

Optique ondulatoire

Objectifs :

Décrire la nature de la lumière

Etendre la notion de propagation d'une onde et d'interférence à l'optique.

Comprendre le phénomène de diffraction de la lumière

1 - Nature de la lumière

Propagation dans un milieu transparent

A - ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

La lumière est une onde électromagnétique (EM), c'est à dire la propagation de champs électrique et magnétique couplés. Le signal est donc un vecteur !

Sa nature est donc totalement identique à celle des ondes radios, à ceci près que sa fréquence est beaucoup plus élevée :

IR

$$\sim 3 \cdot 10^{14} \text{ Hz} < f_{\text{visible}} < \sim 8 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

UV

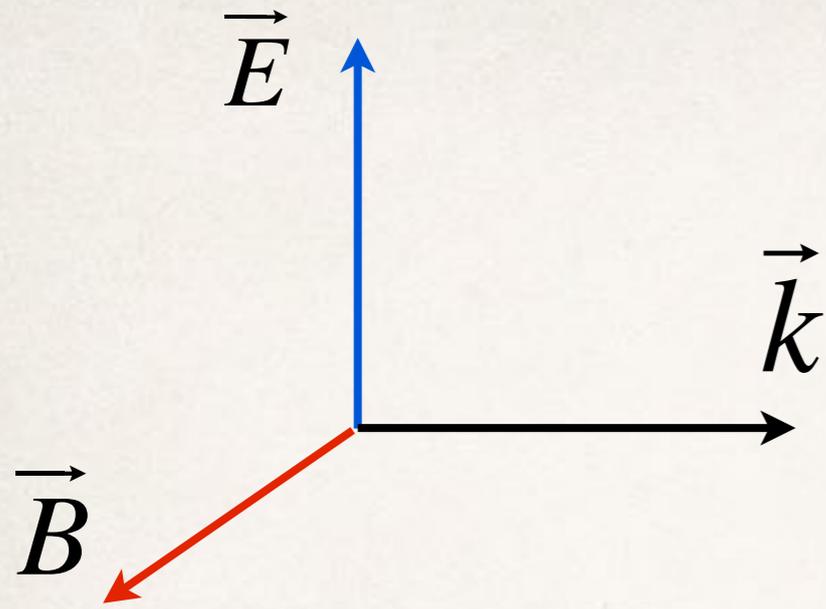
Les ondes électromagnétiques sont produites par des charges accélérées.

ex : Emission naturelle lorsqu'un électron change de niveau d'énergie

ex : Emission par une antenne radio à l'aide d'un courant alternatif

D'un point de vue corpusculaire, les ondes EM sont véhiculées par le photon, à la vitesse de la lumière dans le vide.

Les équations de Maxwell permettent d'établir la structure de l'onde

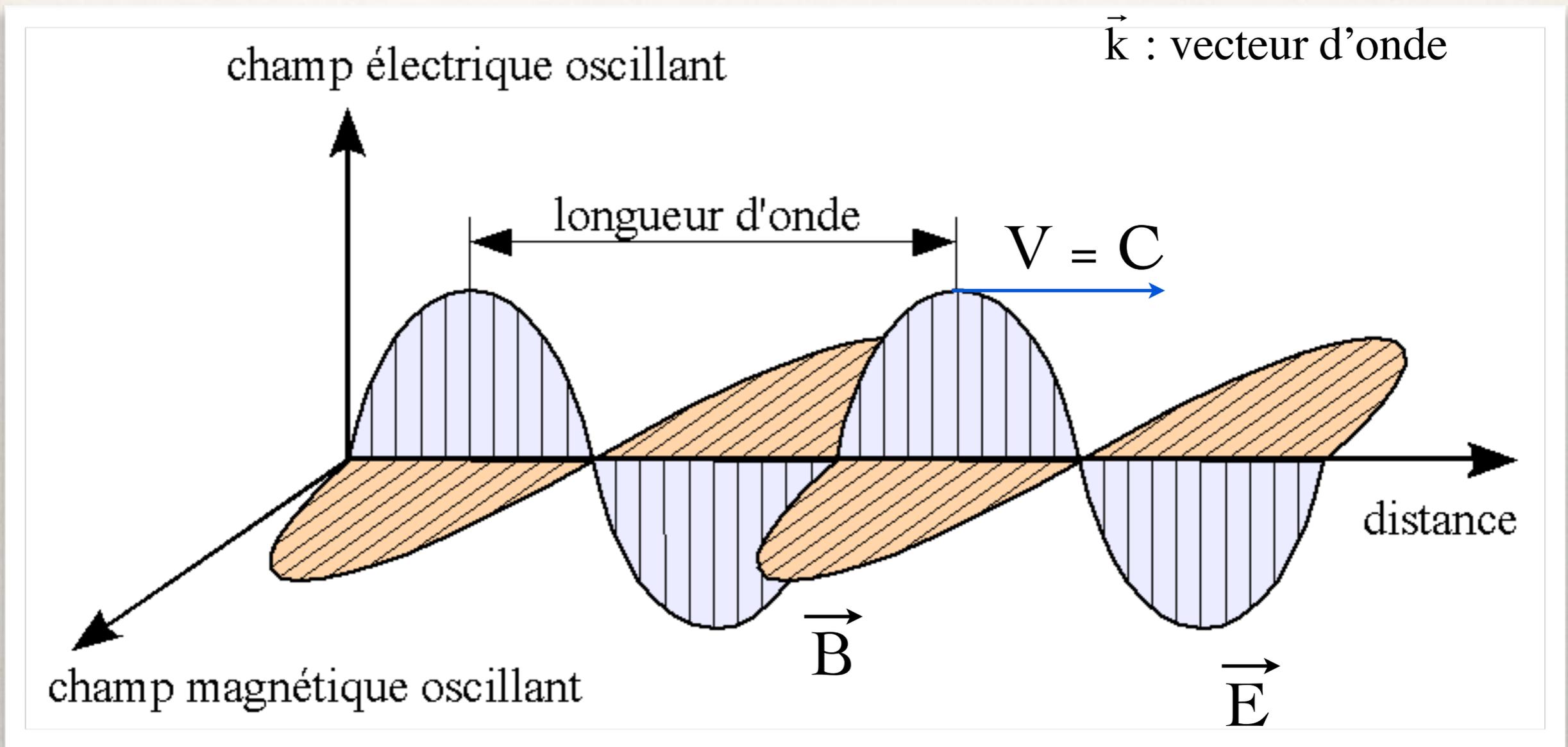


$$\vec{E} \perp \vec{B} \perp \vec{k}$$

\vec{E} : champ Electrique

\vec{B} : champ Magnétique

\vec{k} : vecteur d'onde



Cf TD	Vide		Plexiglass		Diamant	
	λ_B	λ_R	λ'_B	λ'_R	λ''_B	λ''_R
n	1.0	1.0	1.5	1.5	2.4	2.4
C'	3,0E+08	3,0E+08				
T						
f	A compléter					
ω						
λ	400 nm	800 nm				
k						

Seules les période, fréquence et pulsation ne changent pas lorsque l'on change de milieu. On dit qu'il y a invariance par «translation» d'une période dans le temps.

Relation de dispersion et indice optique

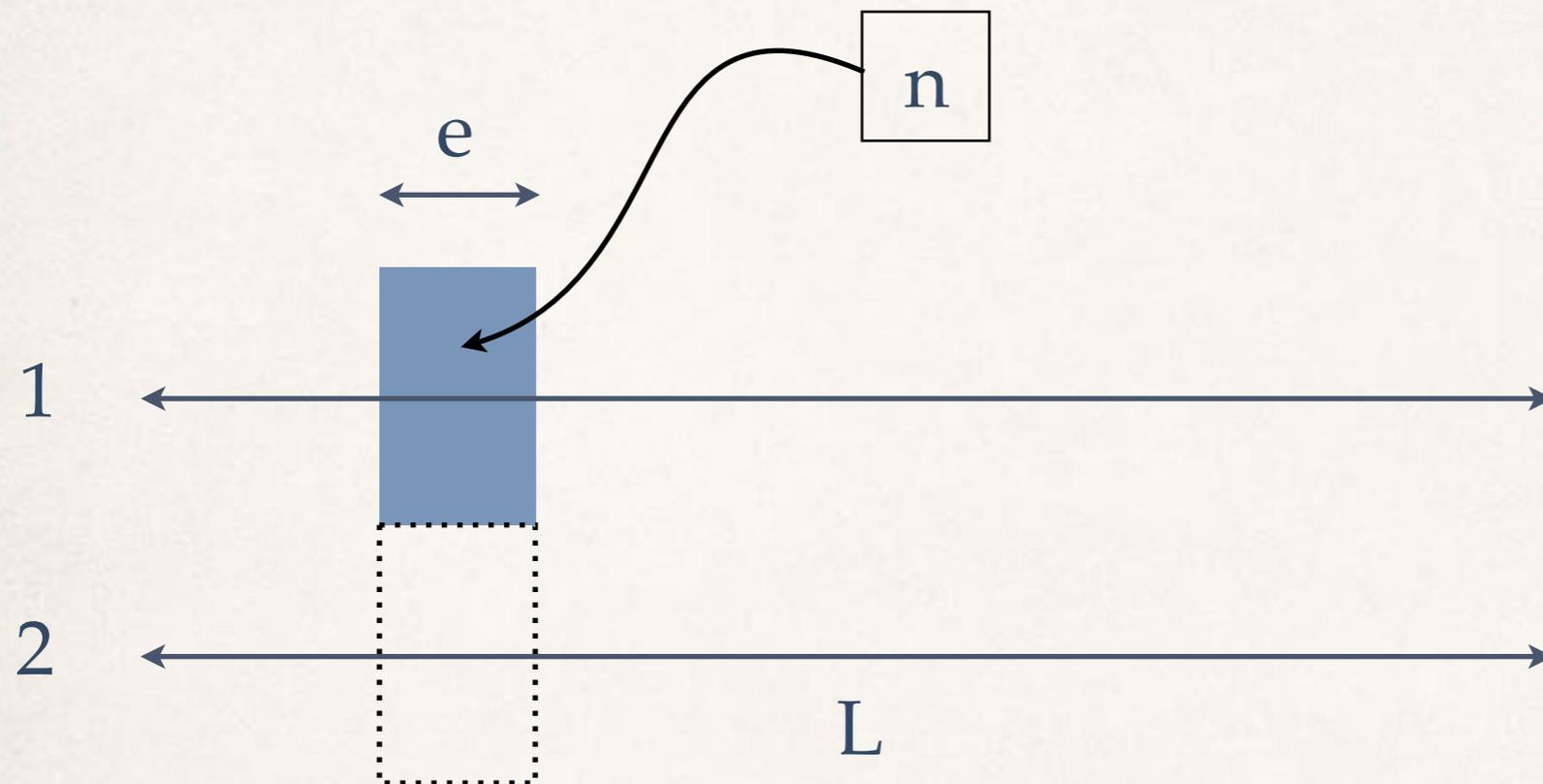
Que devient $w=kc$ dans un milieu d'indice n ?

trouver C' T' k' w' λ' etc

Notion de distance optique :

Un déphasage de 2π radians correspond toujours à une longueur d'onde quel que soit le milieu. Après une distance parcourue L , on a un déphasage :

Application : calcul d'une différence de marche optique à travers un pavé de verre d'épaisseur e et d'indice n



Calculer d_1 et d_2 puis
la différence de marche

Qui est en avance ?

B - POLARISATION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

La lumière est un vecteur [en fait deux E et B], et possède en plus de son amplitude et de sa phase, une direction : **On dit que la lumière est polarisée !**

Cette direction dépend directement du mécanisme responsable de l'émission de l'onde électromagnétique [cf émission spontanée ou stimulée]

Nature vectorielle de la lumière => polarisation

Toutefois la lumière naturelle produite par le soleil ne possède pas de direction privilégiée pour son champ :

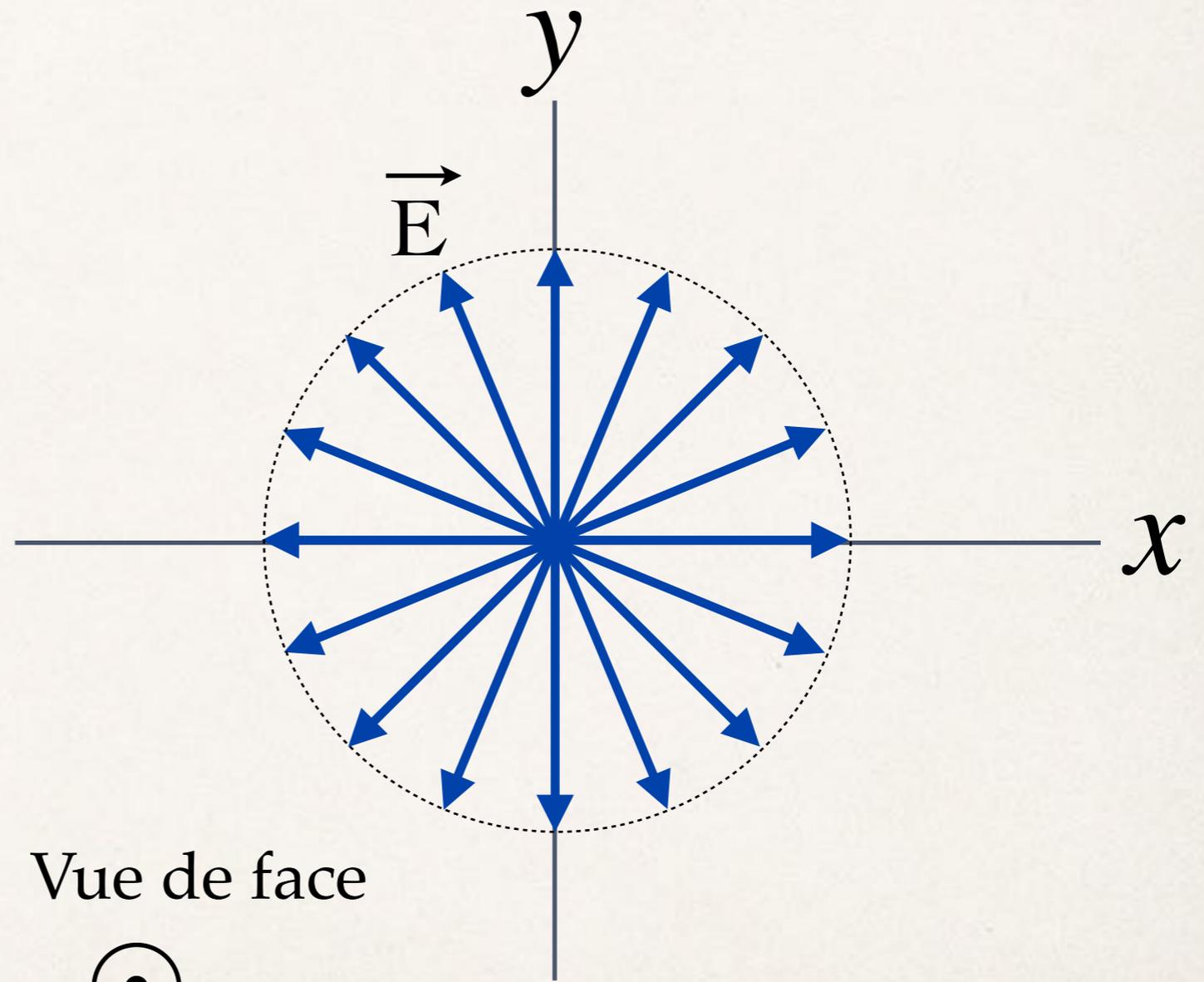
En effet elle est le résultat de la superposition d'un très grand nombre d'ondes individuelles produites chacune dans une direction aléatoire qui dépend de l'atome ayant émis cette onde.

Rq : La nature scalaire d'un signal ne permet pas la polarisation. Inversement les ondes gravitationnelles sont elles aussi polarisées, mais du fait de leur caractère tensoriel c-à-d au delà du vecteur (ex : matrice de composantes).

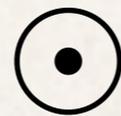
La lumière naturelle [produite par le soleil, par une lampe, etc] n'est pas polarisée, ou plutôt le soleil émet des ondes polarisées dans toutes les directions de façon équiprobables.

Distribution des ondes :

Symétrique autour de l'axe de propagation



Vue de face

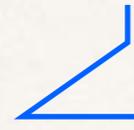


\vec{k}

-> direction de propagation

On peut imposer au champ électrique une direction de vibration privilégiée :

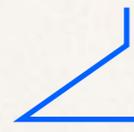
1 - En traversant des matériaux dont la structure microscopique n'est pas symétrique [exemple feuille de cellophane, plexiglass, quartz]



Application 1 : polariseur, lunettes 3D
Cristaux liquides

A compléter

2 - En utilisant des émetteurs et antennes aux directions privilégiées.
[ex : antenne rateau, cornet émetteur]



Application 2 : Réglage de la polarisation
d'une antenne parabolique

3 - Par des effets de réflexion sur des interfaces, de diffusion.
[ex : extinction sous incidence de Brewster]
[expérience : observer le ciel bleu à travers un polariseur]

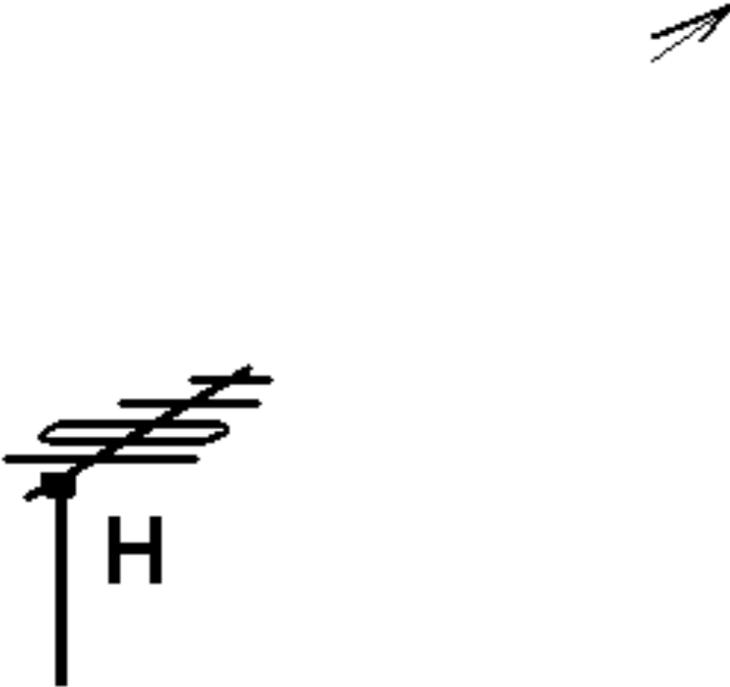
Il faut un moyen de briser la symétrie initiale

Antenne «râteau»

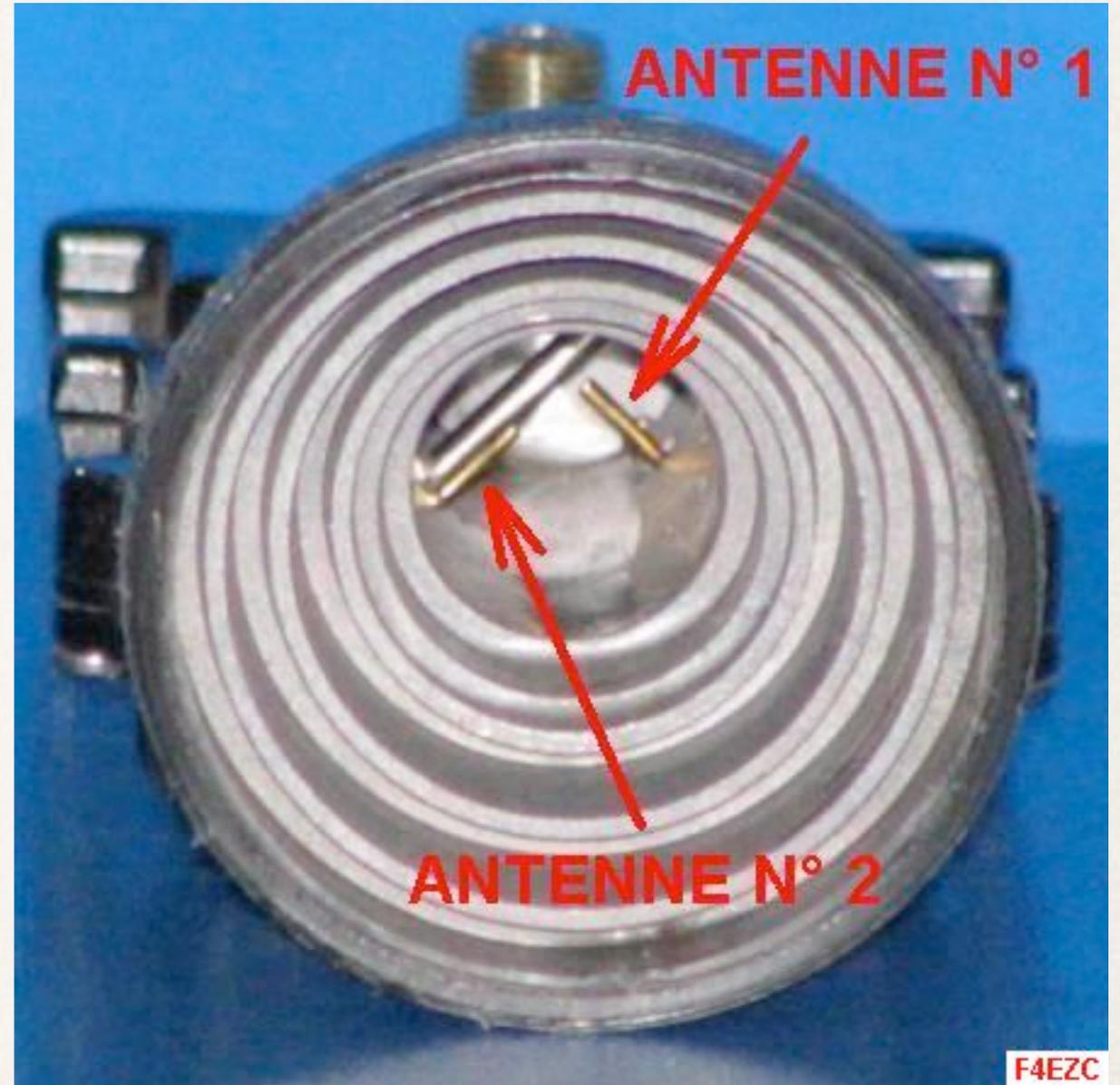
Polarisation de l'onde dans le plan vertical :



Polarisation de l'onde dans le plan horizontal :



Tête d'antenne parabolique



Cornet résonnant

Il existe toutes sortes de polarisations des ondes vectorielles :

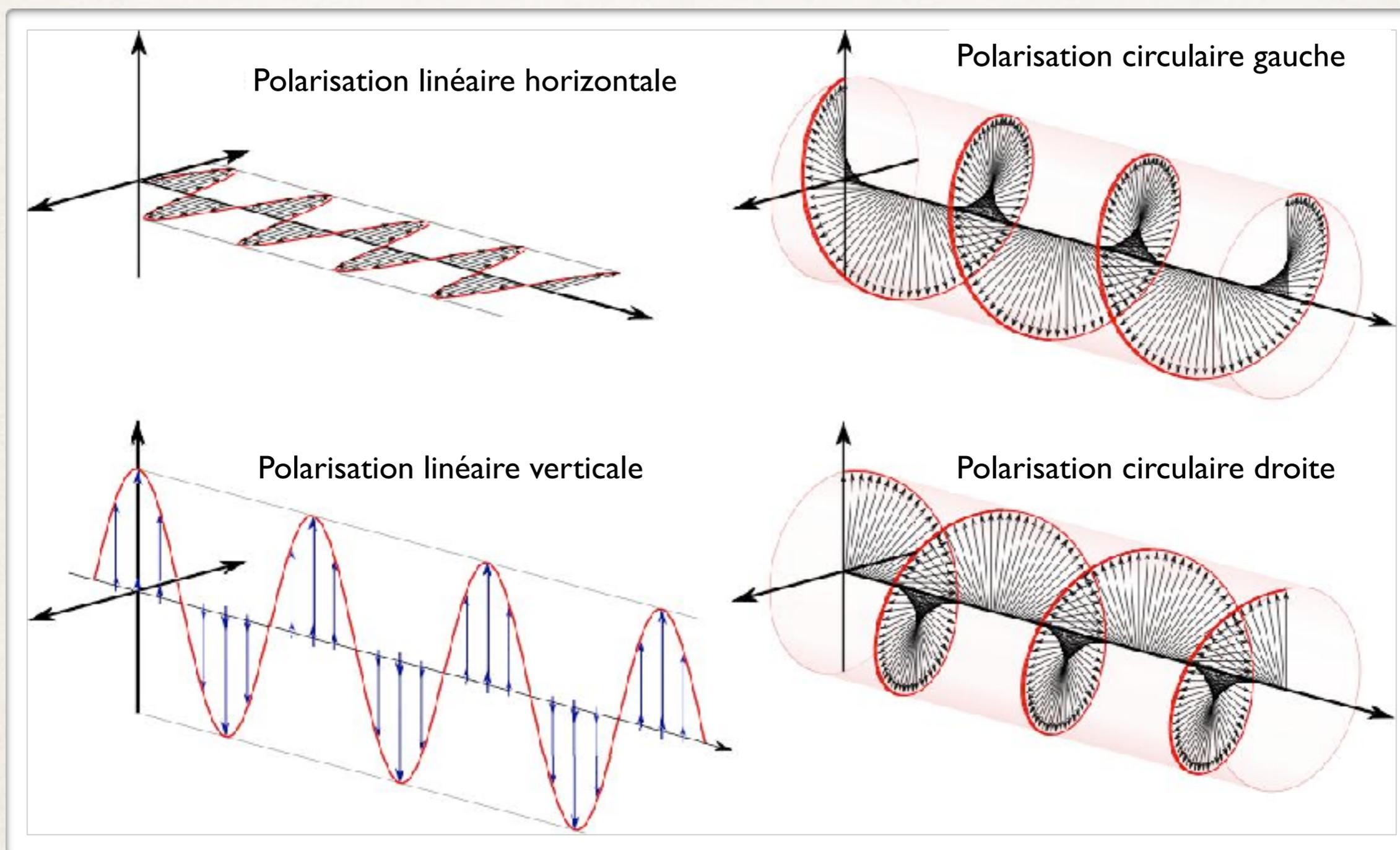
- Rectilignes (différentes directions)

- Circulaires (droite ou gauche)

- Elliptiques

$$\vec{E} \begin{cases} E_{x0} \cos(\omega t - kz + \varphi_x) \\ E_{y0} \cos(\omega t - kz + \varphi_y) \\ 0 \end{cases}$$

Celles-ci sont fonctions des déphasages et amplitudes respectives des champs E_x et E_y :



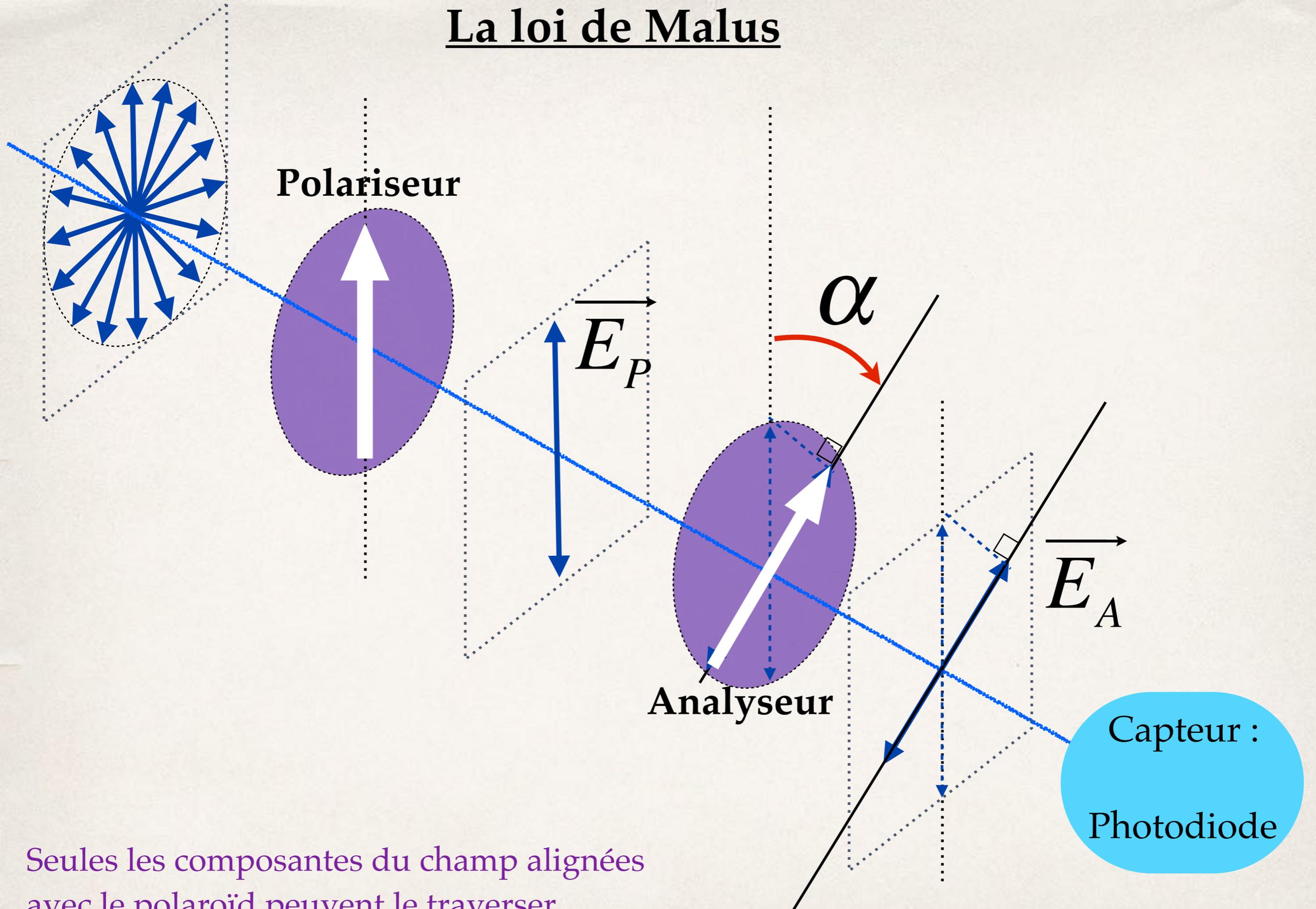
Intensité d'une onde électromagnétique

L'intensité d'une onde électromagnétique est proportionnelle au carré du module du champ électrique [cf vecteur de Poynting 2ème année]

De plus, la fréquence des ondes est tellement rapide que les détecteurs ne sont sensibles qu'à la valeur moyenne de ce carré. On a donc :

$$\mathcal{I} = \kappa \left\langle \vec{E}(x,t)^2 \right\rangle_t$$

La loi de Malus



Seules les composantes du champ alignées avec le polaroid peuvent le traverser.
[pour le polariseur ainsi que pour l'analyseur]

On envoie de la lumière naturelle [lampe ordinaire] à travers un polariseur vertical :
Soit E_P le champ électrique sortant du polariseur => polarisation rectiligne verticale

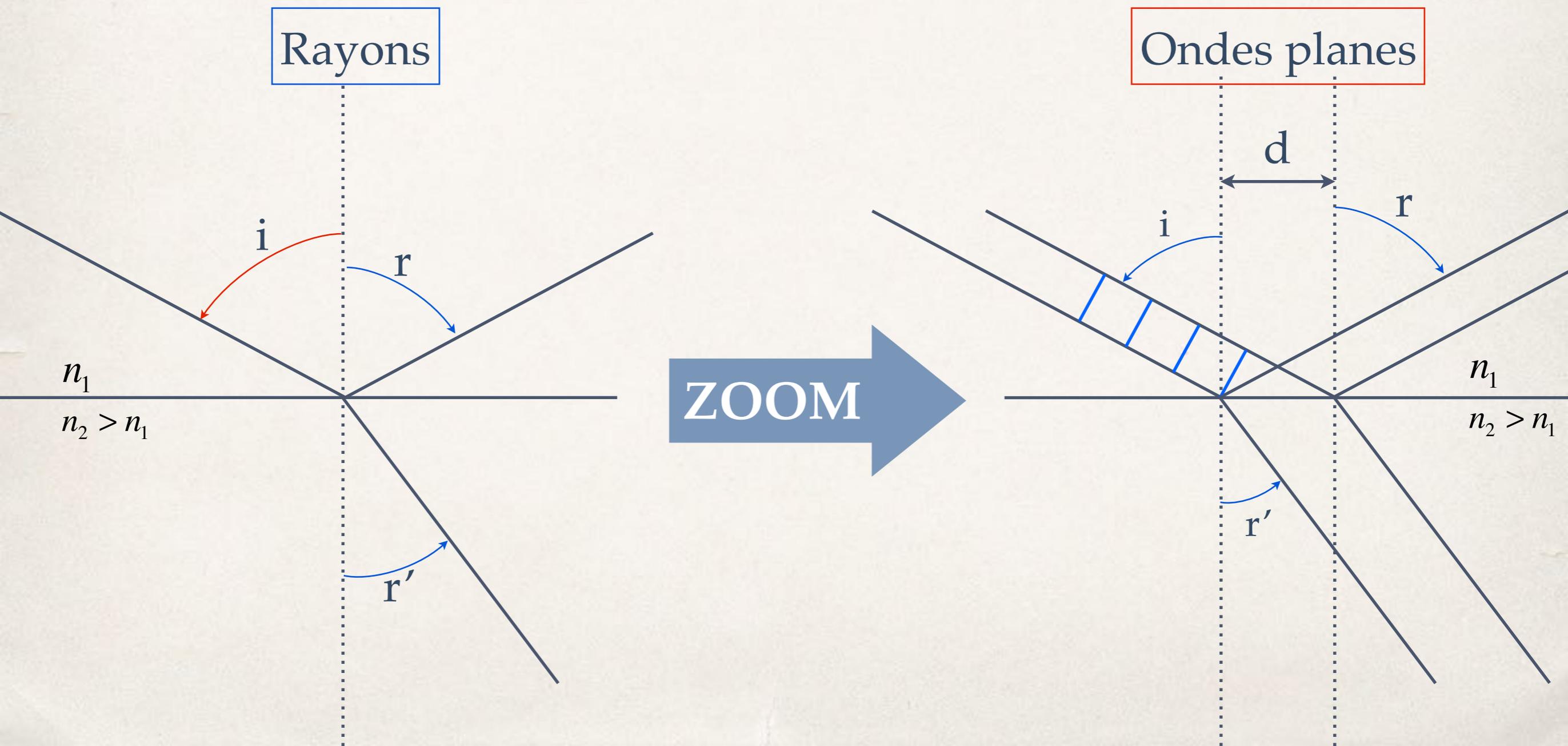
Ce champ doit ensuite traverser l'analyseur [qui est un polariseur identique] tourné d'un angle α par rapport au polariseur : soit E_A le champ sortant.

Calculer l'intensité détectée en fonction de l'angle α :

En classe

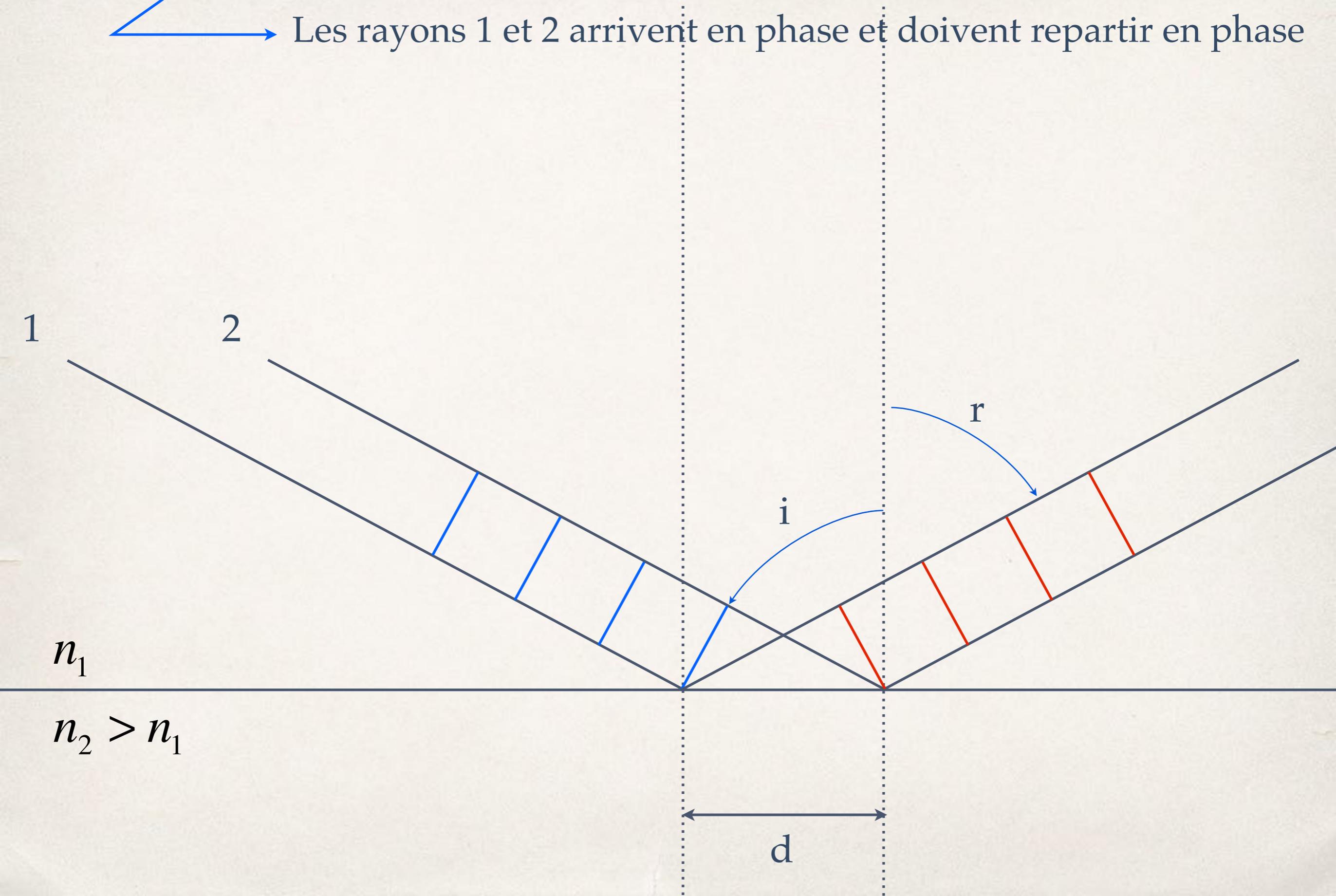
2 - Interprétation ondulatoire des lois de Descartes

On considère une onde plane arrivant sur un dioptre entre deux milieux d'indices respectifs n_1 et n_2 , sous une incidence i , un angle de réflexion r et de réfraction r' :



Interprétation ondulatoire de la loi de réflexion de Descartes

Les rayons 1 et 2 arrivent en phase et doivent repartir en phase

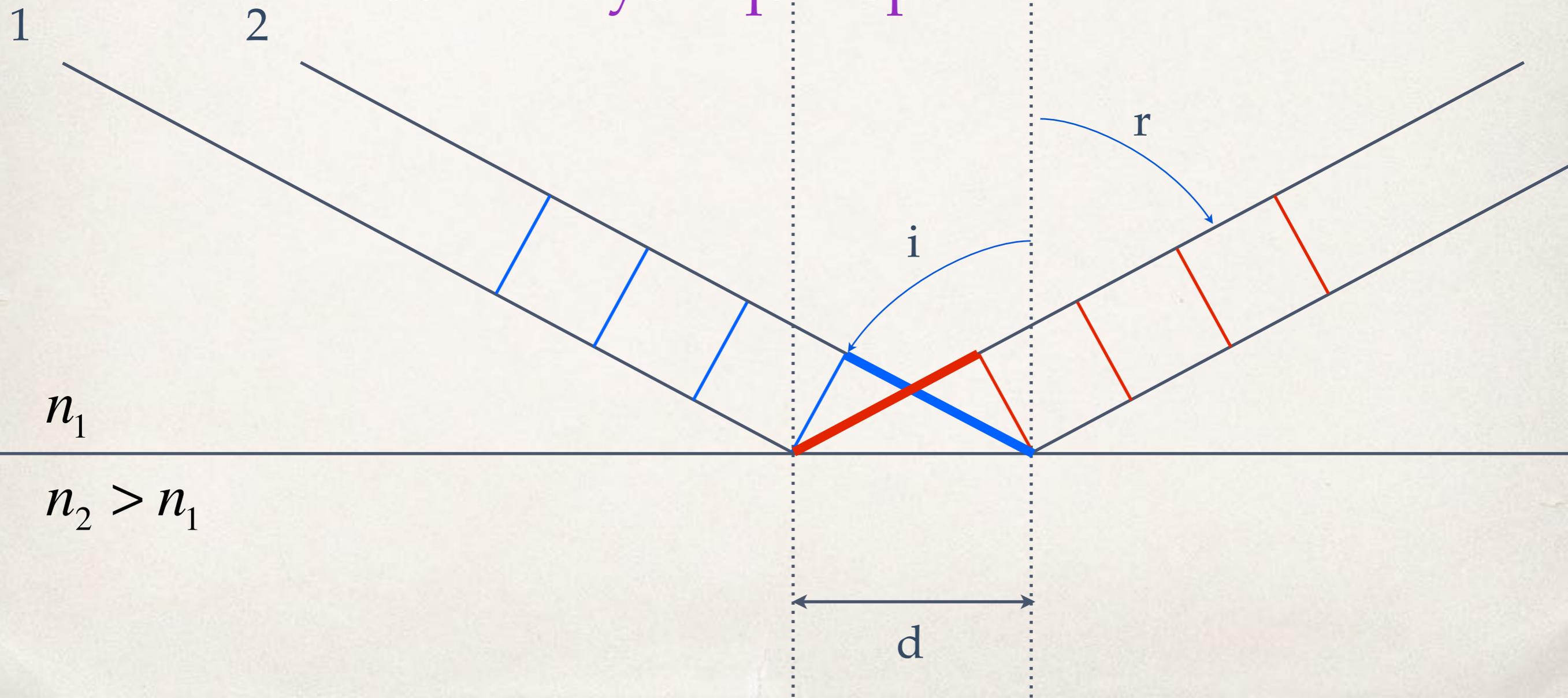


Interprétation ondulatoire de la loi de réflexion de Descartes

Les rayons 1 et 2 arrivent en phase et doivent repartir en phase

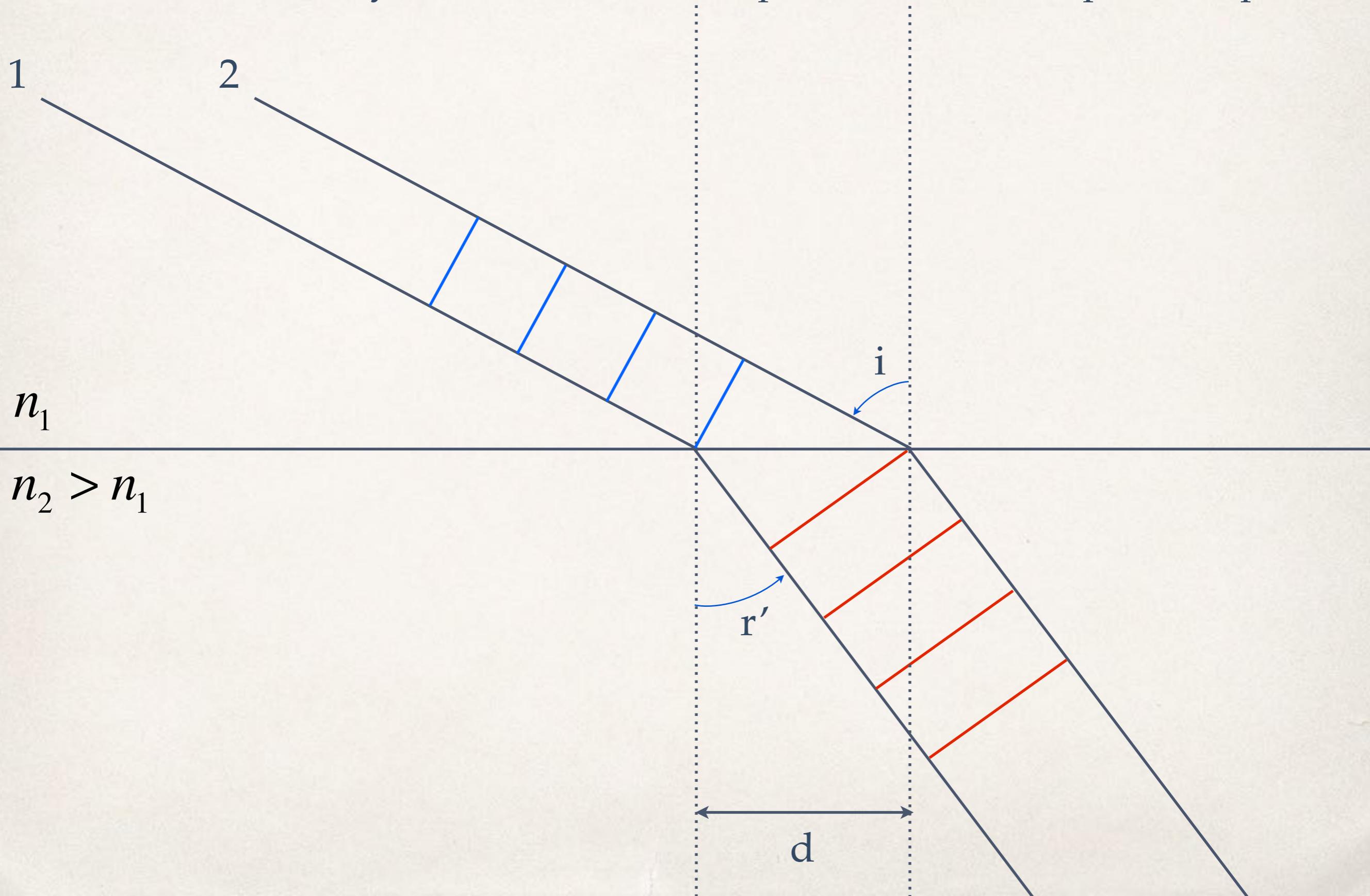
Calculer les distances rouge (d1) et bleu (d2)

Quelle condition imposer sur ces distances,
Pour le rayon qui repart ?



Interprétation ondulatoire de la loi de réfraction de Descartes

Les rayons 1 et 2 arrivent en phase et doivent repartir en phase



Interprétation ondulatoire de la loi de réfraction de Descartes

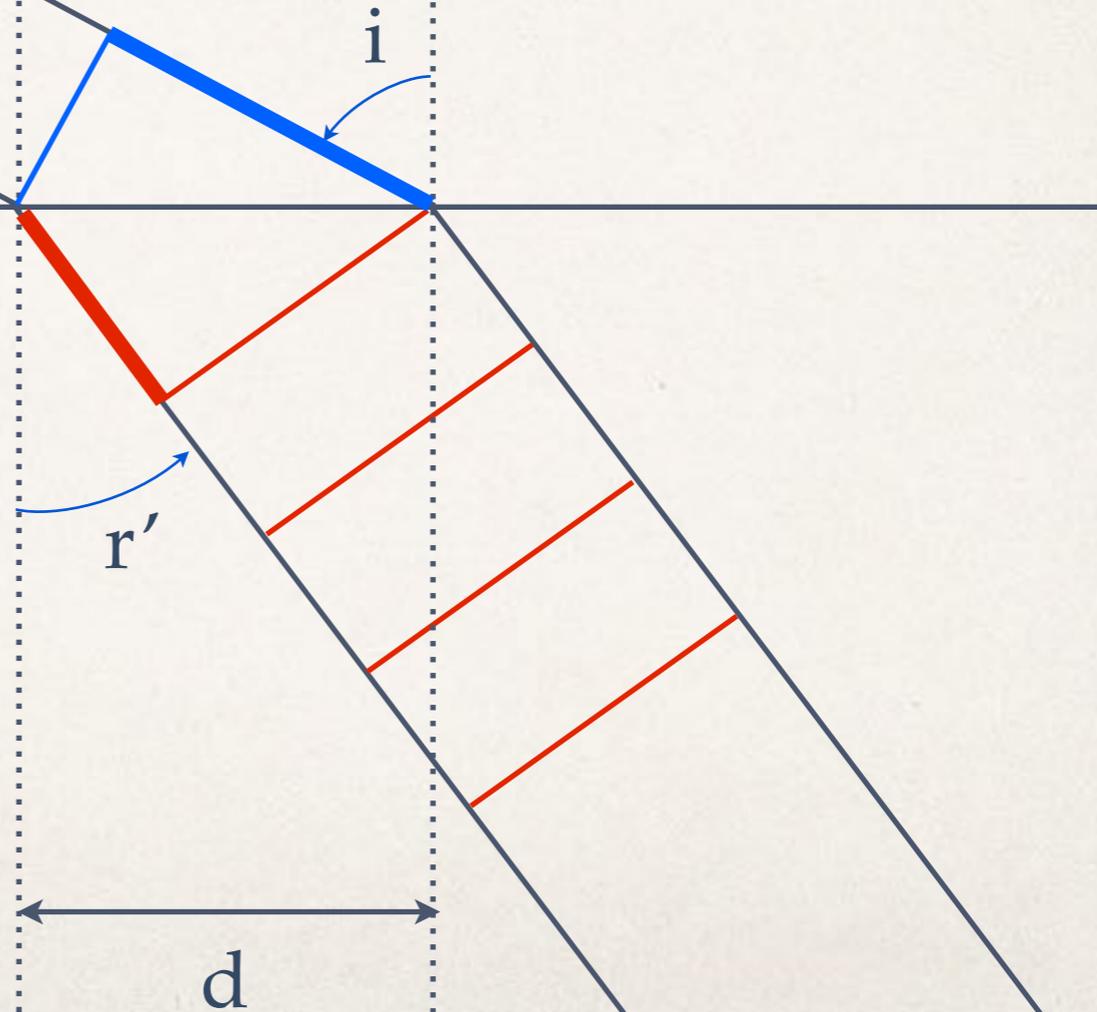
Les rayons 1 et 2 arrivent en phase et doivent repartir en phase

1 Calculer les distances rouge (d_1) et bleu (d_2)

Quelle condition imposer sur ces distances, Pour le rayon qui repart ?

n_1

$n_2 > n_1$



3 - Interférences à N ondes : le réseau en transmission

On considère un réseau de N-fentes parallèles et infiniment fines, séparées deux à deux d'une distance a :

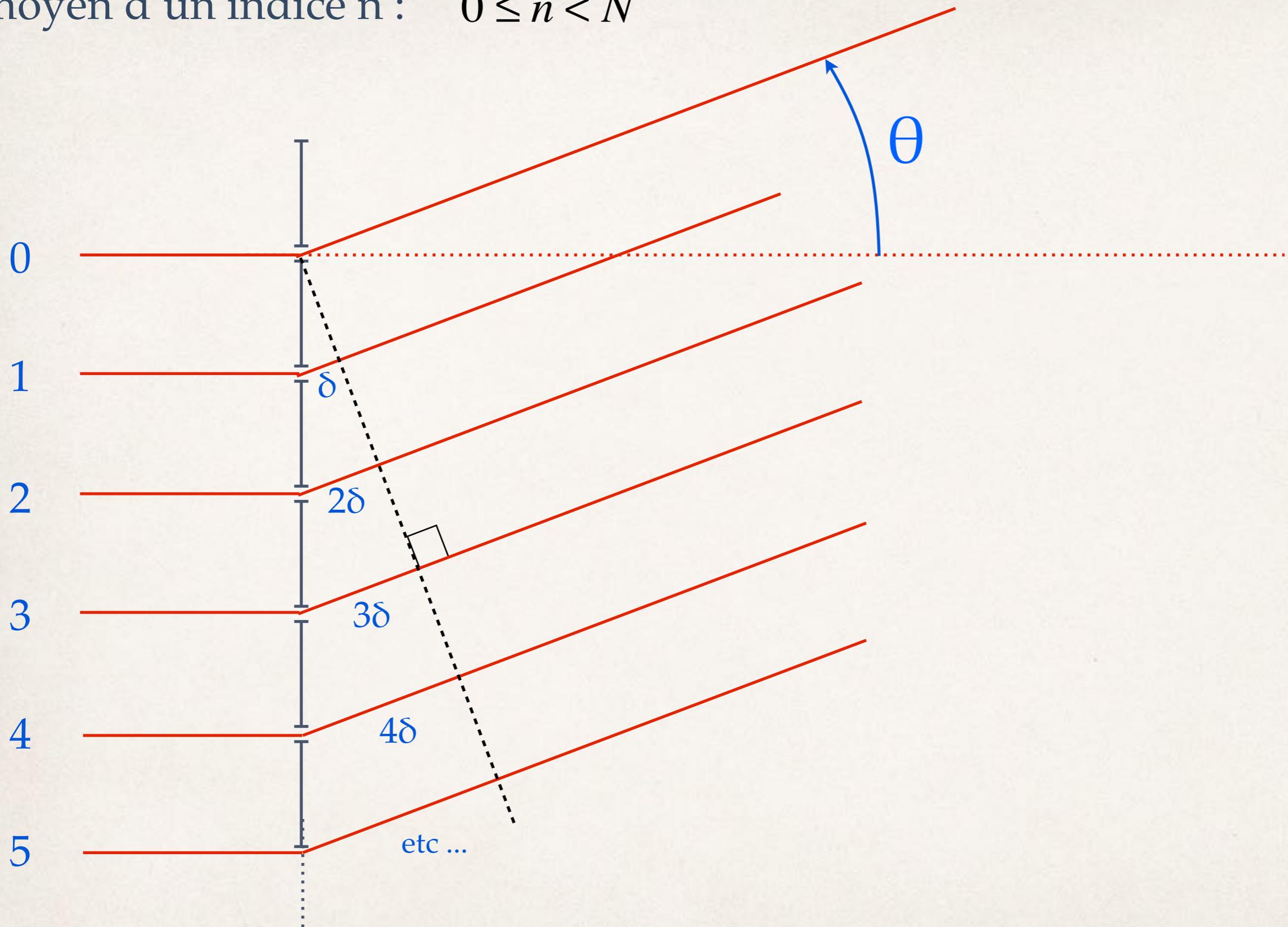


$N \gg 1$: ~ 1000 fentes / cm

[Obtenues par dépôt ou
photogravure sur du verre]

En classe

On introduit une fente source de référence, et on compte les autres au moyen d'un indice n : $0 \leq n < N$



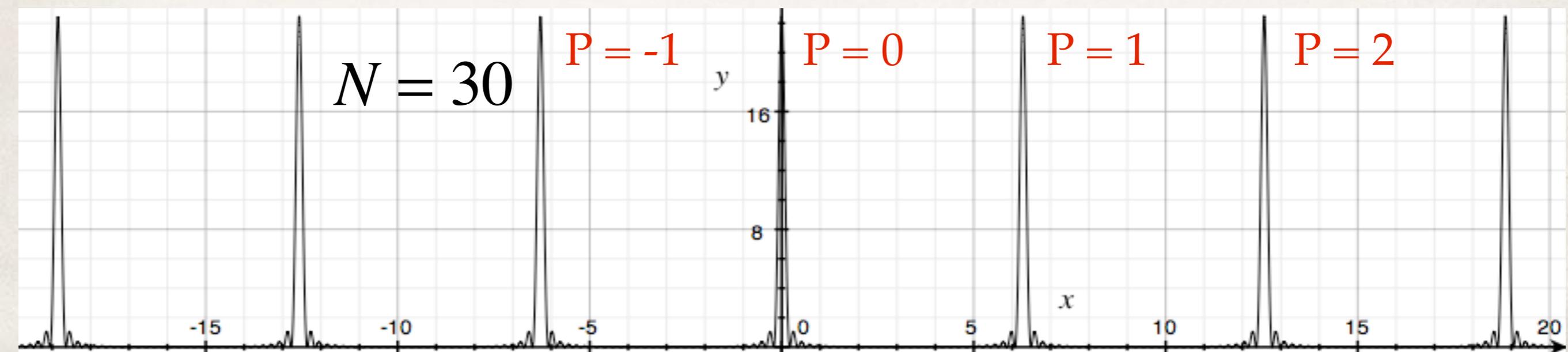
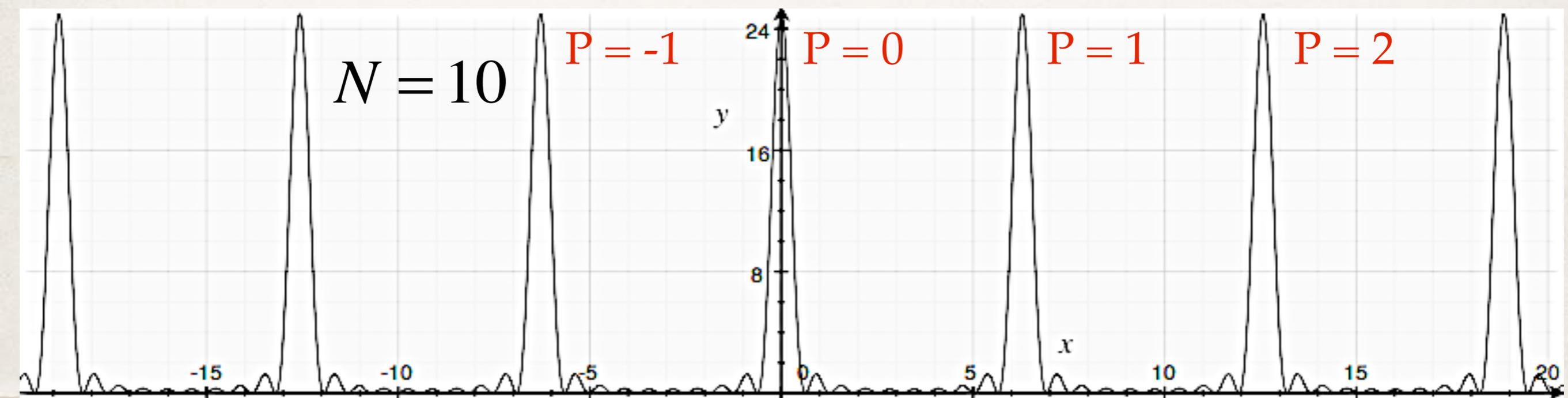
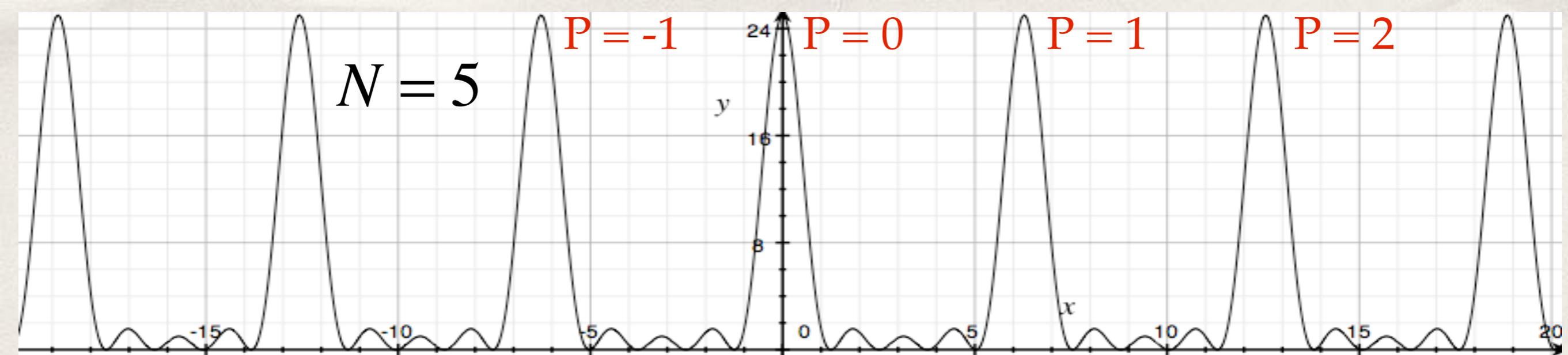
On envisage un angle de sortie θ des rayons :

Ordre d'interférence :

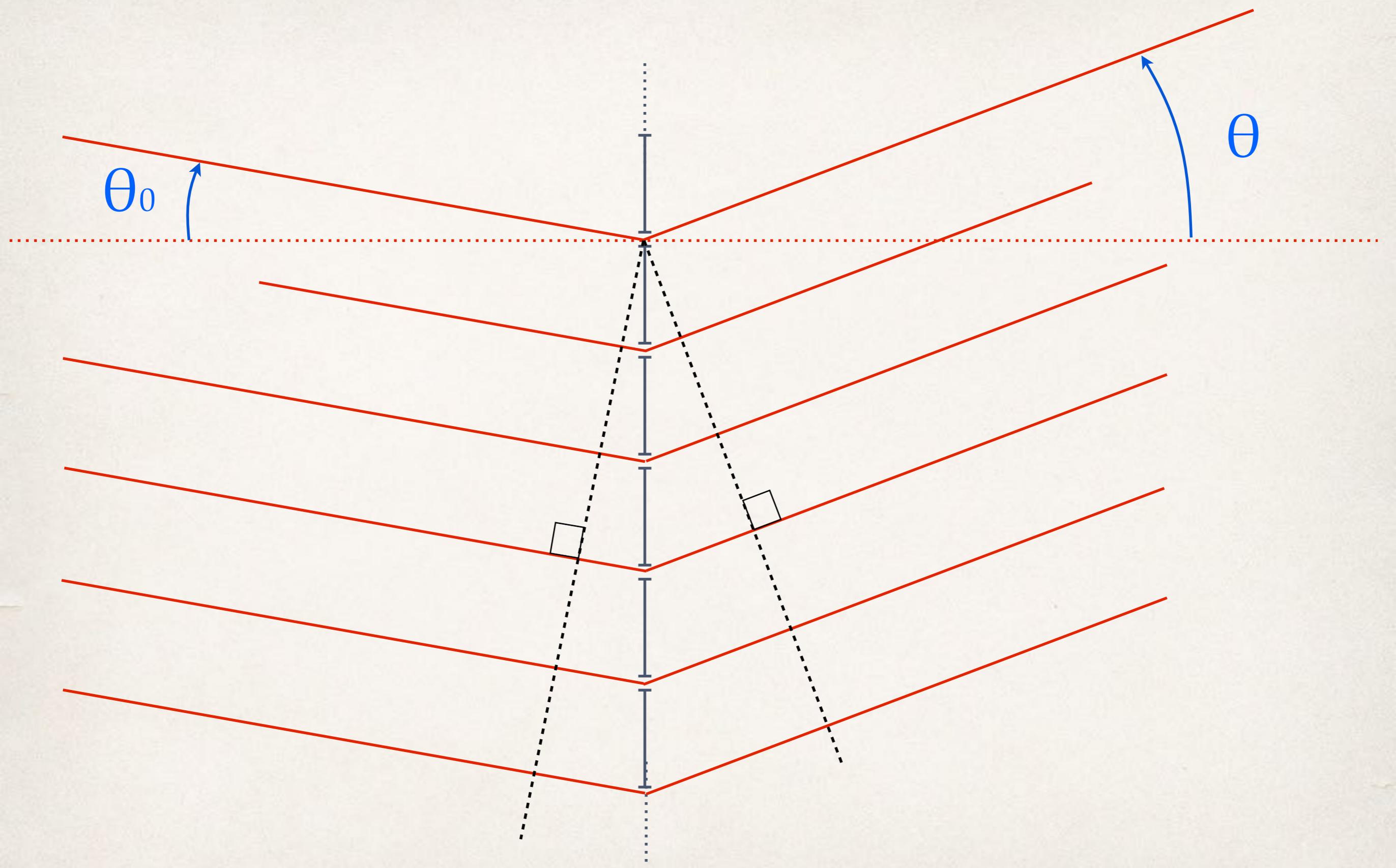
Quelle sera la nature de l'interférence dans la direction θ ?

Intensité fonction du déphasage :

$$I(\varphi)$$



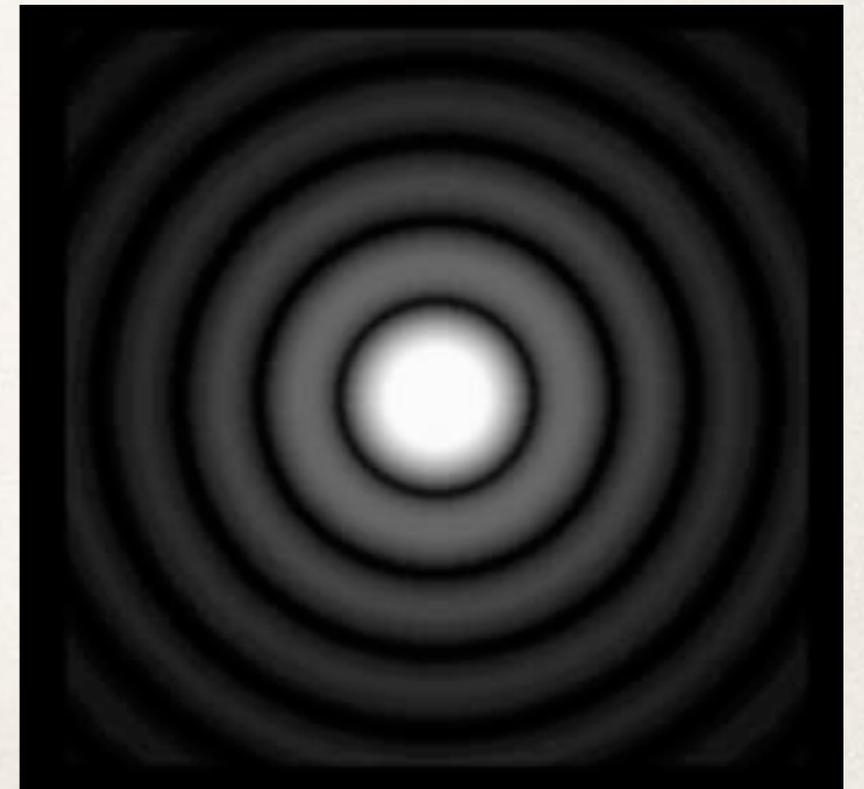
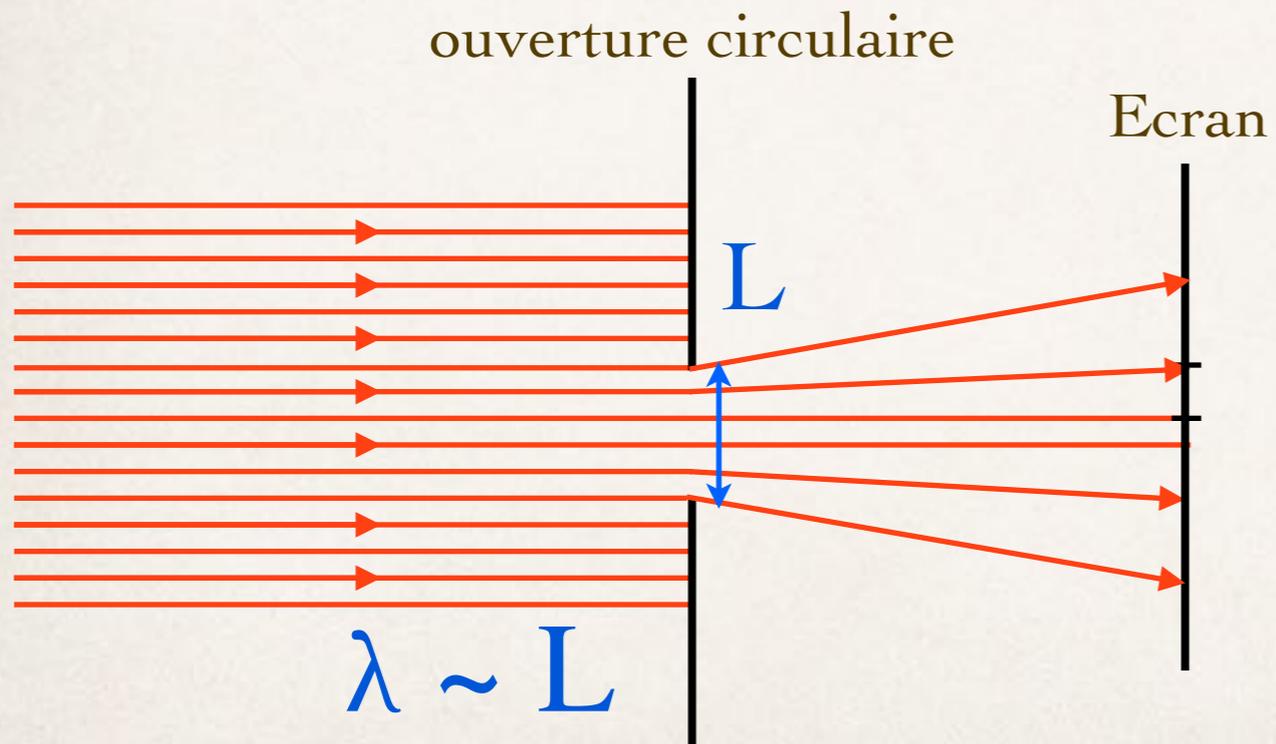
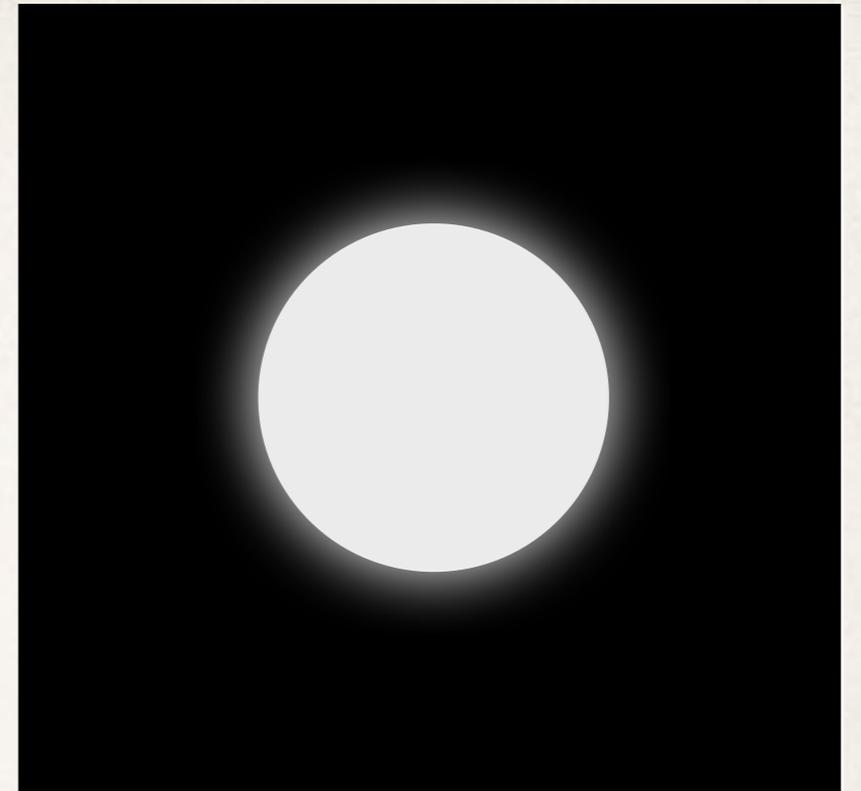
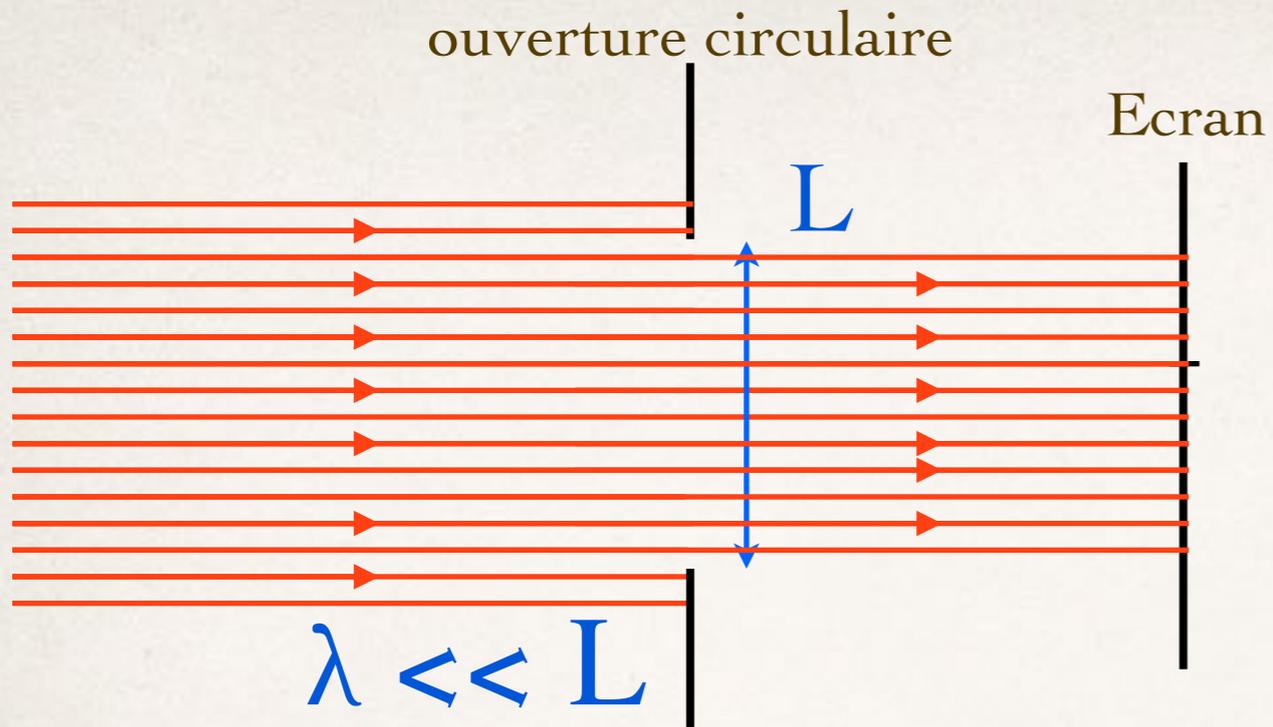
Généralisation : Formule des réseaux



2- DIFFRACTION OU OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

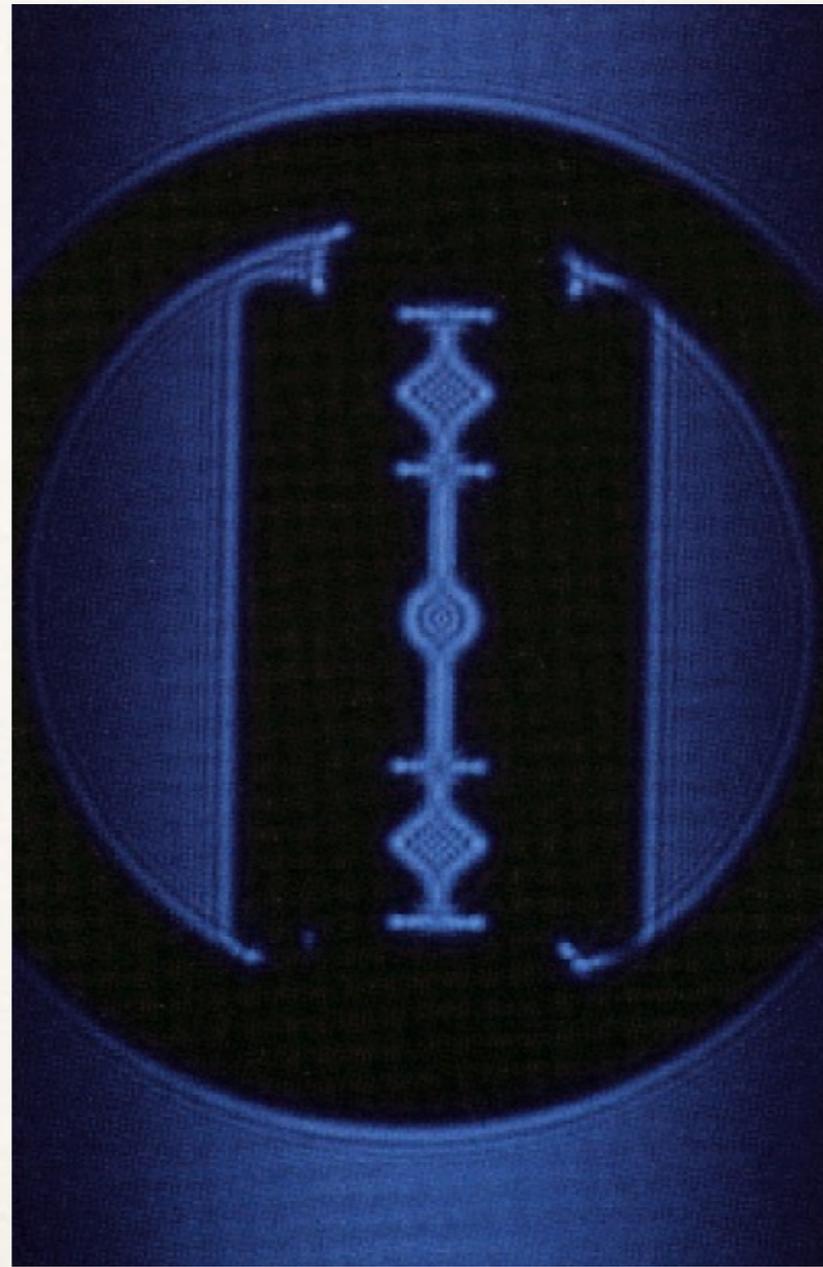
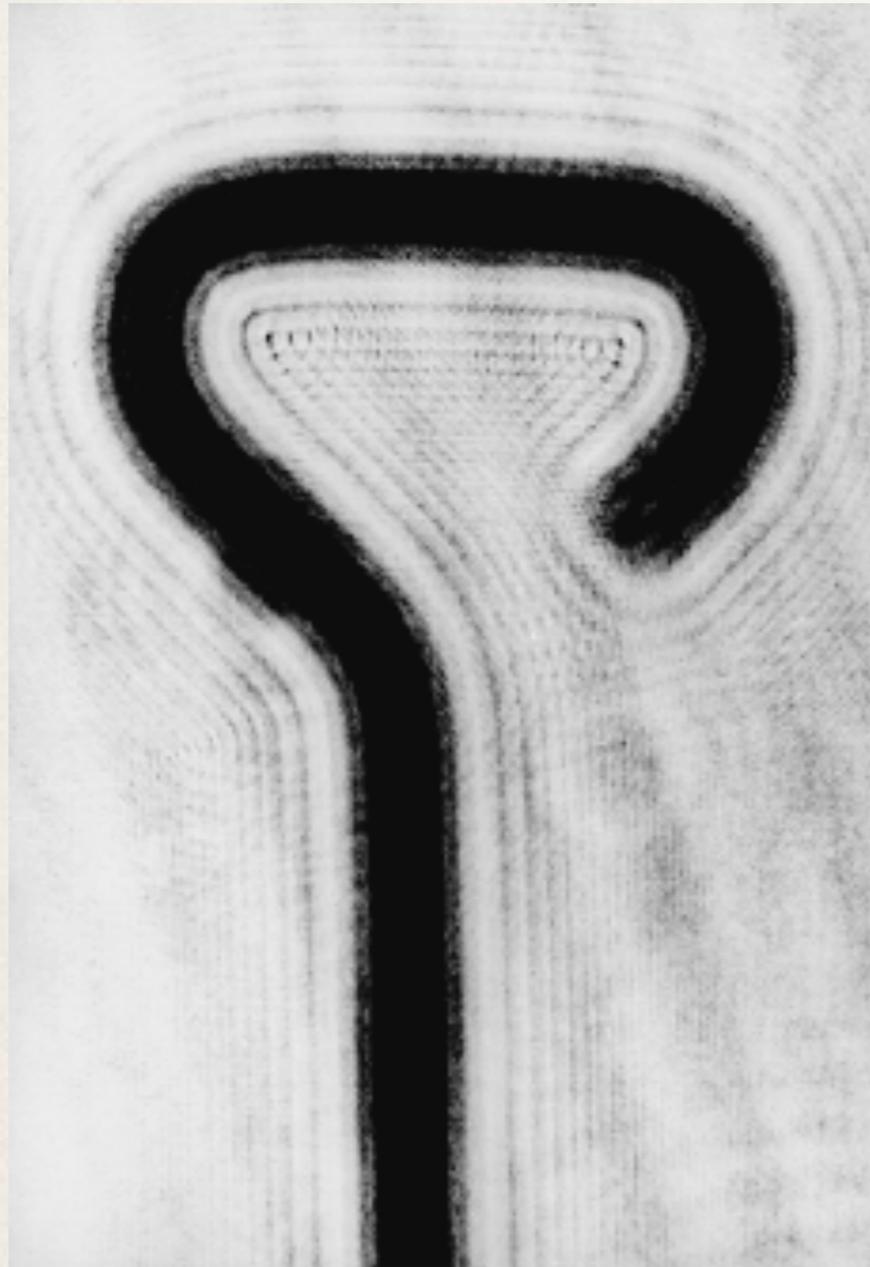
Expérience : Diffraction à travers une ouverture de taille variable

Optique Géométrique



Optique ondulatoire

Ombre d'une tête d'épingle et d'une lame de rasoir



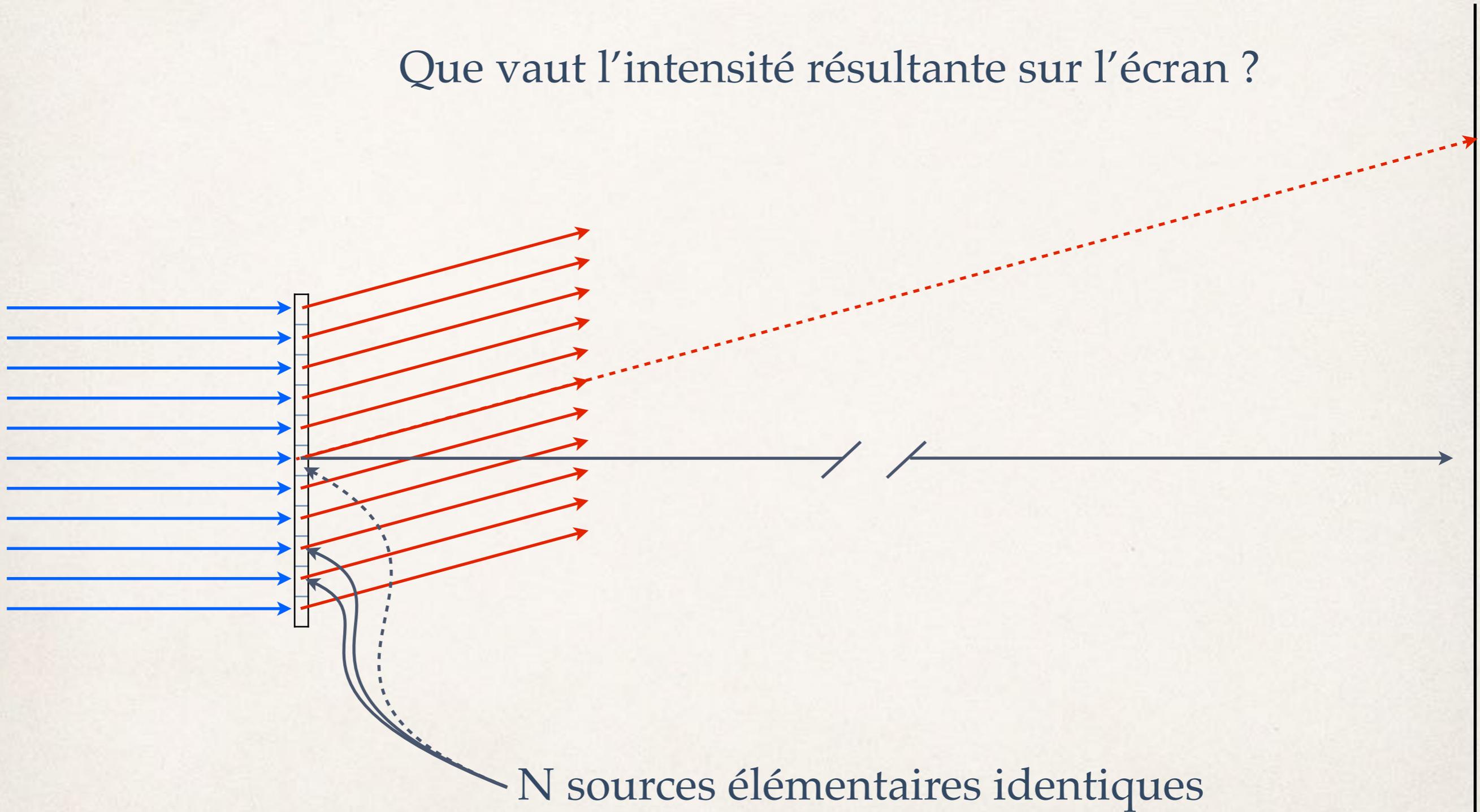
Augustin FRESNEL
1788-1827

L'intensité lumineuse varie à proximité du contour :
Diffraction de Fresnel due à la nature ondulatoire de la lumière.

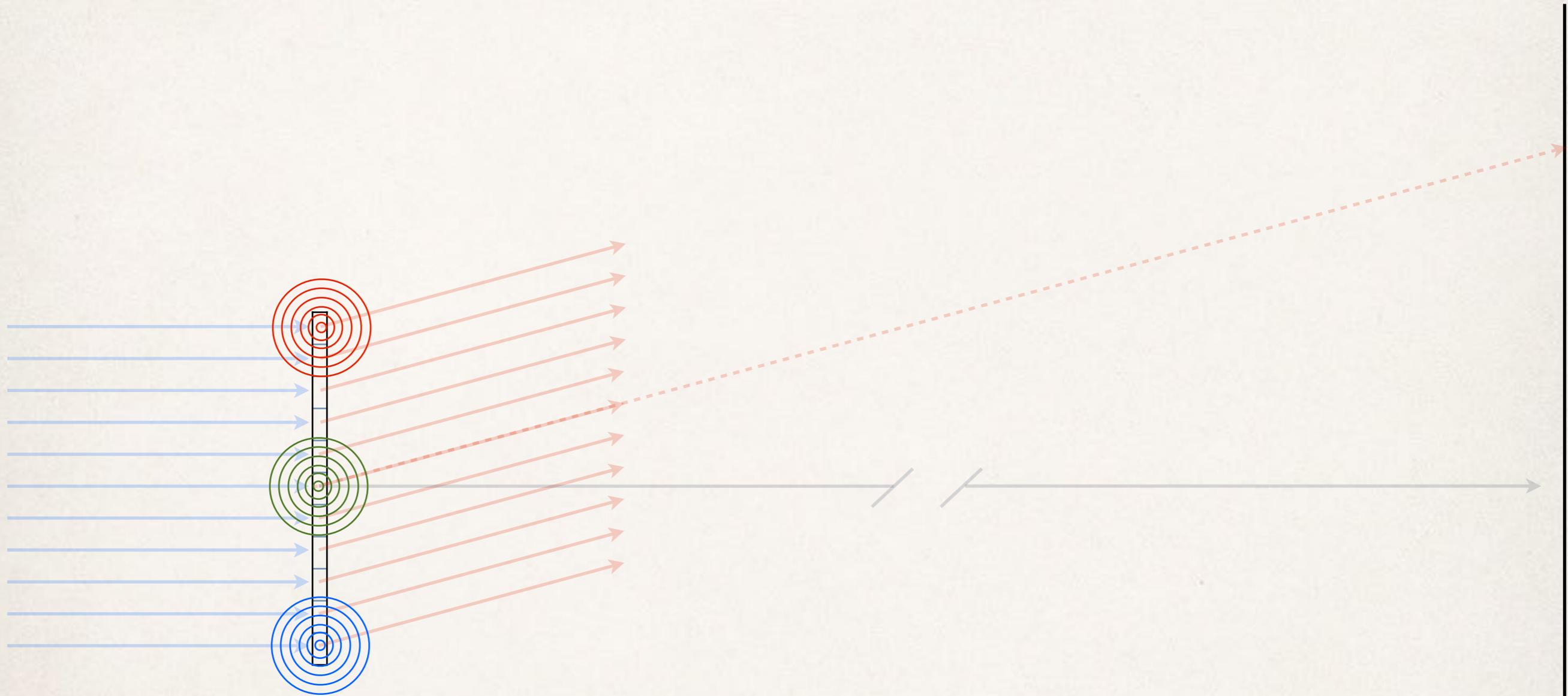
A l'origine de la diffraction il y a un phénomène d'interférence :

avec N ondes

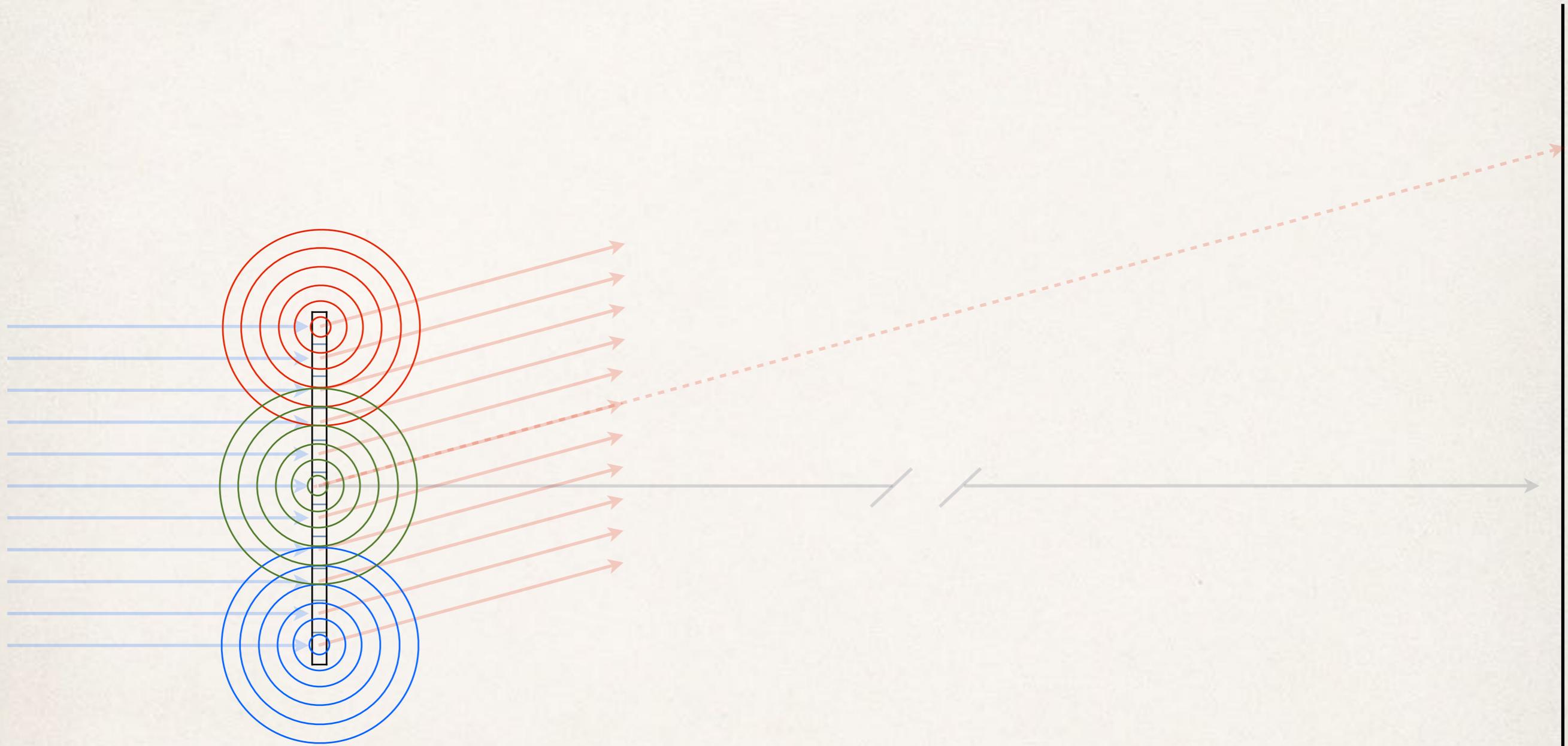
Que vaut l'intensité résultante sur l'écran ?



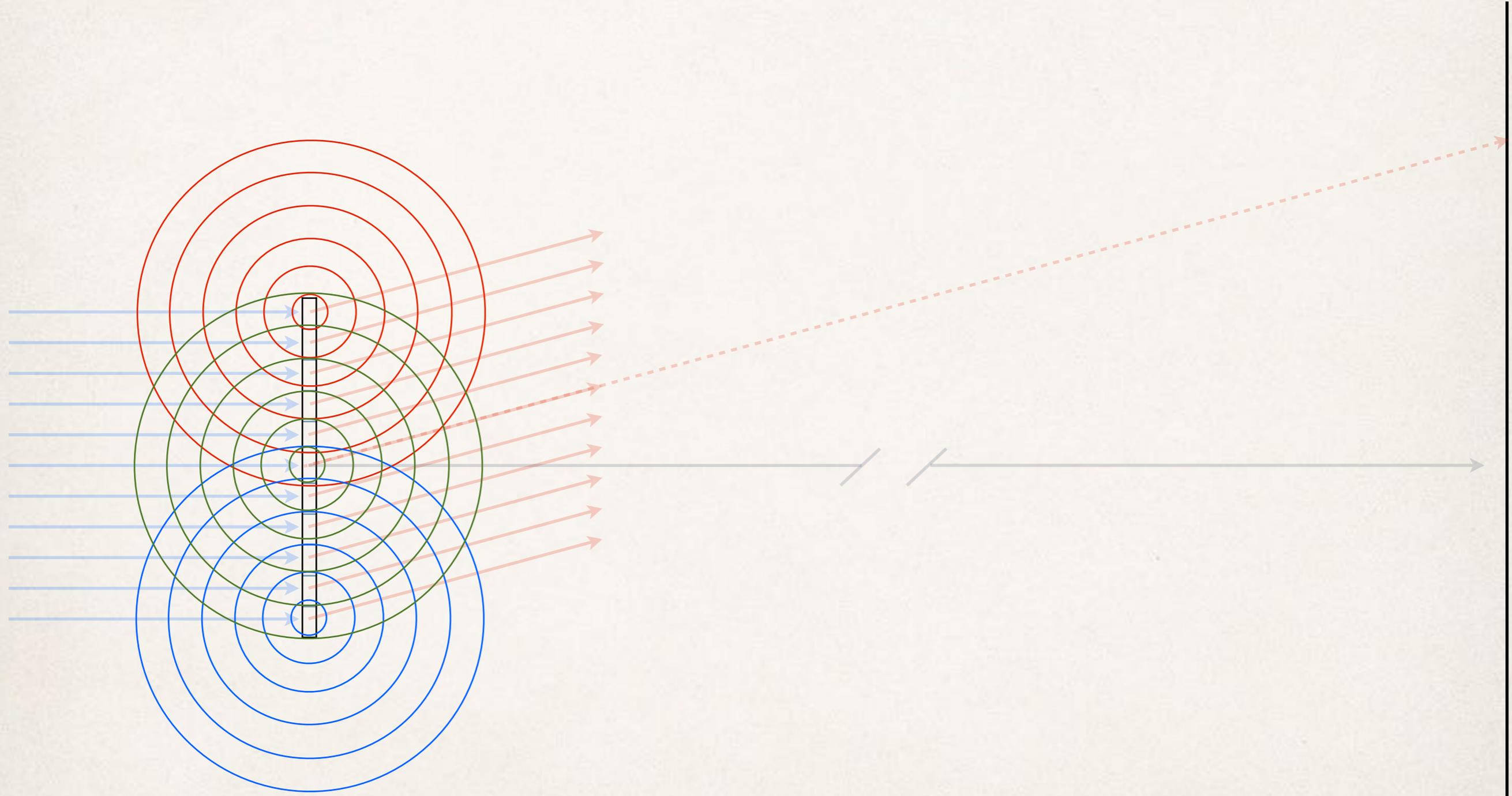
Chaque point source se comporte comme un émetteur ponctuelle sphérique



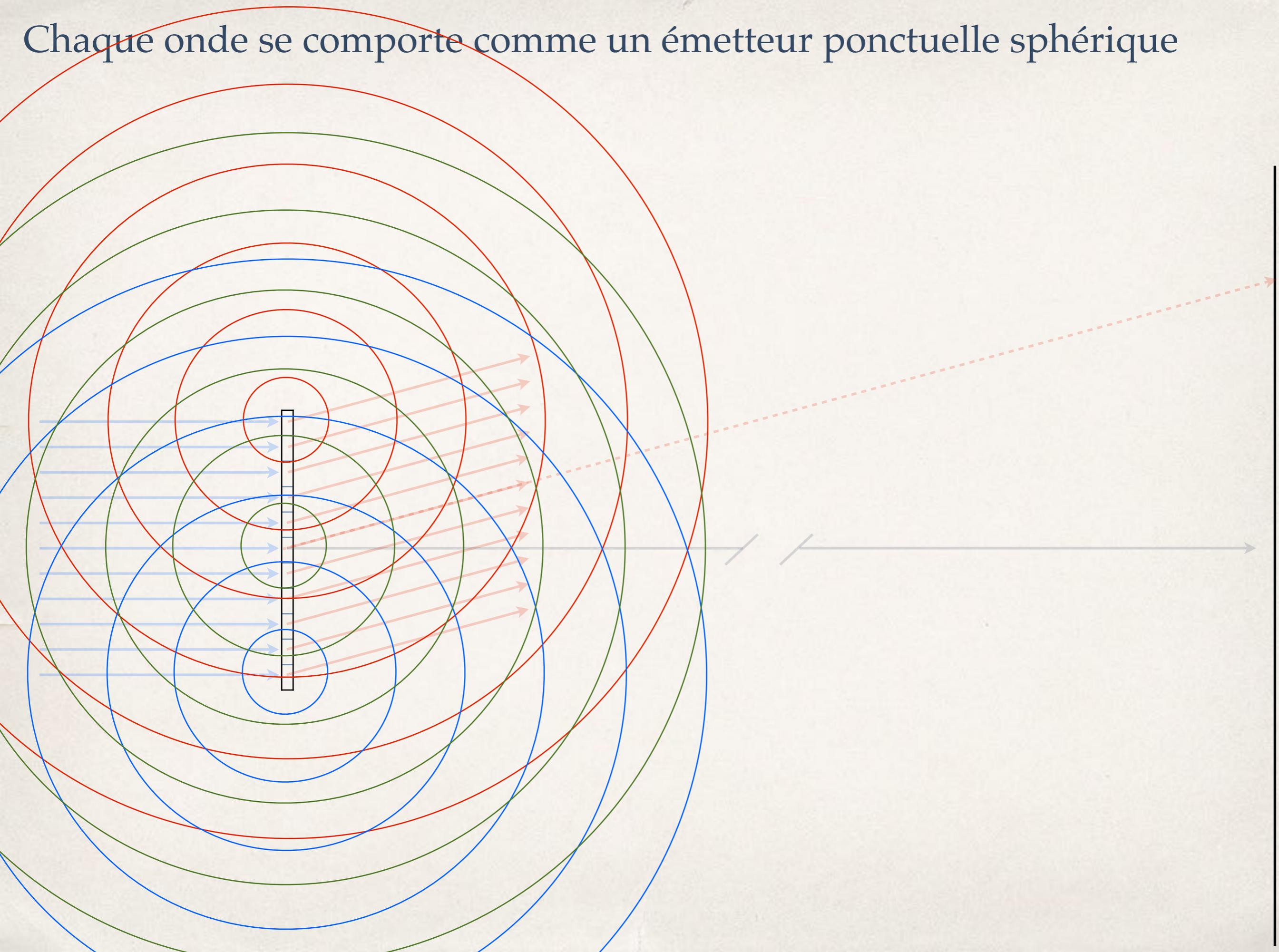
Chaque onde se comporte comme un émetteur ponctuelle sphérique

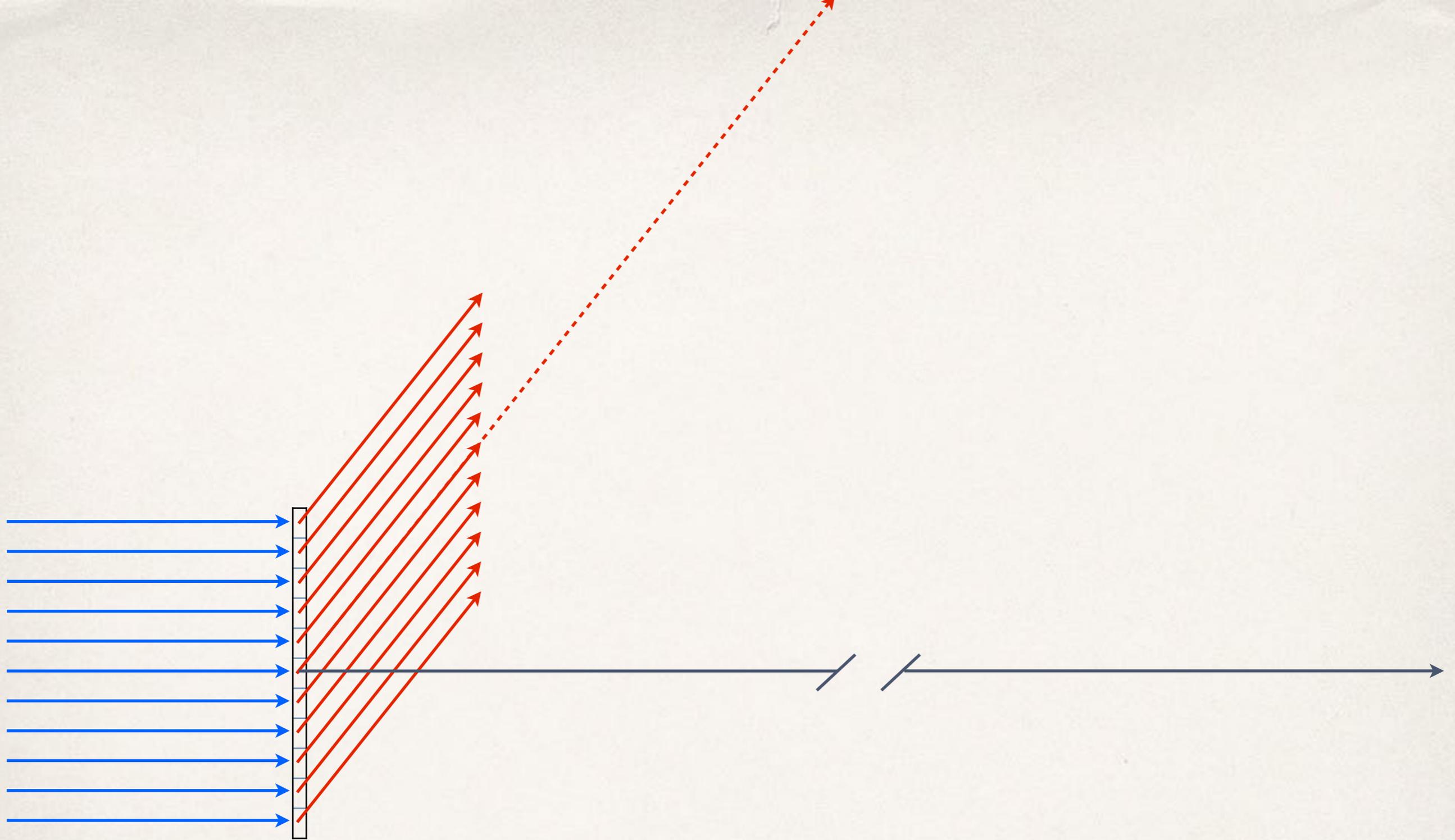


Chaque onde se comporte comme un émetteur ponctuelle sphérique

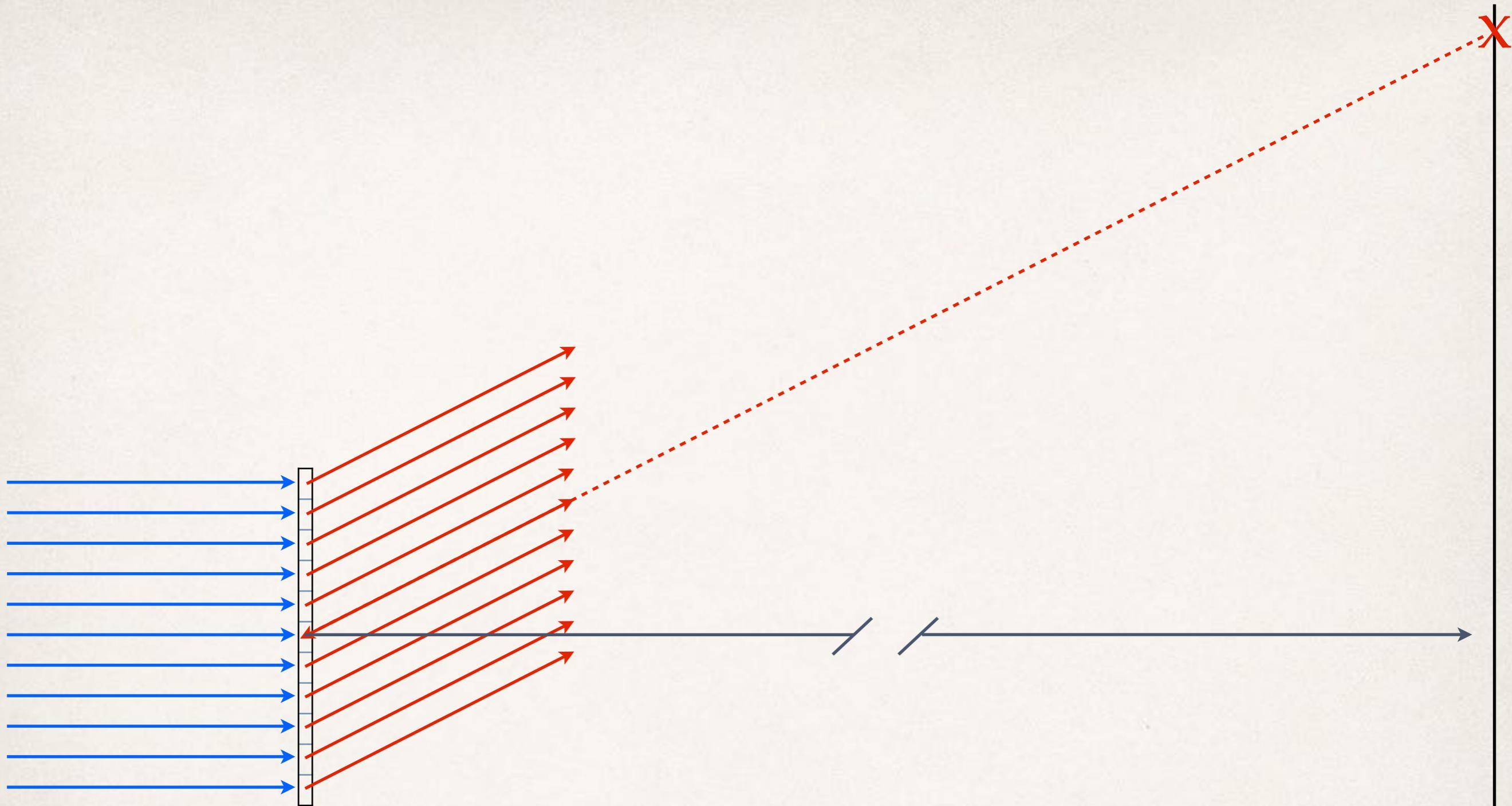


Chaque onde se comporte comme un émetteur ponctuelle sphérique

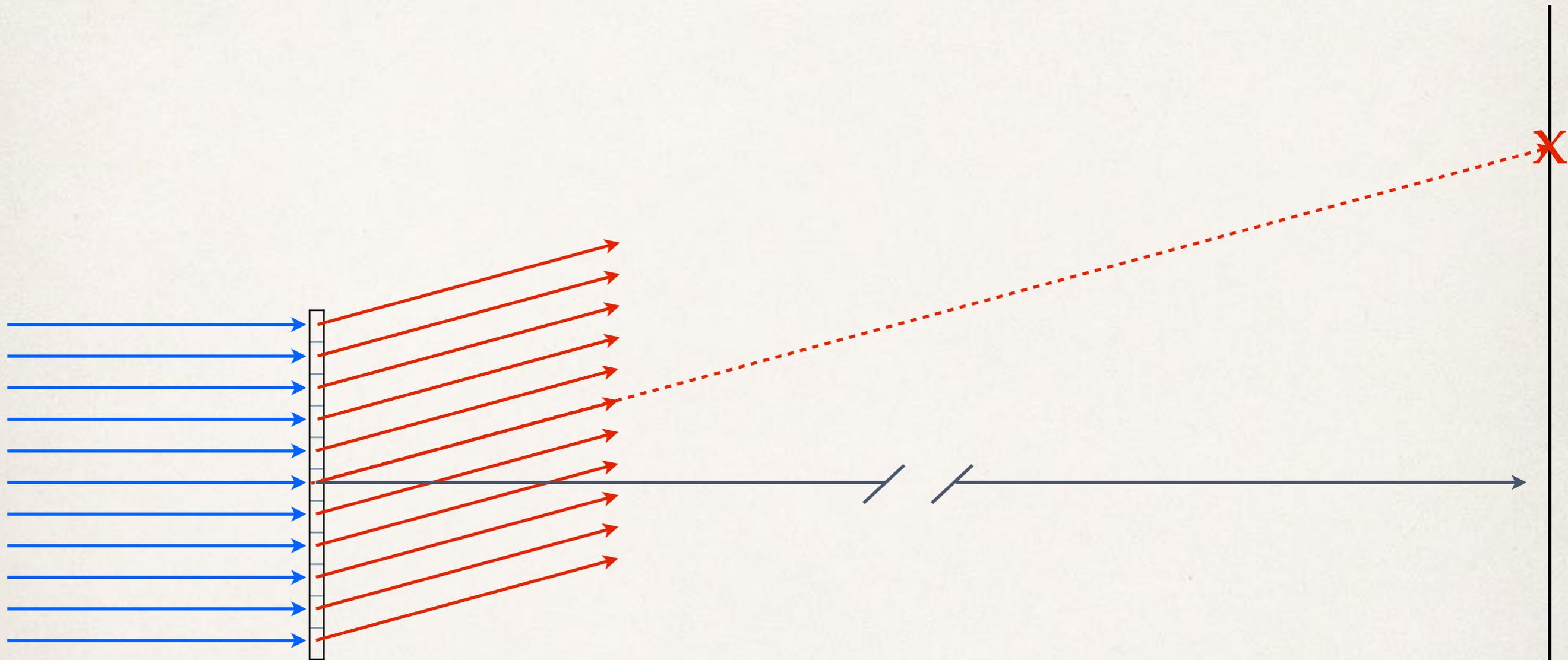




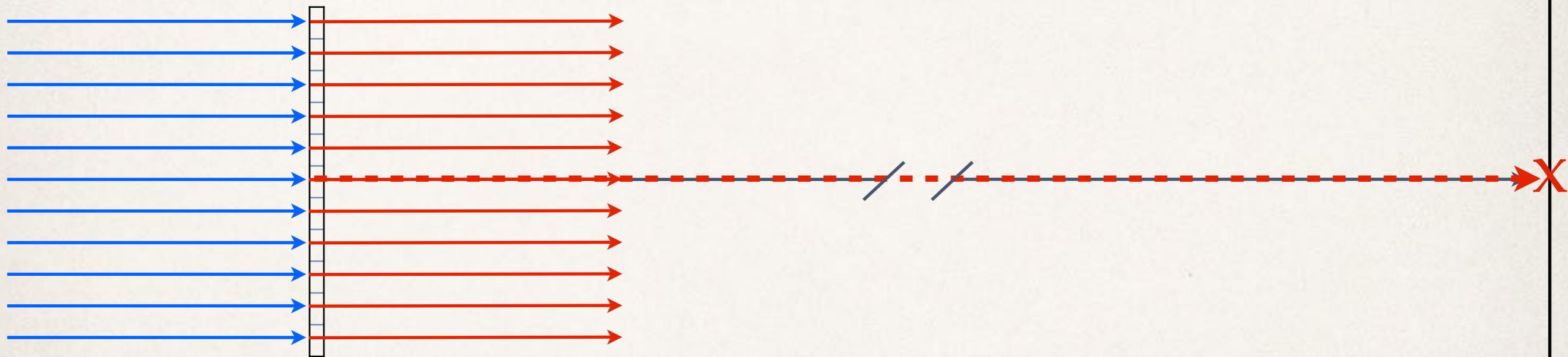
Que vaut l'intensité résultante sur l'écran,
en fonction de la position ?



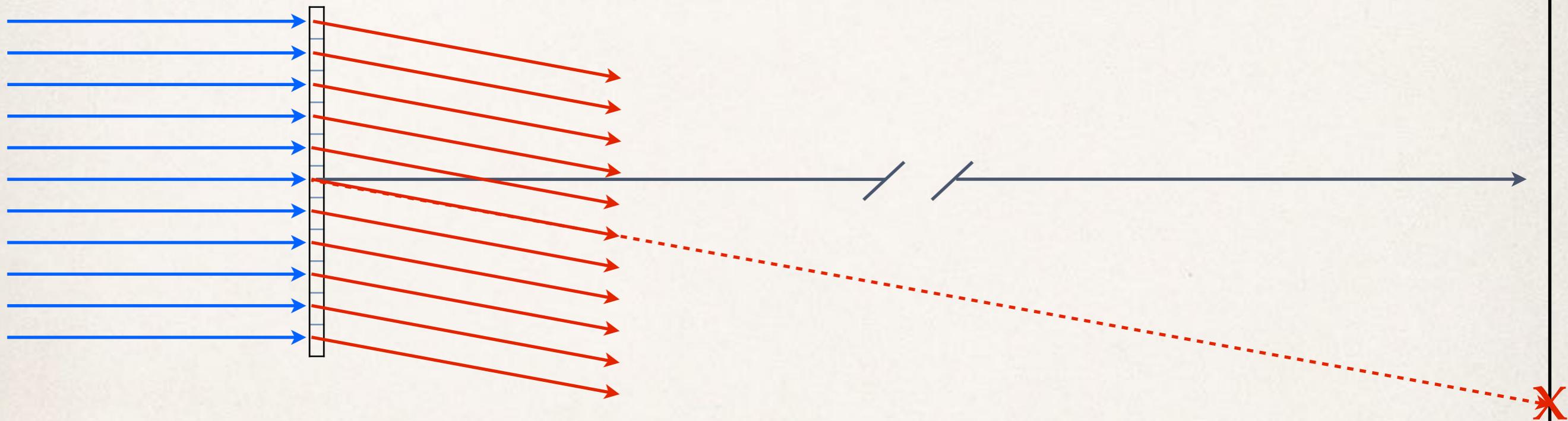
Que vaut l'intensité résultante sur l'écran,
en fonction de la position ?



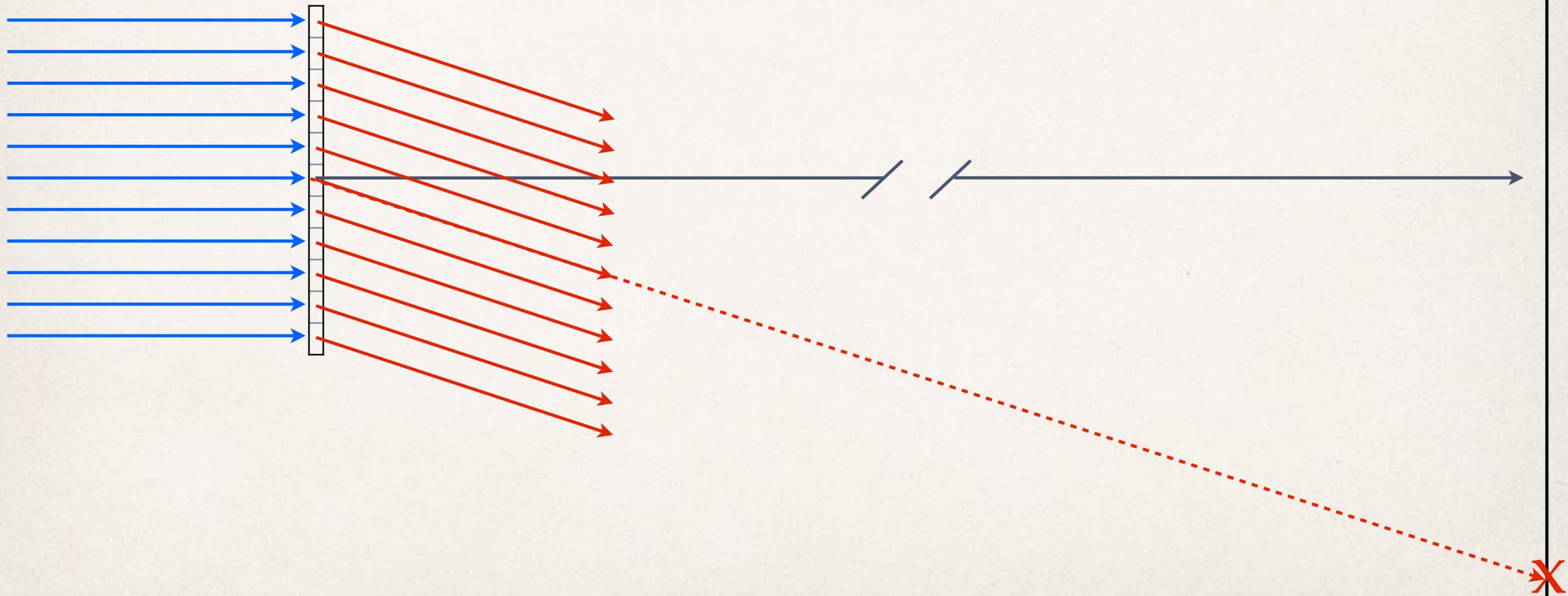
Que vaut l'intensité résultante sur l'écran,
en fonction de la position ?

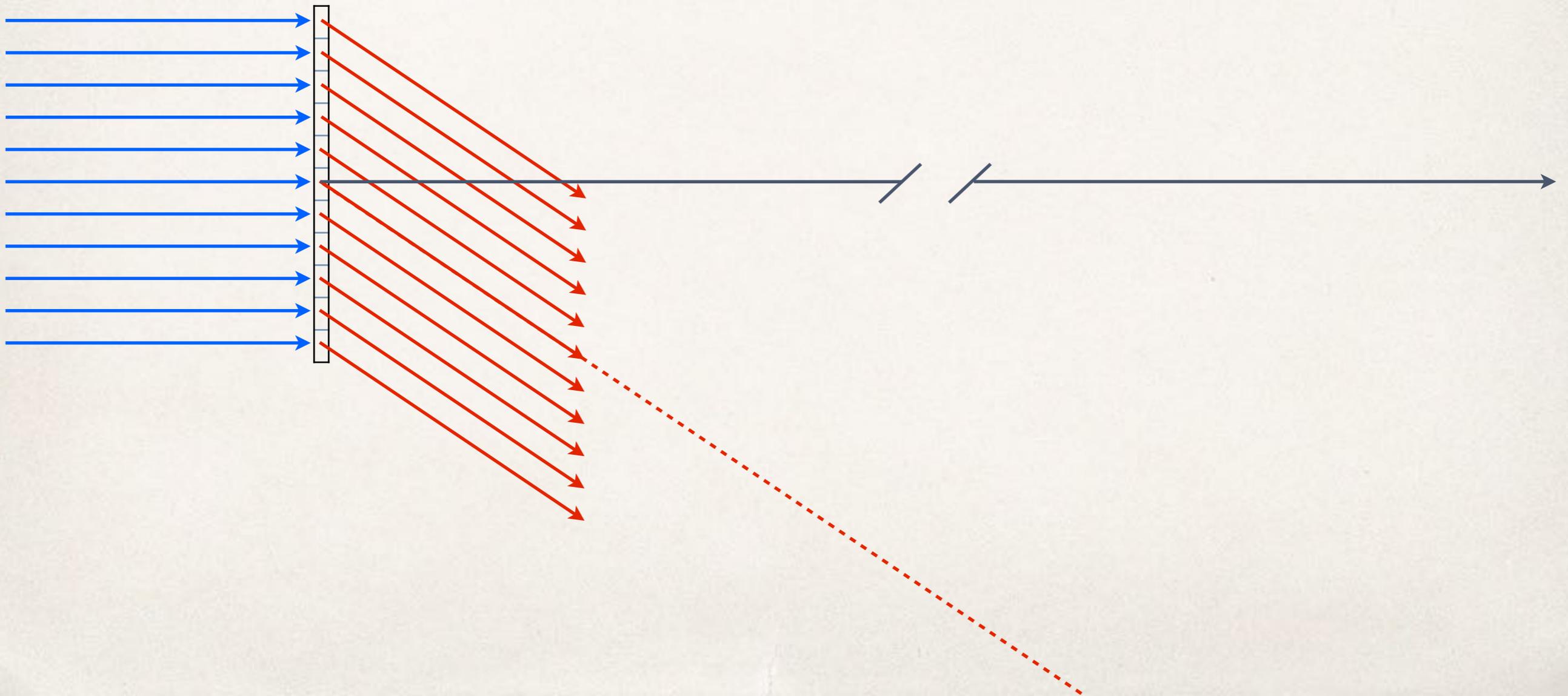


Que vaut l'intensité résultante sur l'écran,
en fonction de la position ?



Que vaut l'intensité résultante sur l'écran,
en fonction de la position ?

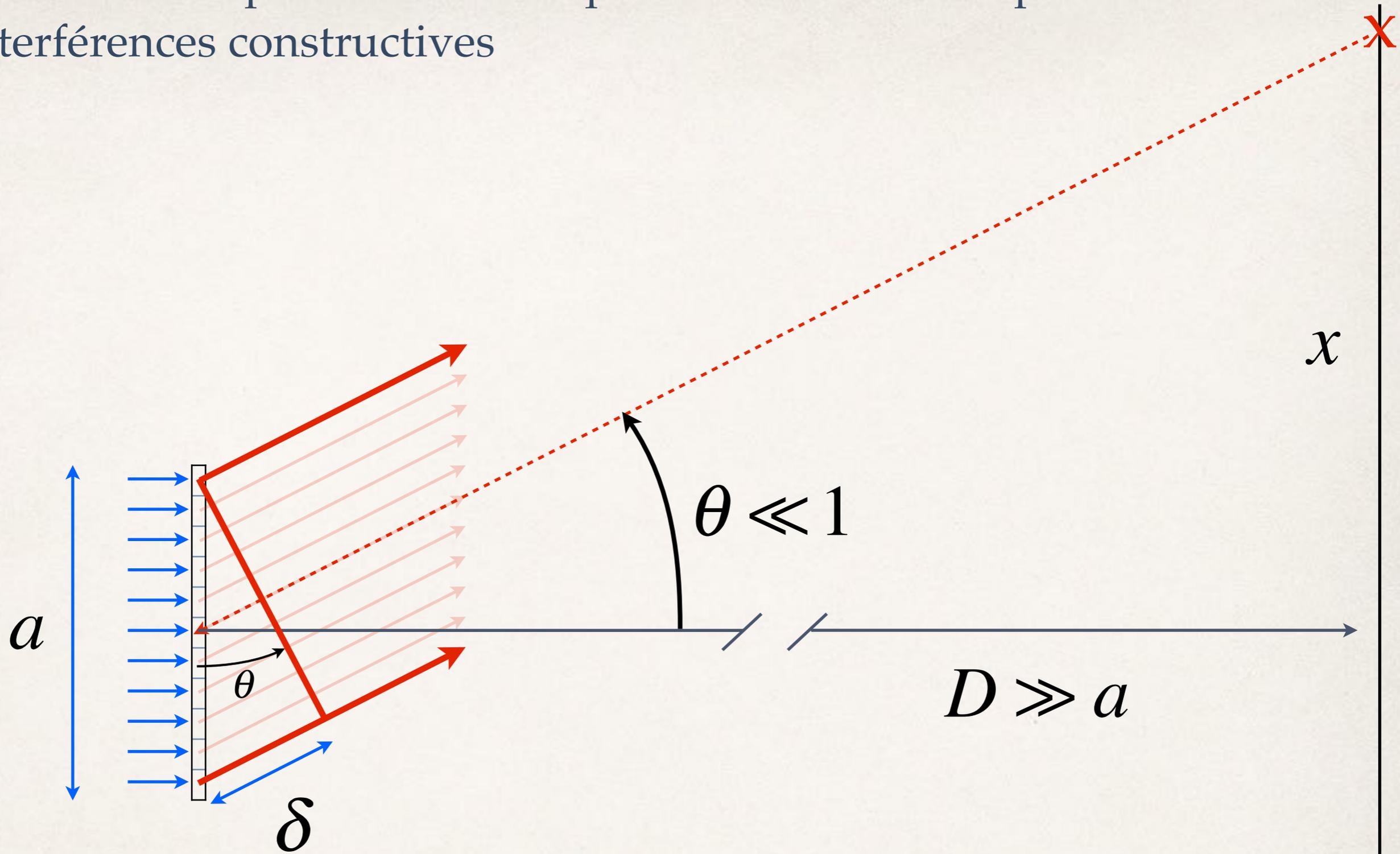






On aura d'autant plus de lumière que les ondes sont en phase :

--> Interférences constructives



$$\delta =$$

Un critère qualitatif simple va nous permettre de dégager l'essence du phénomène et l'ordre de grandeur de l'interfrange :

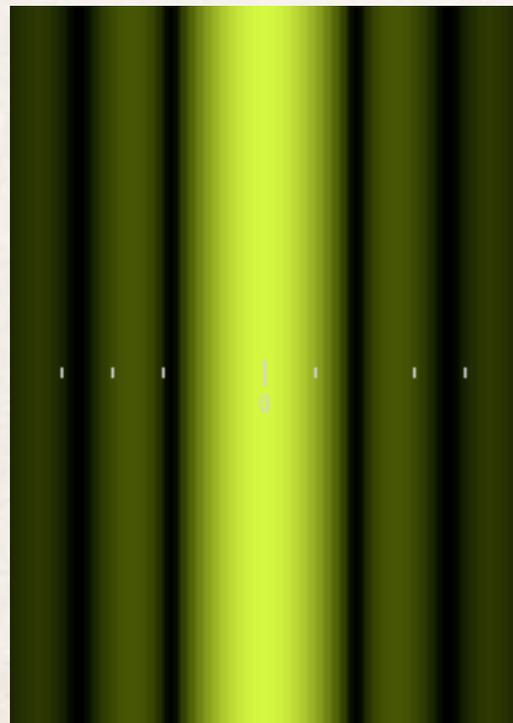
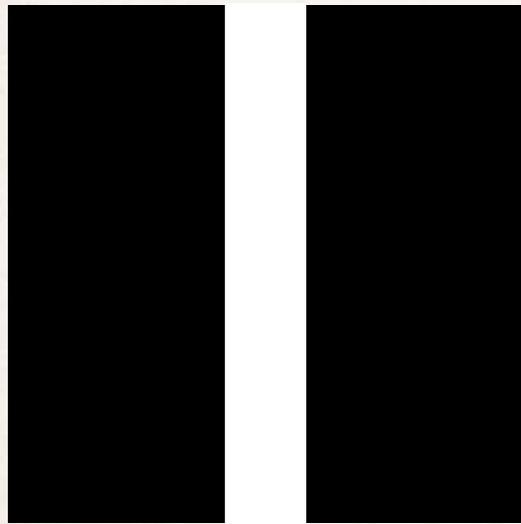
- Si le déphasage entre les deux points extrêmes est inférieur à une demi longueur d'onde, tous les émetteurs sont globalement en phase

- Si le déphasage entre les deux points extrêmes atteint une longueur d'onde, les émetteurs sont globalement déphasés

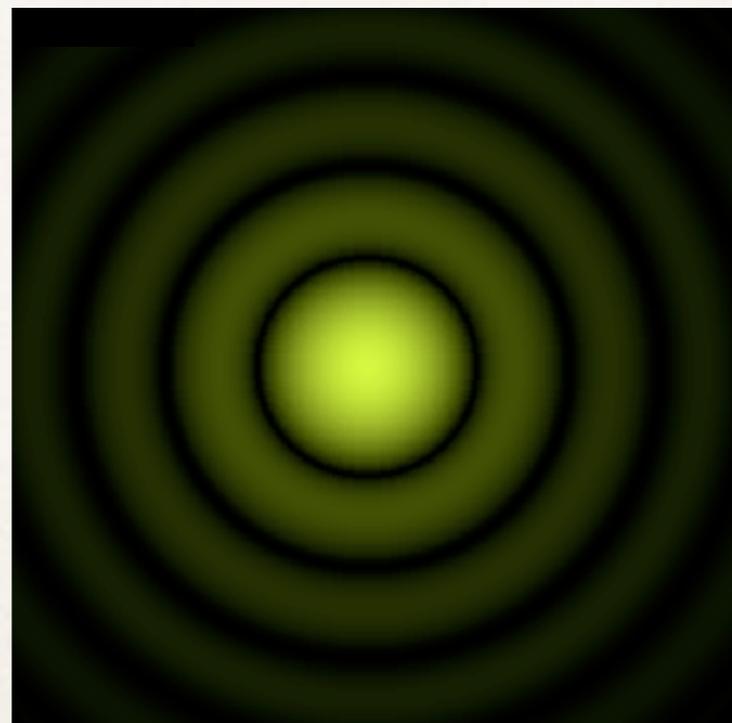
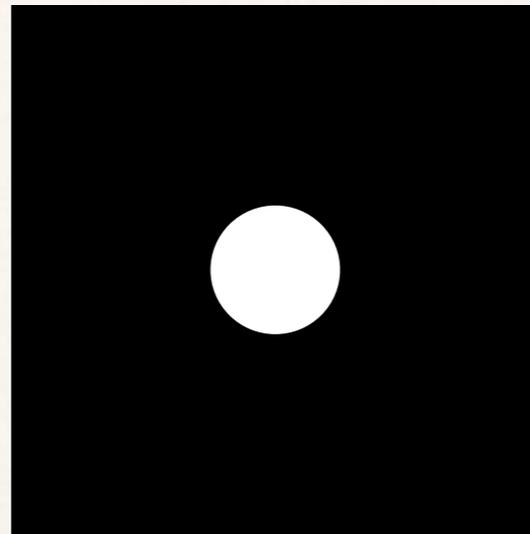
Taille angulaire de la tâche de diffraction centrale :

Diffraction

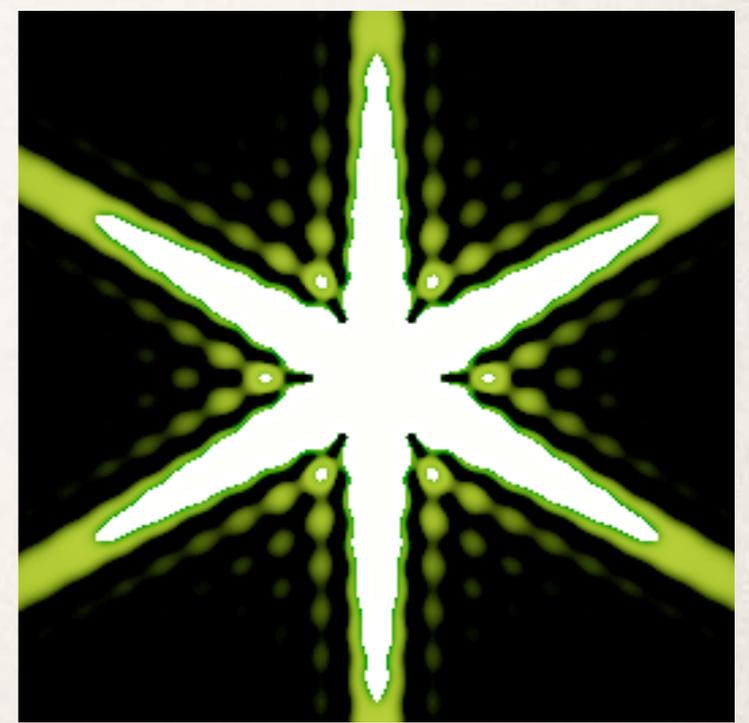
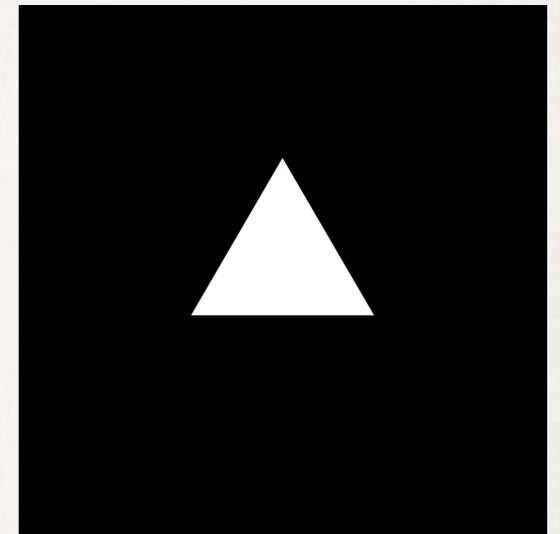
La loi donnant la taille de la tâche de diffraction est la même pour toutes les formes de diaphragme et les ODG sont identiques. Seule le préfacteur α dit «facteur géométrique» change, mais sa valeur reste toujours de l'ordre de 1 :



$$\theta = \frac{2\lambda}{a}$$



$$\theta = 2.44 \frac{\lambda}{a}$$

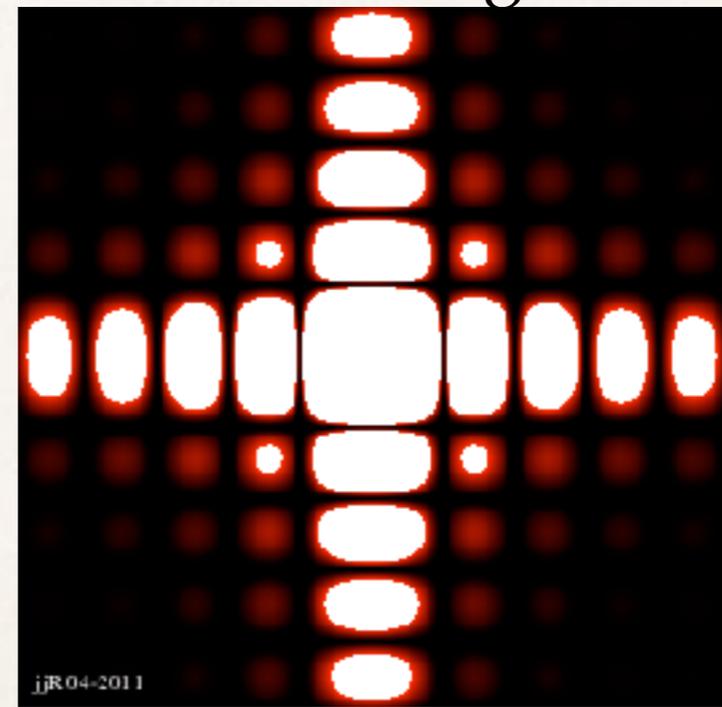


$$\theta \approx 0.3 \frac{\lambda}{a}$$

Photo sans rideau



Photo à travers un rideau
à maille rectangulaire



Tâche de diffraction

Expérience à faire directement «à l'oeil» : bien meilleure résolution !!!