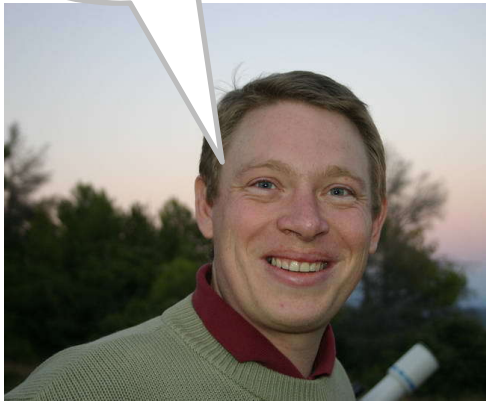


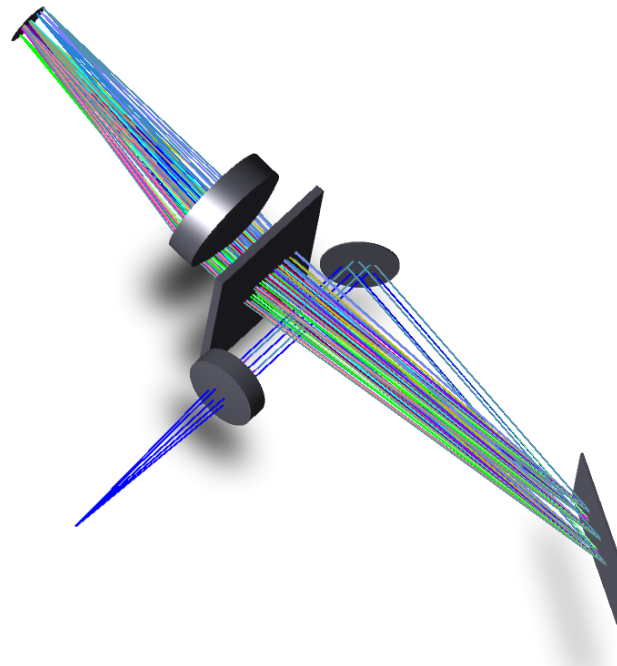
Principes de conception d'un spectrographe Echelle

2014

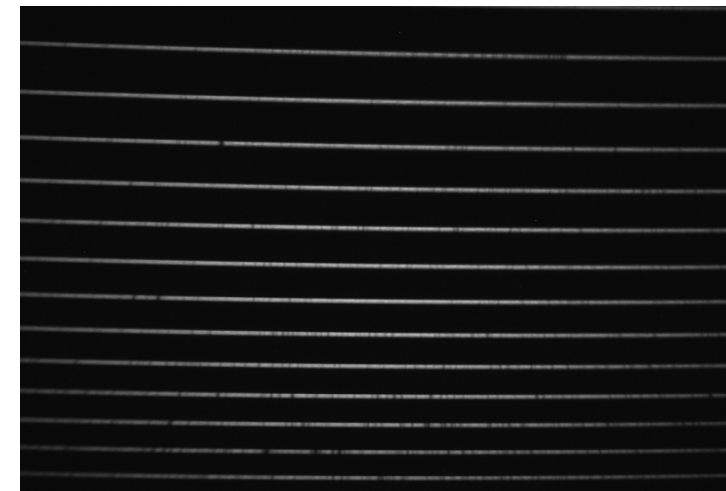
Pierre, I have a dream...



2015



2016



P. Valvin - Atelier Pulsantes - OHP, le 21 Mai 2016



- **Comprendre le réseau échelle**

Huygens, Young à 2, Young à N, blaze

- **Autour du réseau**

Collimation, dispersion croisée, objectif de chambre, pupille blanche

- **Couplage au télescope (fibrage)**

FRD, adaptation d'ouverture, slicing

- **Dimensionnement**

Choix du réseau, calcul des focales, apex, inter-ordres

- **Etude d'un cas**

Dimensionnement et optimisation



Chapitre 1

Comprendre le réseau échelle



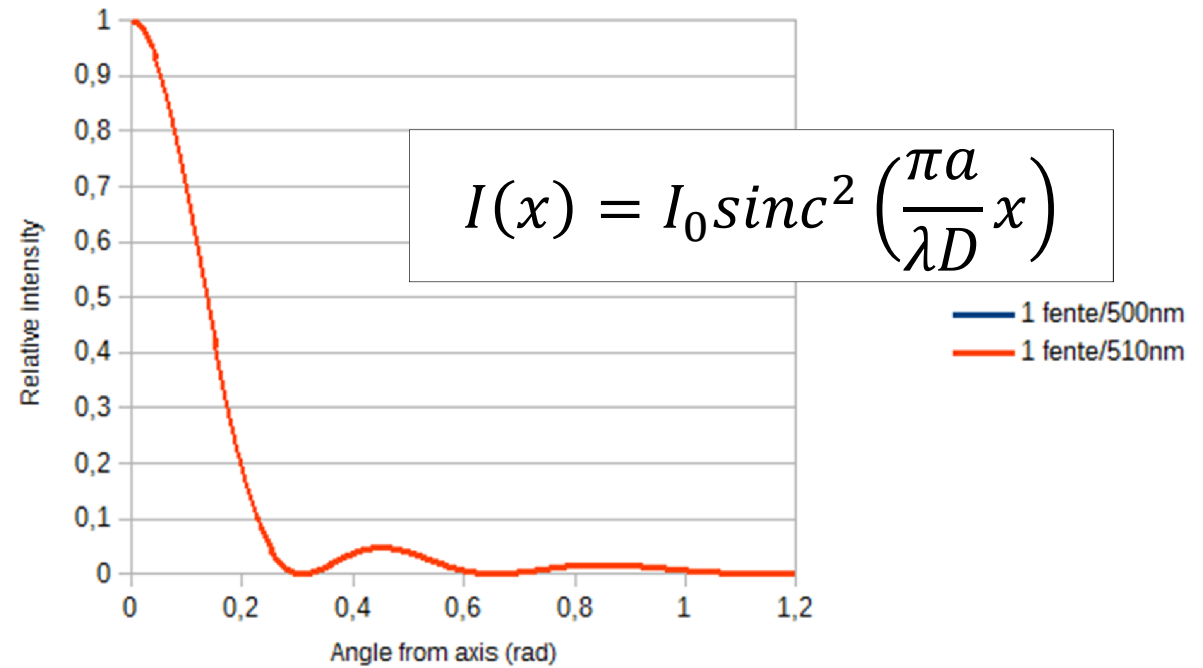
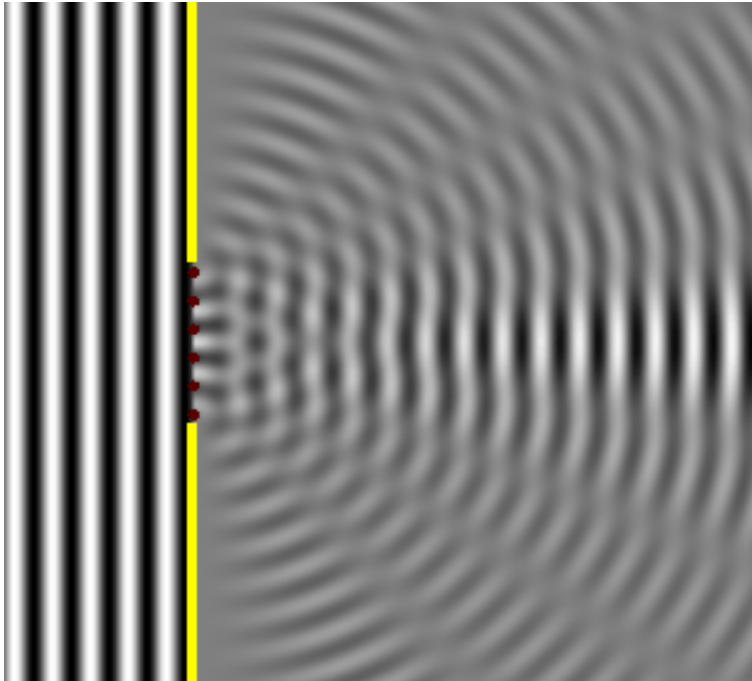
Principe de Huygens

- **1655** : *Grimaldi* observe la diffraction
- **1690** : *Huygens* propose le caractère ondulatoire
- **1815** : Le formalisme de *Fresnel* permet de décrire les phénomènes d'interférences

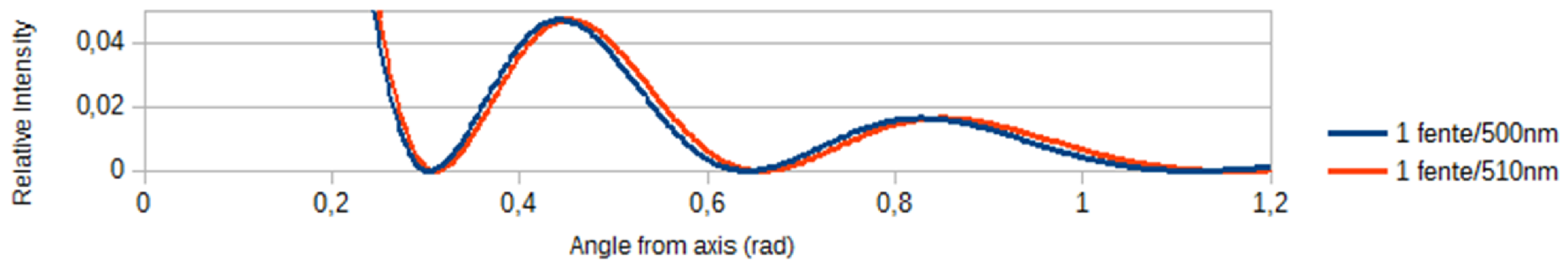


Grand Isle, juste en face de New Orleans, LA

Diffraction par une fente



Crédit : wikimedia foundation



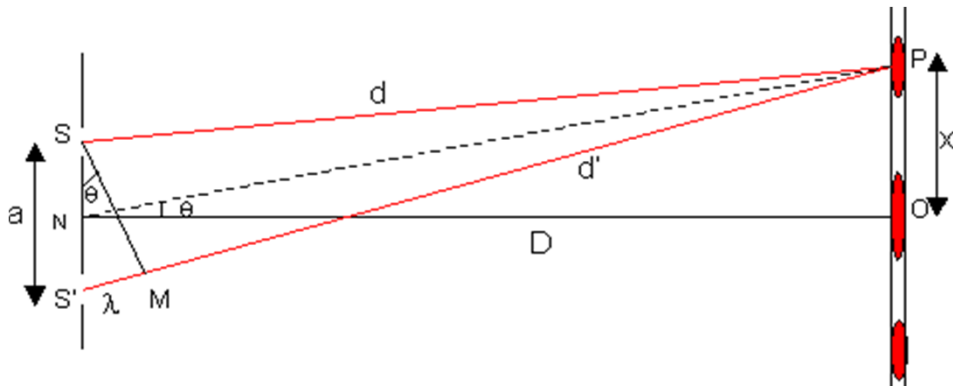
Un premier spectromètre...



Diffraction par une fente



Diffraction par 2 fentes (Young)



Pour qu'il y ait interférences (constructives), il faut que les ondes issues des 2 fentes soient en phase :

$$\Delta\phi = k \cdot 2\pi$$

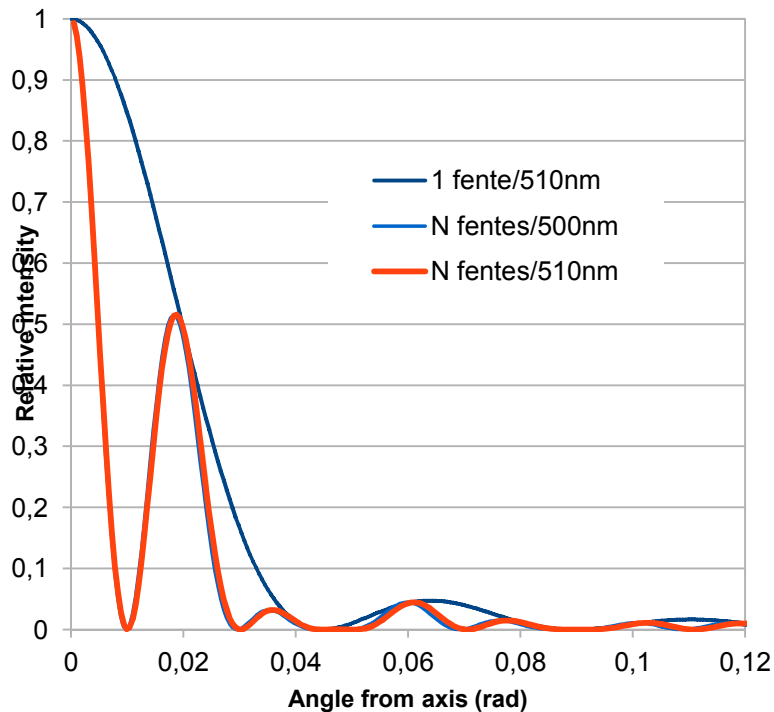
Or le lien déphasage \sim différence de marche est :

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta$$

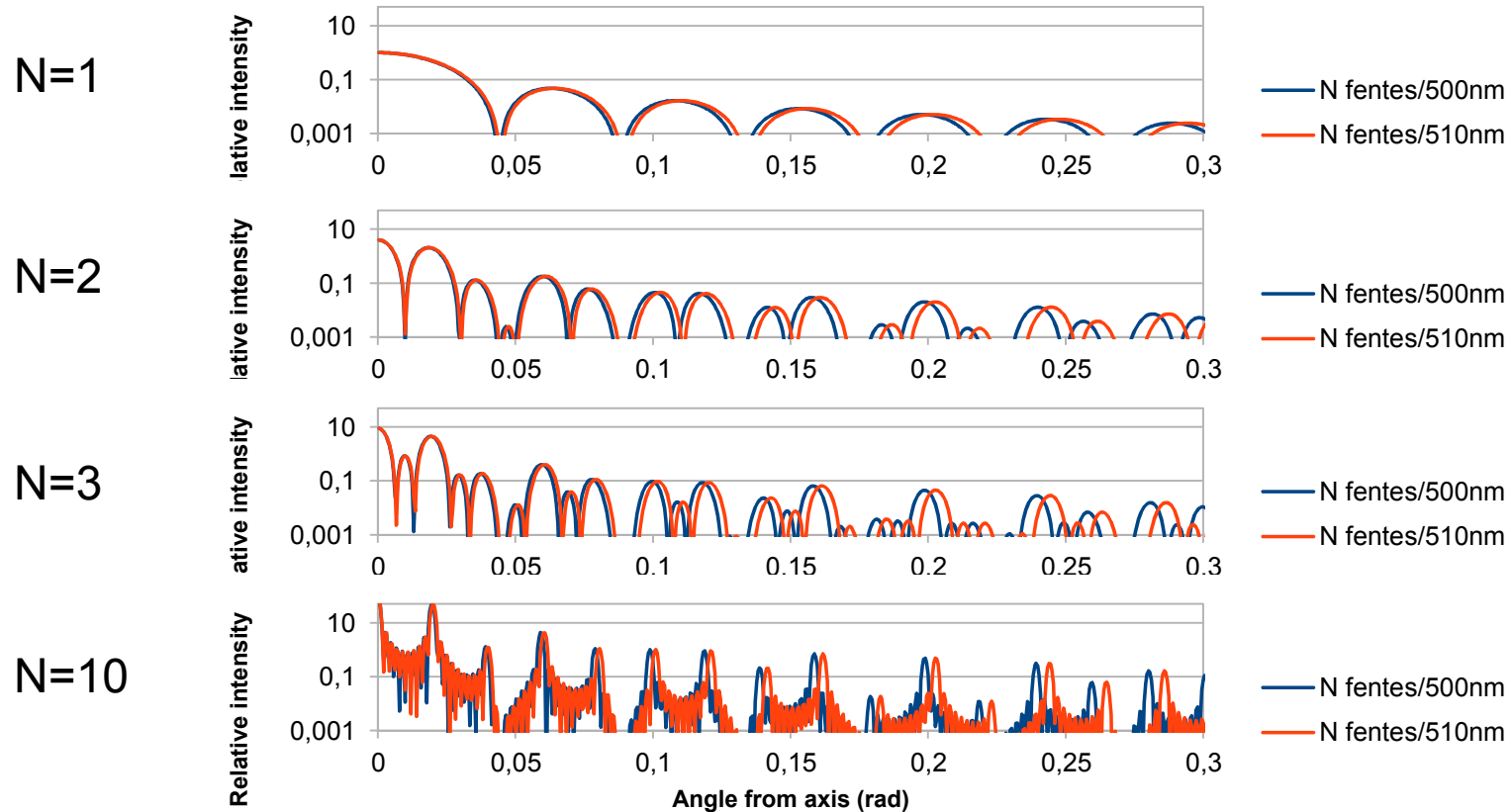
Et sur le dessin, on lit : $\delta = a \cdot \sin(\theta)$

Il faut donc : $\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} a \cdot \sin(\theta) = k \cdot 2\pi$

Finalement, $\sin(\theta) = \frac{k\lambda}{a}$



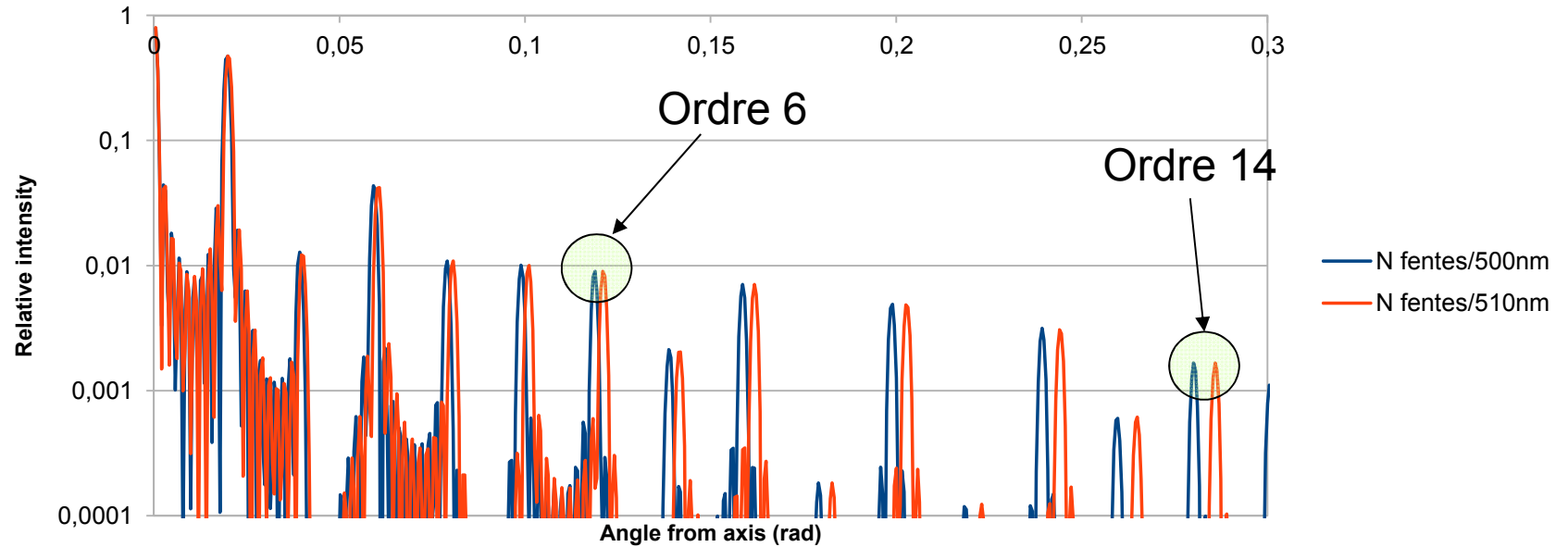
Diffraction par N fentes



plus de fentes \Rightarrow conditions d'interférences plus sévères \Rightarrow pics plus fins
 \Rightarrow meilleure sélectivité en λ (à un ordre donné)



Intérêt des ordres élevés



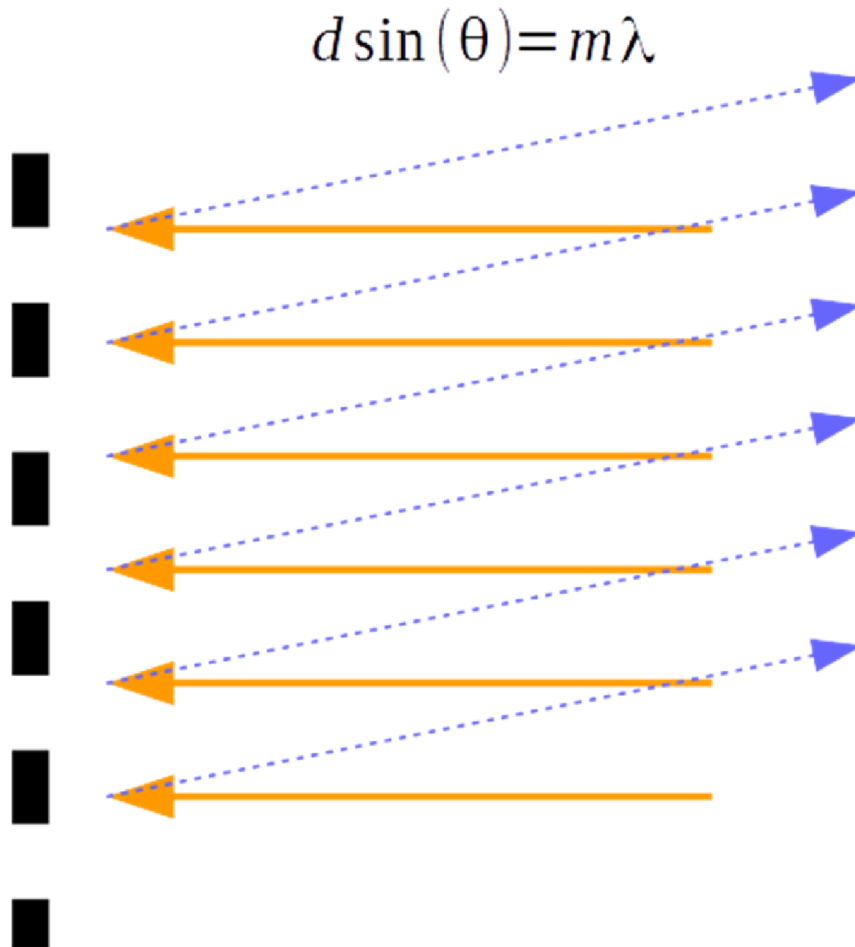
2 longueurs d'onde données sont mieux séparées aux ordres élevés



Quid du rendement ?

Recouvrement d'ordres

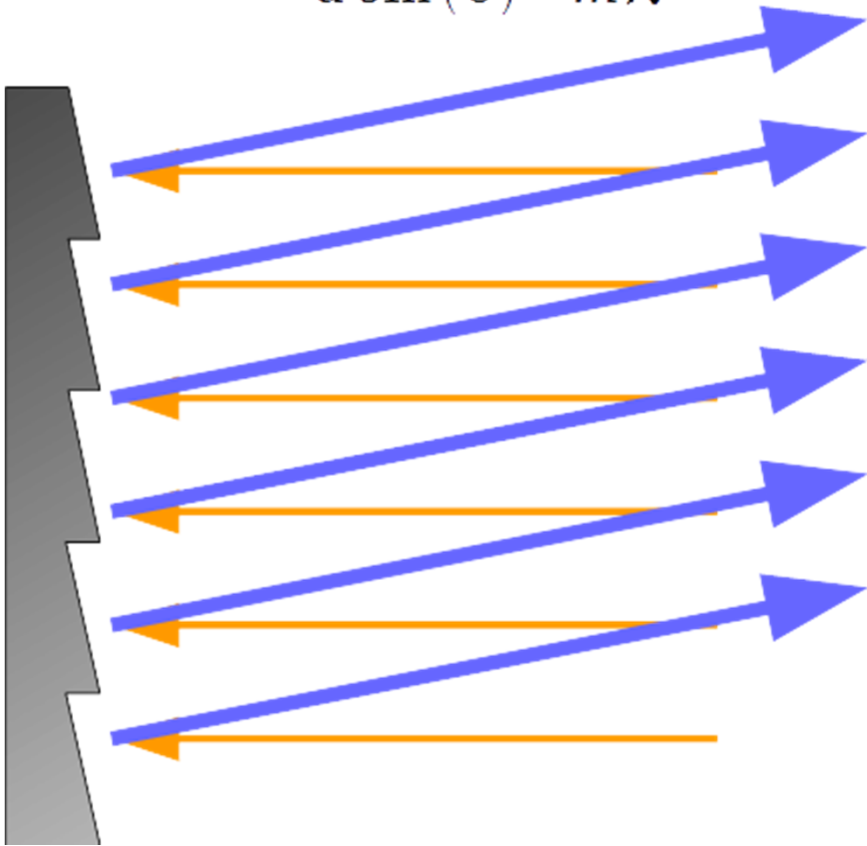
Le *Blaze* pour le rendement



- Pour **diffracter** il faut avoir un motif périodique

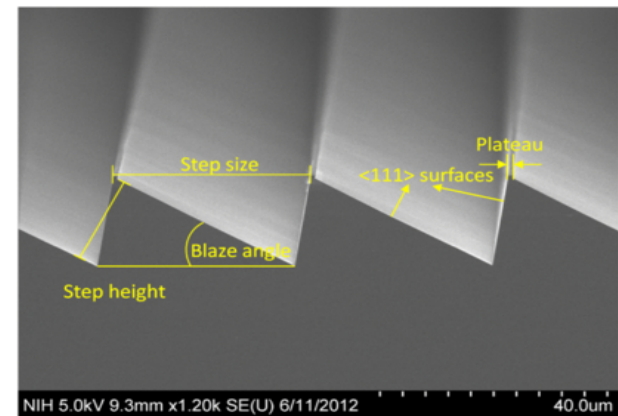
L'angle de blaze

$$d \sin(\theta) = m\lambda$$



Dans la direction θ , on aura un maximum d'énergie pour λ_1 à l'ordre k , et pour un autre λ_2 à l'ordre $k+1$

- Pour **optimiser l'énergie** à un angle donné (à une longueur d'onde donc), on peut arranger les facettes de façon à être en **réflexion** à l'angle correspondant à la longueur d'onde souhaitée.



Le recouvrement d'ordre

- En travaillant aux ordres **élevés** avec un réseau **blazé**, on peut imaginer un système où on aurait une continuité d'efficacité du réseau en fonction de la longueur d'onde pour les ordres successifs :

Gravure
angle de blaze

31,6 traits/mm
63°

ordre	Longueur d'onde centrale (nm)	Intervalle spectral libre (nm)	Longueur d'onde max (nm)	Longueur d'onde min (nm)
...				
125	451,14	3,61	449,34	452,95
126	447,56	3,55	445,79	449,34
127	444,04	3,5	442,29	445,79
128	440,57	3,44	438,85	442,29
129	437,15	3,39	435,46	438,85
...				

Extrait du tableau de conception du spectromètre Kenza

- Mais... les ordres se recouvrent
- Disperseur croisé

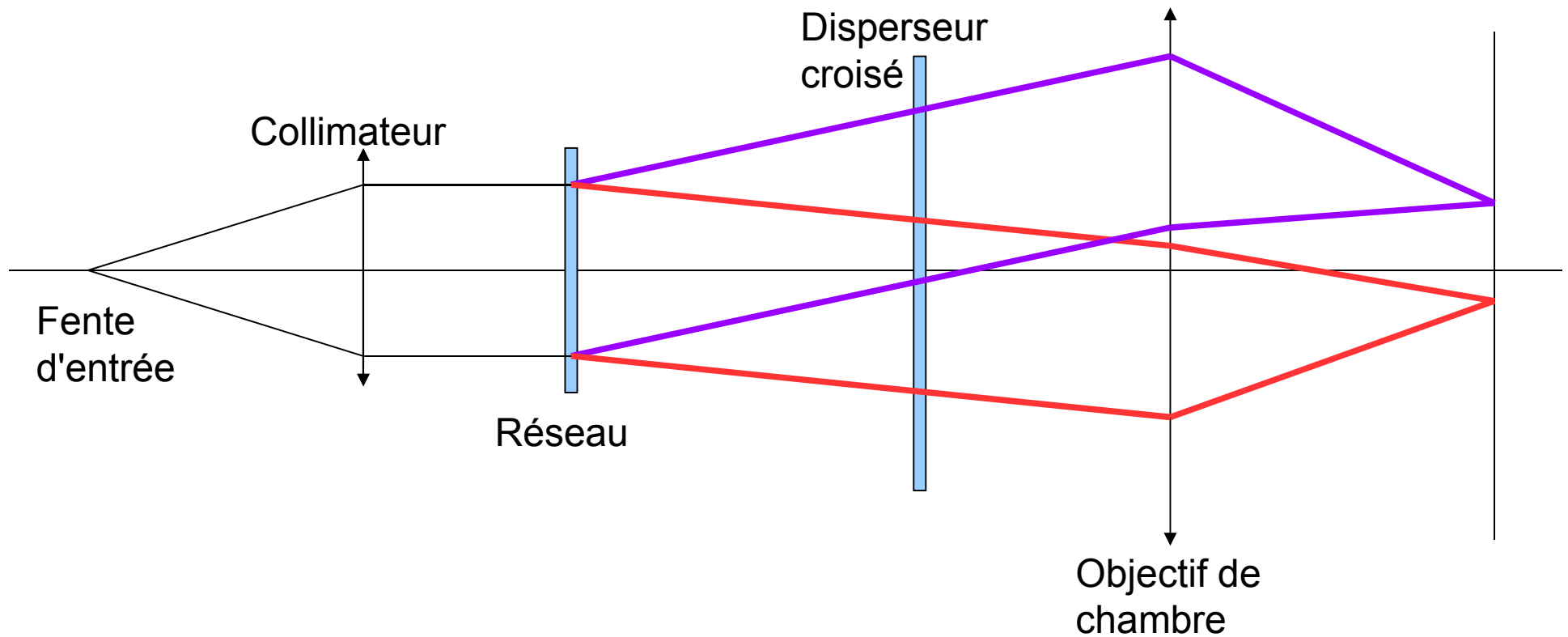


Chapitre 2

Autour du réseau

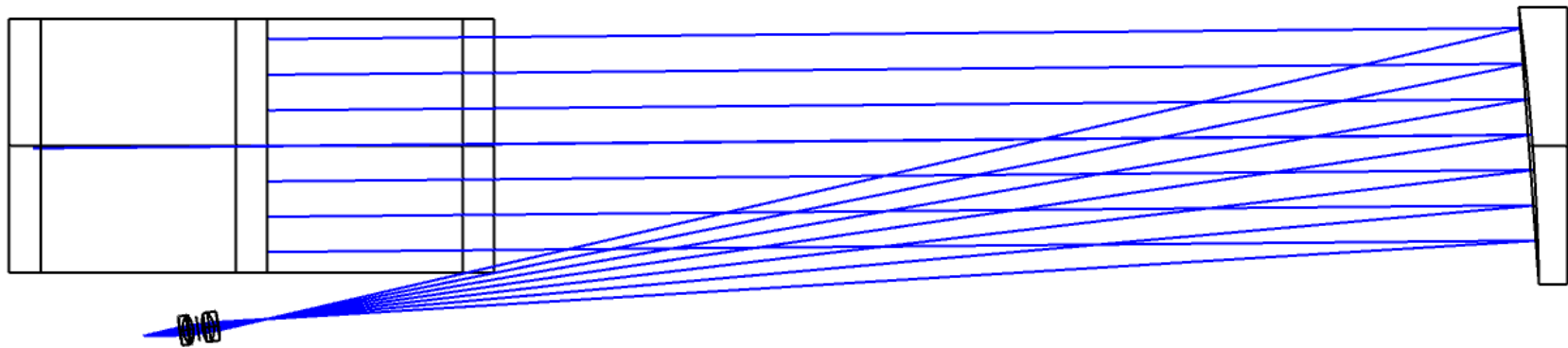


Schéma fonctionnel du spectromètre (base)



Le collimateur

- **Rôle** : contrôle de l'incidence sur le réseau échelle
- **Besoin** : achromatique (bon achromat ou parabole off-axis)
- **Focale** : déterminée par la taille du réseau qui elle-même est déterminée par la résolution

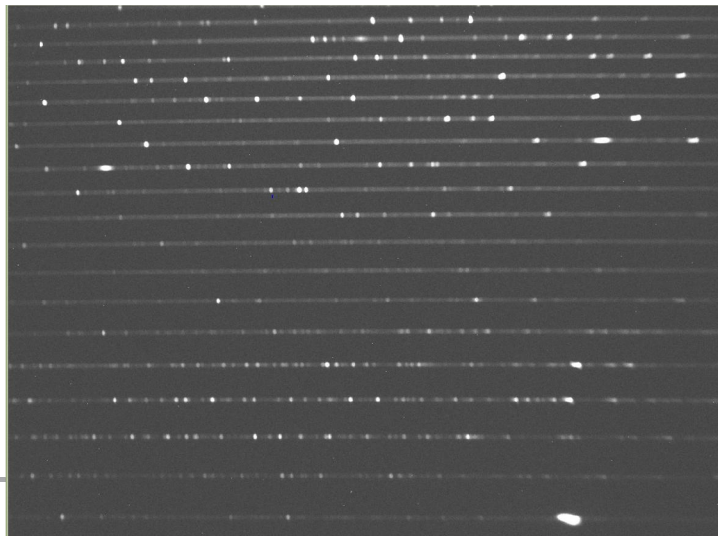


Le disperser croisé

- Réseau en transmission

- Facile à calculer
- Facile à mettre en œuvre
- Bon marché
- Ordres rectilignes

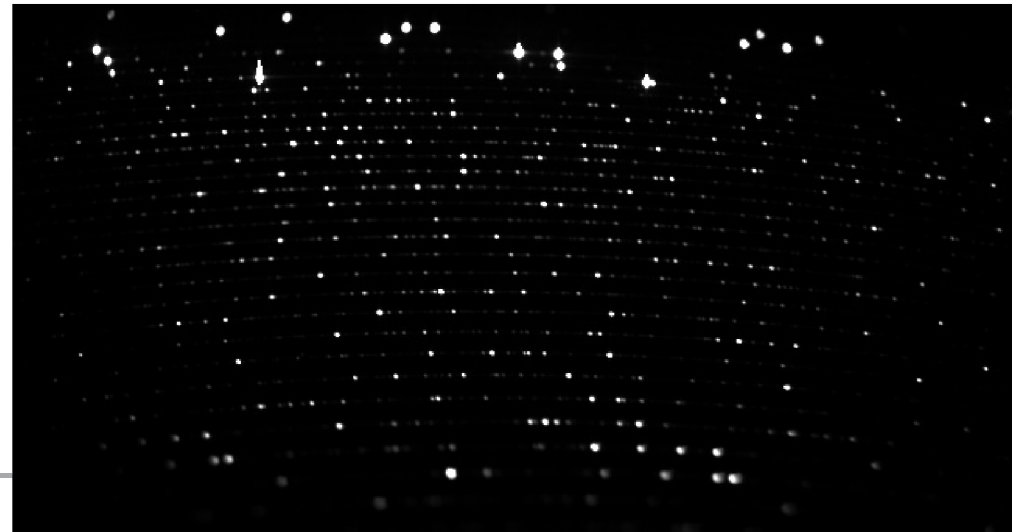
- Rendement faible
- Non nettoyable



- Prisme

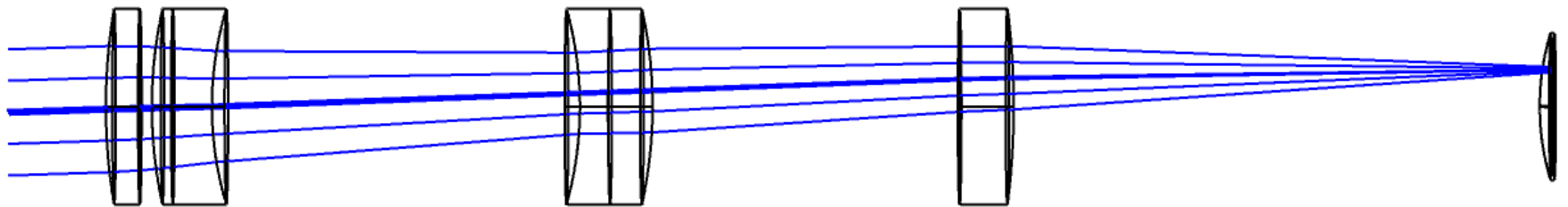
- **Rendement maximal**
- Nettoyable

- Calcul de l'apex pas évident
- Cher, surtout si on veut l'adapter sur mesure
- Ordres incurvés



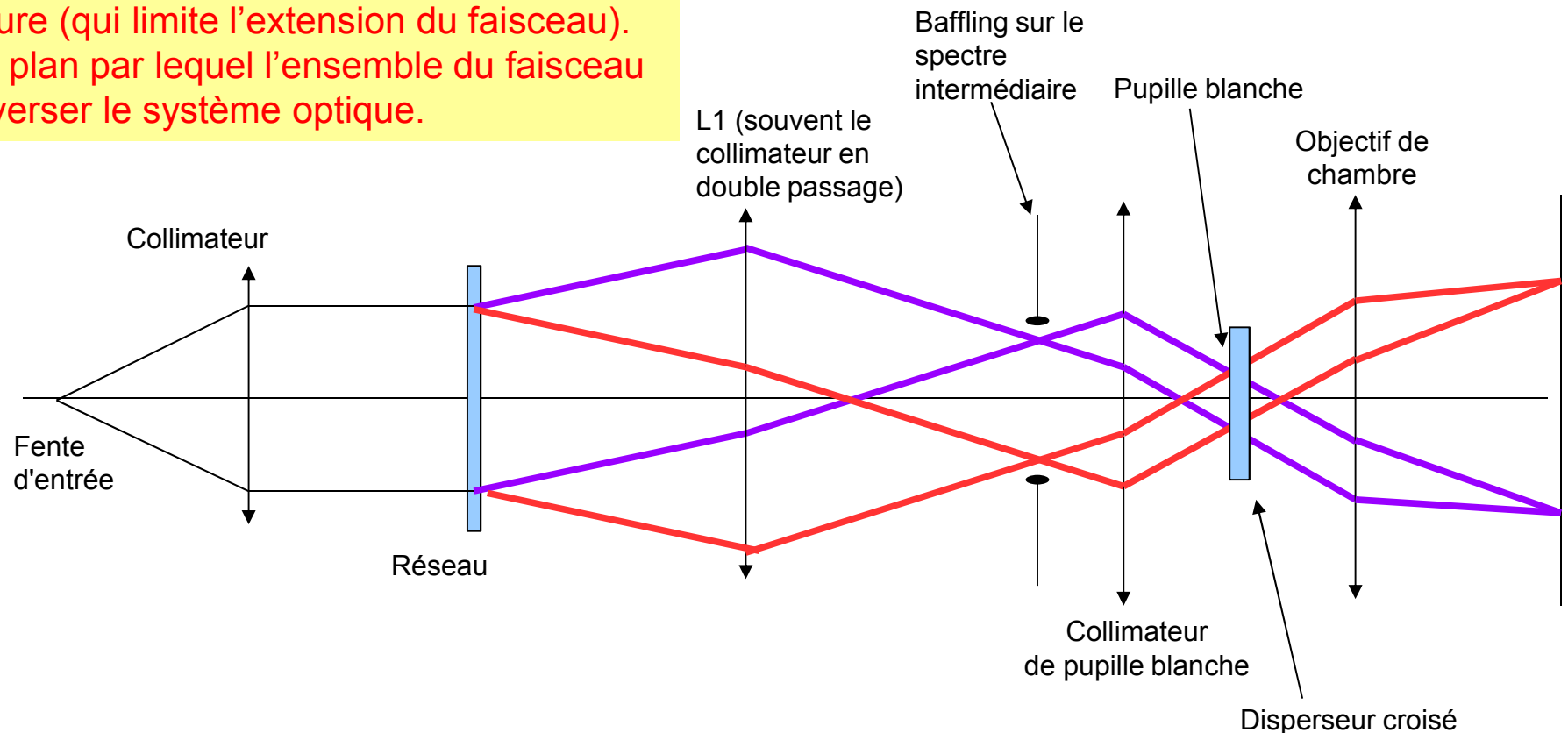
L'objectif de chambre

- La focale dépend de la taille de la caméra
- Très ouvert, très achromatique, très champ plan... très cher



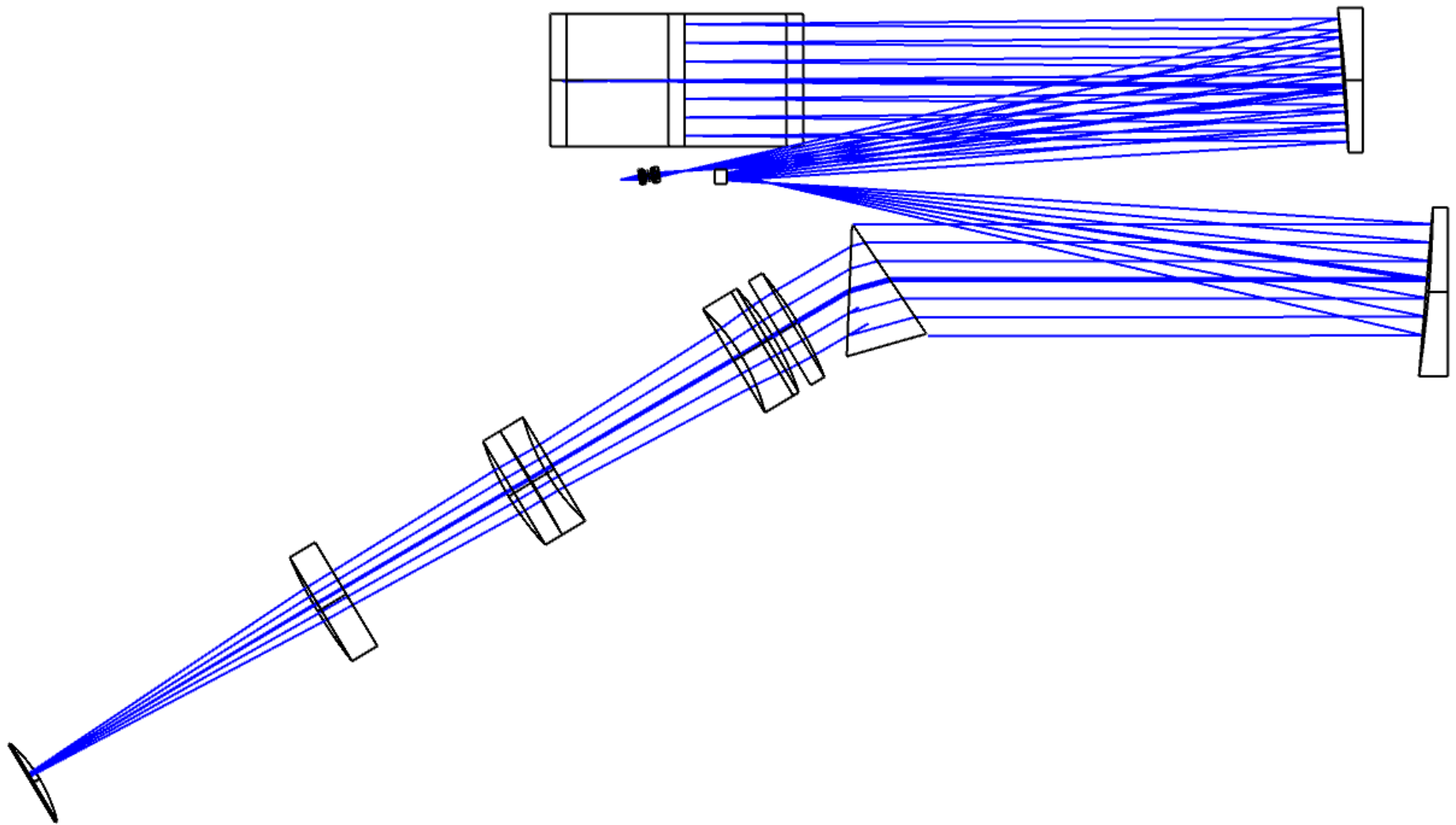
La pupille blanche

Une **pupille** est une image du diaphragme d'ouverture (qui limite l'extension du faisceau). C'est un plan par lequel l'ensemble du faisceau peut traverser le système optique.



- Le montage en pupille blanche (Baranne, 1972) permet
 - De réduire la taille des optiques (disperseur et chambre)
 - D'avoir un contrôle sur la lumière parasite
 - De se rapprocher des conditions de Littrow pur

Spectrographe complet



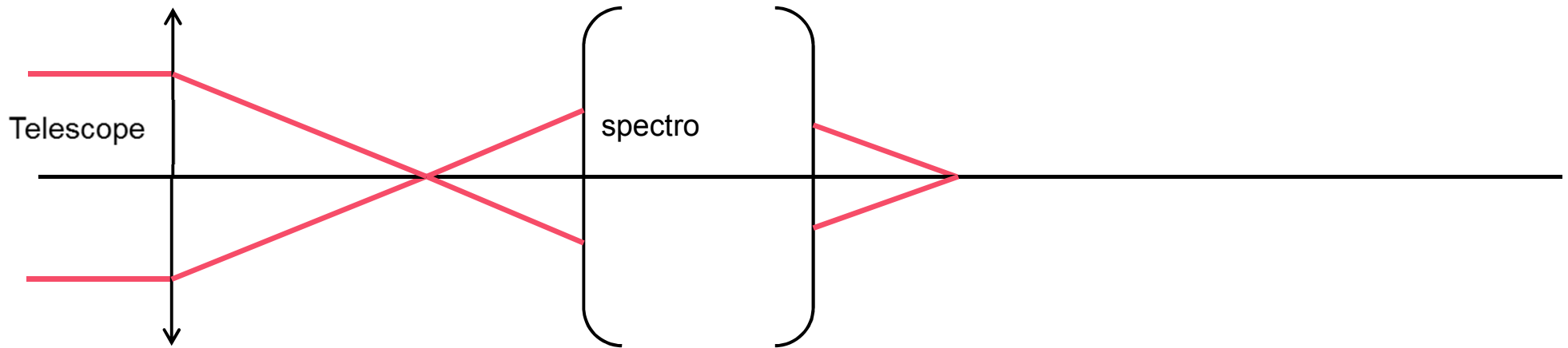
Chapitre 3

Couplage au télescope (fibrage)



Couplage au télescope

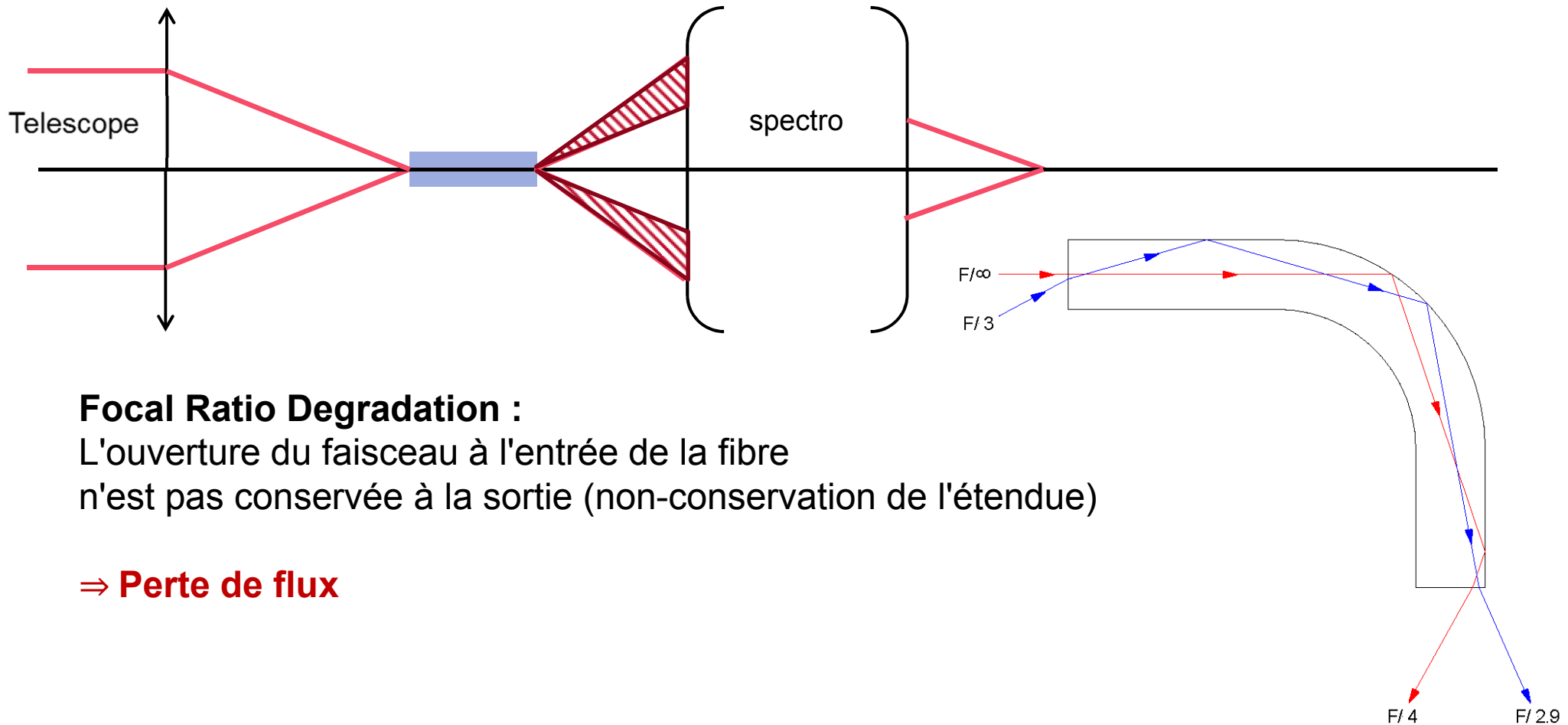
1 – Couplage direct



Pas envisageable en spectro haute résolution :
Trop de dérives mécaniques, thermiques

Couplage au télescope

2 – Couplage fibré



Focal Ratio Degradation :

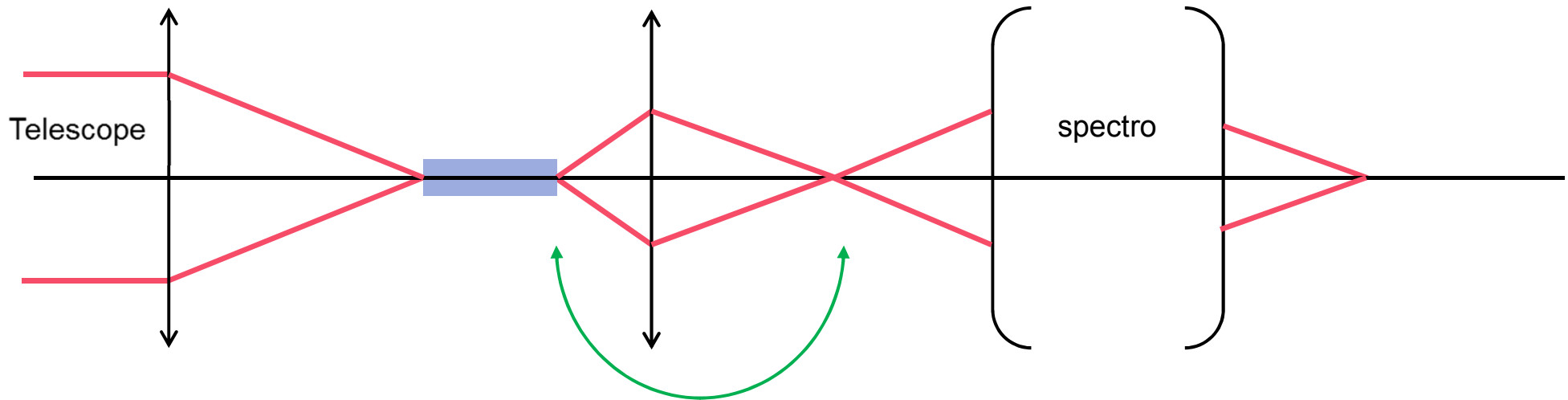
L'ouverture du faisceau à l'entrée de la fibre n'est pas conservée à la sortie (non-conservation de l'étendue)

⇒ **Perte de flux**



Couplage au télescope

3 – Adaptation d'ouverture en sortie

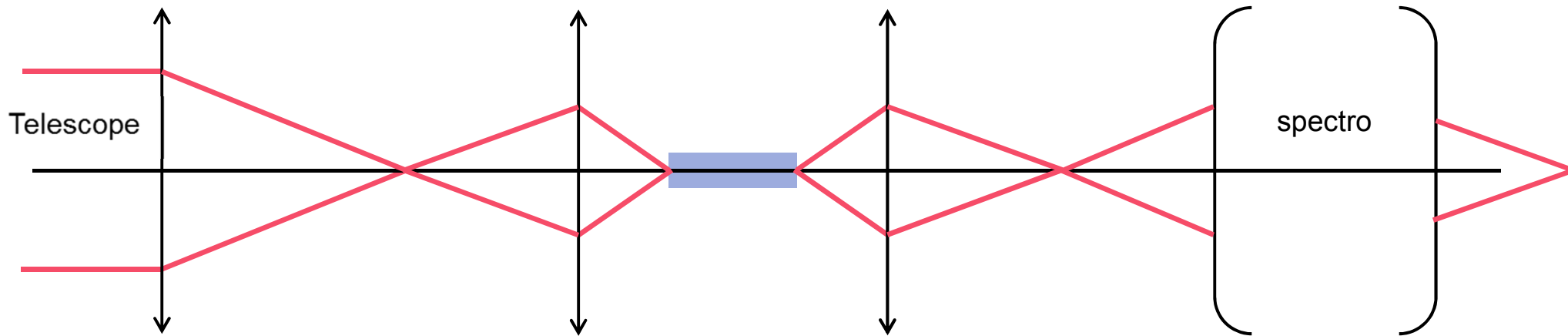


Adaptation d'ouverture
⇒ grandissement de l'image de la fibre

⇒ **Perte de résolution**

Couplage au télescope

4 – Adaptation l'ouverture en entrée et en sortie de fibre



Pas de perte de flux, ni de perte de résolution

SSI le diamètre de la fibre correspond au diamètre de l'étoile

Dans le cas contraire, il ne reste qu'à découper l'image en sortie de fibre.



Chapitre 4

Dimensionnement



Cahier des charges

- Piloté par la science...
 - Résolution
 - Bande passante
 - Echantillonnage

- ...et le budget
 - Taille du capteur



Définition du réseau

- Le choix des réseaux est limité aux 39 masters Richardson
 - La relation donnant la résolution d'un spectre échelle est

$$R = \frac{2d_1 \tan(\theta_B)}{\phi D}$$

- Si on introduit la FRD

$$R = \frac{2d_1 \tan(\theta_B)}{\phi D} \frac{F_{fiber_out}}{F_{fiber_in}}$$

- Une première relation apparaît

$$d_1 \tan(\theta_B) > \frac{Ra}{2F_{fiber_out}}$$

R : Résolution
d : diamètre du faisceau collimaté = petit axe du réseau échelle
 Θ : angle de blaze
 D^B : diam du télescope
 Φ : ouverture de la fibre sur le ciel
A : diam de la fibre

U.S.I.

Définition du réseau

- Implications de la taille du capteur

- L'ordre le plus rouge est le plus étendu

$$ISL_{\max_possible} = \frac{N_x \lambda_{\max}}{p R}$$

Nombre
d'éléments de
résolution

Taille spectrale
d'un élément de
rés.

- Or l'ISL est donné par (*Eversberg*)

$$ISL_{k_min} = \frac{m \lambda^2}{2 \sin(\theta_B)}$$

- On doit donc satisfaire

$$m < \frac{2 N_x \sin(\theta_B)}{p R \lambda_{\max}}$$

N_x : nombre de pixels sur l'axe de dispersion
 p : échantillonnage (pixels)
 m : rulling du réseau

U.S.I.



Focales, apex, inter-ordres

- **Focale du collimateur : fixer F#**

- $F_{coll} = F\# \cdot d_1$

- **Focale de l'objectif de chambre**

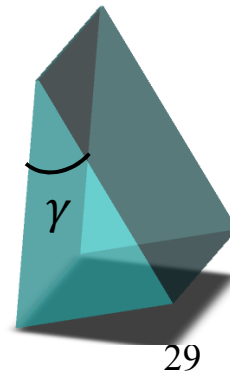
- Extension angulaire de l'ordre le plus long (rouge): $\rho = \frac{2\sin(\theta_B)}{k_{min}\cos(\theta_B)}$

- Et par suite : $F_{cam} = \frac{CCD_Xsize}{\rho}$

- **Apex (γ) :**

$$\delta(n, \gamma, \alpha) = \alpha + \text{asin} \left(\sin(\gamma) \sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha)} - \sin(\alpha) \cos(\gamma) \right) - \gamma$$

- **Inter-ordres > 15 pixels**



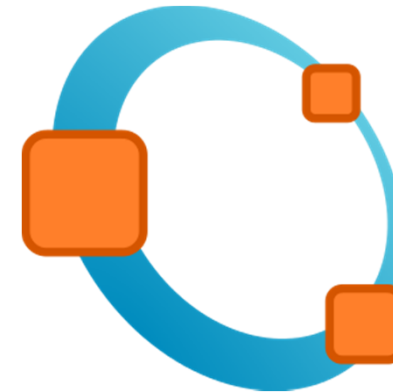
Chapitre 5

Etude d'un cas : sardine 2



Sardine 2

- Cahier des charges :
 - $R > 11000$
 - Caméra Atik460 (2750*2200)
 - BP=400-700nm
- Réseaux possibles : Thorlabs



esaai_1 - Bloc-notes

Fichier Edition Format Affichage ?

```
Cahier des charges
Résolution minimale (-) = 11500
diamètre de fibre (um) = 50.000000
ouverture de la fibre en sortie (-) = 6.000000
ouverture du spectro (-) = 9.000000
CCD - nombre de pixels sur l axe X de dispersion (-) = 2750
CCD - nombre de pixels sur l axe de dispersion croisee (-) = 2200
CCD - taille des pixels en X (um) = 4.540000
CCD - taille des pixels en Y (um) = 4.540000
Echantillonnage minimal (pixels) = 2.300000
lambda_min(nm) = 850
lambda_max(nm) = 400
bordure sur l axe Y (pixels) = 0
séparation minimale des ordres (pixels) = 15
Fichier des réseaux testés f:\rich_thorlabs.txt
Le N- SF4 est utilisé pour le prisme de dispersion croisée
```

Les réseaux possibles sont les suivants :

ruling (/mm)	Blaze (°)	d1(mm)	Fcoll(mm)	Fcam(mm)	apex(°)	R théo(-)	sép(px)	échant. réel(px)
79.0	63.0	24.41	219.73	82.70	53.6	11500.0	35.0	6.5
79.0	75.0	12.84	115.55	46.83	61.5	11500.0	27.0	7.1

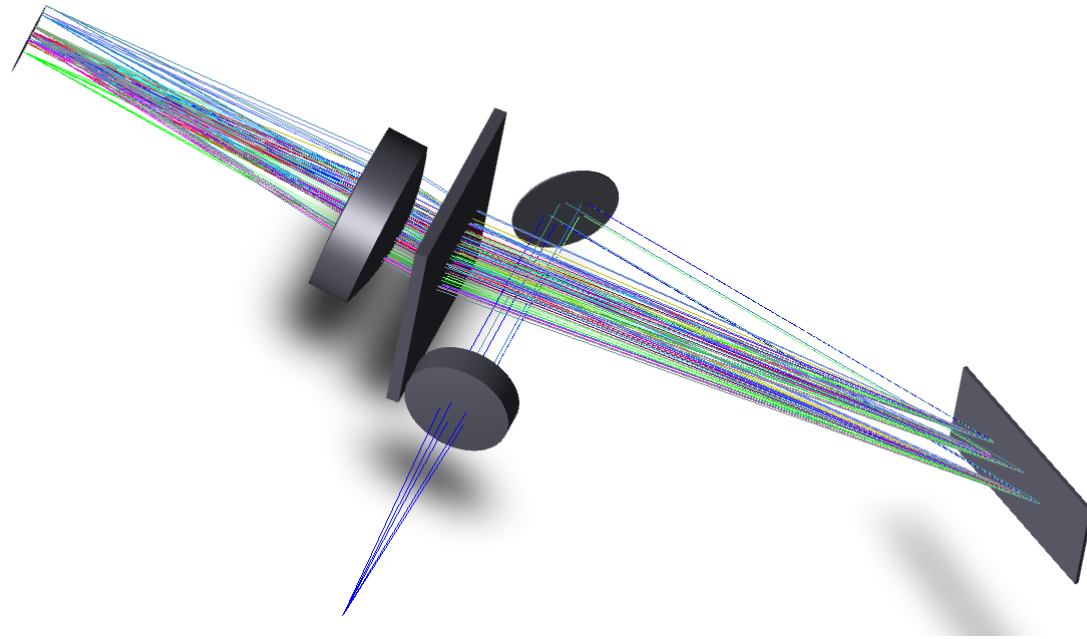
nombre de réseaux possibles : 2 / 4

rich_thorlabs - Bloc-notes

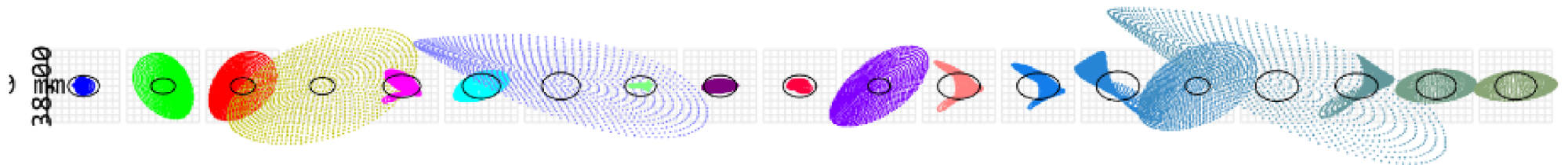
Fichier Edition Format Affichage ?

Ruling	Blaze	d1max	d2max
31.6	63.9	25	50
79	63	25	50
79	75	25	50
316	63	25	50

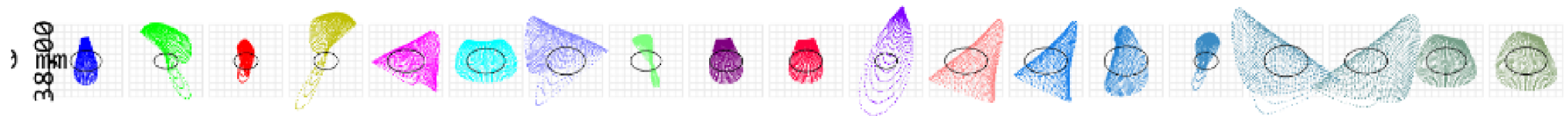
Optimisation Zemax



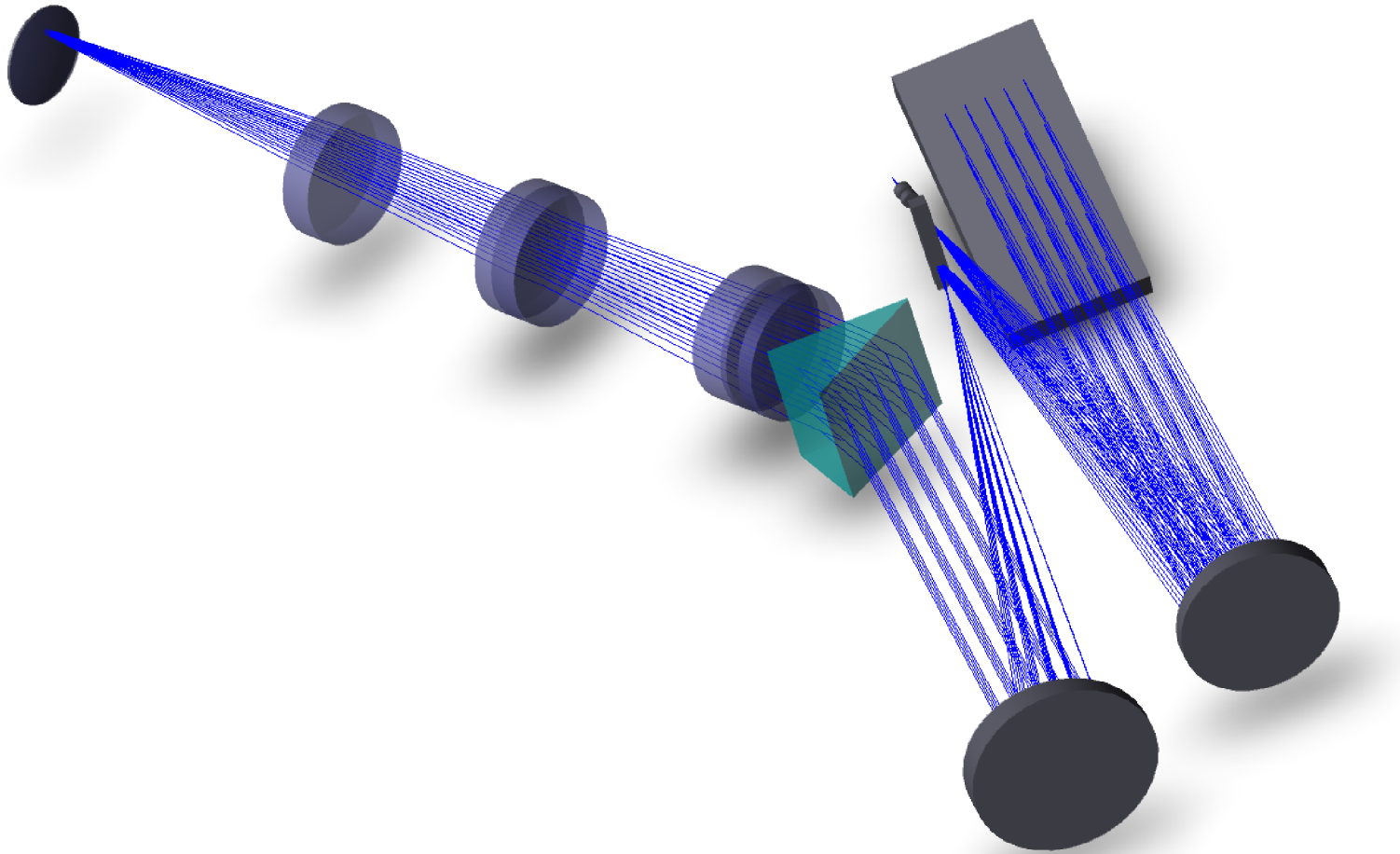
Objectif de chambre centré :



Objectif de chambre décentré :



Questions



500 mm

