

# 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  $45^\circ$  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

NW polarisation 1A

4

Polariseur P placé avant W tenu par une pince jaune

Analyseur A placé après W tenu par une pince rose

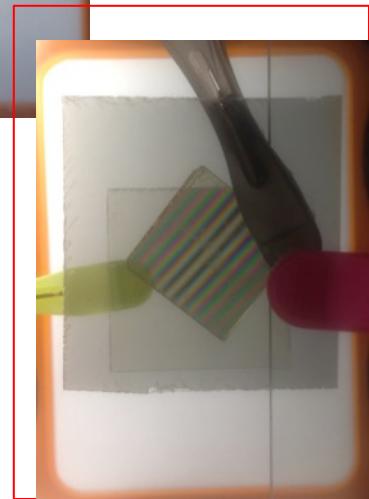
**A. OUI à condition de mettre un analyseur en sortie à 45° des axes du Wollaston W**



**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**



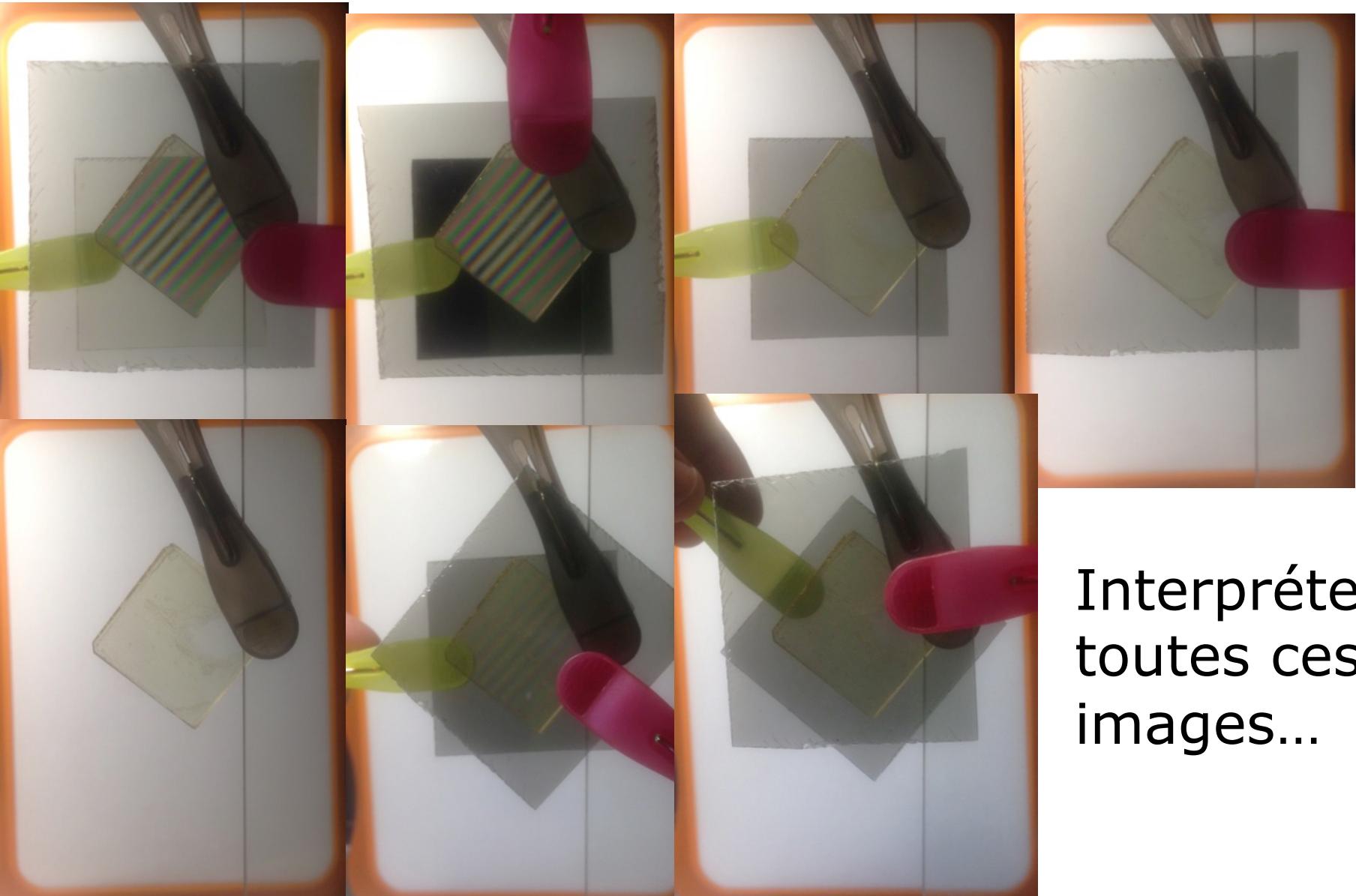
Wollaston W tenu par une pince grise

NW polarisation 1A

5

Polariseur P placé avant W tenu par une pince jaune

Analyseur A placé après W tenu par une pince rose



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).

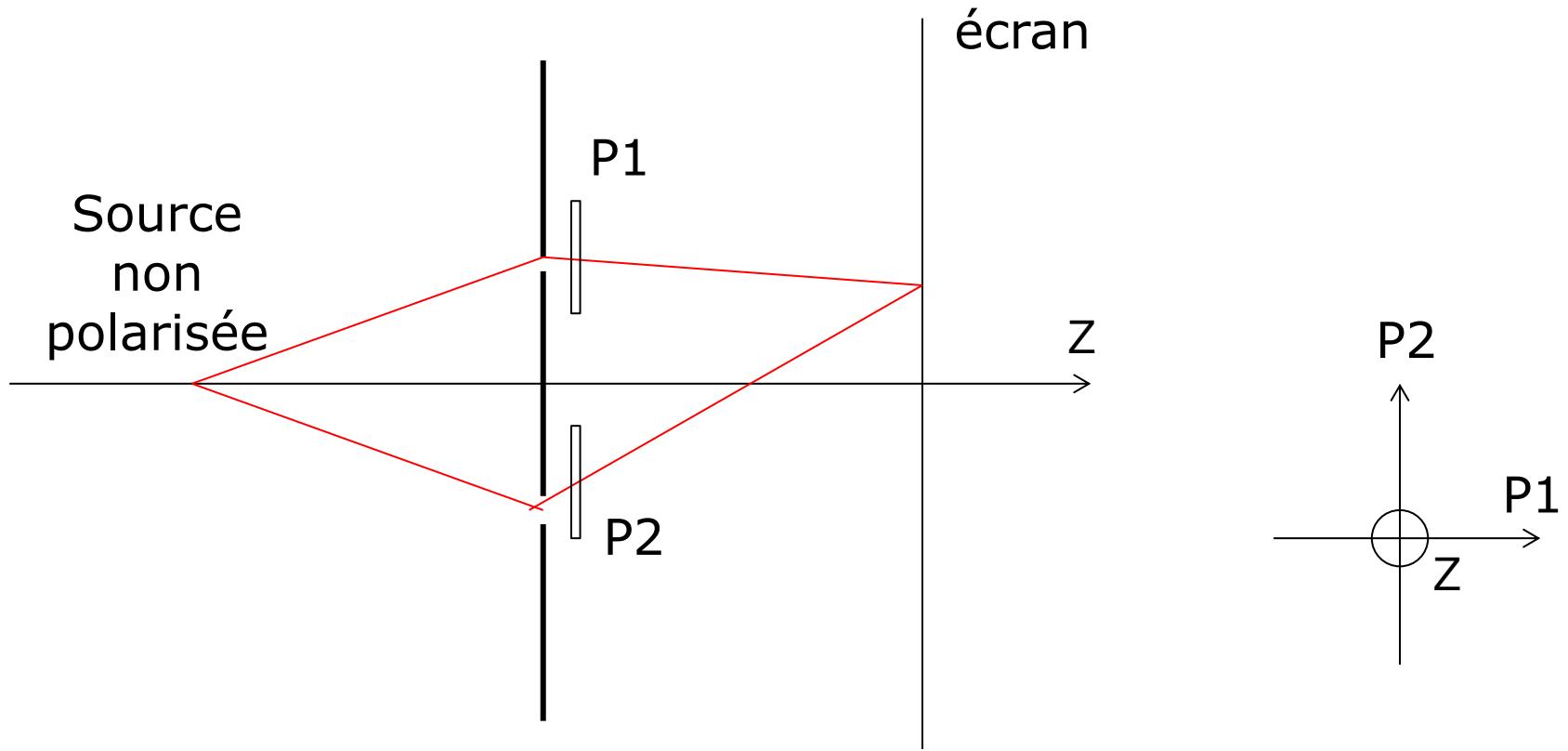
De plus:

P et A doivent être à  $45^\circ$  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).

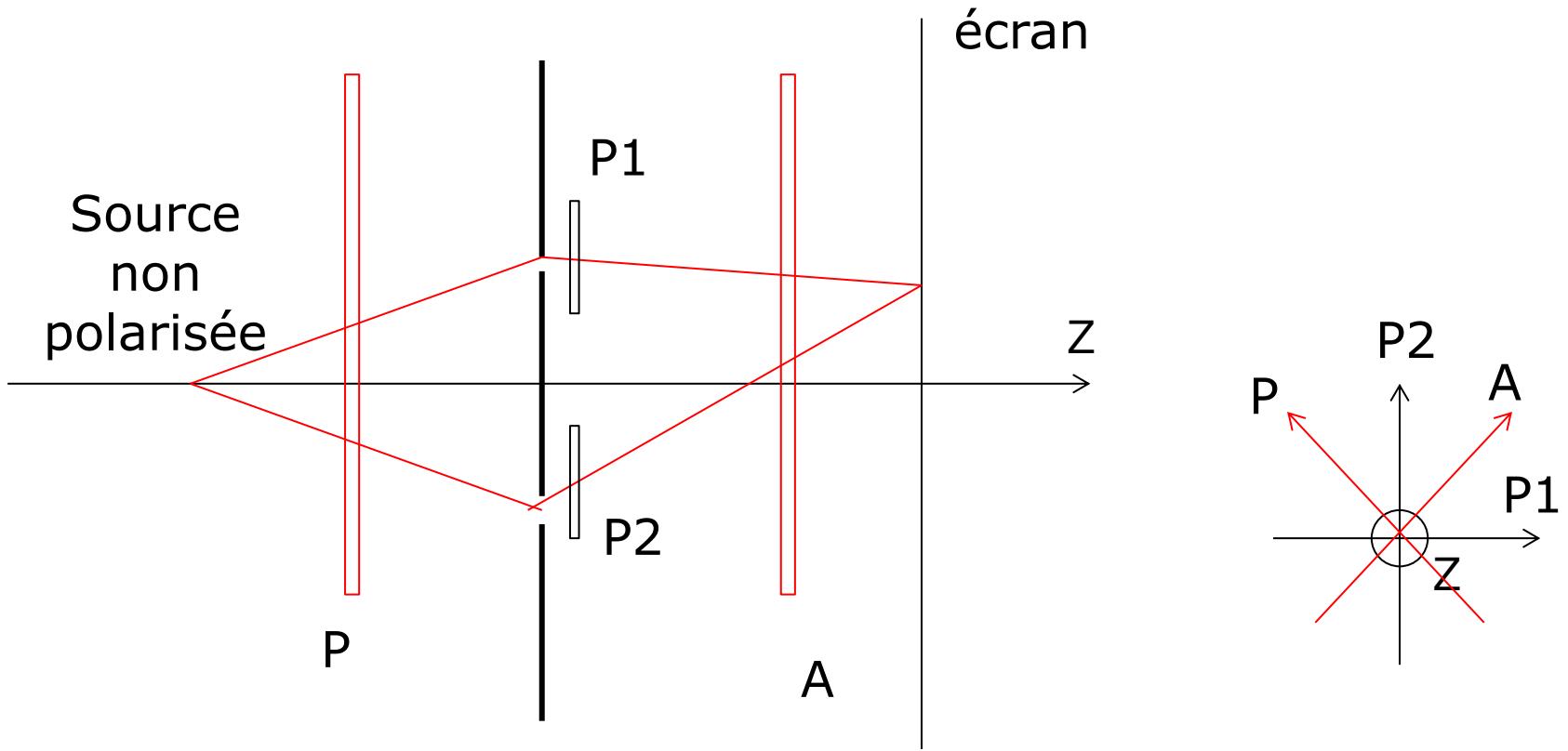
## Expérience originale de Fresnel-Arago

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?



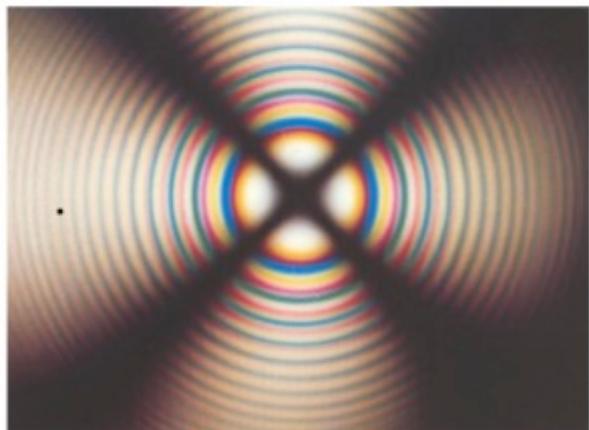
## Expérience originale de Fresnel-Arago

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

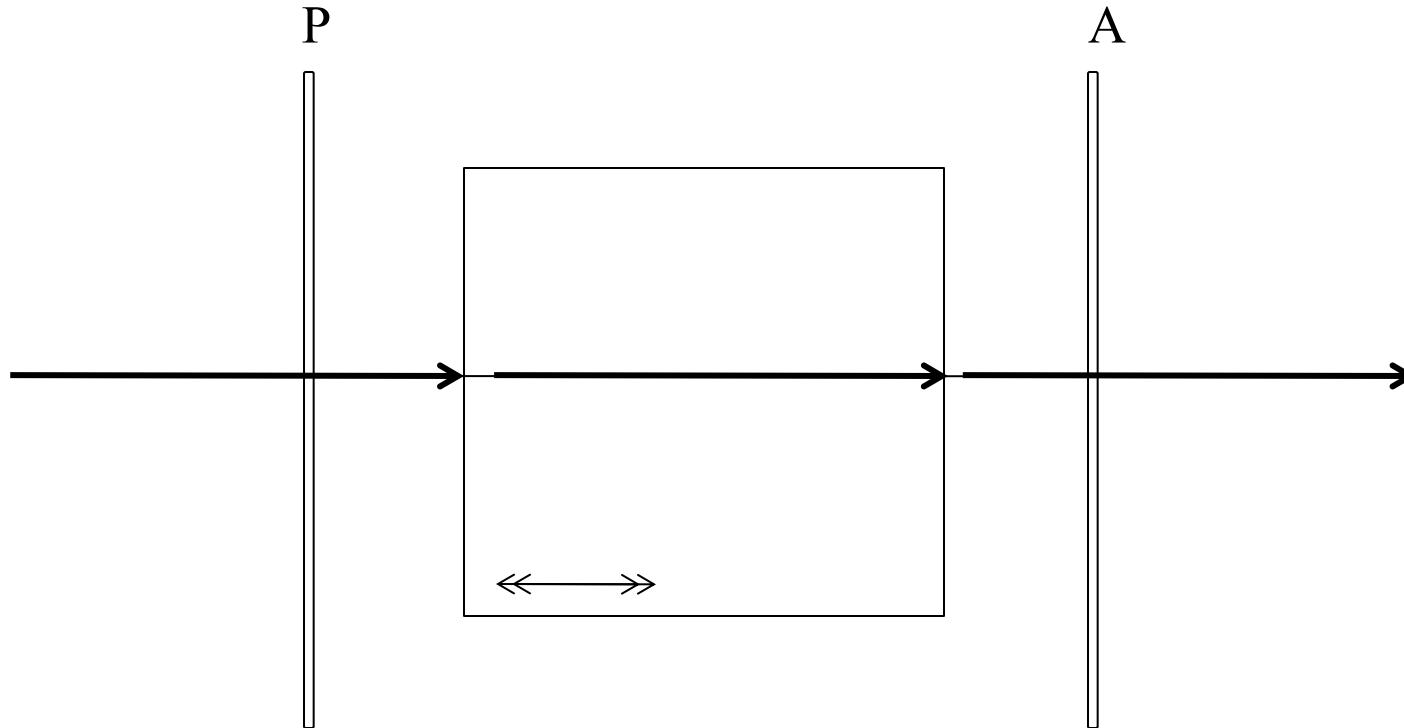


Interférences observées avec

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

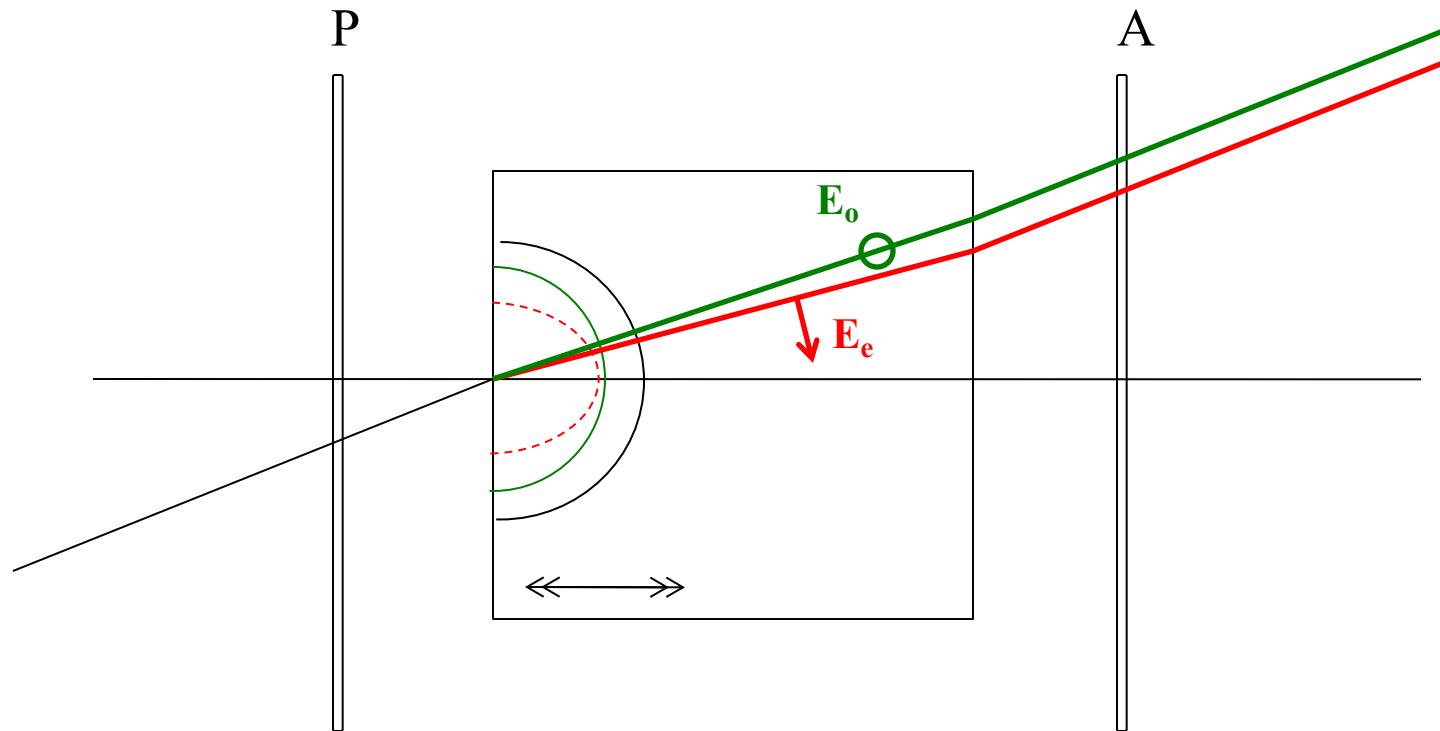
Extraite du site HAL SFO, photo prise  
à SupOptique par M. Cagnet & al

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



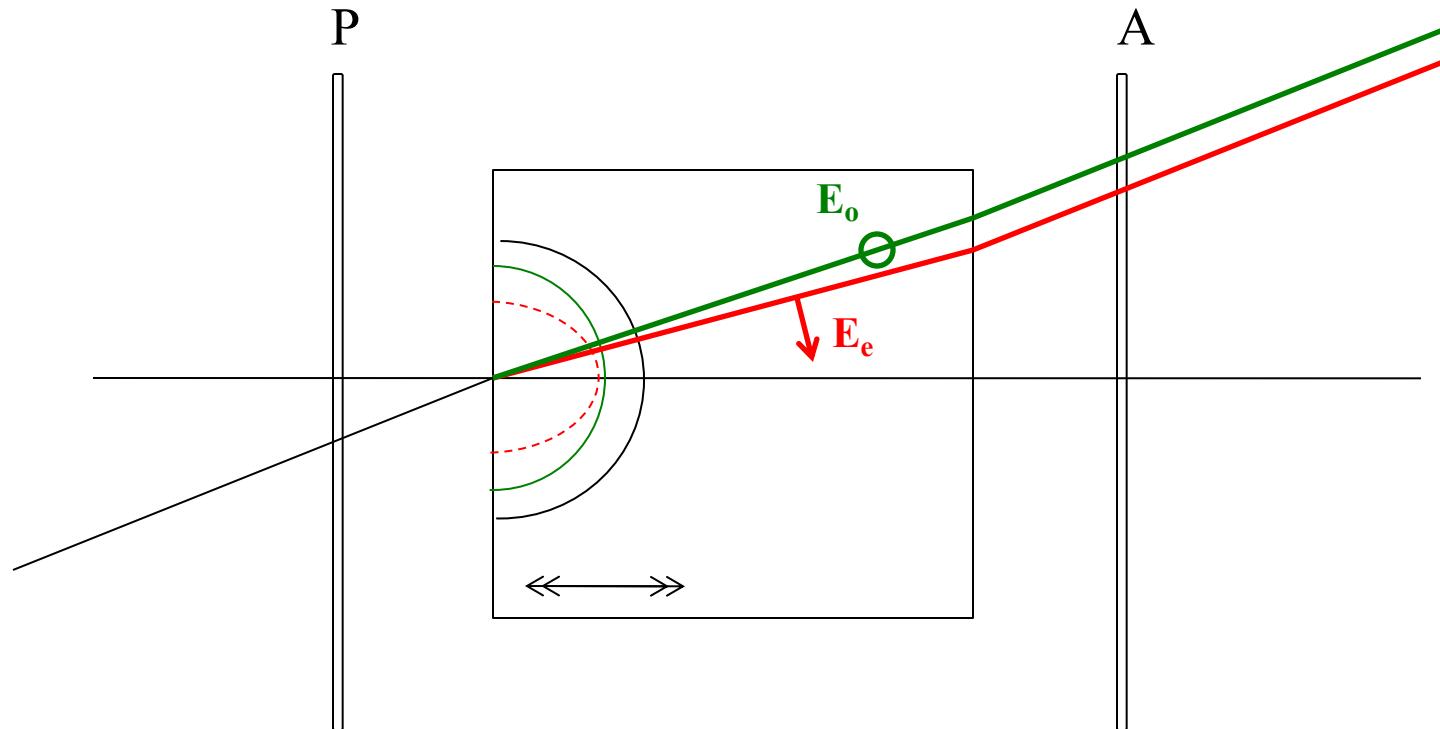
En incidence normale: propagation suivant l'axe optique, toutes les polarisations voient l'indice ordinaire, la différence de marche est nulle  
⇒ **Intensité nulle si P et A sont croisés**

## Interprétation de cette figure d'interférence: franges circulaires



Pour un rayon incliné de  $\alpha$ : 2 ondes ordinaire (vert) et extraordinaire (rouge) et donc une différence de marche non nulle qui ne dépend que de l'angle  $\alpha$   
**=> Franges d'interférence circulaires**

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

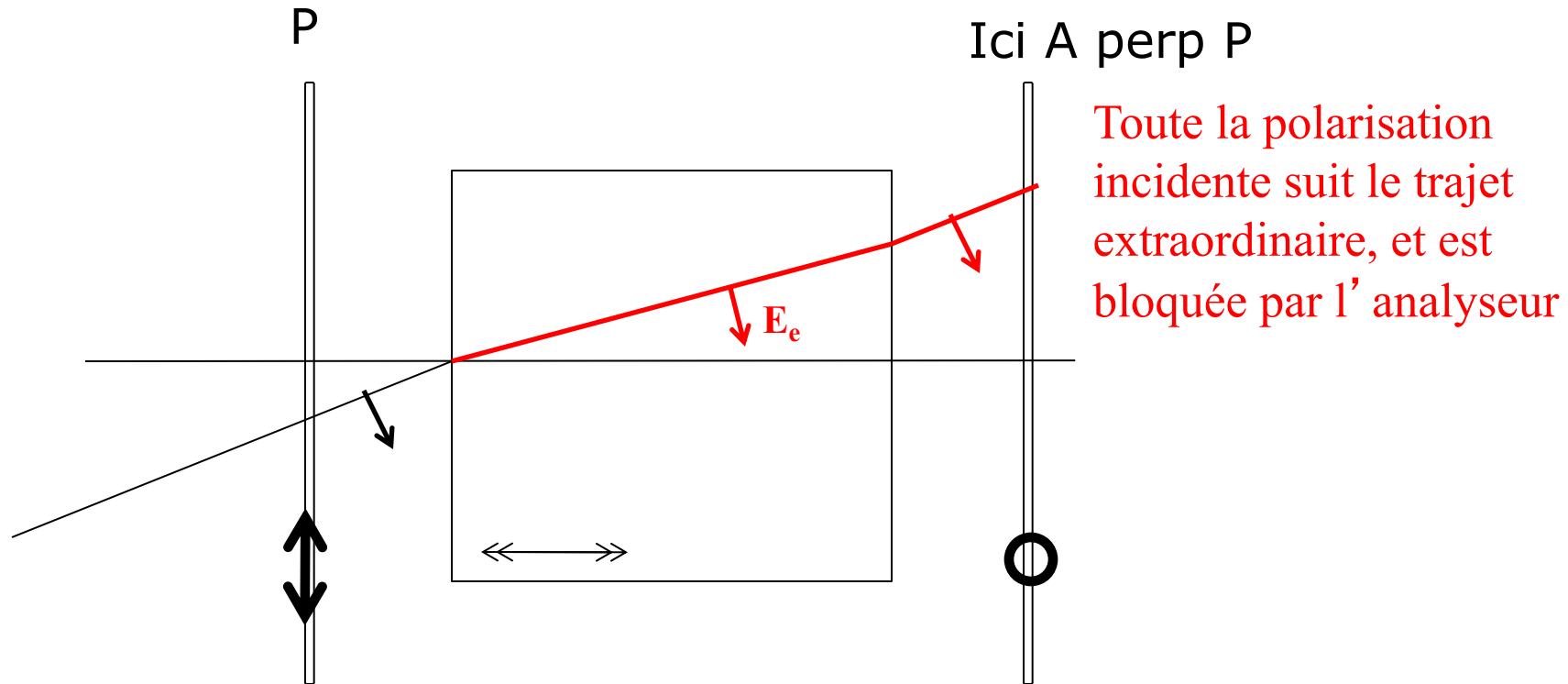


Les polarisations ordinaire et extraordinaire changent avec le plan d'incidence (parallèle et perpendiculaire à ce plan)

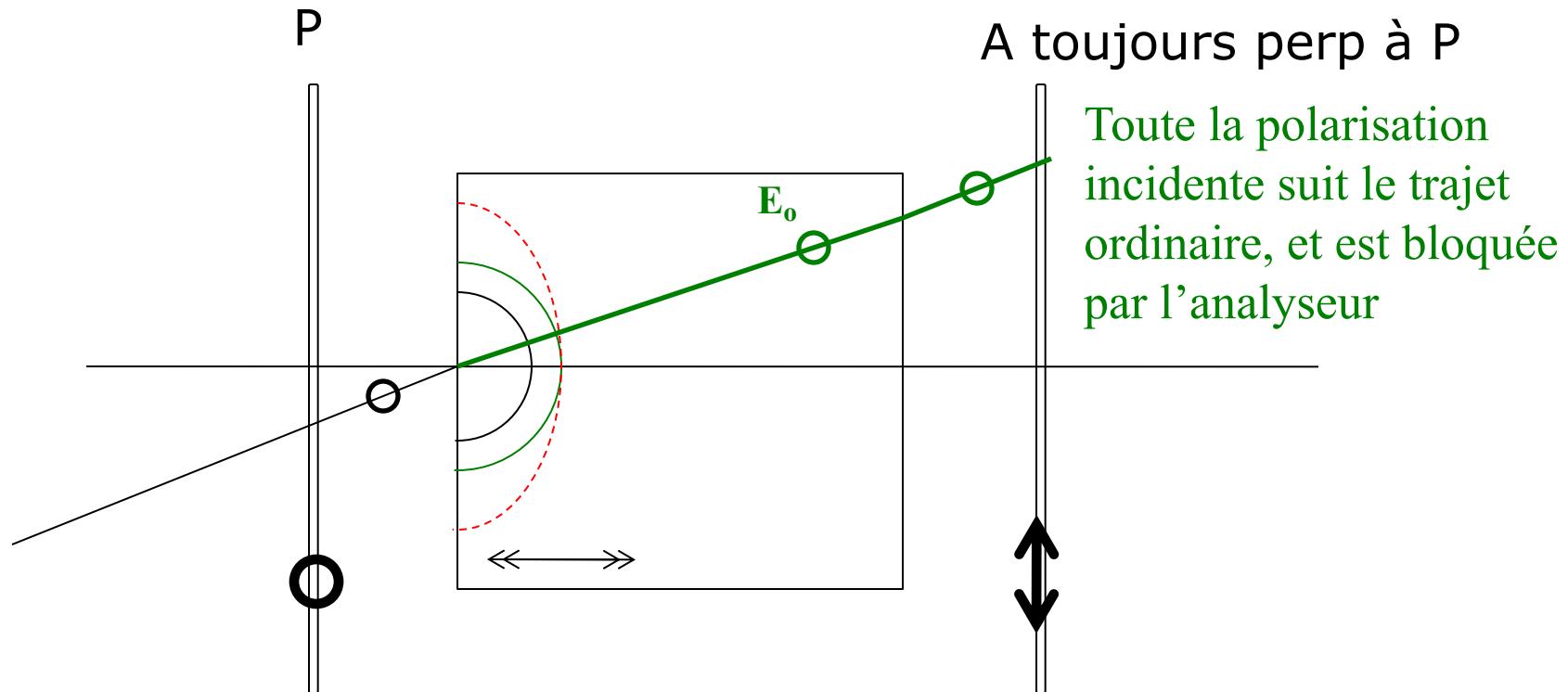
Par contre la direction de  $P$  et  $A$  est fixe

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

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



## Interprétation de cette figure d'interférence: 2<sup>e</sup> axe de la croix noire



### BILAN:

La croix noire est dans la direction de P et de A  
Elle sera blanche si P // A

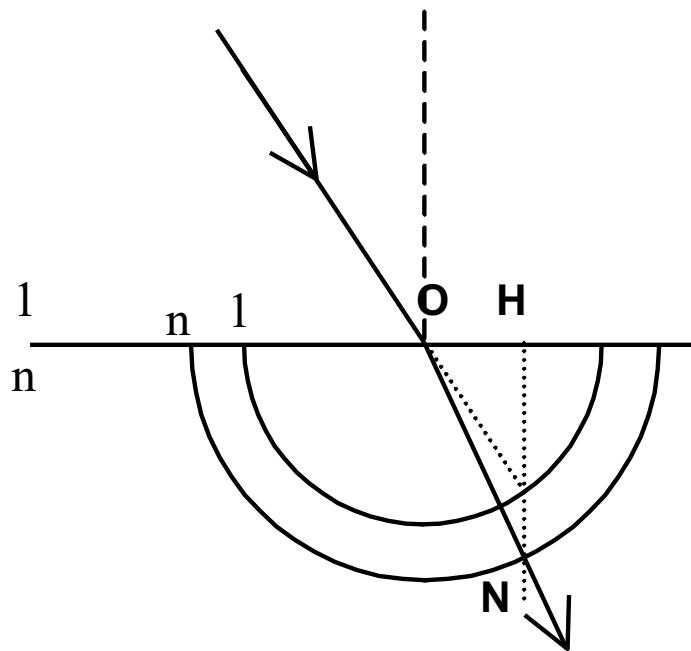
## 2) Calcul de la différence de marche(DDM) pour une lame à faces parallèles en fonction de l'angle d' incidence

**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!)

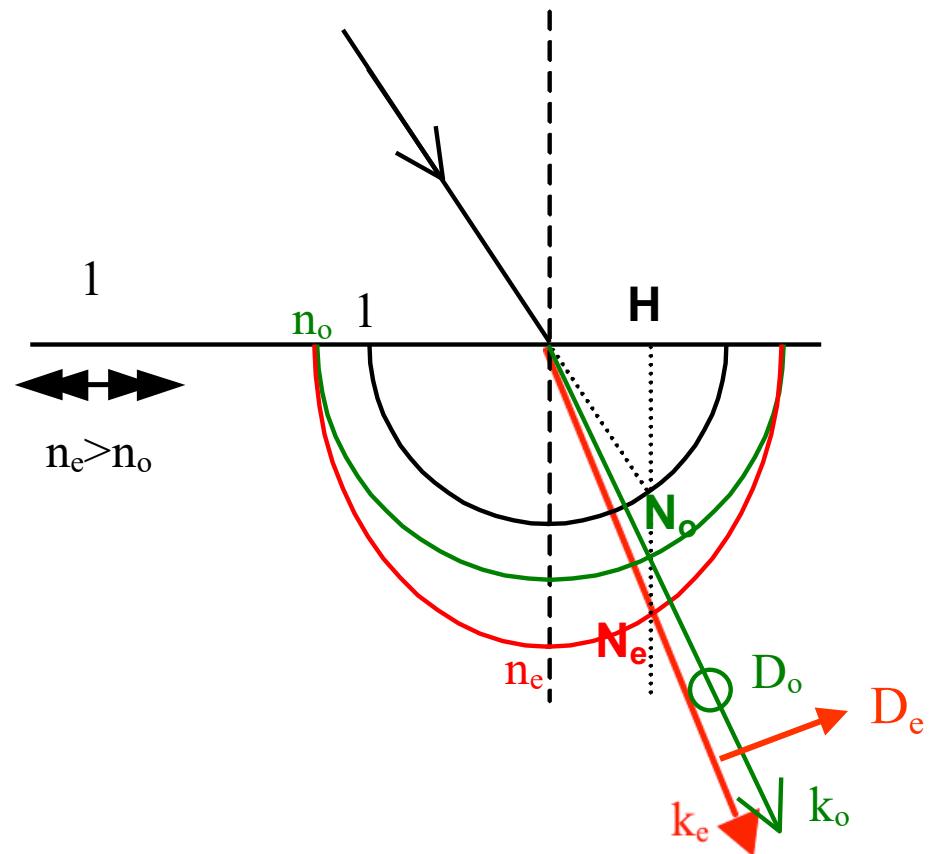
Calcul le long des vecteurs d'onde  $k$ : **on construit les vecteurs d'onde  $k$  des ondes réfractées en utilisant LES SURFACES DES INDICES**

# Constructions des vecteurs $k$ réfractés avec la surface des indices

Rappel du cas isotrope



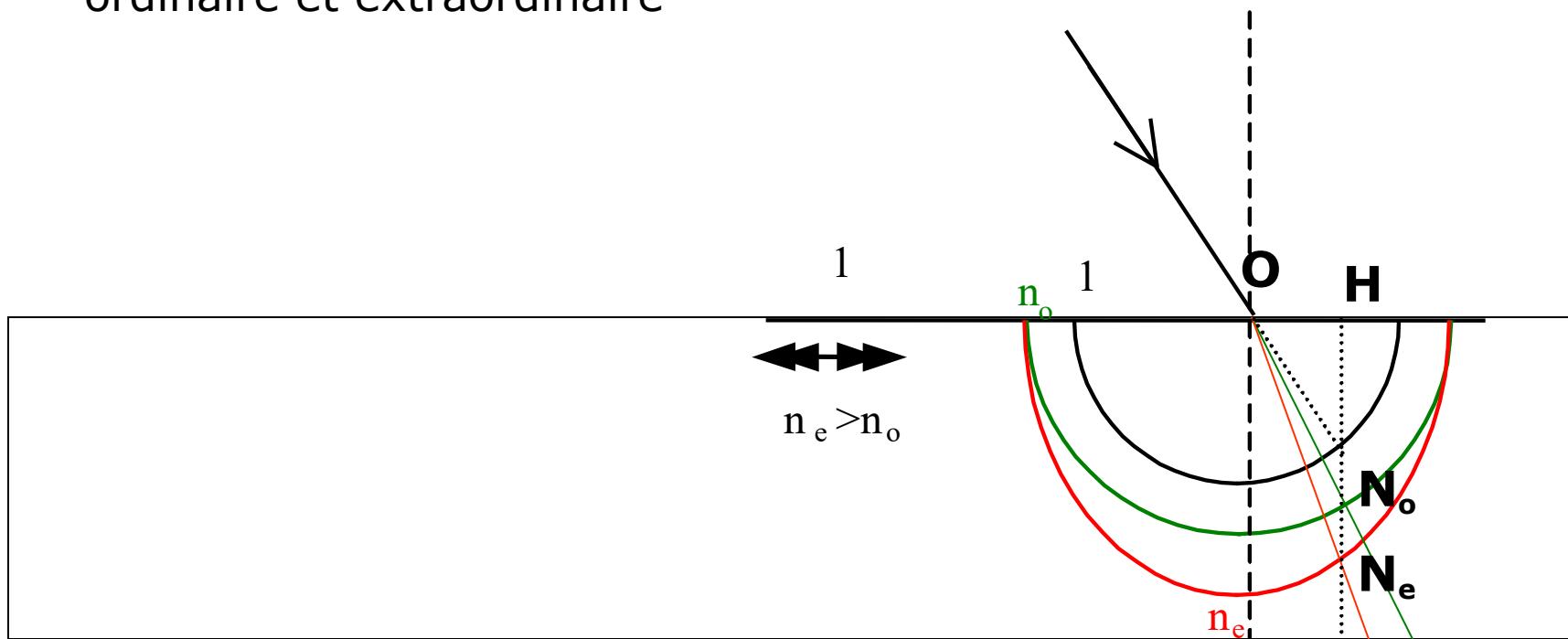
Cas uniaxe



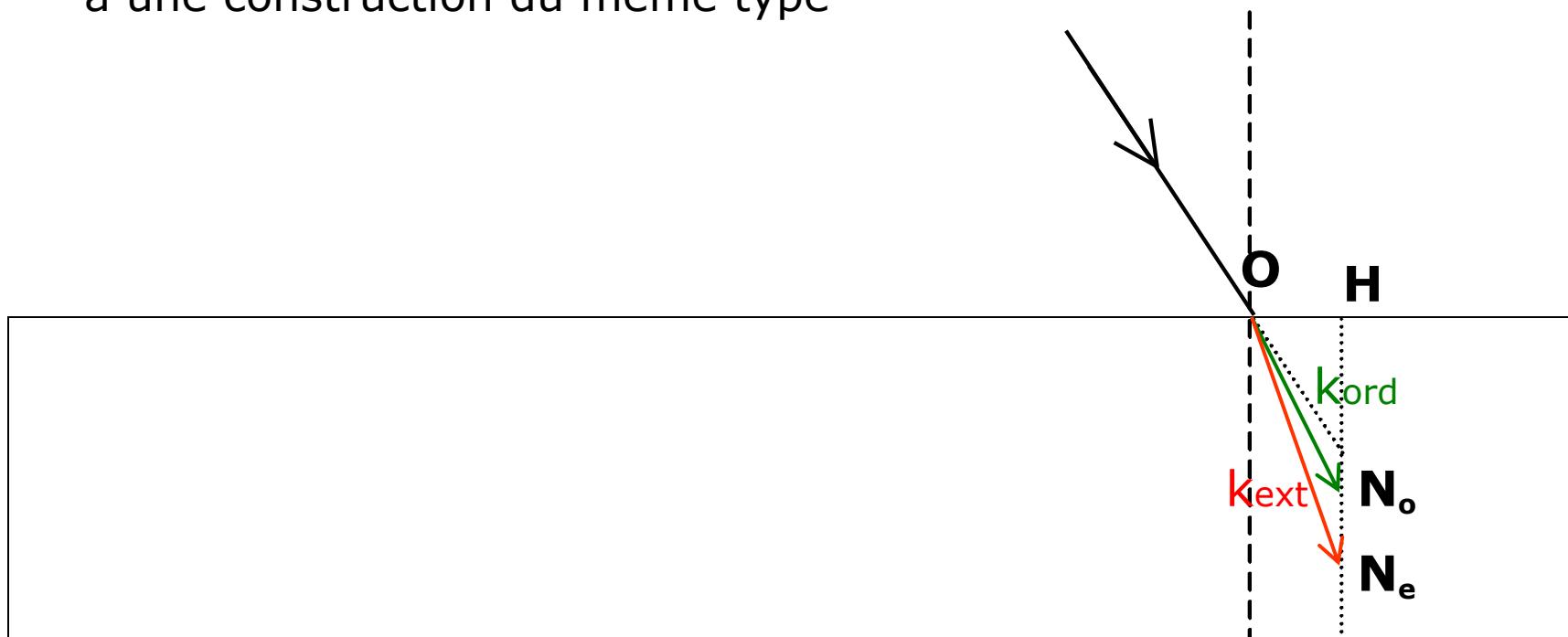
# Application au calcul de la DDM entre chemins ordinaire et extraordinaire

NW polarisation 1A

17



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

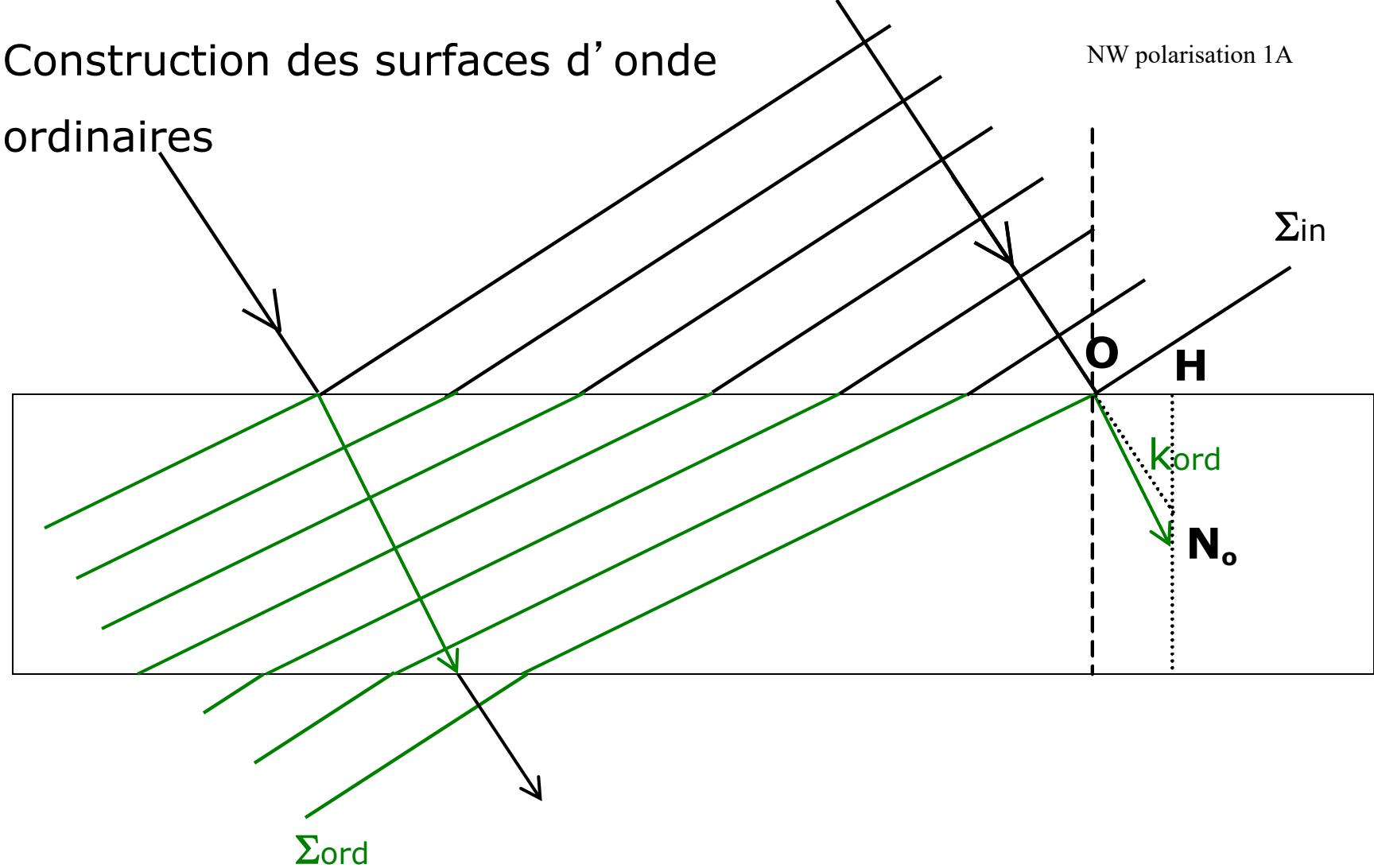


# Construction des surfaces d' onde

ordinaires

NW polarisation 1A

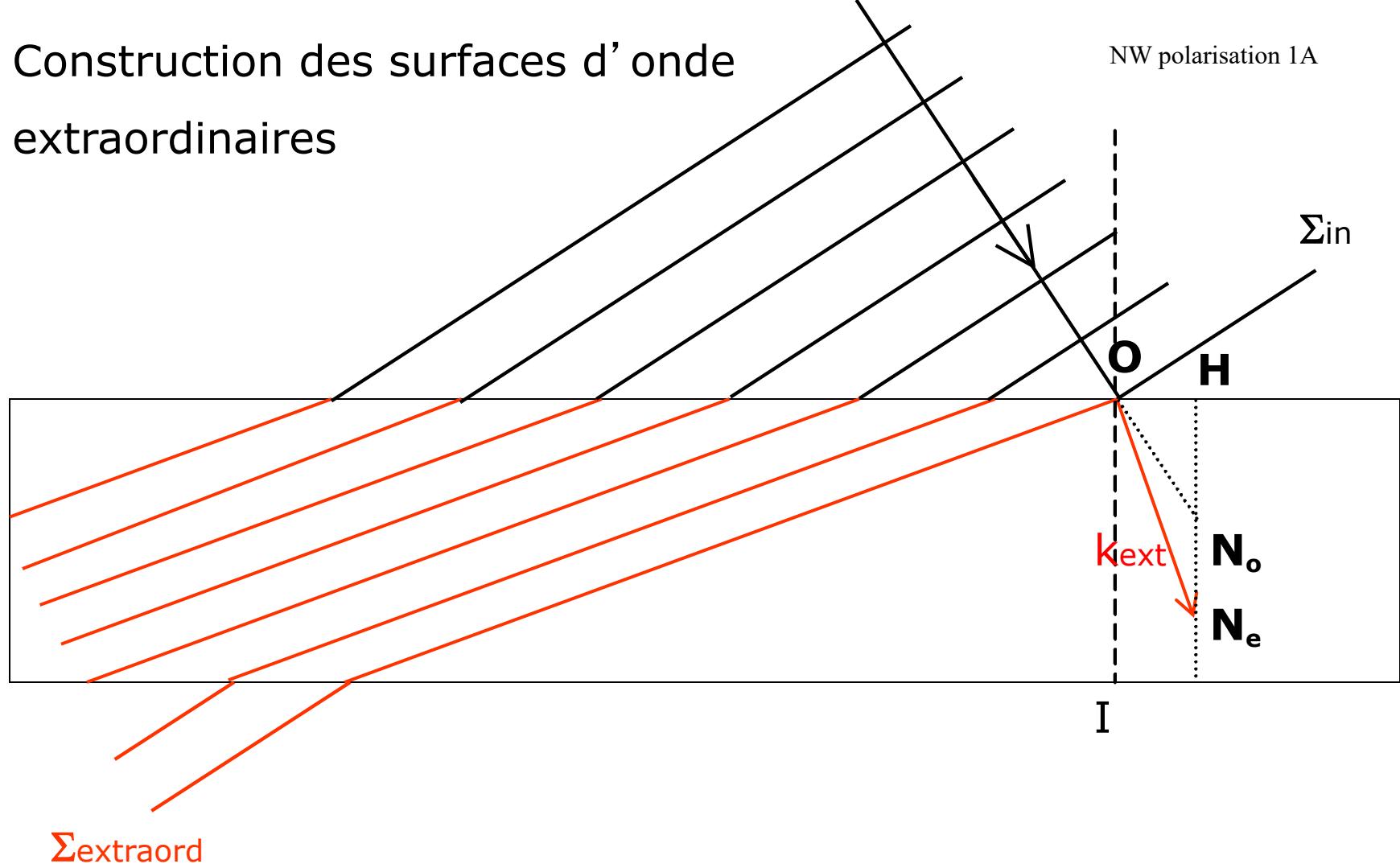
19



# Construction des surfaces d' onde extraordinaire

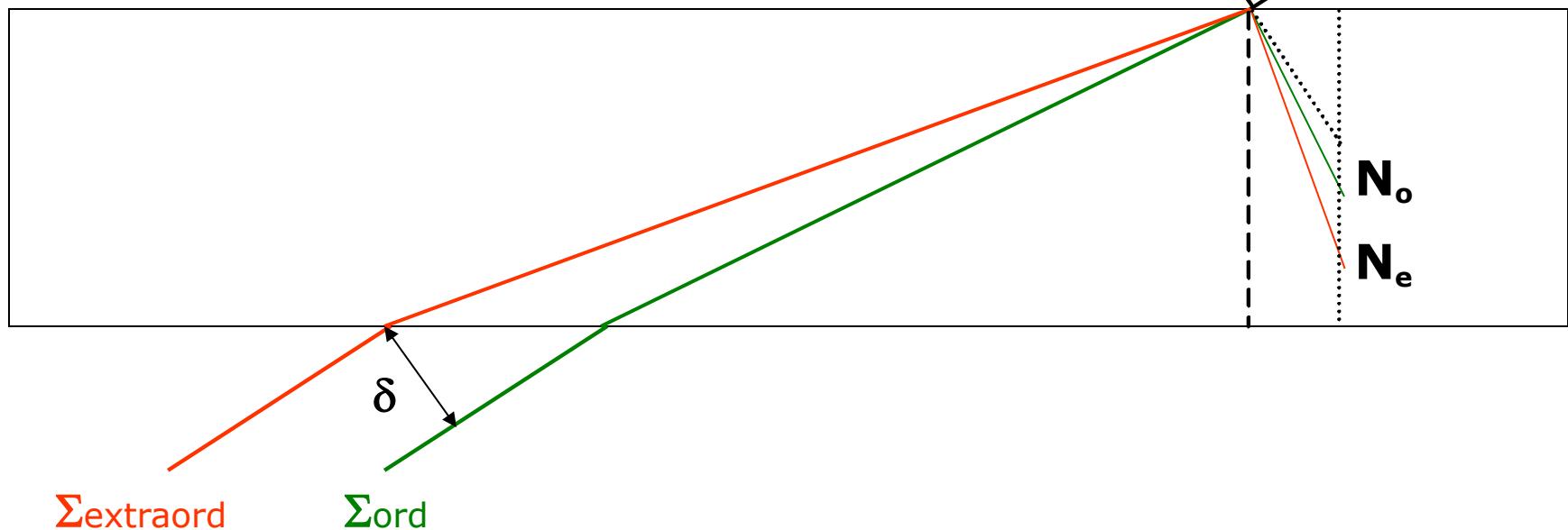
NW polarisation 1A

20

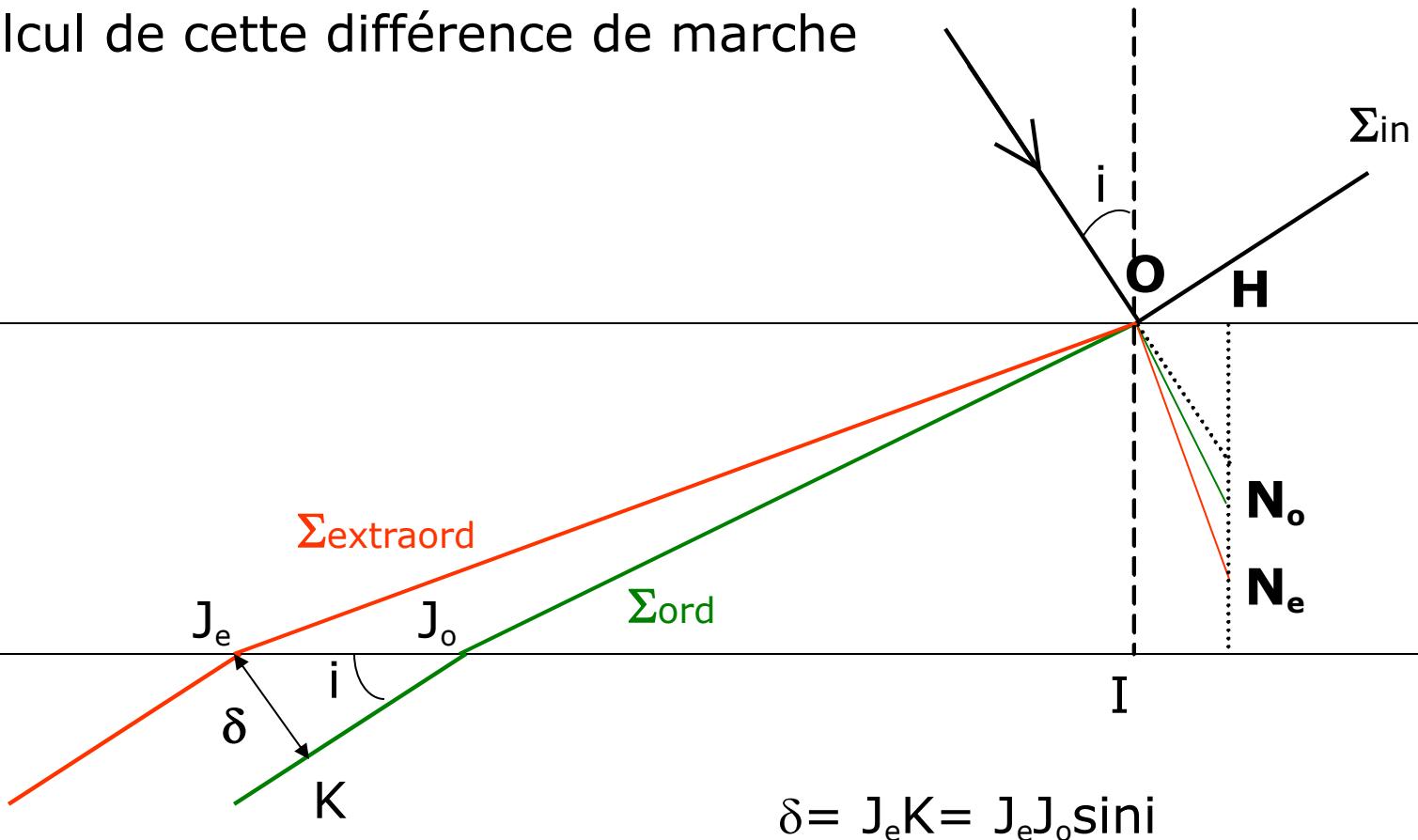


Position des 2 surfaces d' onde au même instant

On trouve ainsi la différence de marche  $\delta$  entre les deux ondes à la sortie de la lame



Calcul de cette différence de marche



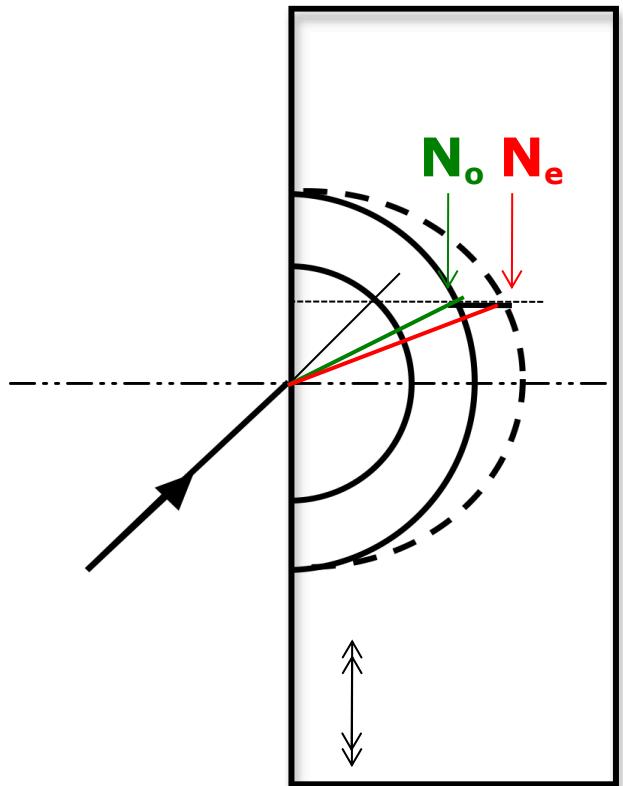
$$\frac{J_e J_o}{OI} = \frac{N_e N_o}{OH} \quad OH = \sin i \quad OI = e$$

$$\delta = e N_e N_o$$

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

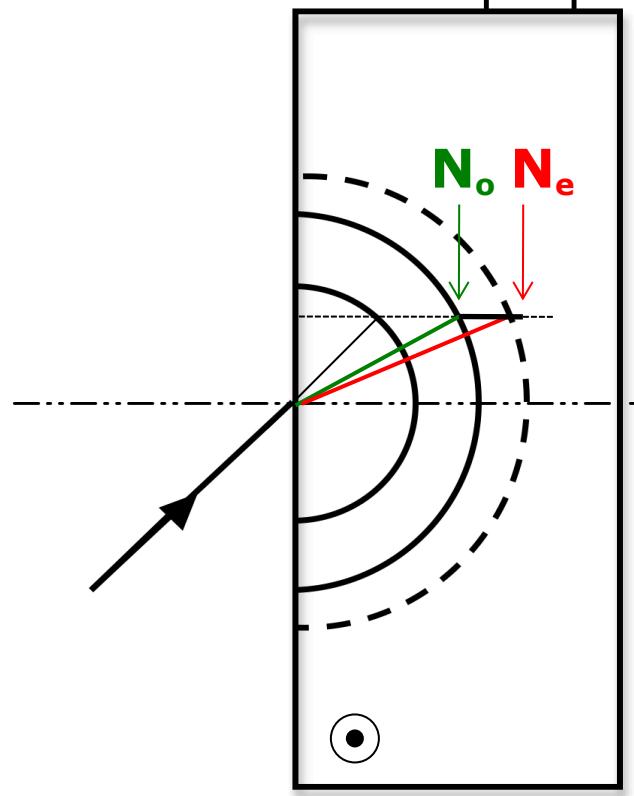
### 3) Cas d'une lame d'axe optique parallèle aux faces

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



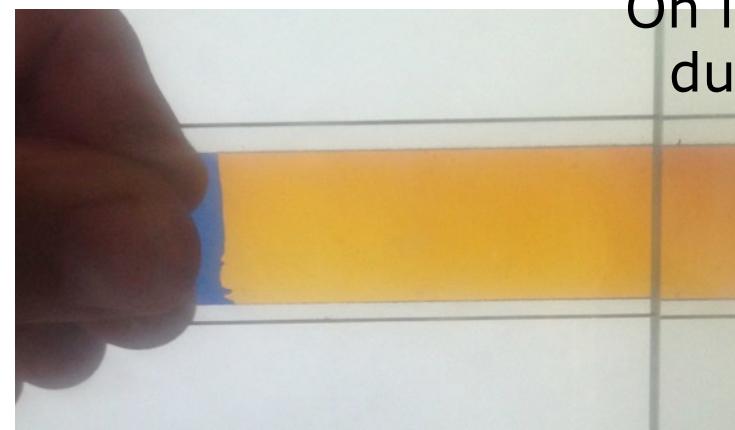
$\delta$  augmente avec l'angle d'incidence

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

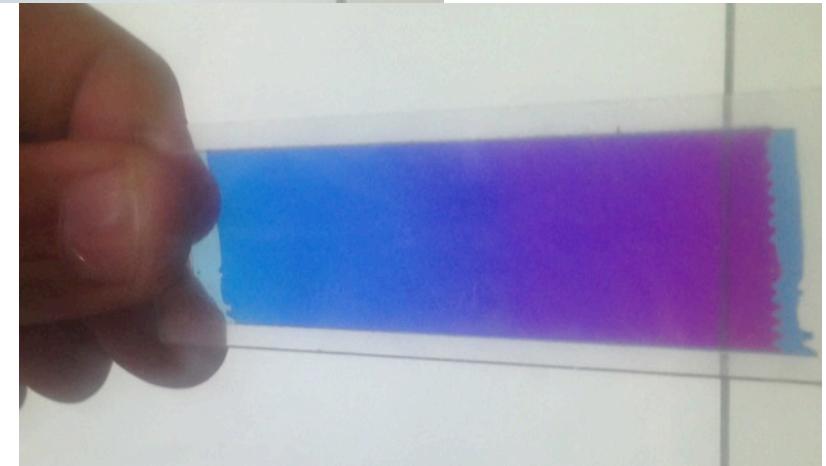
# Démo: changement de couleur des lames de scotch suivant la rotation appliquée



2 couches de  
scotch en  
incidence normale



On incline autour  
du grand côté



On incline autour  
du petit côté

# Analyse avec teintes de Newton (extrait)

NW polarisation 1A

25

## P et A parallèles

## P et A croisés

|      |                    |                      | pr |
|------|--------------------|----------------------|----|
| 306  | indigo             | jaune clair          |    |
| 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     |    |
| 565  | vert plus clair    | pourpre              |    |
| 575  | jaune verdâtre     | violet               |    |
| 589  | jaune d'or         | indigo               |    |
| 664  | orange             | bleu de ciel         |    |
| 728  | orangé brunâtre    | bleu verdâtre        |    |
| 747  | rouge carmin clair | vert                 |    |
| 826  | purple             | vert plus clair      |    |
| 843  | purple violacé     | vert jaunâtre        |    |
| 866  | violet             | jaune verdâtre       |    |
| 910  | indigo             | jaune pur            |    |
| 948  | bleu sombre        | orange               |    |
| 998  | bleu verdâtre      | orangé rougeâtre vif |    |
| 1101 | vert               | rouge violacé foncé  |    |

Rotation autour du  
grand côté

$\delta$  diminue



Incidence normale

$\delta$  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

⇒  $\delta$  augmente

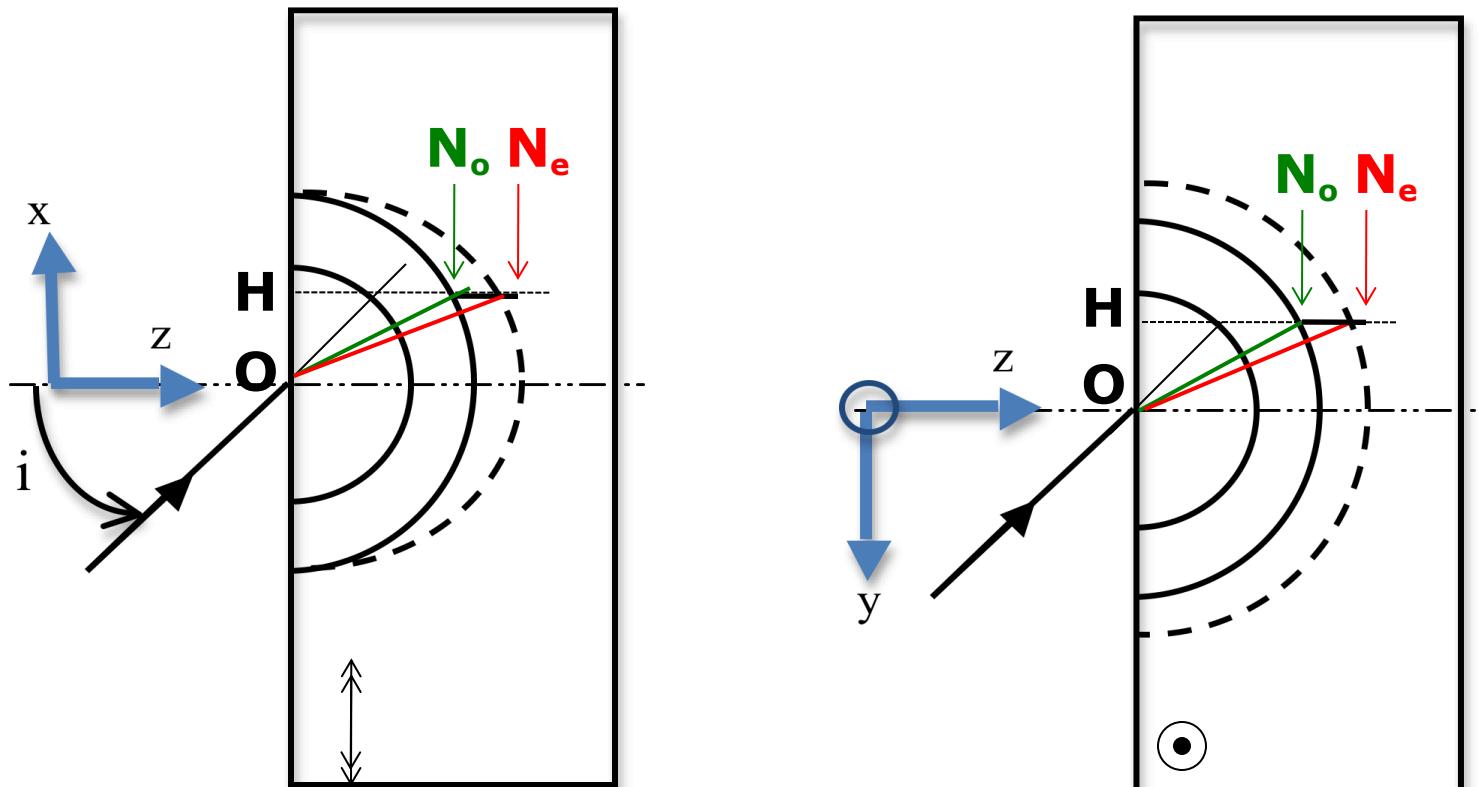
⇒ La teinte change en suivant l'échelle de Newton

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)

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

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

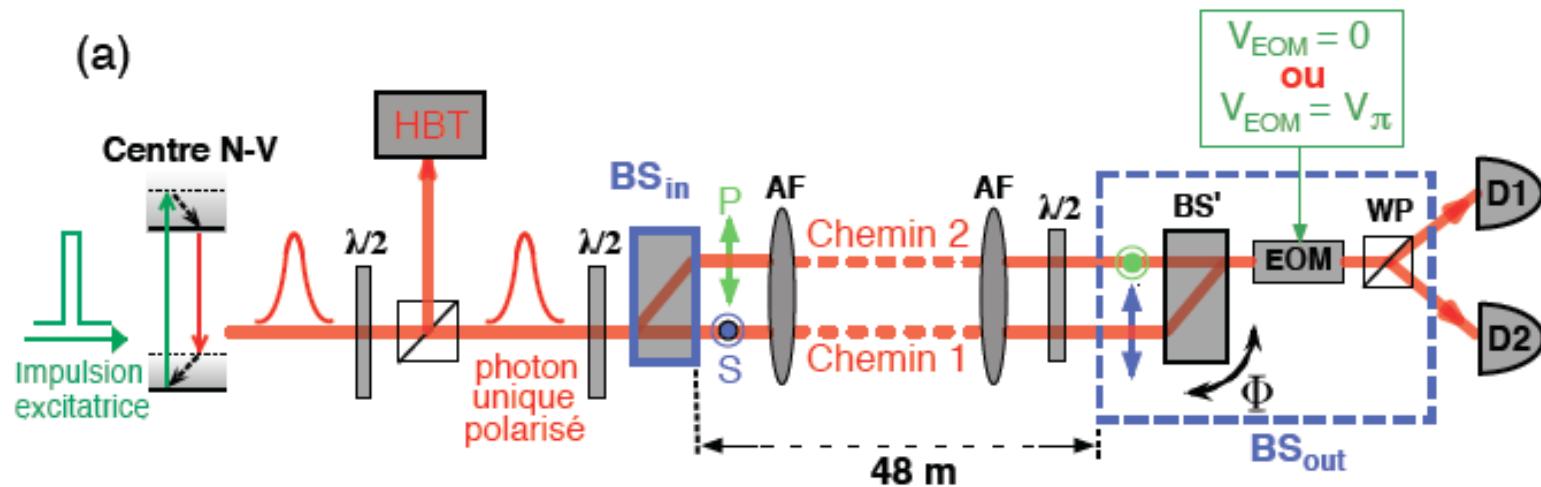
Equation des franges de la forme:

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

→ **Hyperboles**

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

## 1) Schéma complet de l'interféromètre utilisé

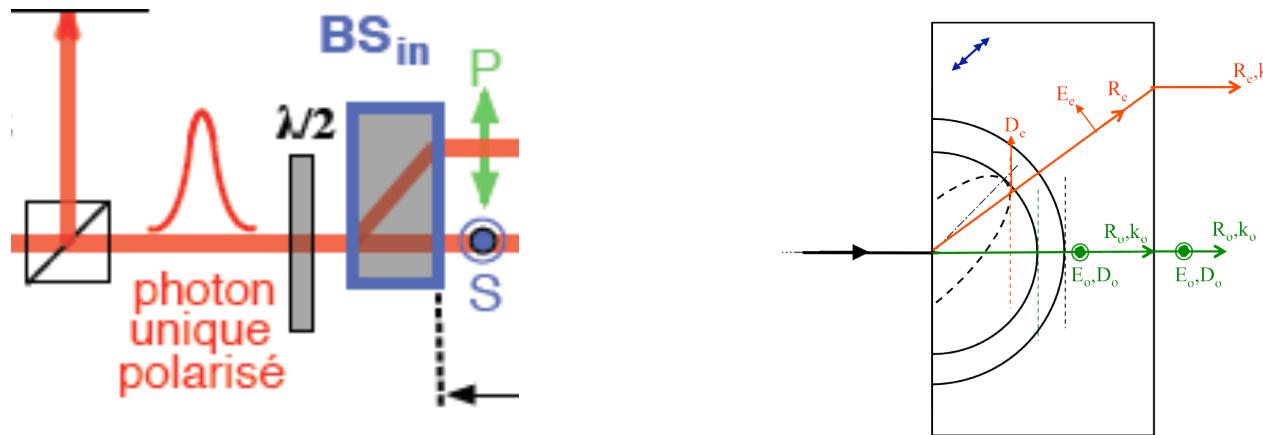


Référence :

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 (YVO<sub>4</sub>). Son axe optique est dans le plan de la figure et fait un angle  $\psi$  proche de 45° avec la normale à la face d'entrée.



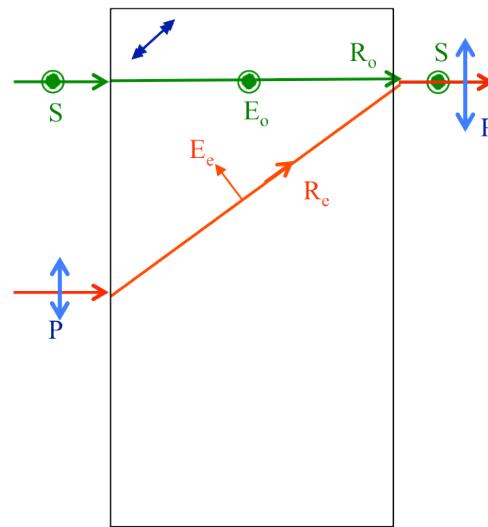
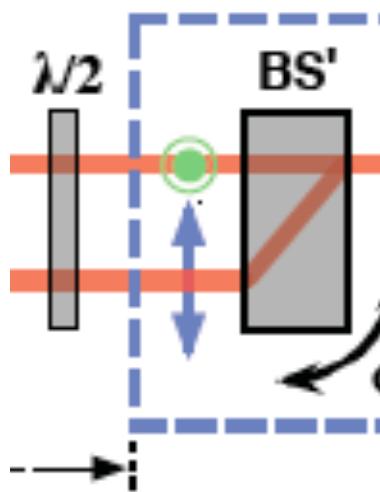
Comment faut-il orienter les axes neutres de la lame demi-onde qui précède BSin pour que les deux voies de sortie de la séparatrice soient de même intensité ? On notera que la lame demi onde est précédée d'un cube polariseur qui transmet la polarisation P (parallèle au plan de figure).

La lame demi onde doit avoir ses axes à 22,5° 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<sup>e</sup> 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.

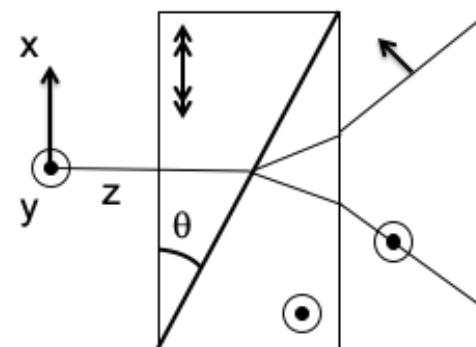
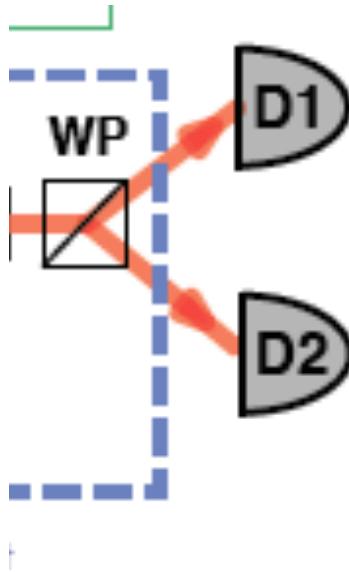


Comment doit être orientée cette lame demi onde ?

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 :



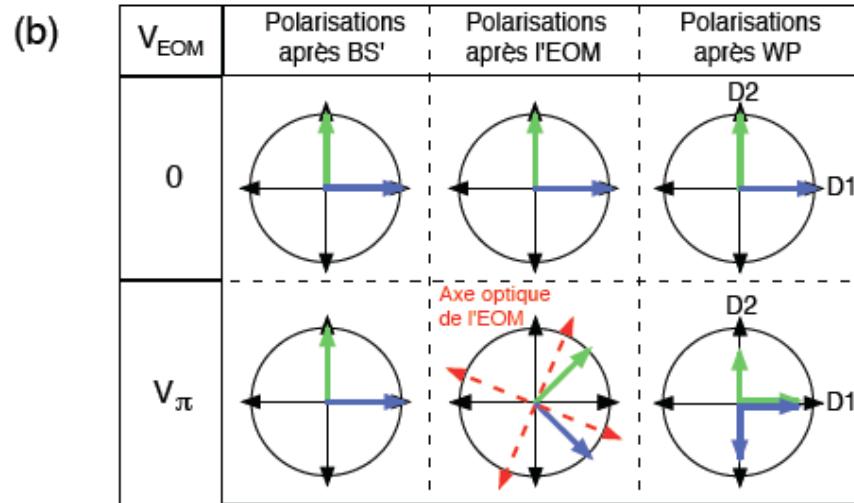
On veut que la polarisation selon y sorte vers le détecteur D2 (vers le bas).

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:

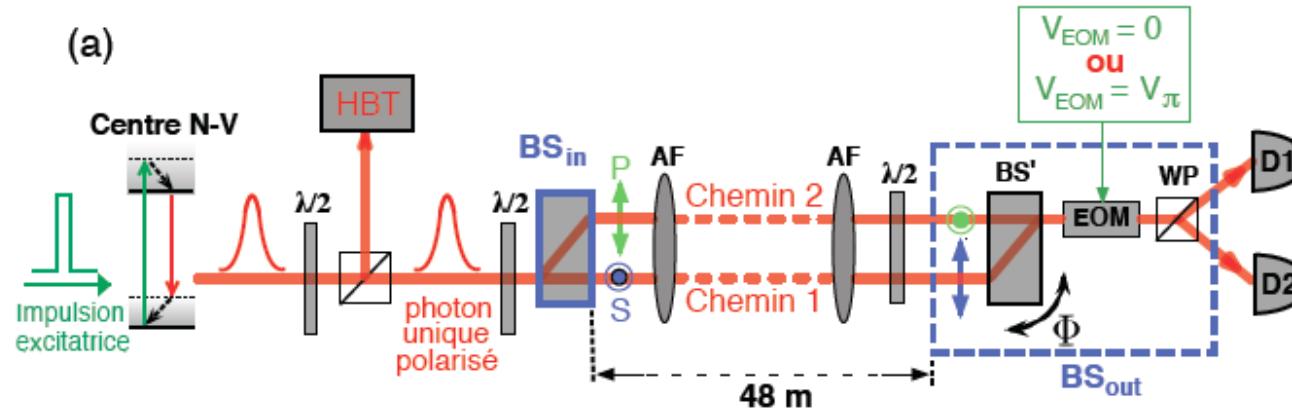


A quel composant est équivalent le modulateur à tension nulle et à tension  $V_\pi$  ?

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

## 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  $V_y$ , l'EOM+WP joue le rôle d'un analyseur à  $45^\circ$  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  $BS_{in}$  est compensée par celle induite par  $BS'$ . Il faut incliner  $BS'$  pour faire apparaître une ddm et donc un déphasage.