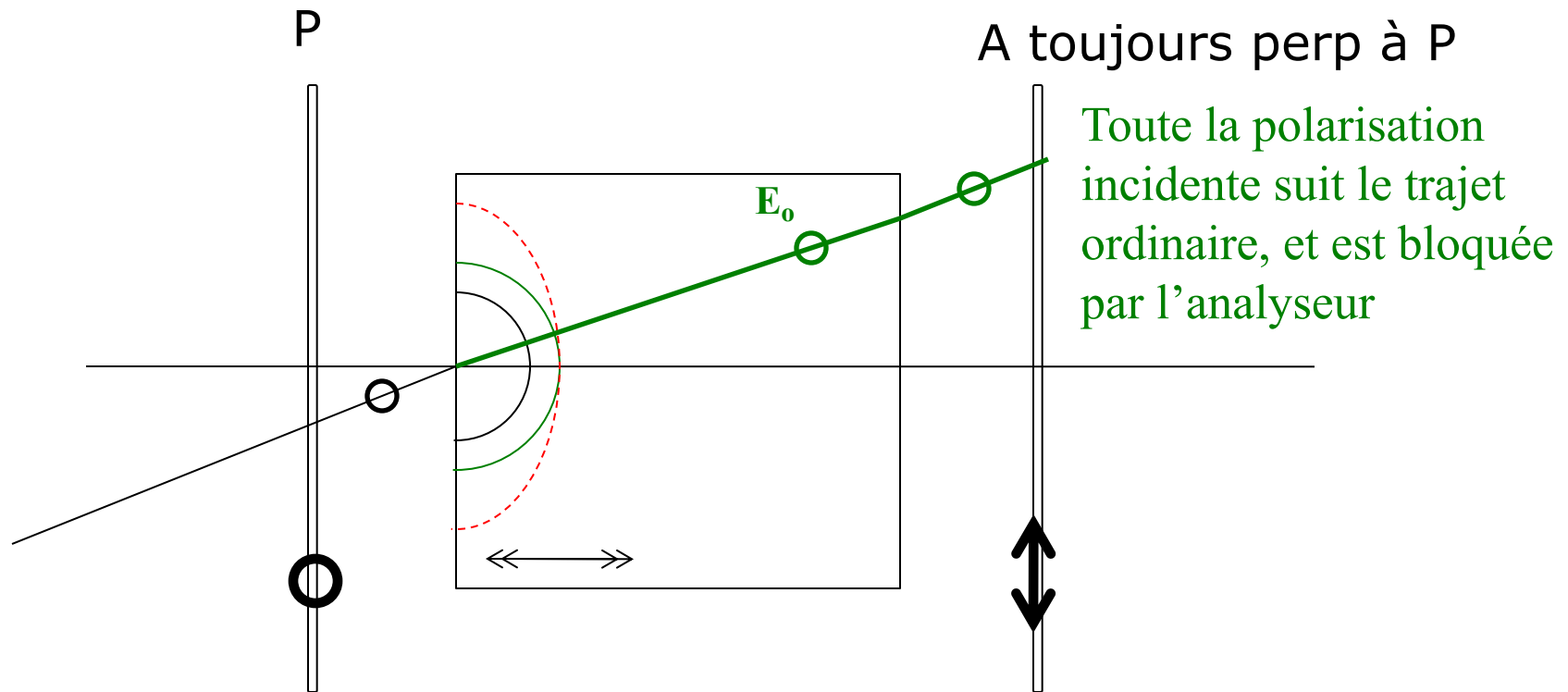
=> Le contraste s'annule si P ou A sont // plan d'incidence

Interprétation de cette figure d'interférence: premier axe de la croix noire



Toute la polarisation
incidente suit le trajet
extraordinaire, et est
bloquée par l'analyseur

Interprétation de cette figure d'interférence: 2^e axe de la croix noire



BILAN:

La croix noire est dans la direction de P et de A
Elle sera blanche si $P \parallel A$

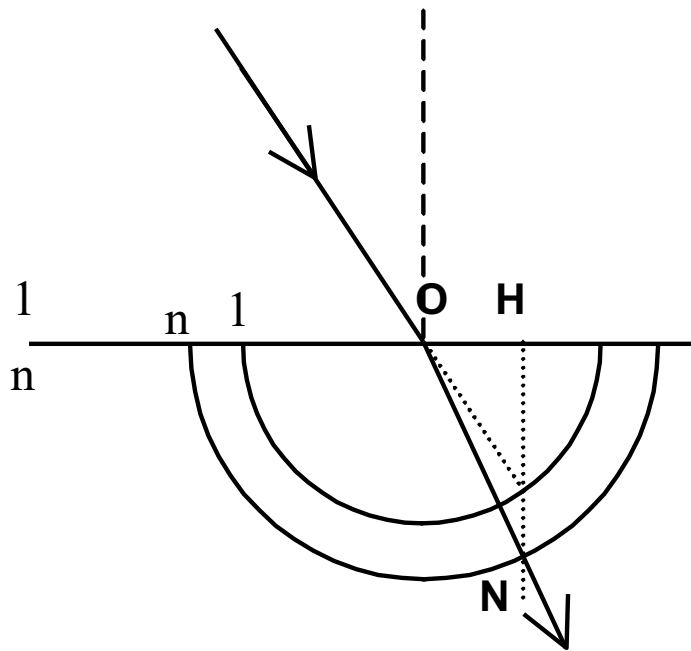
2) Calcul de la différence de marche(DDM) pour une lame à faces parallèles en fonction de l'angle d'incidence

Franges localisées à l'infini → calcul des chemins optiques jusqu'à une surface d'onde plane commune aux deux chemins (attention à ne pas oublier la partie du chemin à rattraper dans l'air!)

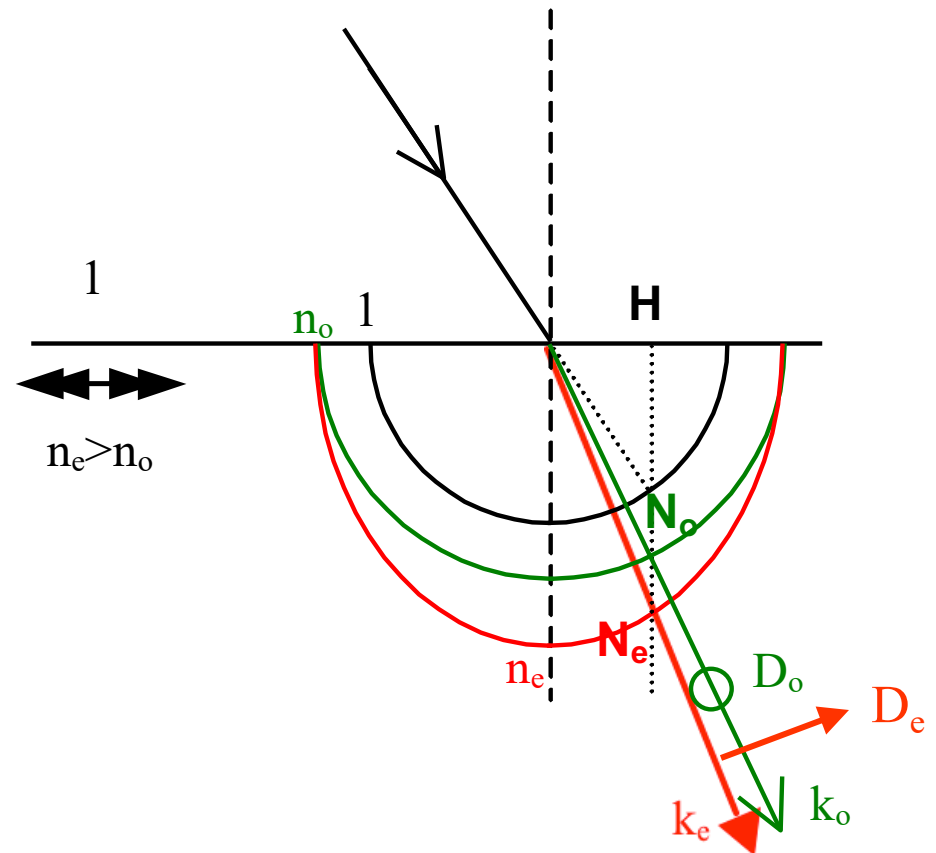
Calcul le long des vecteurs d'onde k : **on construit les vecteurs d'onde k des ondes réfractées en utilisant LES SURFACES DES INDICES**

Constructions des vecteurs k réfractés avec la surface des indices

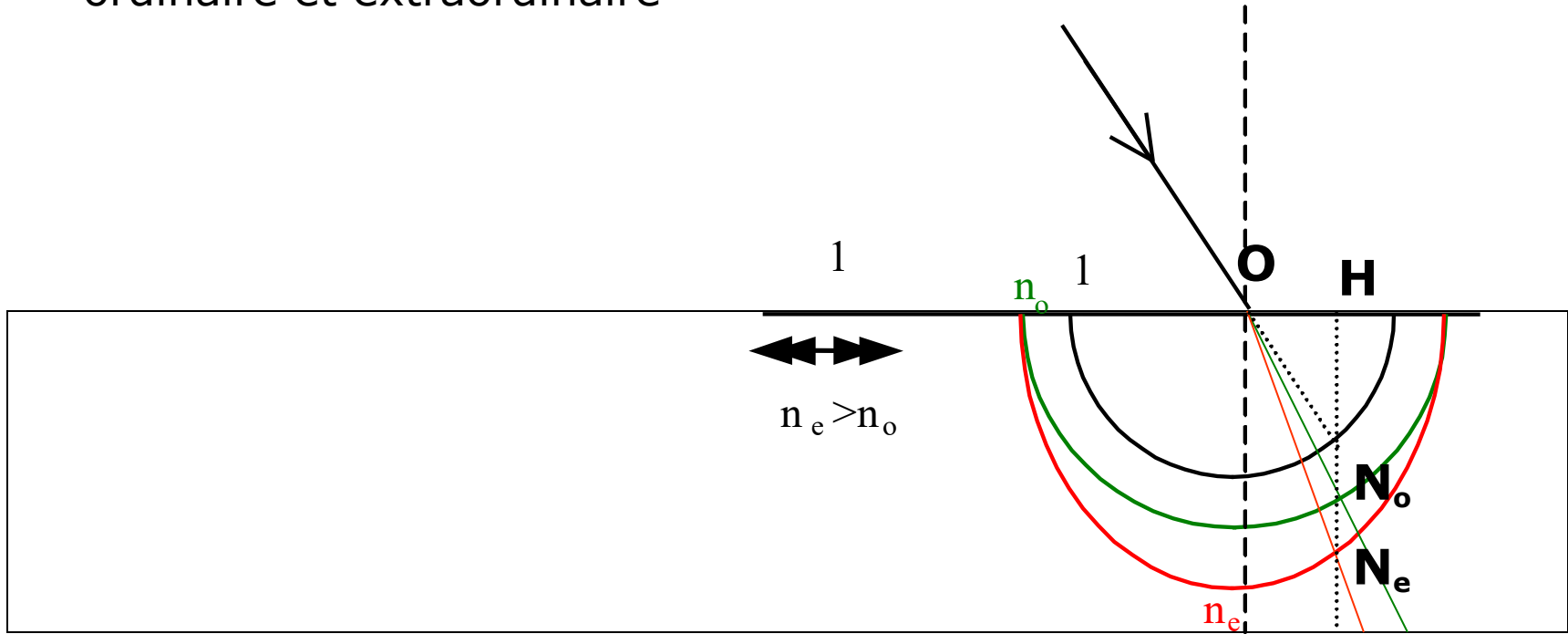
Rappel du cas isotrope



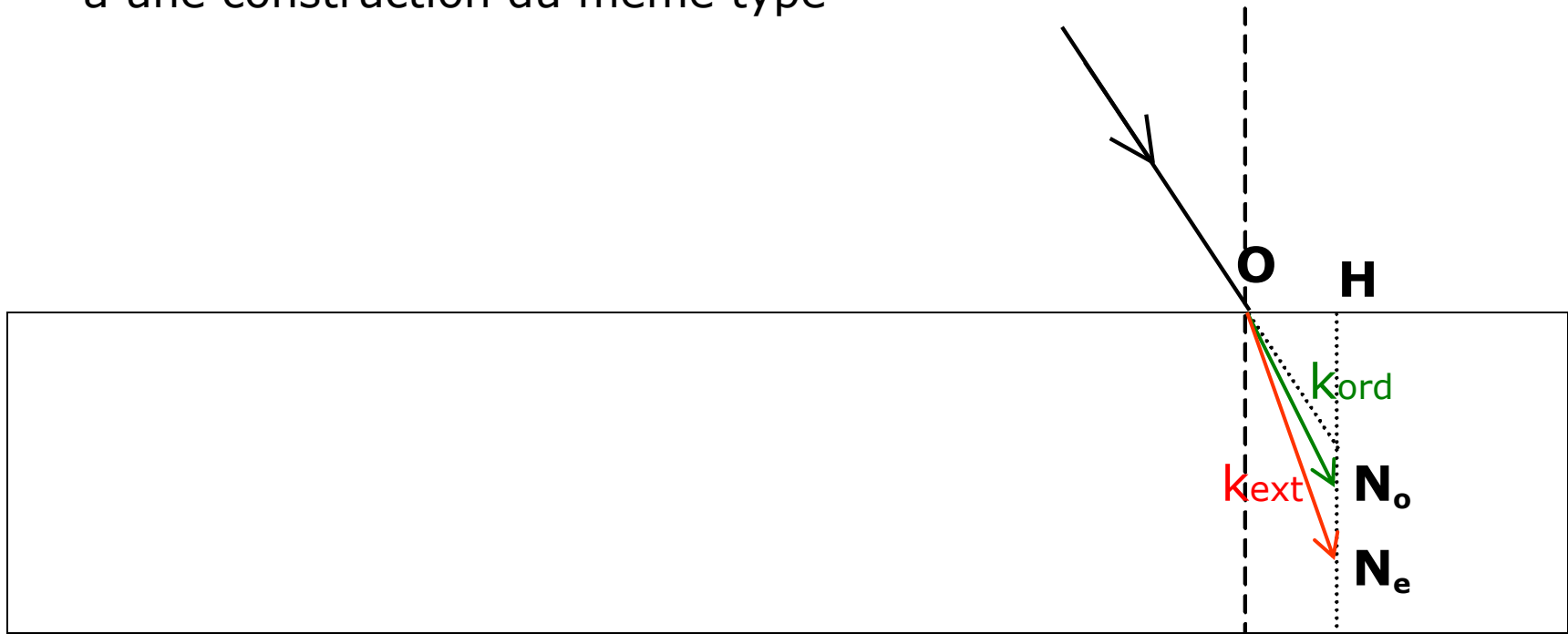
Cas uniaxe



Application au calcul de la DDM entre chemins ordinaire et extraordinaire



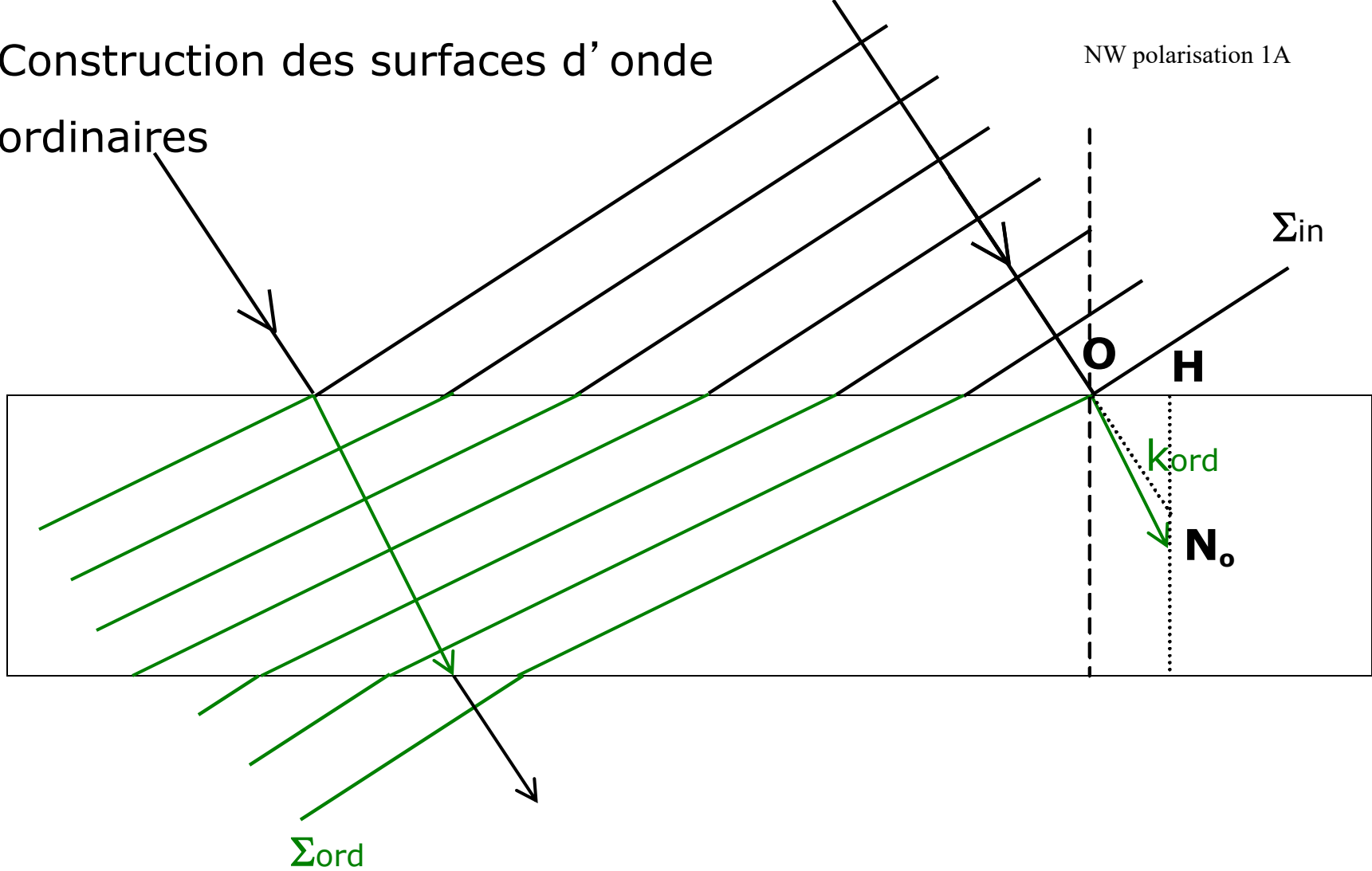
Quelle que soit la direction de l'axe optique, on a une construction du même type



Construction des surfaces d'onde ordinaires

NW polarisation 1A

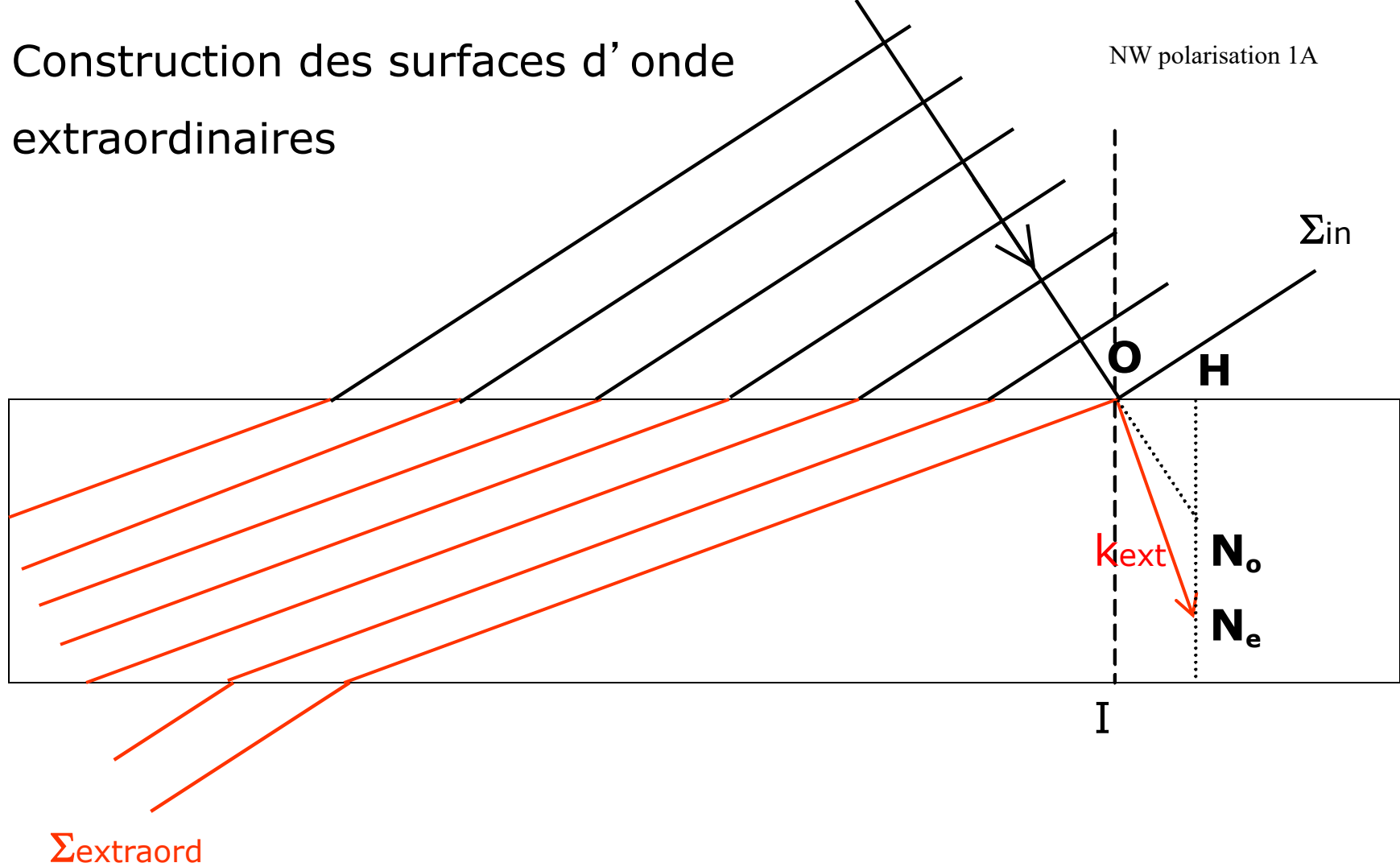
19



Construction des surfaces d'onde extraordinaires

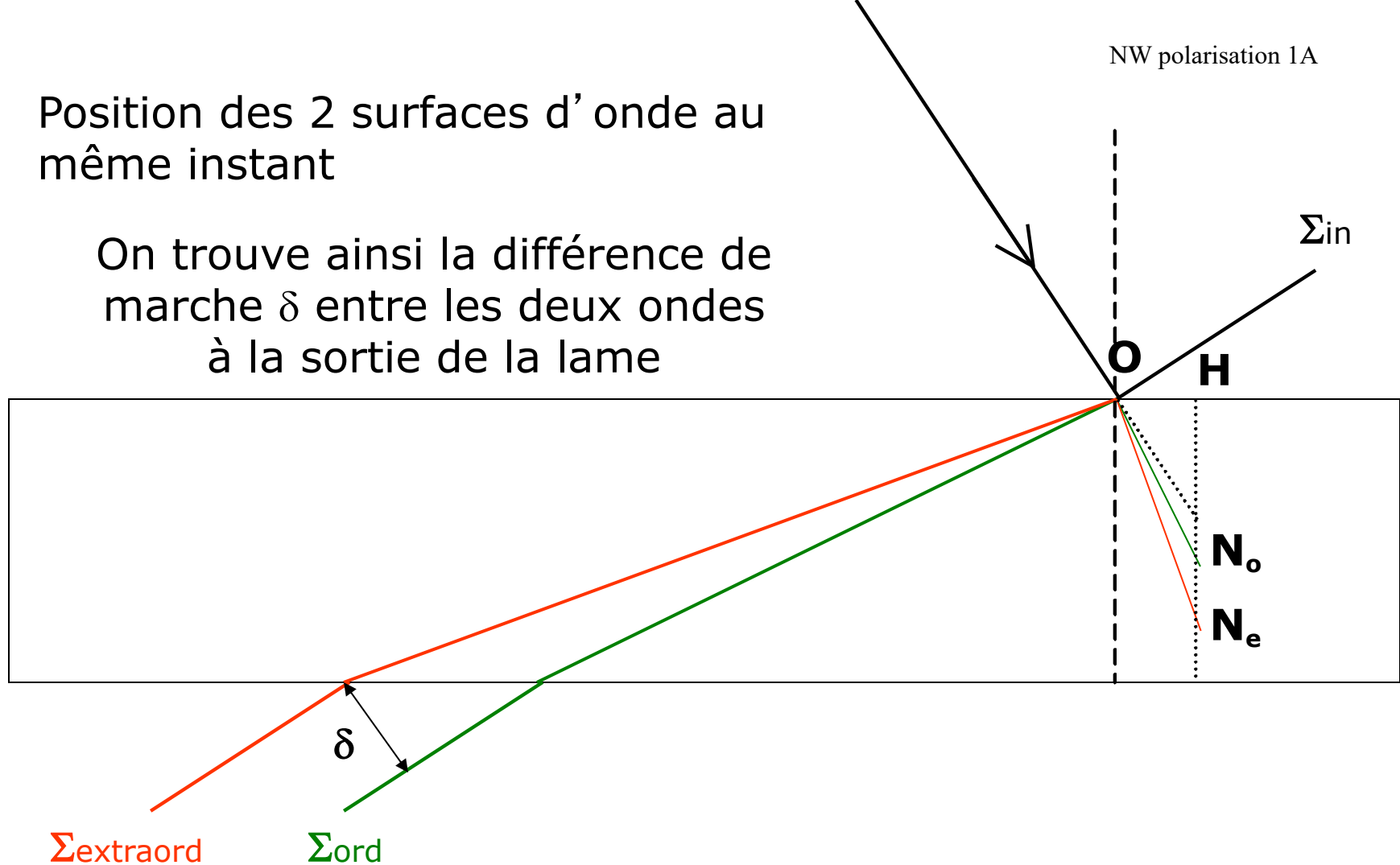
NW polarisation 1A

20

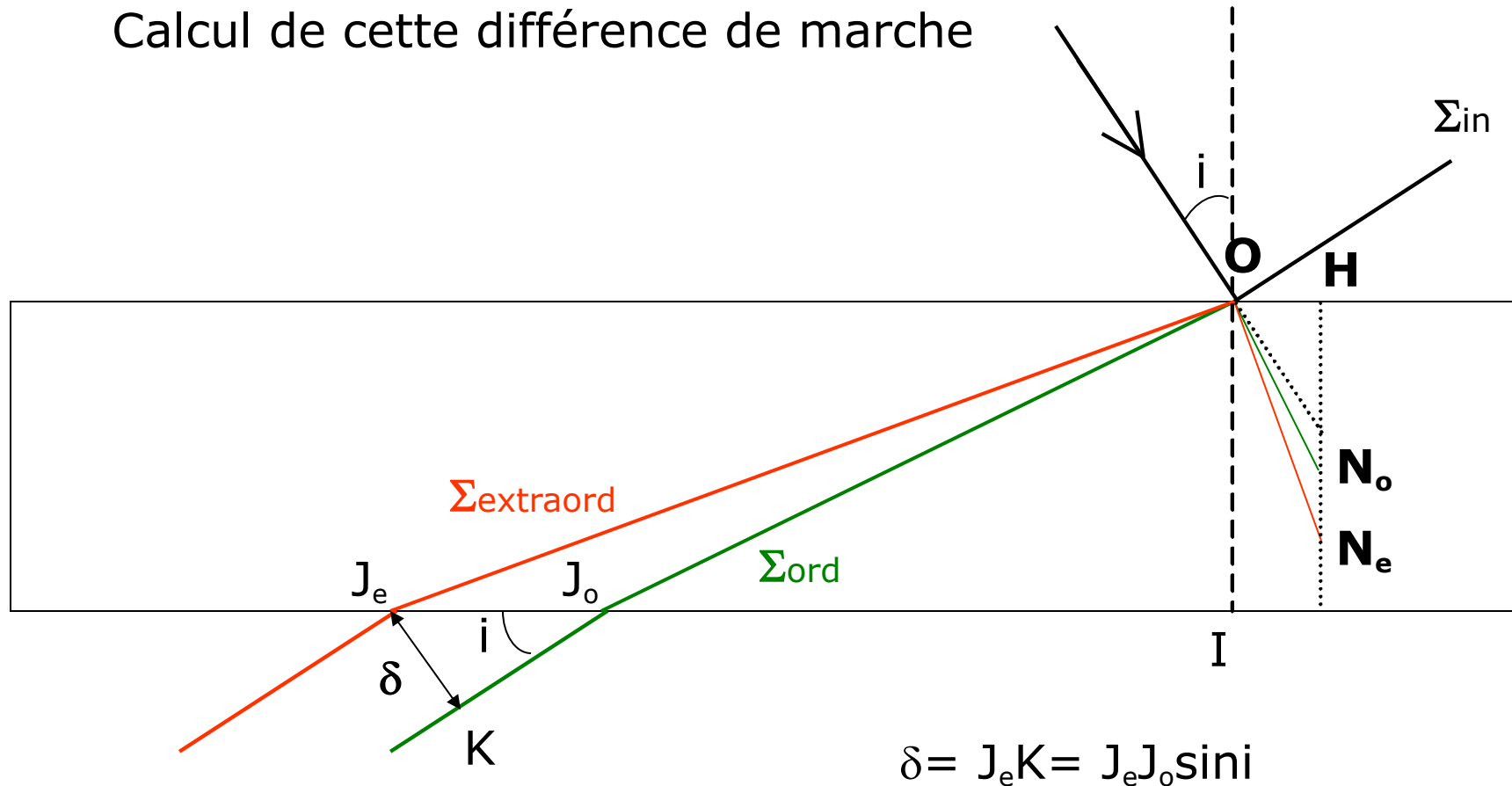


Position des 2 surfaces d'onde au même instant

On trouve ainsi la différence de marche δ entre les deux ondes à la sortie de la lame



Calcul de cette différence de marche



$$\delta = J_e K = J_e J_o \sin i$$

$$\frac{J_e J_o}{OI} = \frac{N_e N_o}{OH}$$

$$OH = \sin i$$

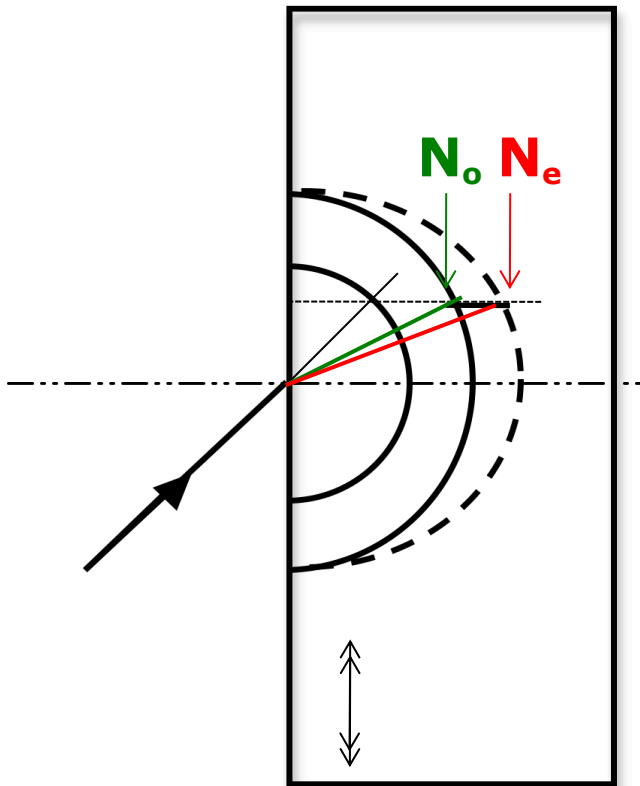
$$OI = e$$

$$\delta = e N_e N_o$$

Valable pour toute orientation de l'axe optique, tant que la lame est à faces parallèles!

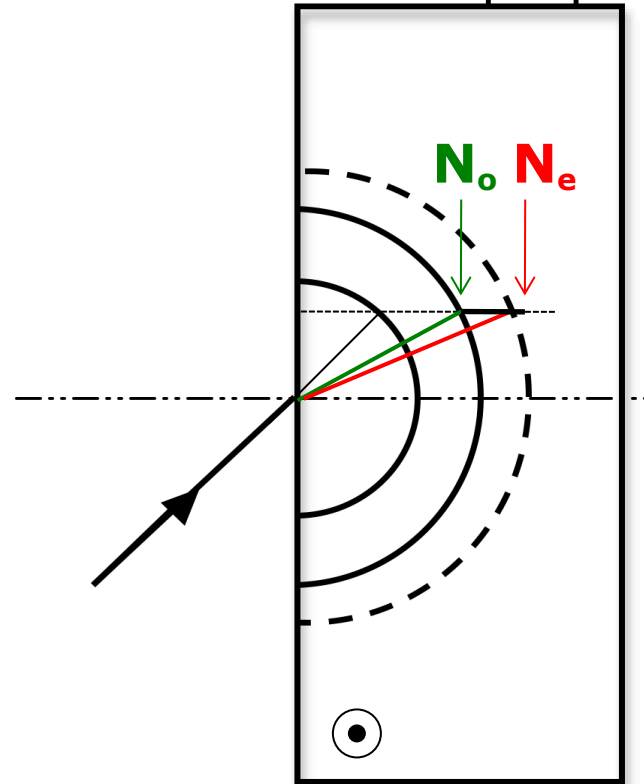
3) Cas d'une lame d'axe optique parallèle aux faces

Rotation autour d'un axe
perpendiculaire à l'axe optique



$\delta = eN_o N_e$ diminue avec
l'angle d'incidence

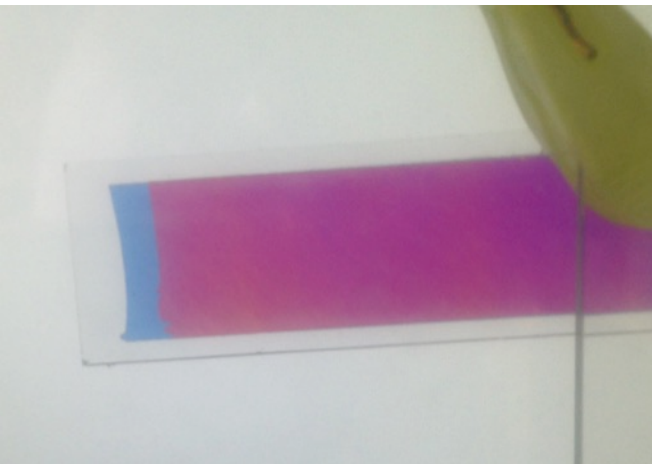
Rotation autour de l'axe
optique



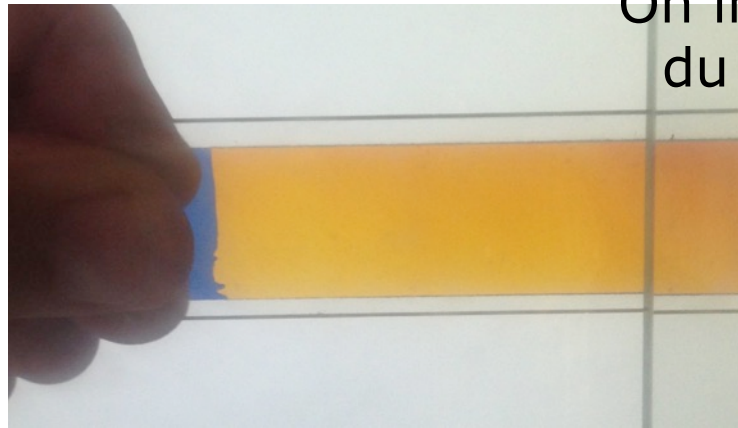
δ augmente avec l'angle
d'incidence

=> Le sens de variation de la ddm dépend de l'axe de rotation

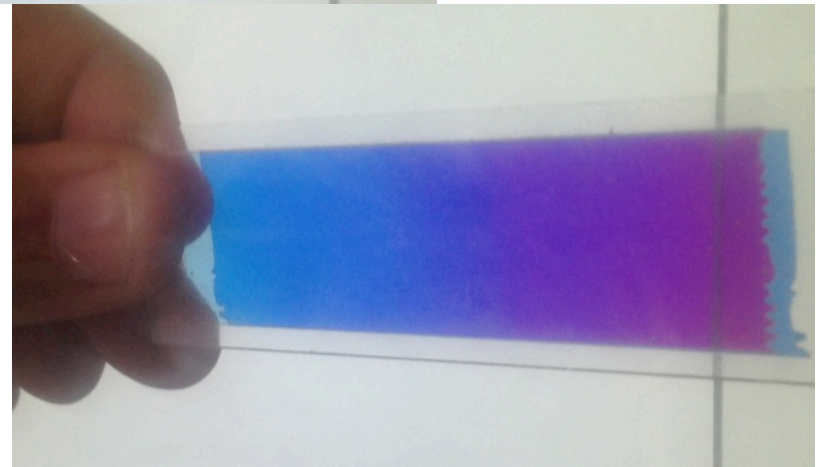
Démo: changement de couleur des lames de scotch suivant la rotation appliquée



2 couches de
scotch en
incidence normale



On incline autour
du grand côté



On incline autour
du petit côté

Analyse avec teintes de Newton

P et A parallèles

P et A croisés

306	indigo	jaune clair	premier ordre
332	bleu	jaune vif	
430	bleu gris	jaune brun	
505	vert bleuâtre	orangé rougeâtre	
536	vert pâle	rouge chaud	
551	vert jaunâtre	rouge plus foncé	
			deuxième ordre
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	
948	bleu sombre	orangé	
998	bleu verdâtre	orangé rougeâtre vif	
1101	vert	rouge violacé foncé	

Rotation autour du grand côté

δ diminue 

Incidence normale

δ augmente 

Rotation autour du petit côté

4) Trouver l'axe lent d'une lame quart d'onde

Lame quart d'onde = Lame d'axe optique parallèle à ses faces

En général réalisée dans un milieu uniaxe positif

⇒ axe lent = axe extraordinaire = axe optique

Observation des couleurs en lumière blanche en tournant la lame

Rotation autour de l'axe lent

⇒ δ augmente

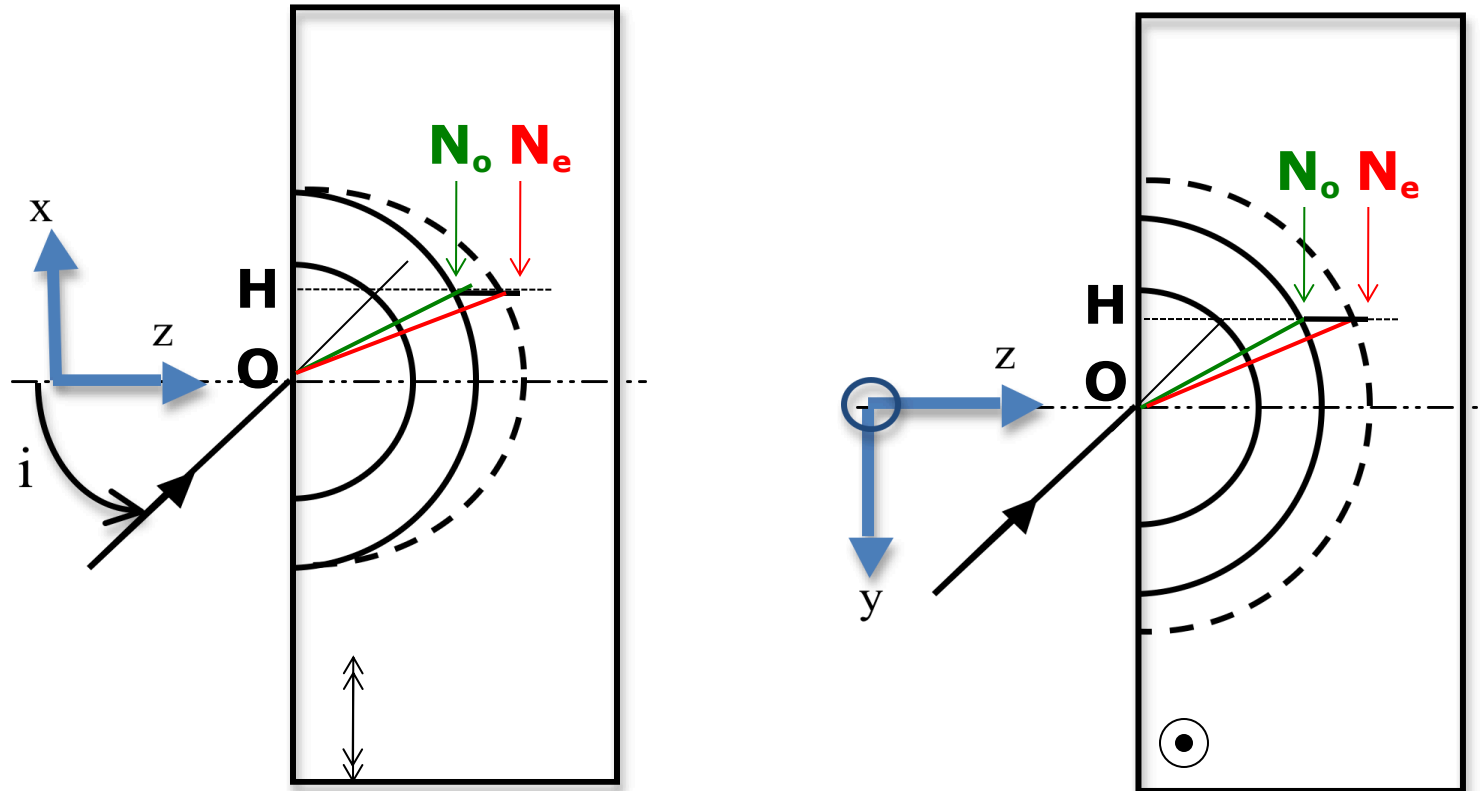
⇒ La teinte change en suivant l'échelle de Newton

Par exemple pour une lame quart d'onde d'ordre 0 à 550nm:

$$\delta = 550/4 = 137,5\text{nm}$$

=> Couleur grise entre P et A croisés qui vire au jaune clair quand on tourne autour de l'axe lent

5) Calcul de la ddm en fonction de l'angle d'incidence



$$\sqrt{x^2 + y^2} = OH = \sin i$$

N_o est sur la sphère d'équation: $x^2 + y^2 + z^2 = n_o^2$

N_e est sur l'ellipsoïde d'équation: $\frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_e^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1$

Résultat du calcul de la DDM dans le cas général (lame d'axe optique // aux faces)

$$\delta = eN_e N_o = e(z_{N_e} - z_{N_o}) = e \left(n_e \sqrt{1 - \frac{x^2}{n_o^2} - \frac{y^2}{n_e^2}} - n_o \sqrt{1 - \frac{x^2 + y^2}{n_o^2}} \right)$$

$$\delta \cong e(n_e - n_o) \left(1 - \frac{1}{2n_o} \left(\frac{x^2}{n_o} - \frac{y^2}{n_e} \right) \right)$$

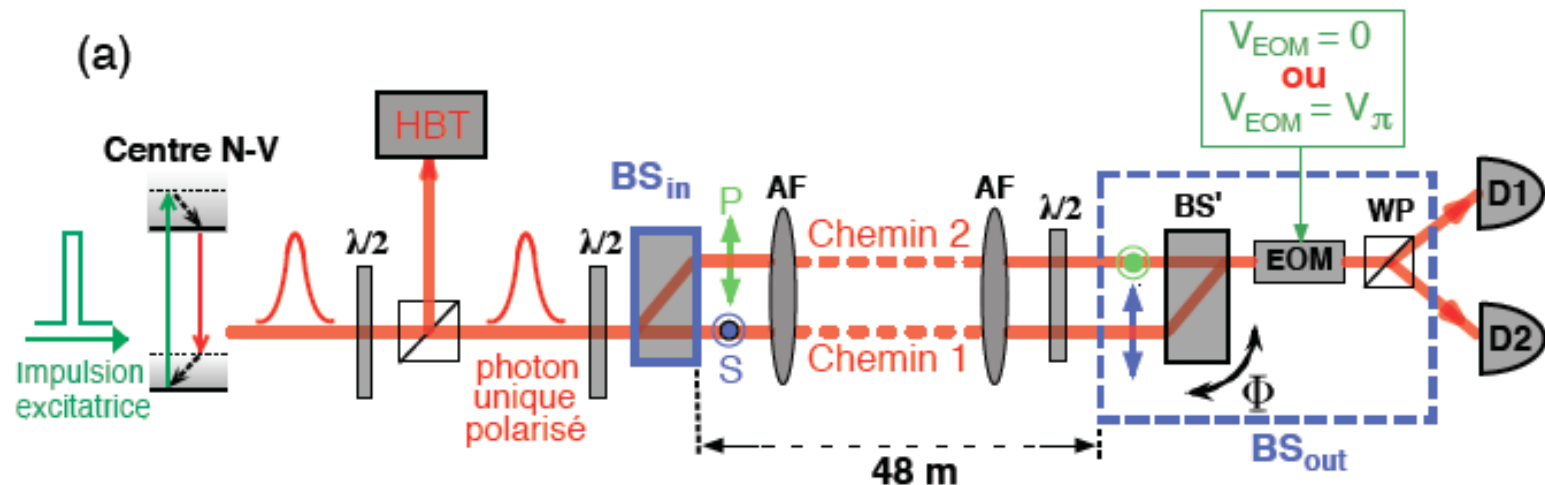
Equation des franges de la forme:

$$\frac{x^2}{n_o} - \frac{y^2}{n_e} = cste$$

→ **Hyperboles**

IX. Interféromètre de polarisation pour une expérience d'optique quantique

1) Schéma complet de l'interféromètre utilisé

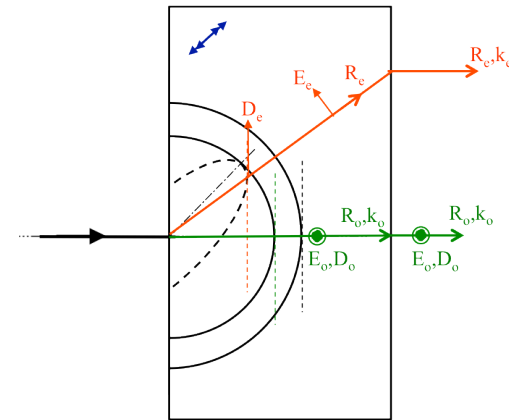
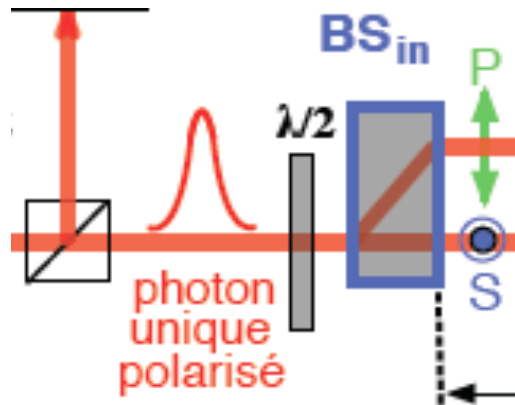


Référence :

Thèse de Vincent Jacques, ENS Cachan, «Source de photons uniques et interférences à un seul photon. De l'expérience des fentes d'Young au choix retardé », soutenue en nov 2007, manuscrit complet disponible en ligne à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00281163/document>.

Partie 1 : analyse du fonctionnement de la séparatrice BSin (cf TD1 sur les tracés de rayons)

BSin est une lame à faces parallèles taillée dans un matériau biréfringent uniaxe positif, le Vanadate d'Ytterbium (YVO4). Son axe optique est dans le plan de la figure et fait un angle ψ proche de 45° avec la normale à la face d'entrée.



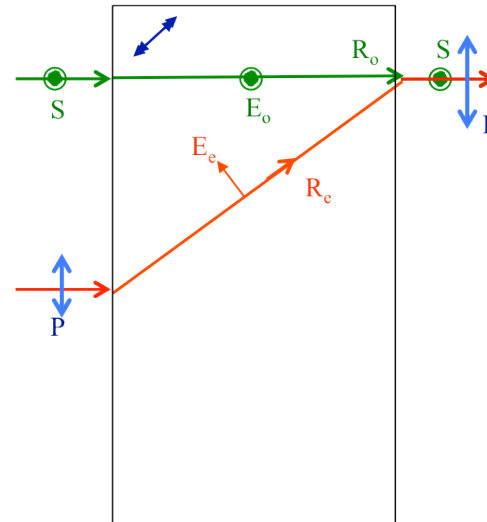
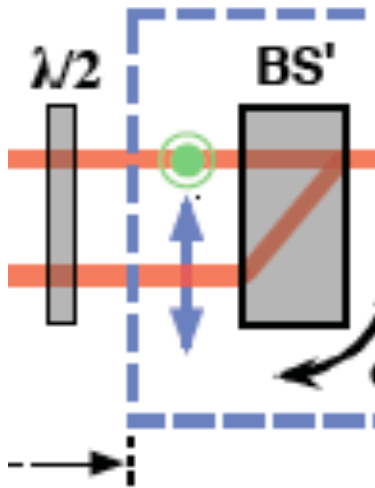
Comment faut-il orienter les axes neutres de la lame demi-onde qui précède BSin pour que les deux voies de sortie de la séparatrice soient de même intensité ? On notera que la lame demi onde est précédée d'un cube polariseur qui transmet la polarisation P (parallèle au plan de figure).

La lame demi onde doit avoir ses axes à $22,5^\circ$ des polarisations P et S

Partie 2 : analyse du fonctionnement du bloc « séparatrice BS' + lame demi onde qui précède »

On peut oublier ici les deux systèmes afocaux AF car le premier élargit le faisceau pour en réduire la divergence et le 2^e le ramène au diamètre initial. La séparatrice BS' est identique à BSin (même matériau, même épaisseur, même axe optique)

Expliquer le trajet des rayons dans ce bloc à la suite de la séparatrice BSin.

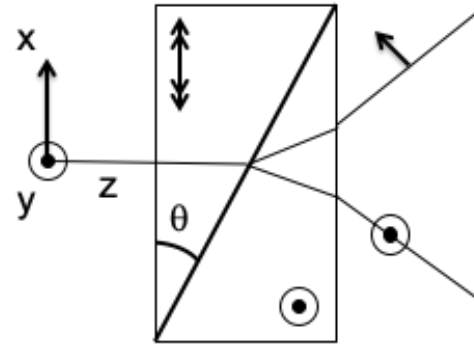
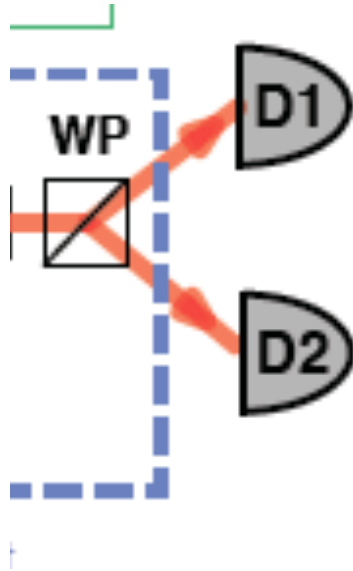


Comment doit être orientée cette lame demi onde ?

La lame demi onde doit avoir ses axes à 45° des polarisations P et S

Partie 3 : analyse du fonctionnement du prisme de Wollaston

Le dernier élément du montage, juste avant les deux détecteurs D1 et D2, est un prisme de Wollaston. Ce composant est constitué de deux prismes biréfringents accolés, réalisés dans le même matériau mais avec des axes optiques orientés à 90° selon le schéma suivant :



On veut que la polarisation selon y sorte vers le détecteur D2 (vers le bas).

Le prisme de Wollaston doit-il être réalisé dans un matériau uniaxe positif ou négatif?

Positif

Partie 4 : Analyse du fonctionnement du modulateur électrooptique (EOM)

Ce modulateur est similaire à celui vu en cours (KDP). Son effet est décrit dans la figure ci-dessous:

(b)

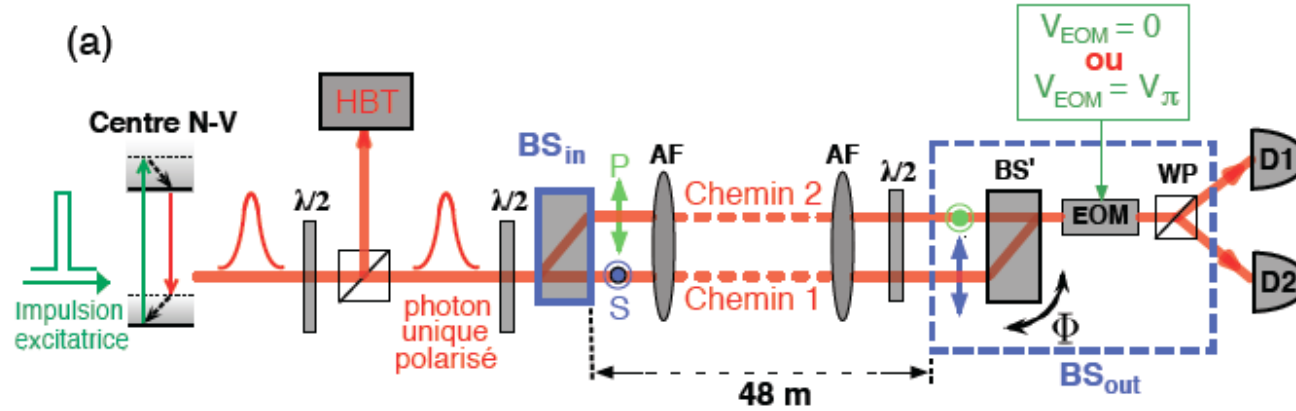
V_{EOM}	Polarisations après BS'	Polarisations après l'EOM	Polarisations après WP
0			
V_{π}			

A quel composant est équivalent le modulateur à tension nulle et à tension V_{π} ?

Aucun effet à tension nulle, une lame demi-onde à $22,5^{\circ}$ de S et P à tension V_{π}

Partie 5 : Analyse du fonctionnement de l'interféromètre complet

On considère maintenant l'ensemble du dispositif depuis le cube polariseur jusqu'au prisme de Wollaston, qui est un interféromètre à deux bras parallèles.



Est-on dans les meilleures conditions pour voir des franges d'interférence (contraste et intensité maximales) ? Expliquer pourquoi en fonction de la tension appliquée à l'EOM.

A tension nulle, le Wollaston joue le rôle d'un analyseur parallèle aux axes de la BS' donc pas d'interférences possibles, à tension V_π l'EOM+WP joue le rôle d'un analyseur à 45° donc les conditions sont les meilleures pour voir les franges

Y a-t-il une différence de marche dans l'interféromètre complet?

Non la ddm induite par BSin est compensé par celle induite par BS'. Il faut incliner BS' pour faire apparaître une ddm et donc un déphasage