

ONERA



Génération de motifs à haute résolution sans optique: application à la caractérisation spatiale de détecteurs infrarouge

Emmanuel di Mambro

*Département d'Optique Théorique et Appliquée
Conception d'instruments optiques
ONERA*

Plan de la présentation

I. Objectif: Caractérisation spatiale de détecteurs infrarouge

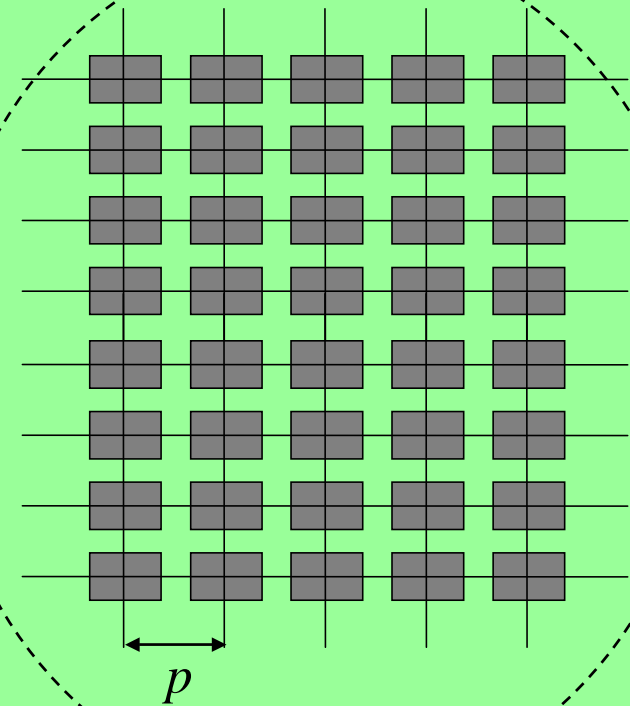
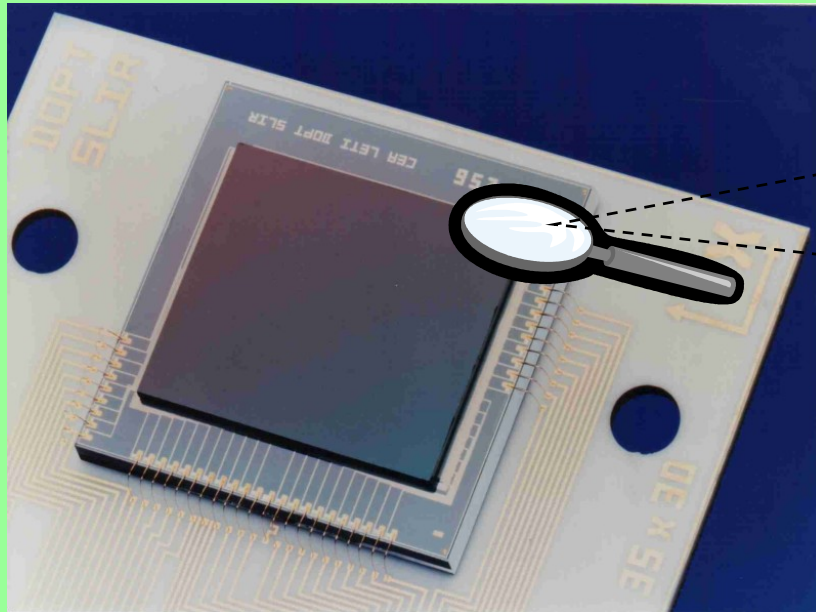
II. Méthodes

- A. Effet Talbot monochromatique et ses limites
- B. Apport de l'effet Talbot panchromatique
- C. Utilisation de nouveaux réseaux

III. Conclusion et perspectives

CARACTERISATION SPATIALE DE DETECTEURS

Détecteur et matrice de détecteur



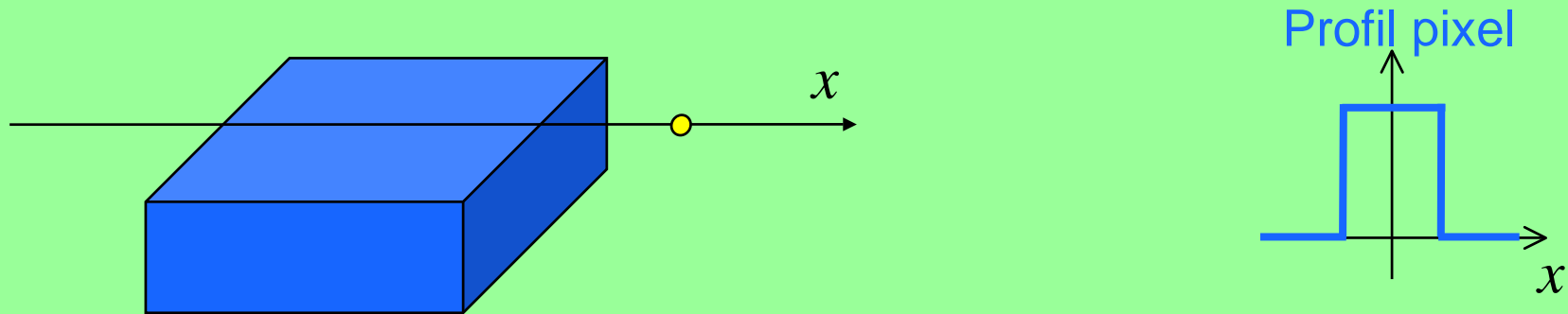
Etat de l'art infrarouge:

Formats typiques : 640x512

Tailles pixels : 20-25 μm

CARACTERISATION SPATIALE DE DETECTEURS

Réponses spatiales dans l'infrarouge



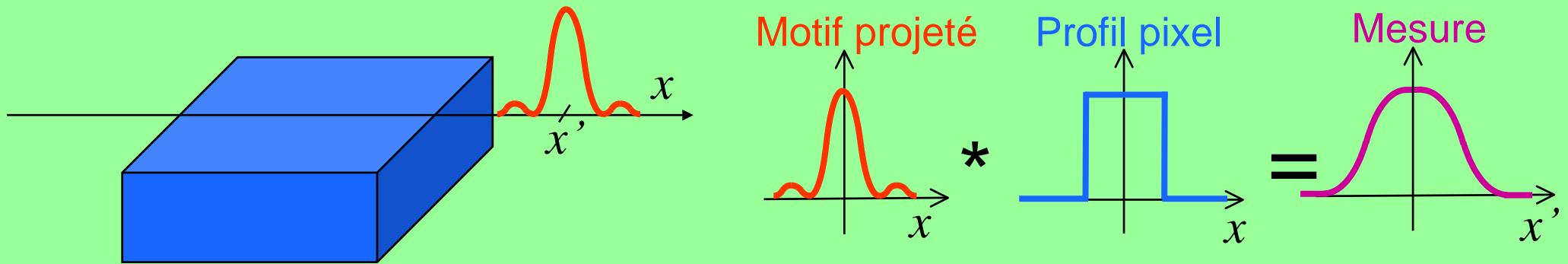
Nécessité de projeter des motifs fins

Difficultés expérimentales de projection en infrarouge

- dimensions pixel \sim longueur d'onde
- Mise au point des optiques dans le cryostat

CARACTERISATION SPATIALE DE DETECTEURS OPTIQUES

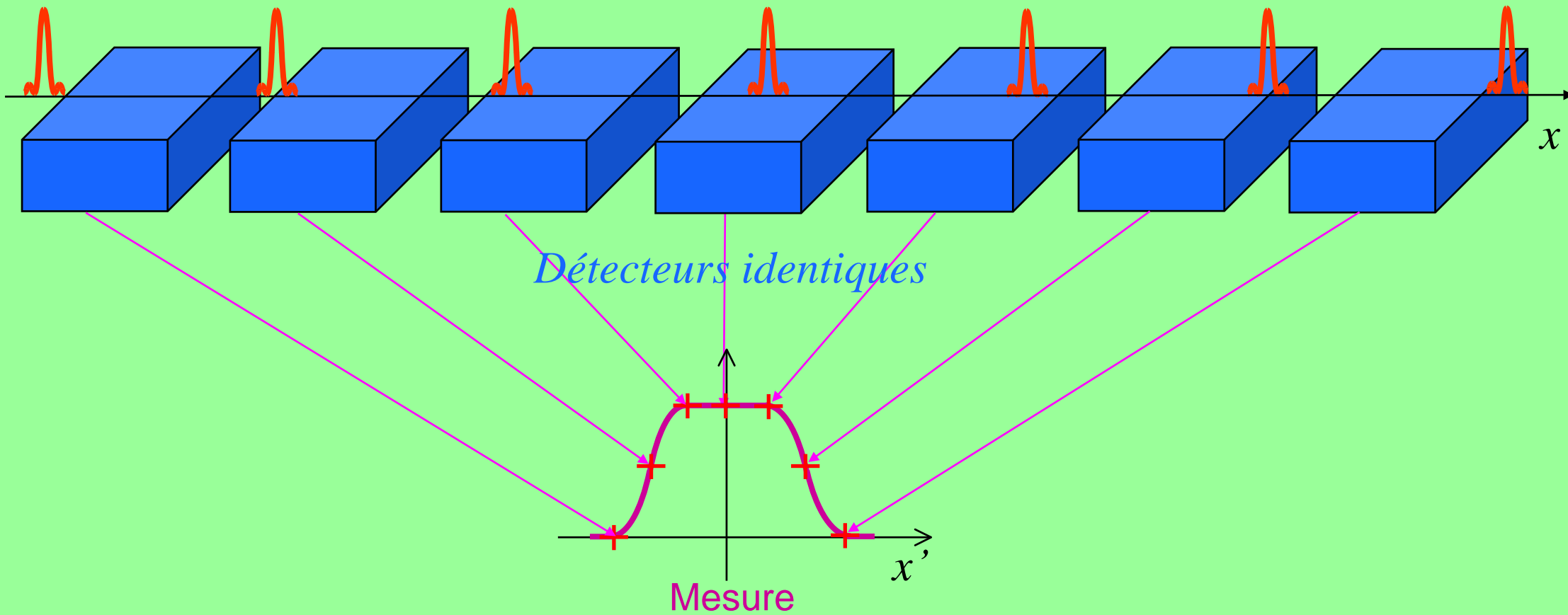
Mesure du profil pixel



➔ Déconvolution: Nécessité de projeter des motifs connus

CARACTERISATION SPATIALE DE DETECTEURS

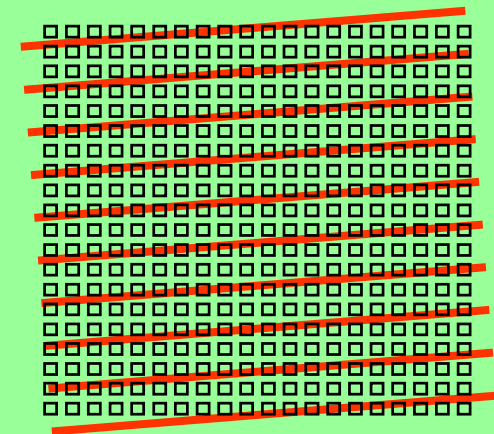
Construction d'un profil pixel global



CARACTERISATION SPATIALE DE DETECTEURS

Approche ONERA

- Projection d'une image périodique sur la matrice
 - Gain de temps
 - Caractérisation globale
- Utilisation de l'effet Talbot



CARACTERISATION SPATIALE DE DETECTEURS

William Henry Fox Talbot

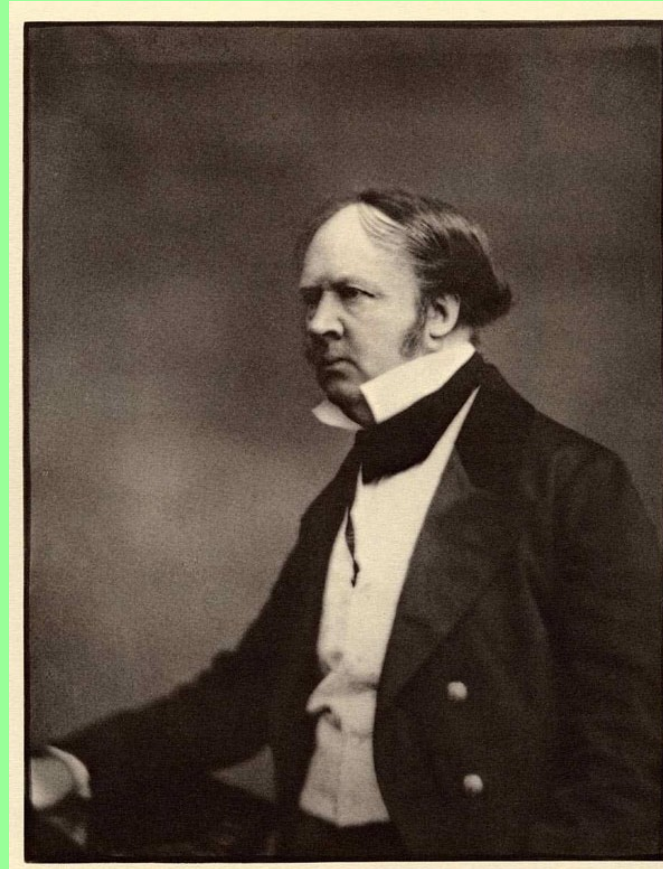
Sir William Henry Fox Talbot

1800 Dorset – Angleterre

1836 Effet Talbot

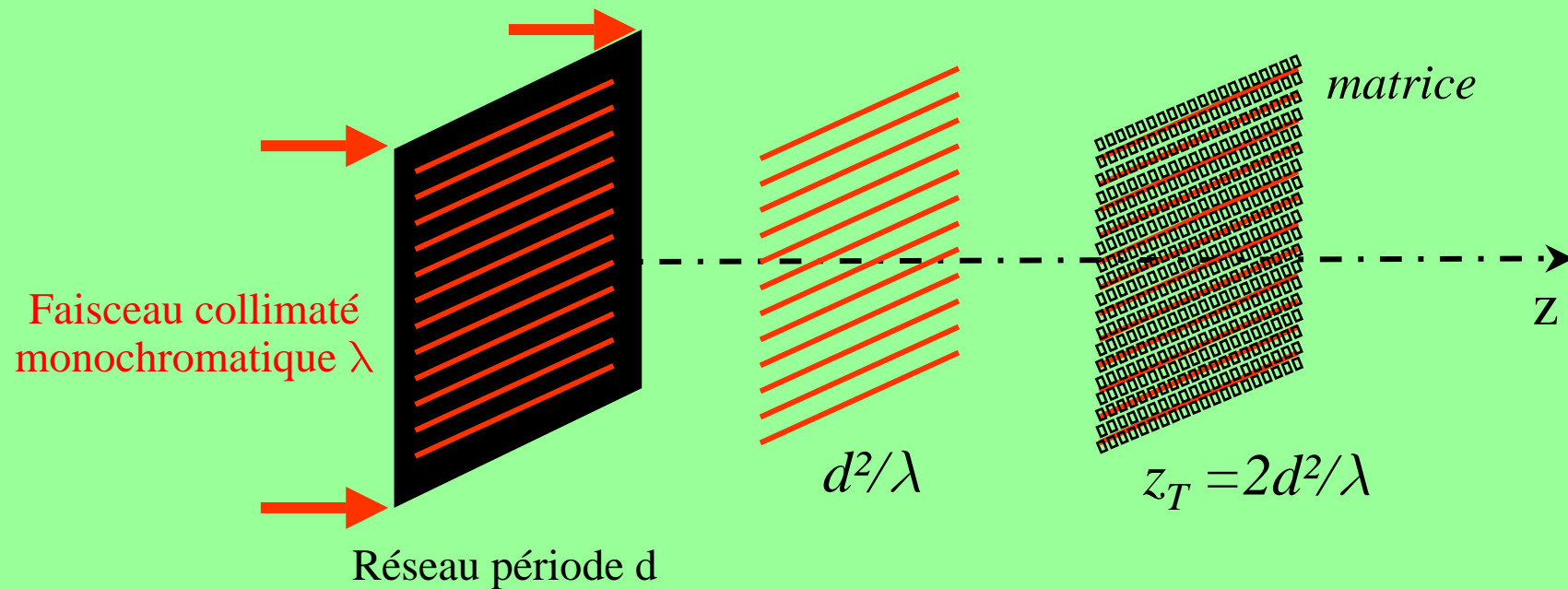
1877 Wiltshire - Angleterre

*Inventeur de la photographie
sur papier (calotype),
mathématicien, linguiste et
homme politique*



CARACTERISATION SPATIALE DE DETECTEURS

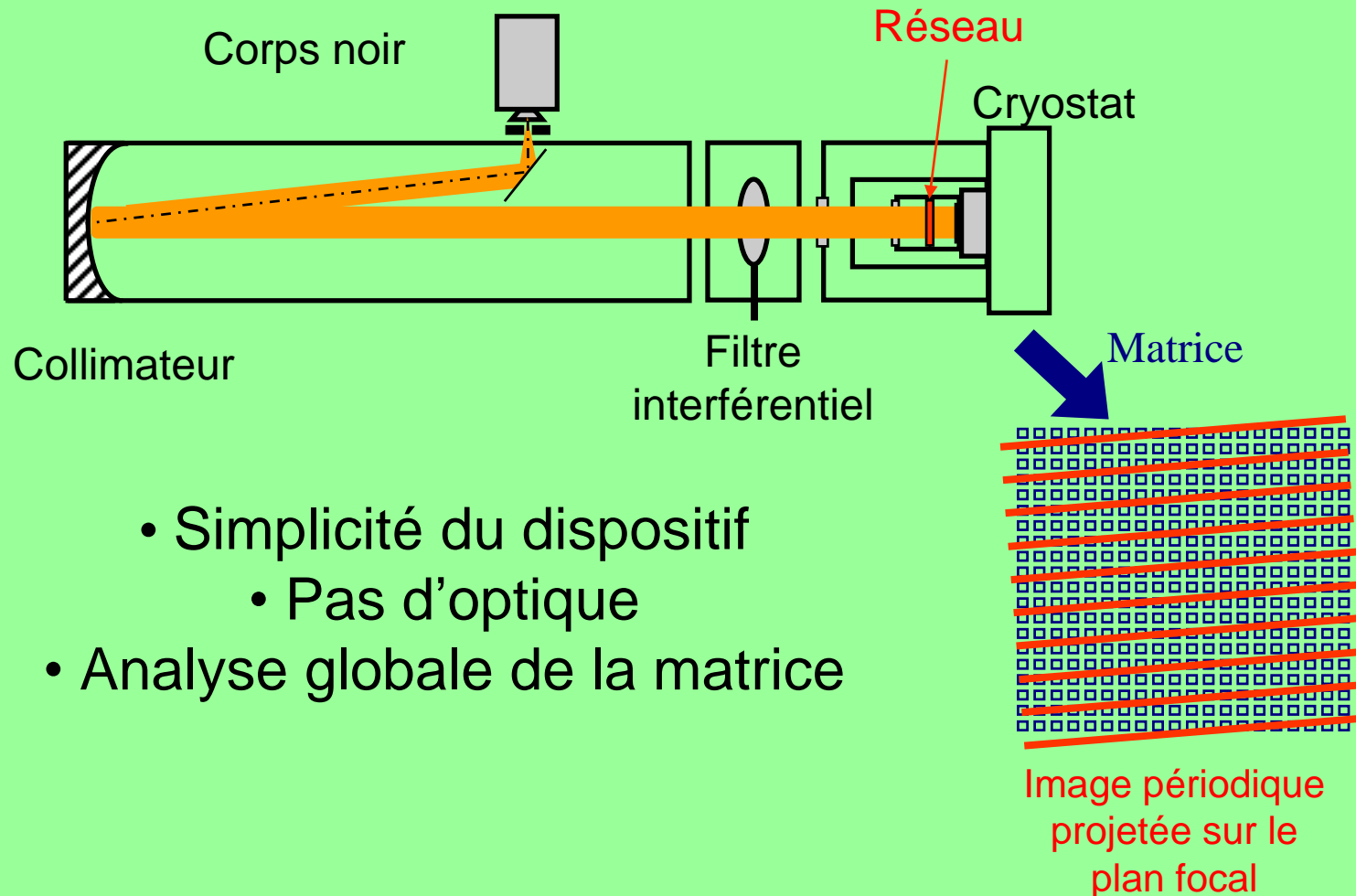
Enoncé de l'effet Talbot



“Facts relating to Optical Science”,
Philosophical Magazine, vol. 9,
401-407 (1836).

CARACTERISATION SPATIALE DE DETECTEURS

Banc de mesure par effet Talbot (opérationnel en 1999)



- Simplicité du dispositif
 - Pas d'optique
- Analyse globale de la matrice

CARACTERISATION SPATIALE DE DETECTEURS

Etat des lieux en début de thèse

- **Bande II :** validation effectuée avec un composant « petits pixels » (25 μ m)
- **Bande III :** limitations physiques de la technique

Feuille de route

- **Quelles sont les limites de la projection par effet Talbot ?**
- **Apport de l'éclairage panchromatique ?**
- **Apport de l'utilisation d'un nouveau type de réseaux ?**

Plan de la présentation

I. Objectif: Caractérisation spatiale de détecteurs infrarouge

Mesure de profil pixel par projection d'une image périodique

Utilisation de l'effet Talbot en bande II

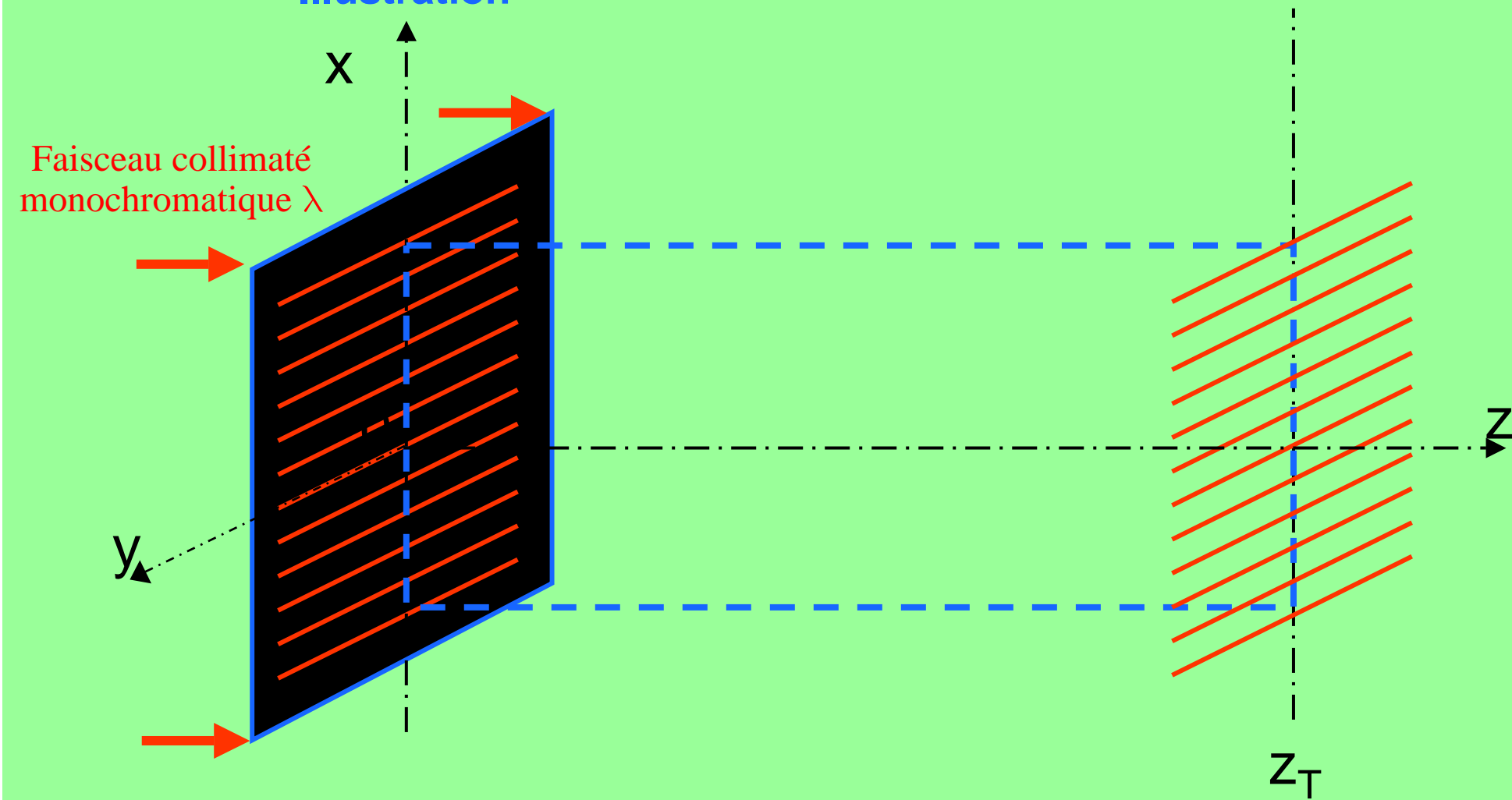
Limitations en bande III?

II. Méthodes

A. Effet Talbot monochromatique et ses limites

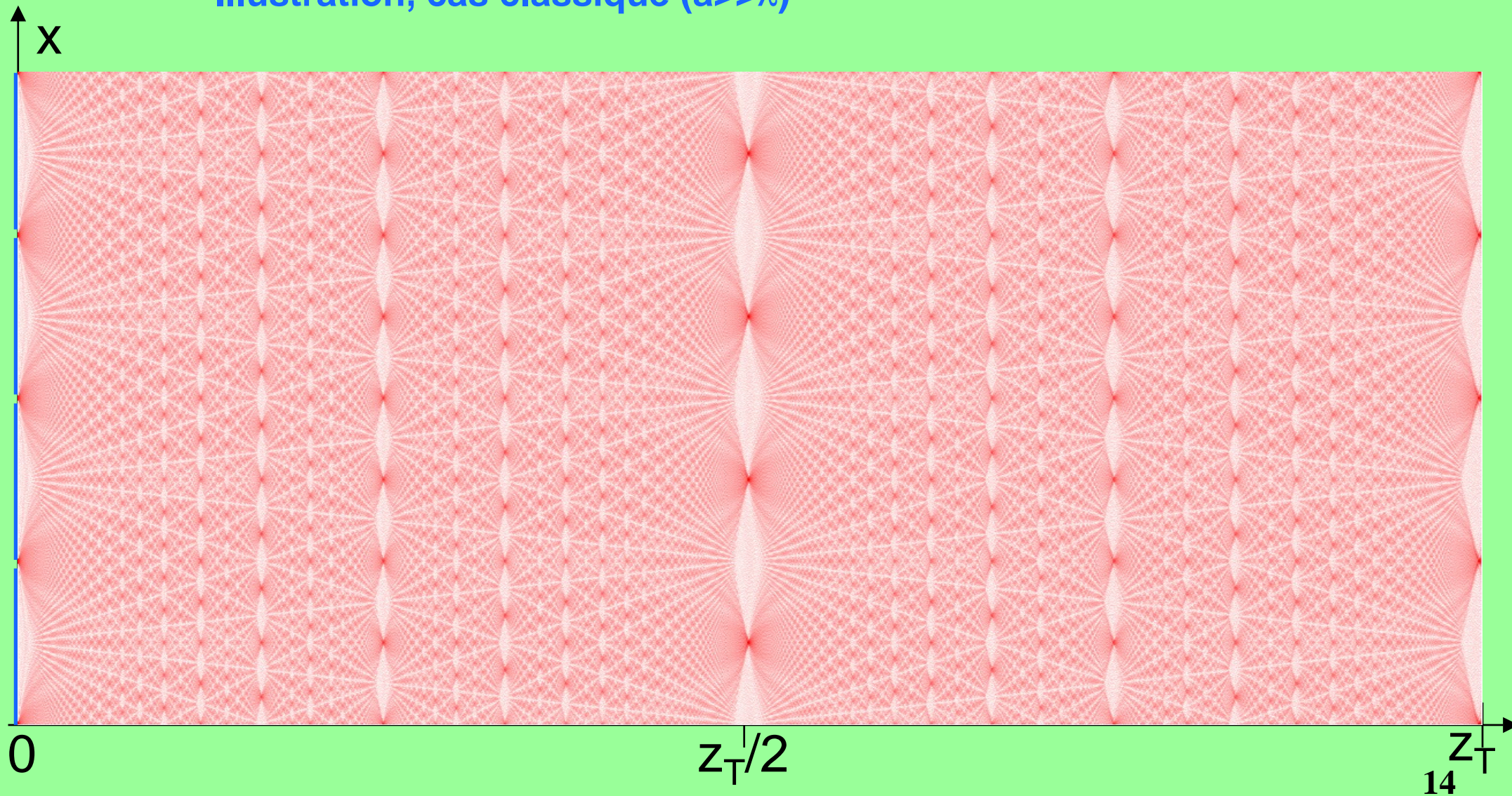
Effet Talbot monochromatique et ses limites

Illustration



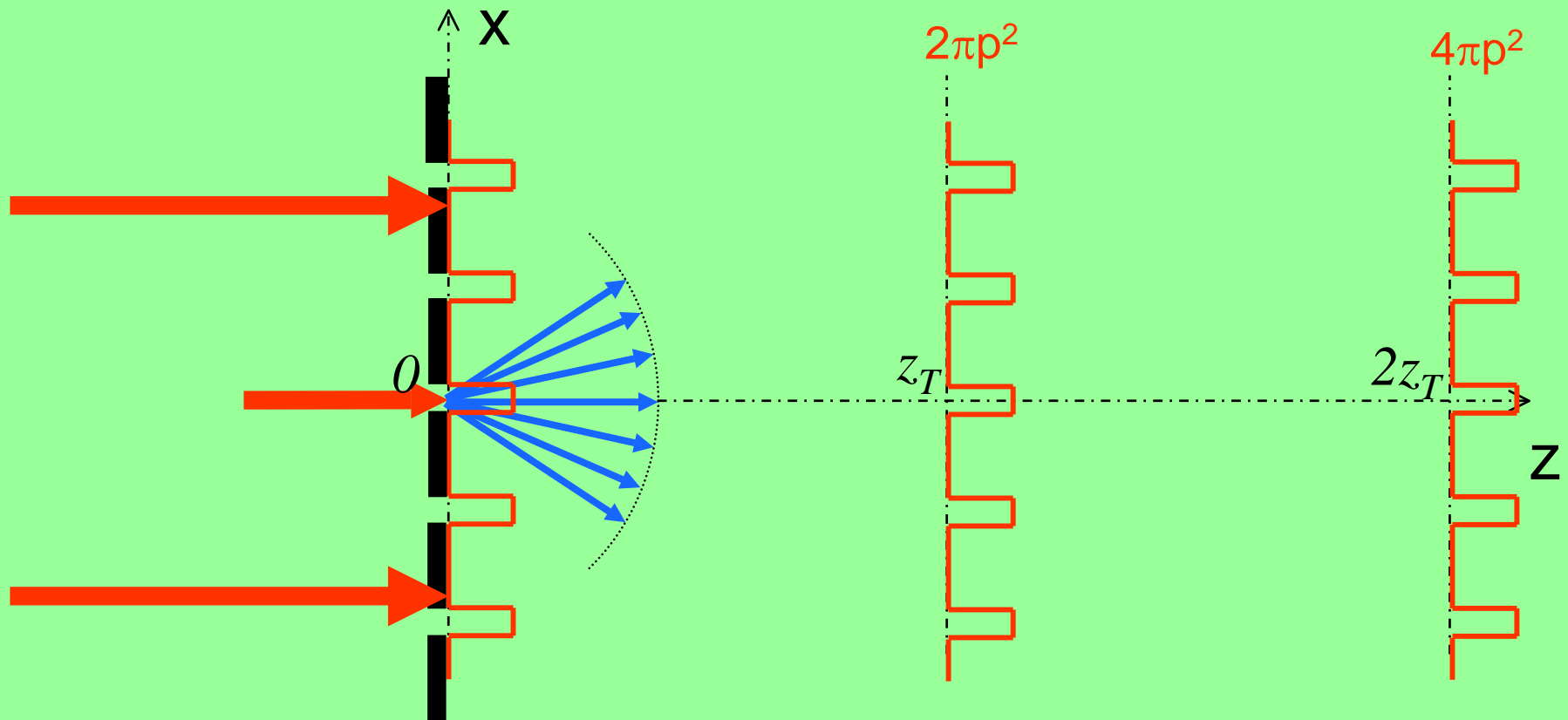
Effet Talbot monochromatique et ses limites

Illustration, cas classique ($a \gg \lambda$)



Effet Talbot monochromatique et ses limites

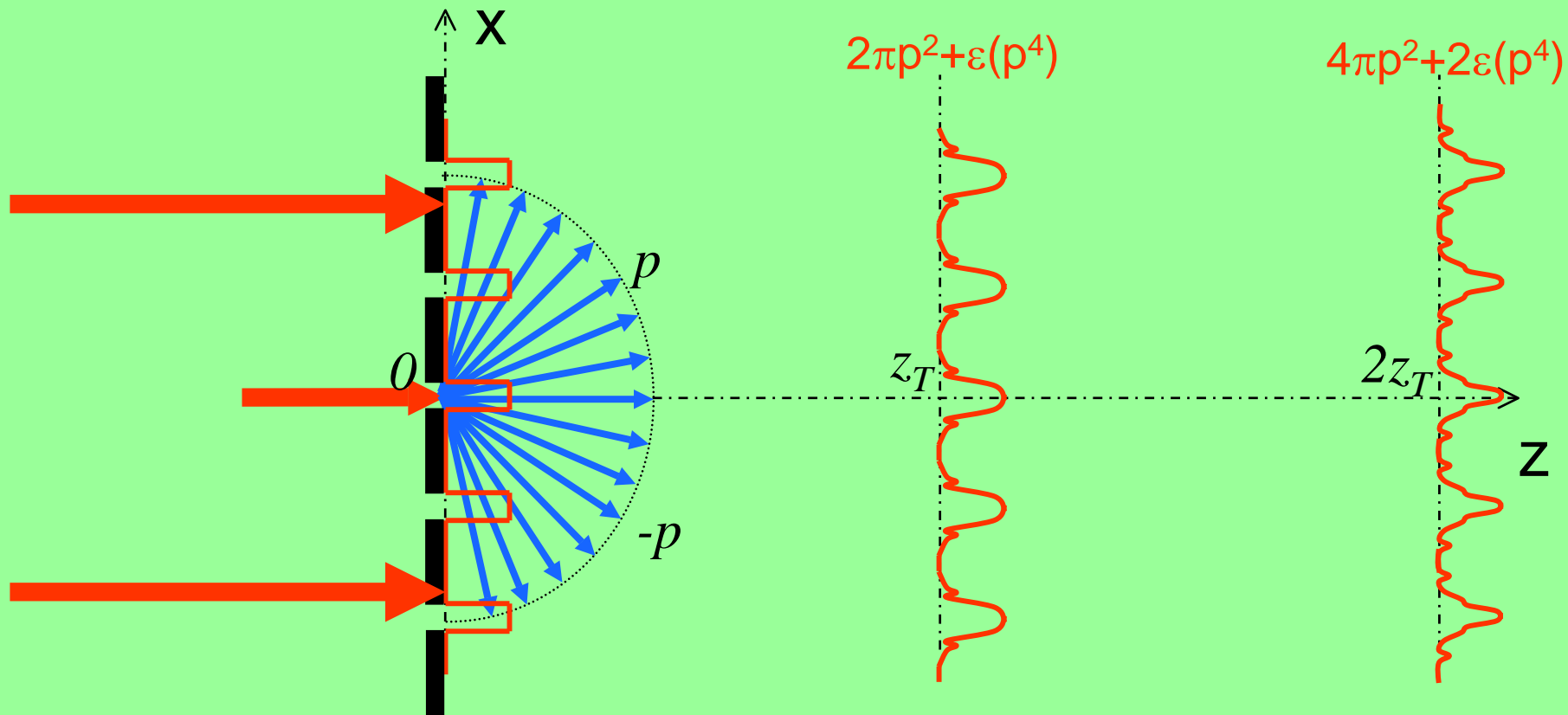
Effet Talbot monochromatique



Théorie scalaire usuelle: cas paraxial

Effet Talbot monochromatique et ses limites

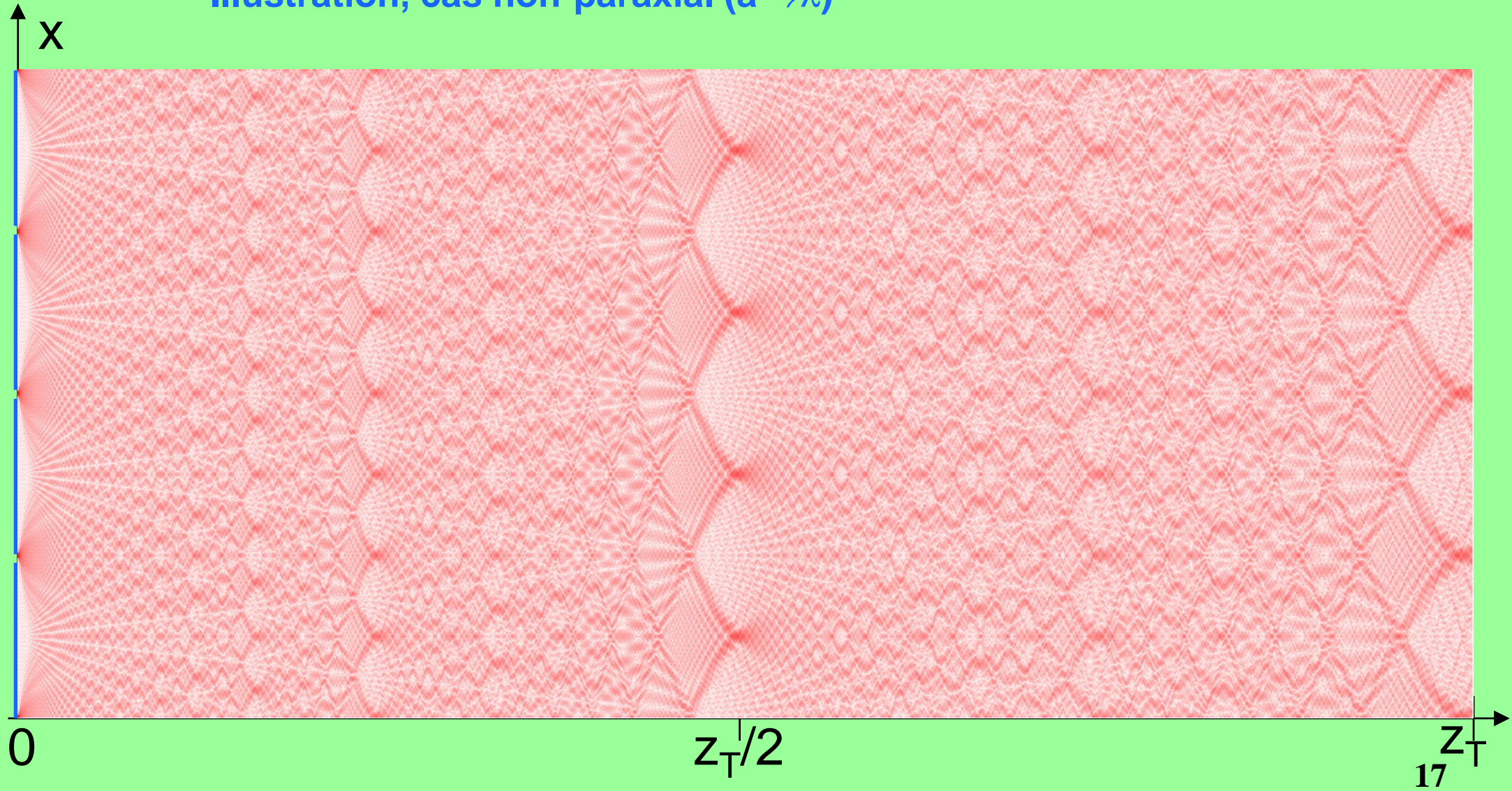
Effets non paraxiaux



Théorie scalaire non paraxiale

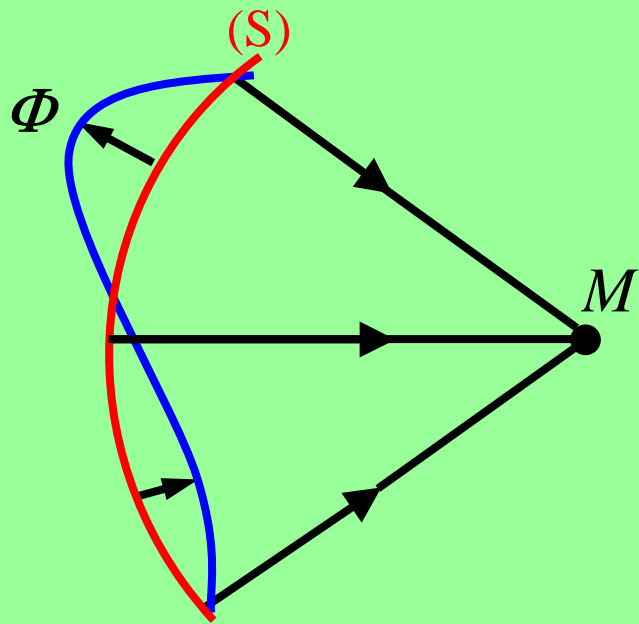
Effet Talbot monochromatique et ses limites

Illustration, cas non-paraxial ($a \rightarrow \lambda$)



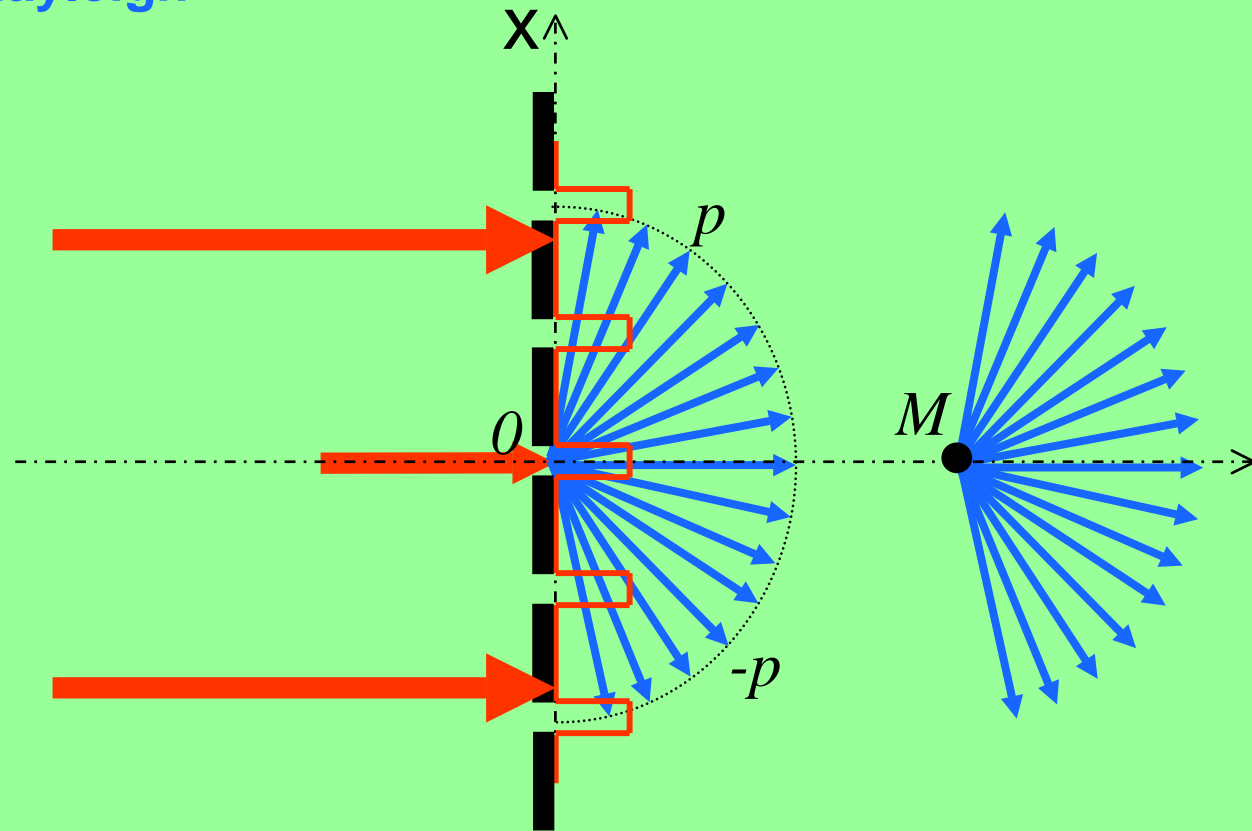
Effet Talbot monochromatique et ses limites

Adaptation du critère de Rayleigh



$$\Phi_{ab,max} < \pi/2$$

Critère de Rayleigh



$$(\Phi_{ab}(z))_{p=d/a} = \frac{2\pi}{\lambda} z \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{a}\right)^2} - 1 \right] - \pi m \left(\frac{d}{a}\right)^2 < \frac{\pi}{2}$$

Critère de Rayleigh modifié

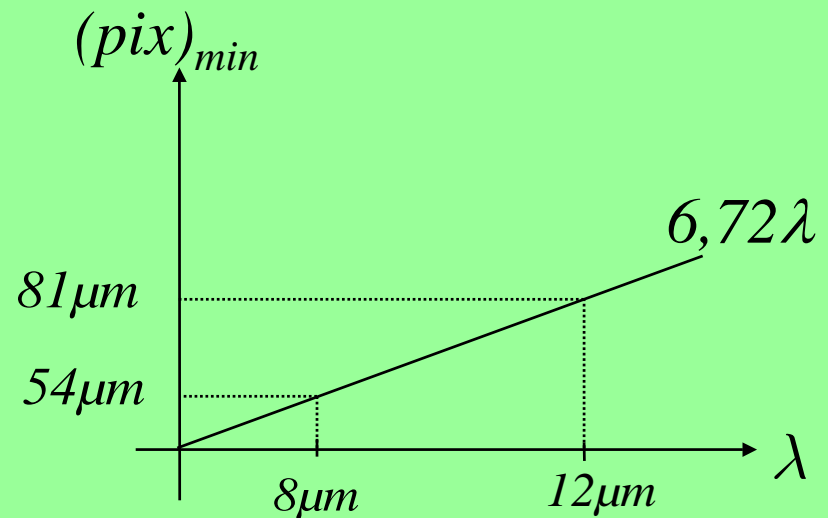
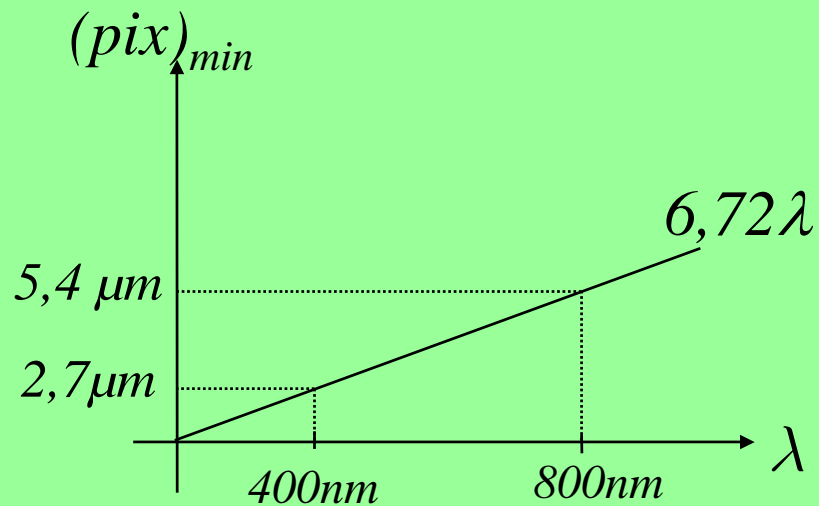
Effet Talbot monochromatique et ses limites

Adaptation du critère de Rayleigh

Pour d , a et λ fixées et en travaillant à la distance md^2/λ (m entier),
la largeur minimale des traits projetés vaut

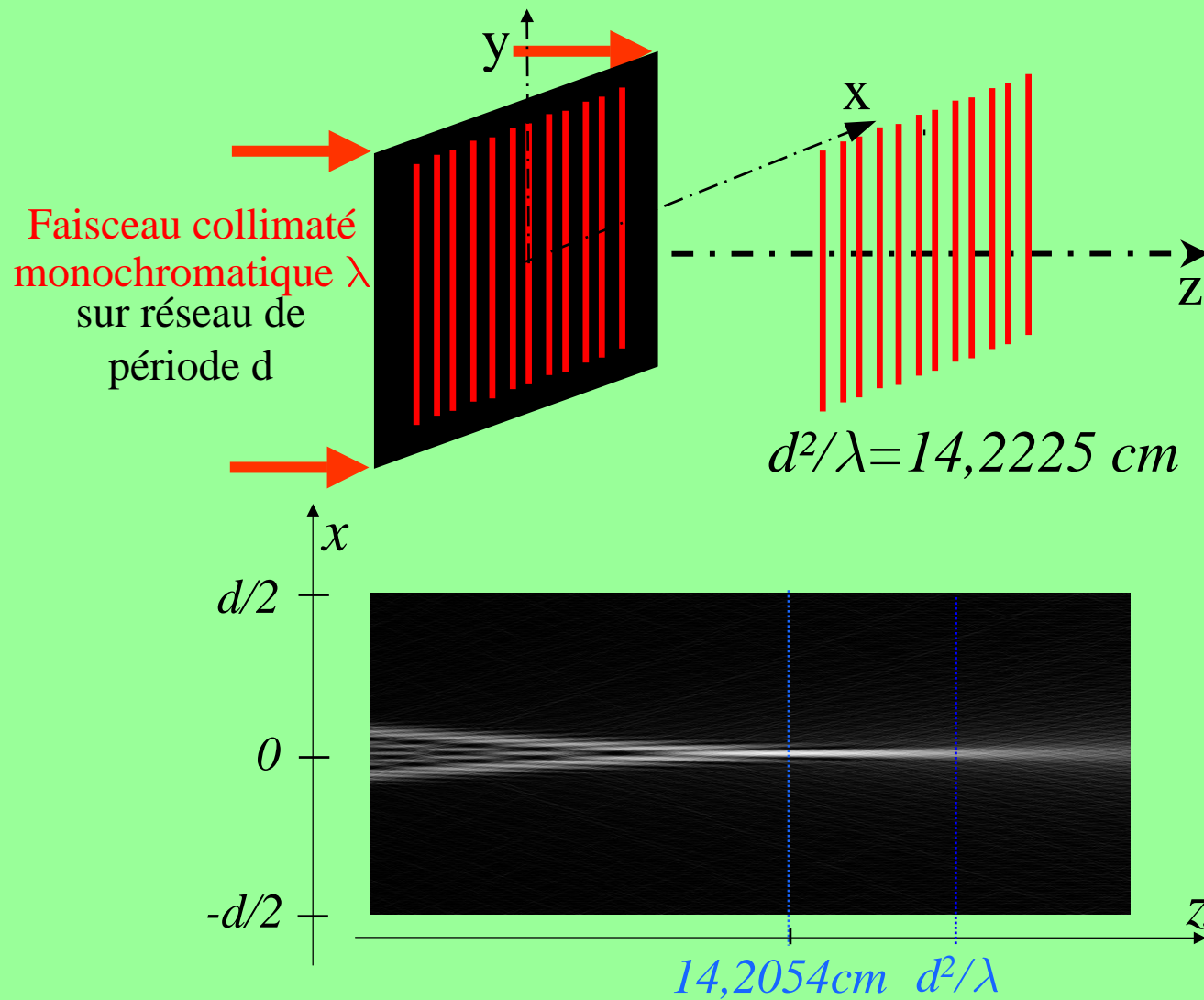
$$a_{\min} = (m/2)^{1/4} \times \sqrt{\lambda d}$$

Avec $d=2.\text{pix}$



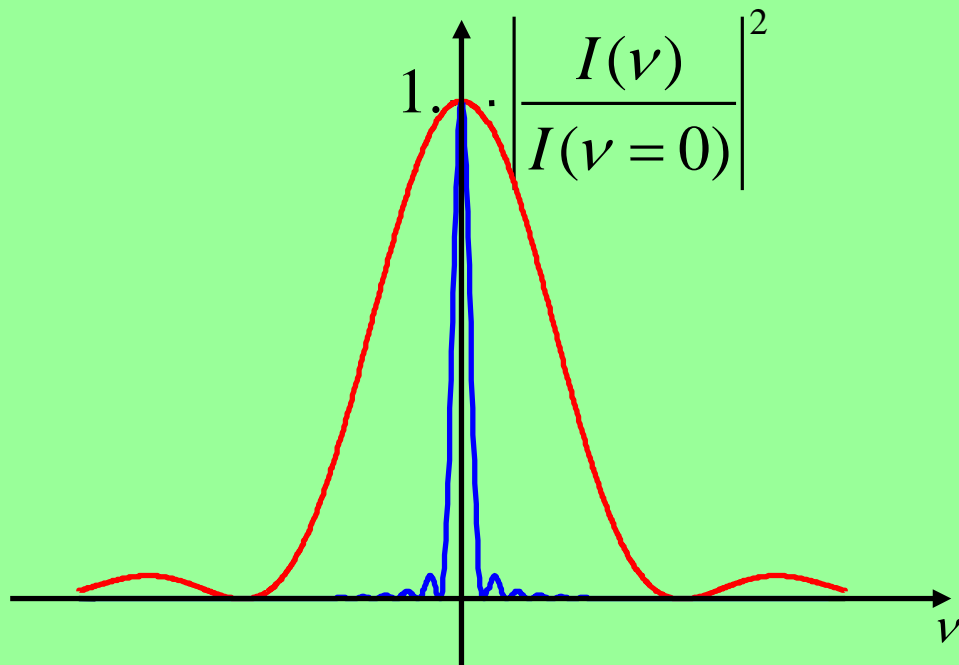
Effet Talbot monochromatique et ses limites

Théorie scalaire non paraxiale



Effet Talbot monochromatique et ses limites

Evaluation de la finesse de l'image



*Evaluation de la largeur spectrale
indépendante de l'amplitude incidente*

$$C = \int \left| \frac{I(\nu)}{I(0)} \right|^2 d\nu \sim \frac{1}{a_{eq}}$$

$$C = \frac{\sum_p |D_p|^2}{|D_0|^2} \sim \frac{d}{a_{eq}} \quad \text{Cas périodique}$$

D_p coefficients de Fourier de $I(x)$

Effet Talbot monochromatique et ses limites

Mise en évidence expérimentale des effets non paraxiaux: démarche

Mise en évidence expérimentale des effets non paraxiaux

- Dans le visible
- Dimensionnement d'un réseau en conditions non paraxial

Critère de Rayleigh modifié

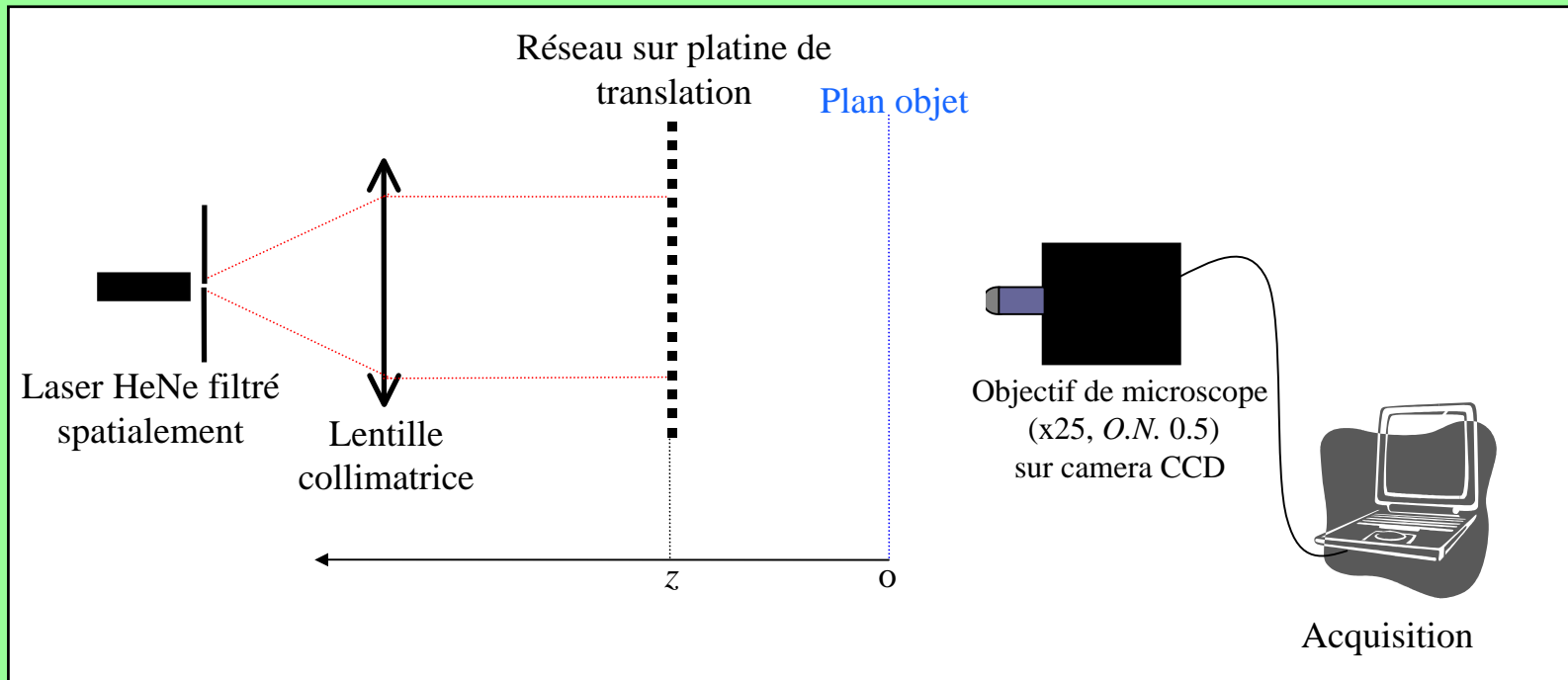
Pour $d=300\mu\text{m}$ $\lambda=632,8\text{ nm}$ alors $a_{\text{min}}\sim 12\mu\text{m}$

Choix $a=3\mu\text{m}$

- Tracé de l'évolution de la finesse du profil d'éclairement suivant z

Effet Talbot monochromatique et ses limites

Mise en évidence expérimentale des effets non paraxiaux

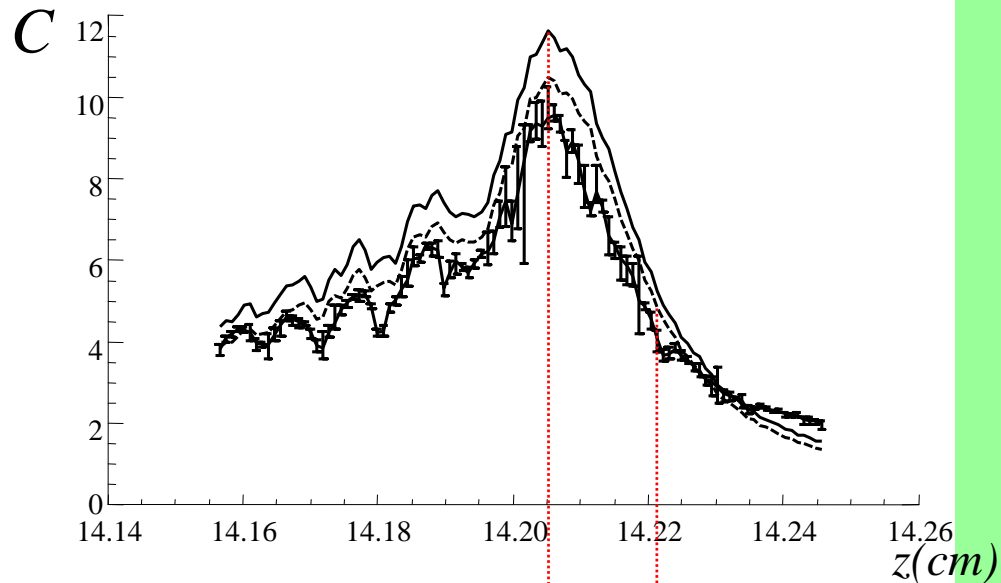


Réseau en conditions non paraxiales

Effet Talbot monochromatique et ses limites

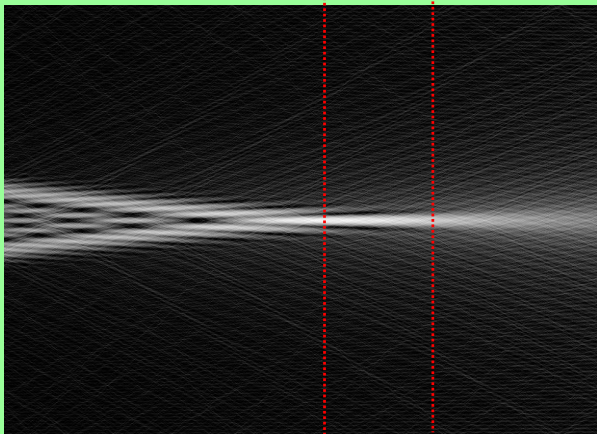
Mise en évidence expérimentale des effets non paraxiaux

En paraxial $C_{\max}=d/a=100$, ici $C_{\max}\approx 10$: existence d'« effets non paraxiaux »



Tracé de $C(z)$ au voisinage de l'auto-image non paraxiale

- **courbe pleine**: simulation
 - **courbe hachée**: simulation+filtrage optique
 - **courbe et barres d'erreur**: expérimentation
- barres d'erreur: problème des vibrations
autres écarts: aberrations objectif

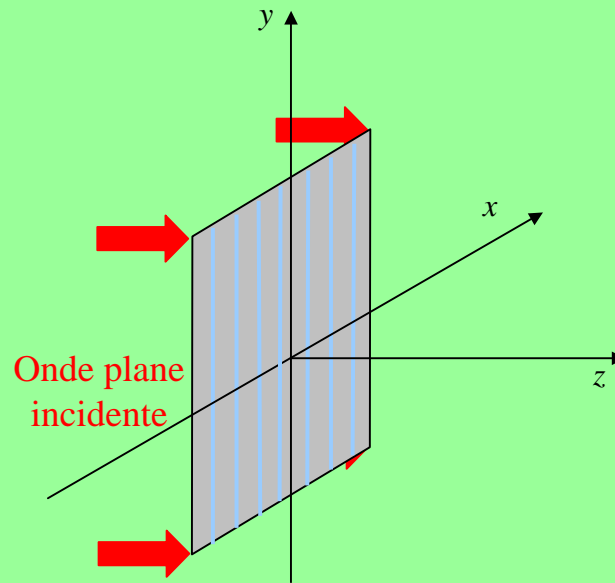
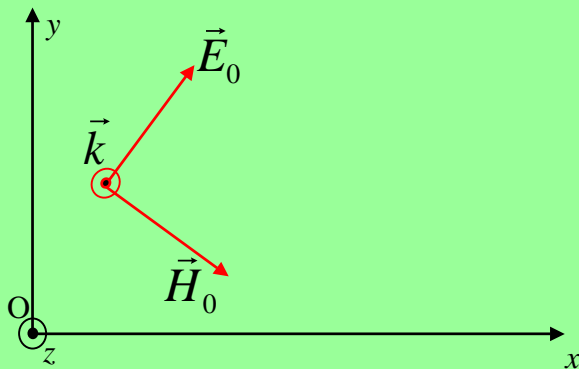


E.di Mambro & al., J.Opt.Soc.Am.A, décembre 2004

Effet Talbot monochromatique et ses limites

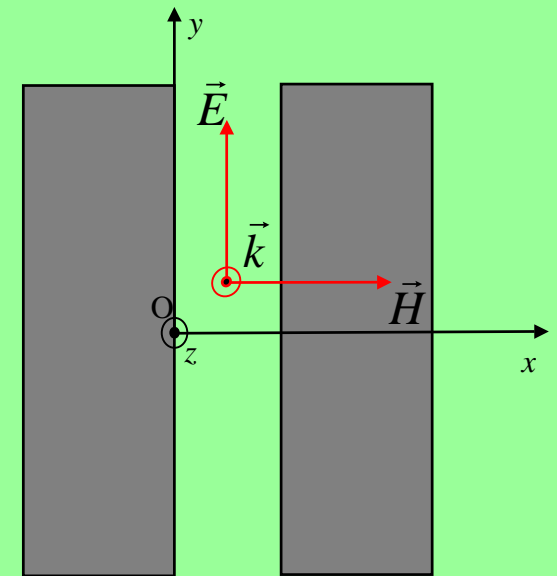
Effets électromagnétiques

Plan d'entrée du réseau $z=0$



Onde électromagnétique incidente projetée sur les modes de propagation de la fente

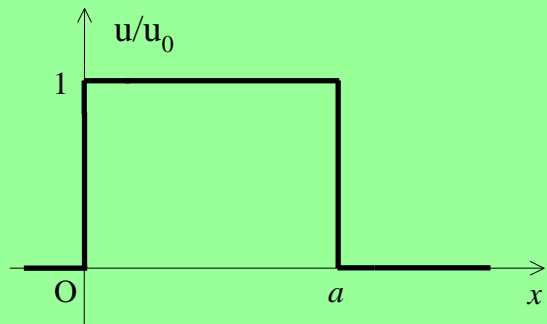
Plan de sortie du réseau $z=h$



Effet Talbot monochromatique et ses limites

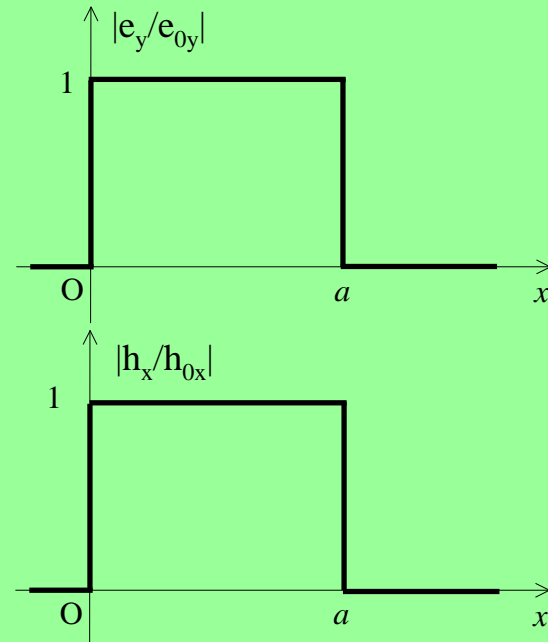
Effets électromagnétiques

$a \gg \lambda$ Composantes transversales modélisables par la théorie scalaire



Grandeur scalaire détectée

$$I = uu^*$$

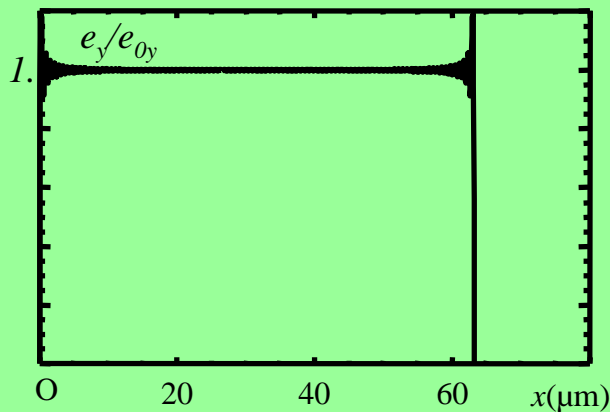


Grandeur électromagnétique détectée

$$w = \frac{\epsilon_0}{2} e_y e_y^* + \frac{1}{2\mu_0} h_x h_x^*$$

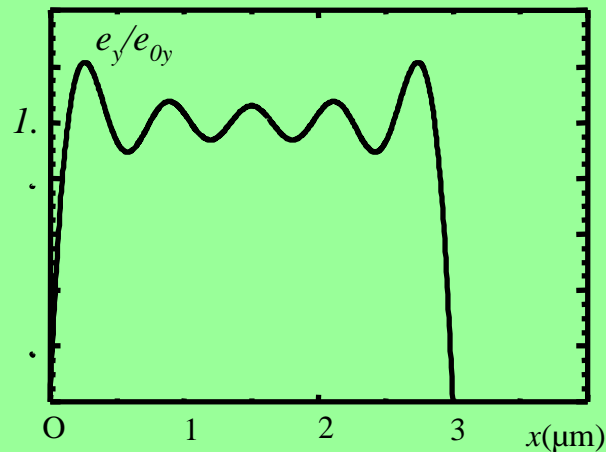
Effet Talbot monochromatique et ses limites

Effets électromagnétiques



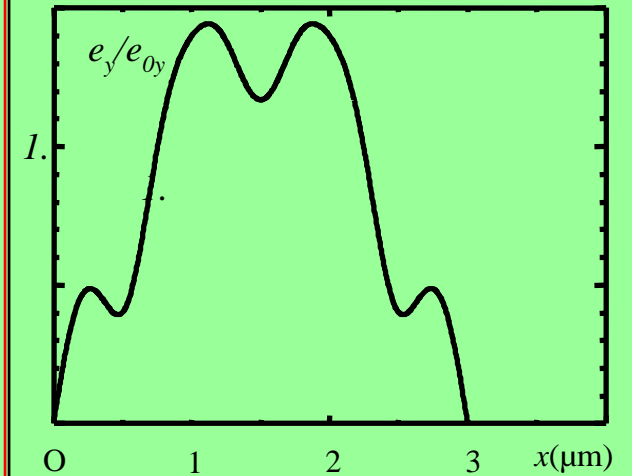
$a=100\lambda$
 $h=90\text{nm}$ pour $\lambda=632,8\text{nm}$

Fente « large »



$a=3\mu\text{m}$
et $h=90\text{nm}$ pour $\lambda=632,8\text{nm}$

Cas de l'étude expérimentale



$a=3\mu\text{m}$
et $h=10\mu\text{m}$ pour $\lambda=632,8\text{nm}$

Fente « épaisse »

Exemple de e_y en sortie de fente

Plan de la présentation

I. Objectif: Caractérisation spatiale de détecteurs infrarouge

II. Méthodes

A. Effet Talbot monochromatique et ses limites

Grandeur d'évaluation de la finesse des profils d'éclairement

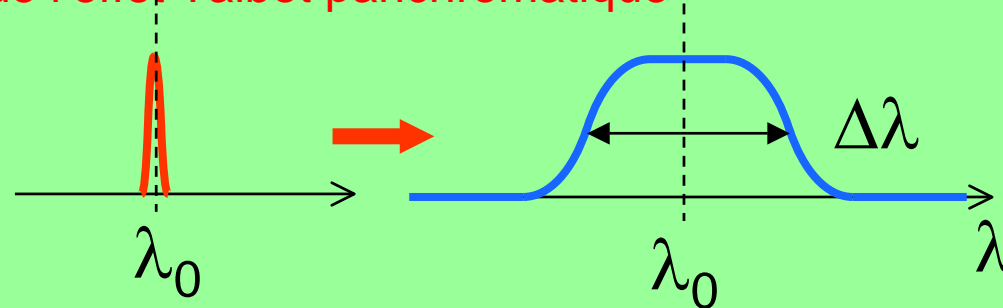
Critère de Rayleigh modifié pour la largeur de motifs minimale

Mise en évidence expérimentale des effets non paraxiaux

Validation de la théorie scalaire non paraxiale dans notre cas

Comment contourner les limitations non paraxiales?

B. Apport de l'effet Talbot panchromatique

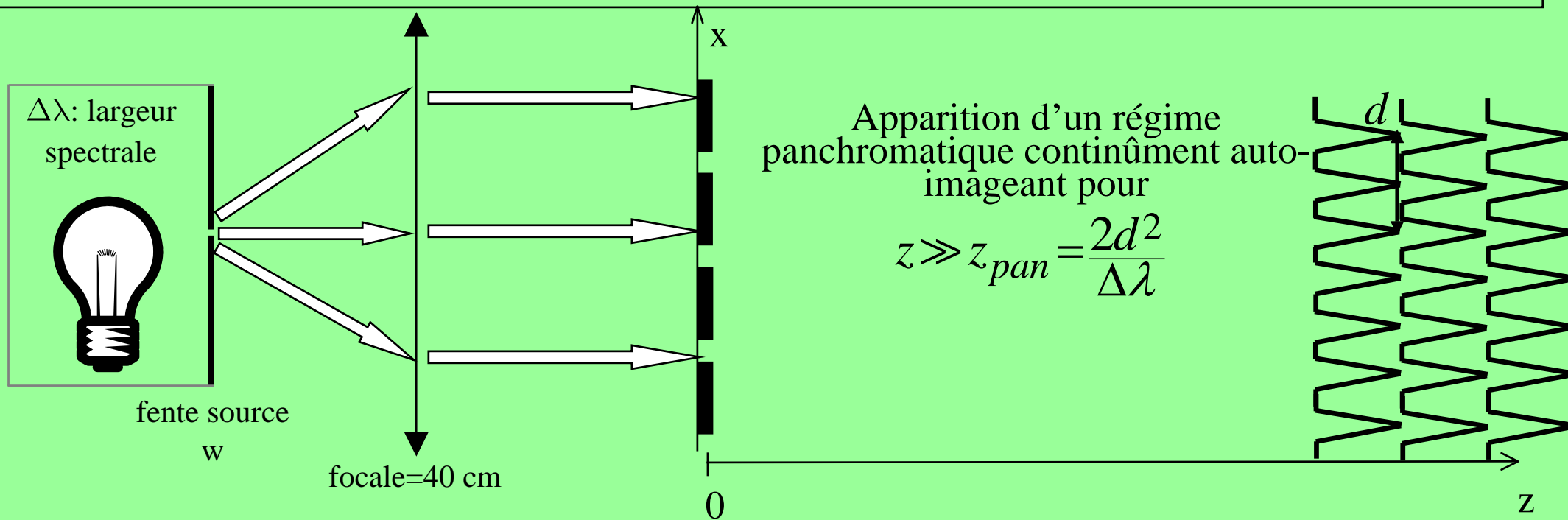


Apport de l'éclairage panchromatique

2000: découverte de l'effet Talbot panchromatique (*)

Un réseau éclairé par un **faisceau de lumière panchromatique spatialement cohérente** de largeur spectrale $\Delta\lambda$ produit un profil d'éclairage panchromatique périodique $I(x)$ pour des distances z grandes devant la distance

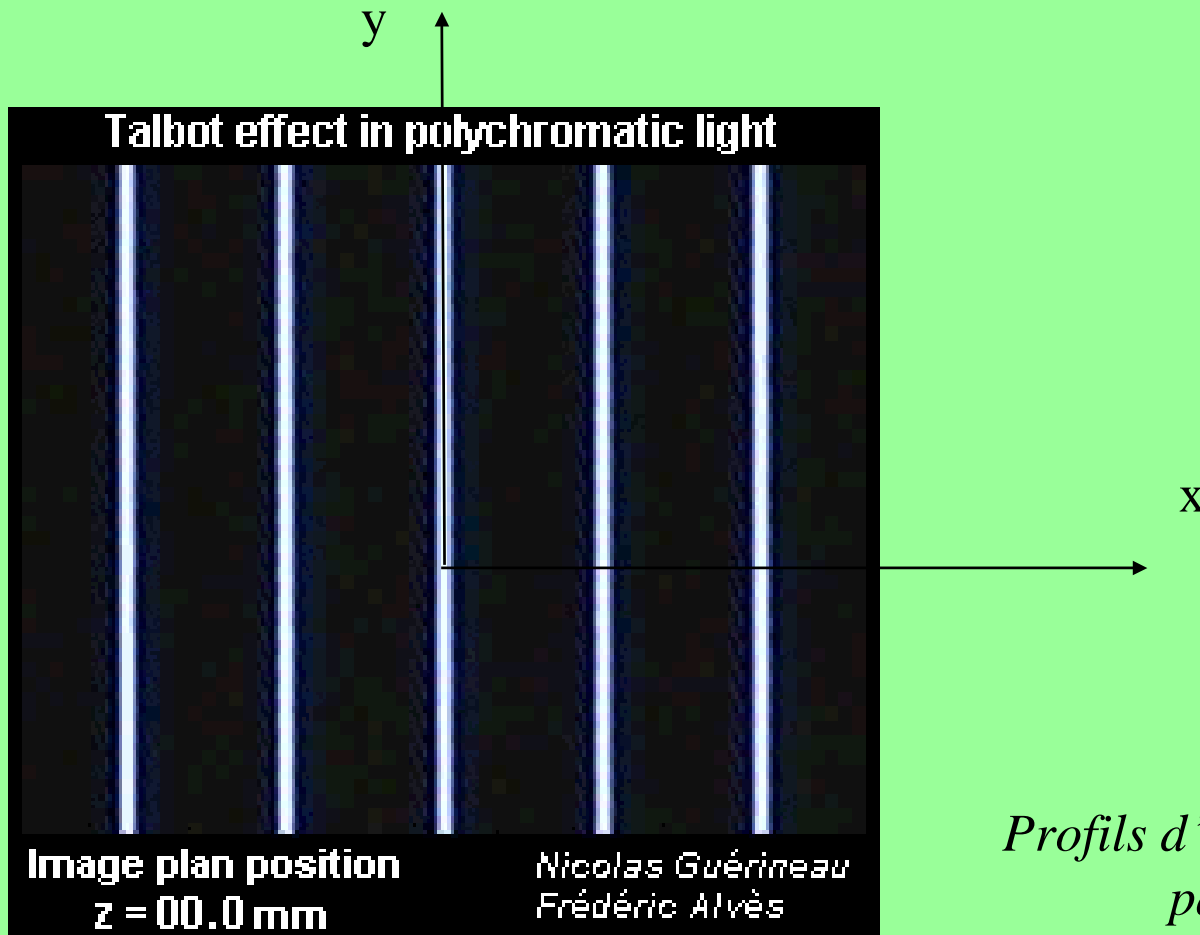
$$z_{pan} = \frac{2d^2}{\Delta\lambda}$$



(*) N.Guérineau&al, optics communications, 2000

Apport de l'éclairage panchromatique

Présentation de l'effet Talbot panchromatique

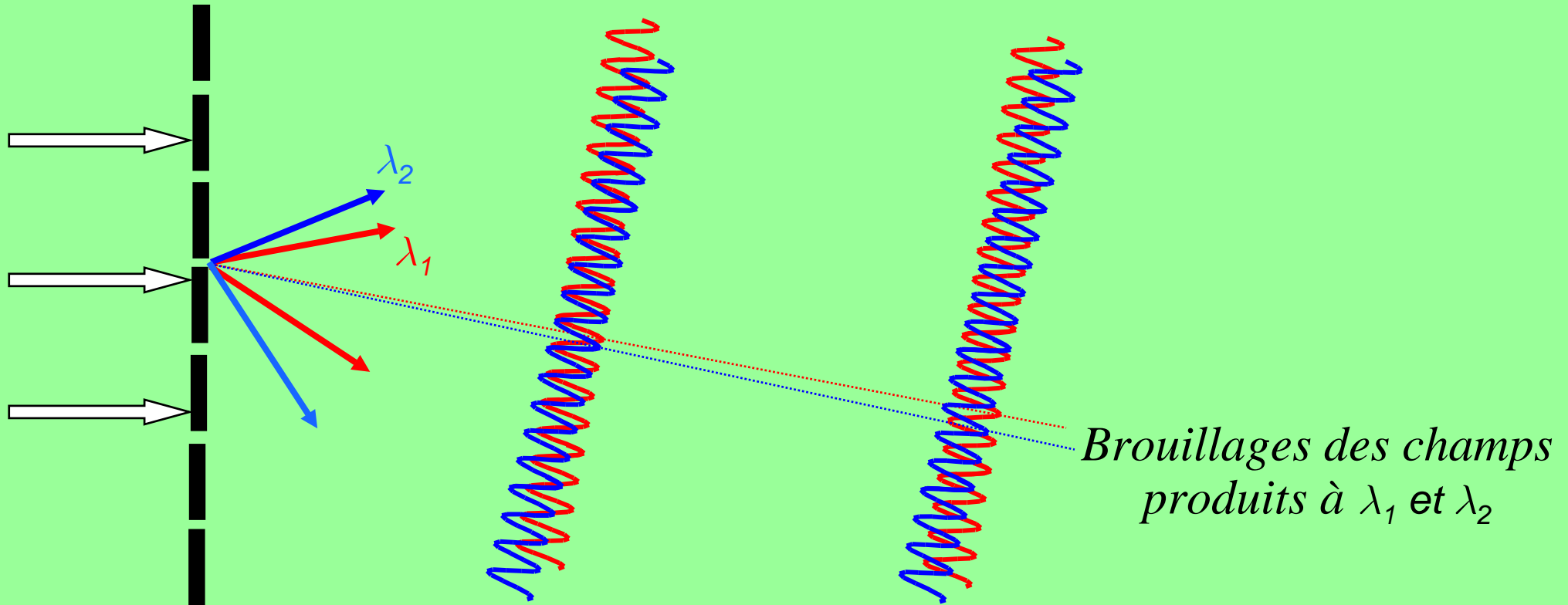


*Profils d'éclairement dans les plans
parallèles au réseau*

(*) N.Guérineau & al, Opt. Exp., vol.11, p.3310-3319, 2003

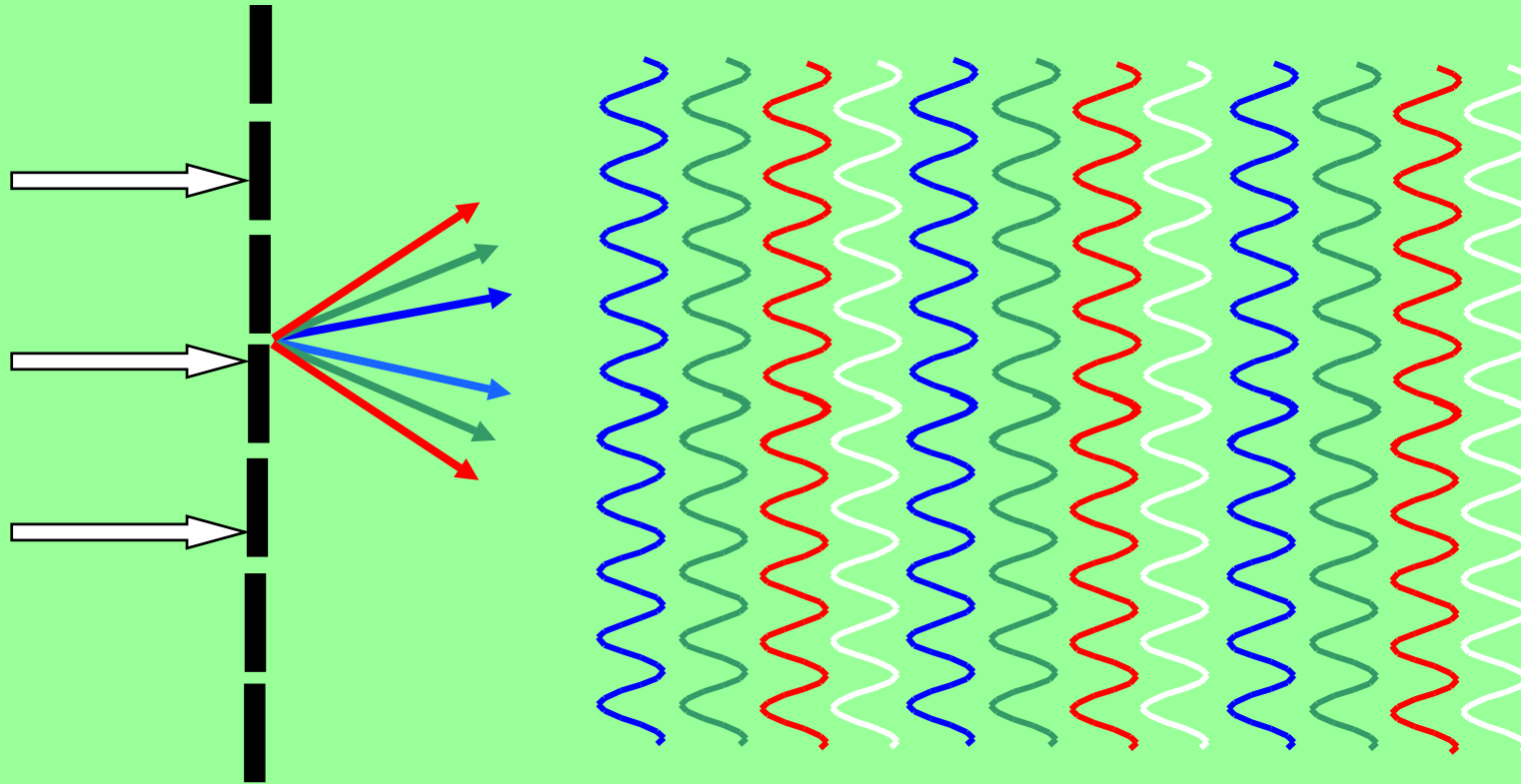
Apport de l'éclairage panchromatique

Brouillage des ordres non symétriques



Apport de l'éclairage panchromatique

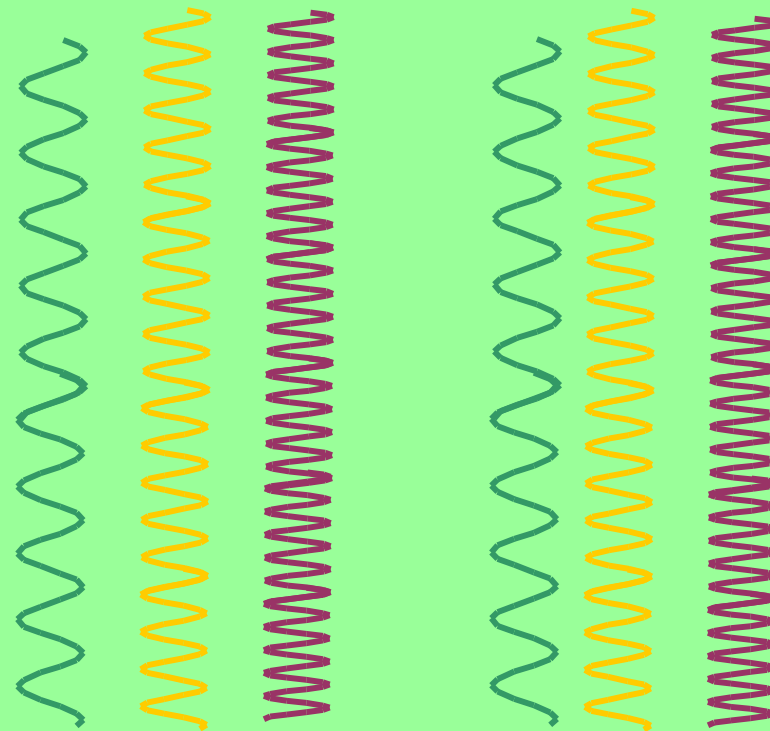
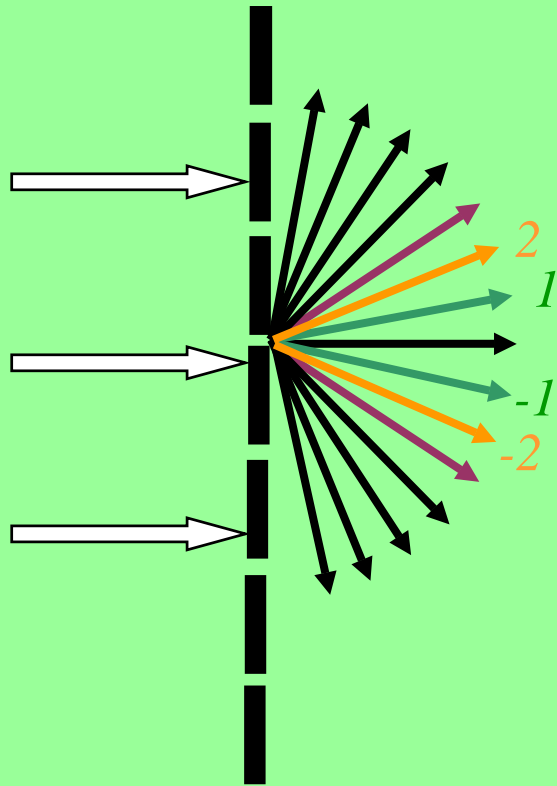
Influence des ordres symétriques



Champs continûment
auto-imageant en lumière
blanche

Apport de l'éclairage panchromatique

Influence des ordres symétriques



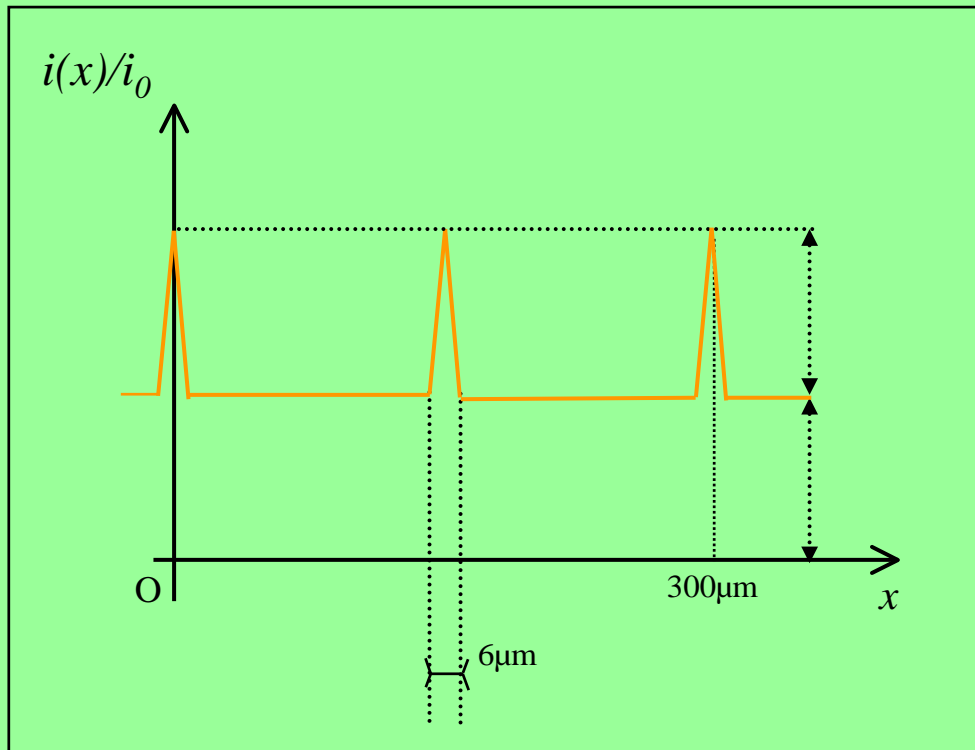
Champs continûment auto-imageant en lumière blanche

Somme incohérente de profils d'éclairement élémentaires invariants par propagation

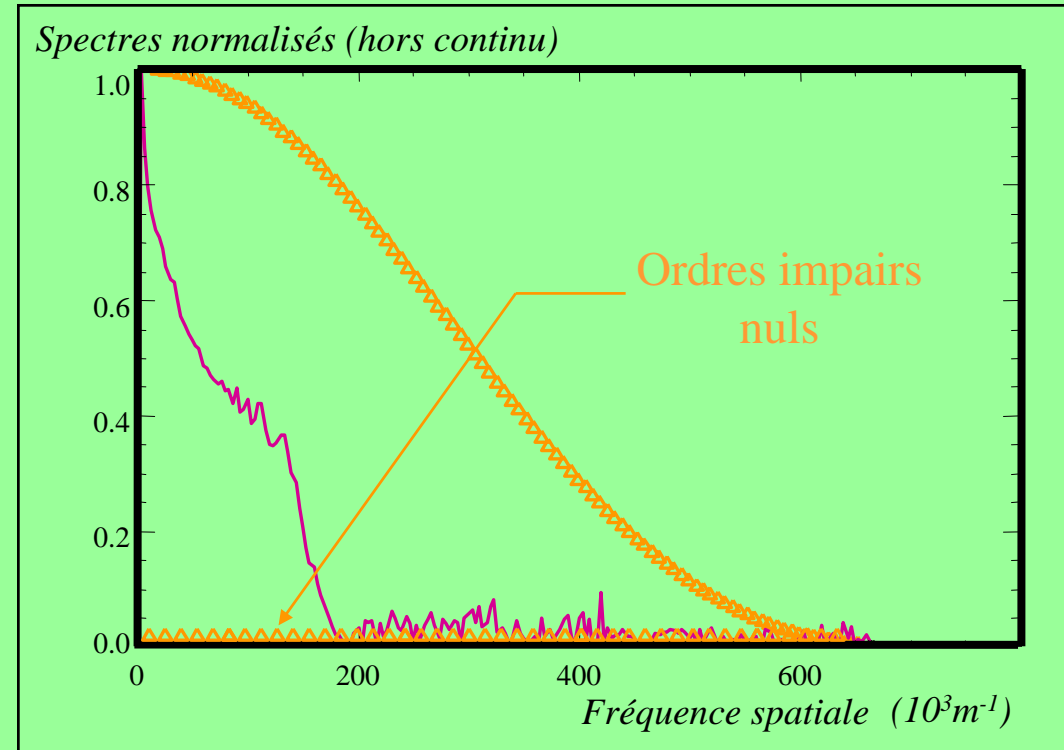
→ Phénomène a priori « aparaxial »

Apport de l'éclairage panchromatique

Amélioration de la finesse des motifs projetés



Profil d'éclairement de l'effet Talbot panchromatique pour une largeur de fente $a=3\mu\text{m}$ et une période $d=300\mu\text{m}$



Comparaison des spectres d'image

Δ auto-image panchromatique

$$C_{\text{panchro}} = 33,2$$

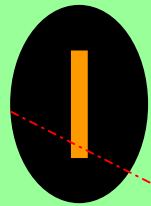
— meilleure auto-image monochromatique

$$C_{\text{monochro}} = 11,6$$

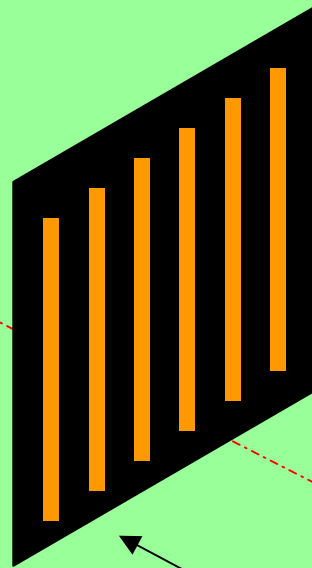
Apport de l'éclairage panchromatique

Influence de la largeur de fente source

Fente source
largeur w



f



z

Élargissement Δx des motifs avec z croissant

$$\Delta x = \frac{w}{f} z$$

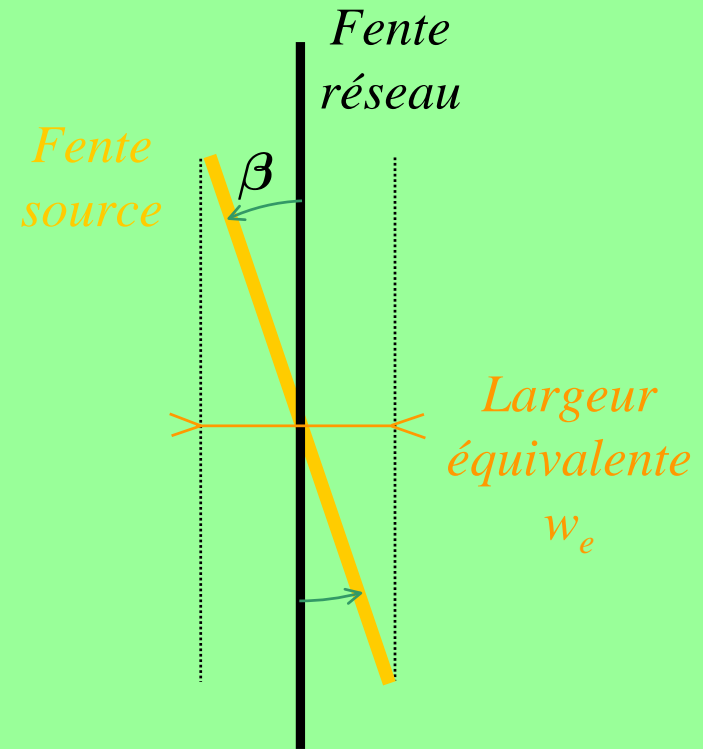
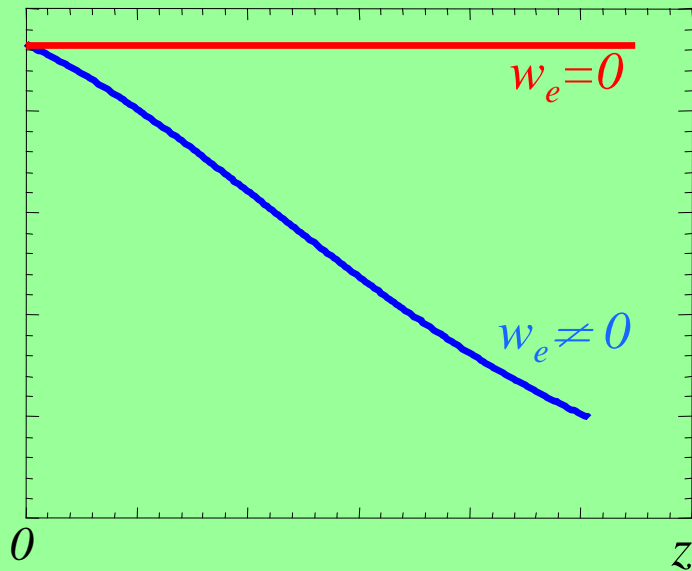
Filtrage de coupure

$$v_c \sim \frac{f}{wz}$$

Apport de l'éclairage panchromatique

Influence de la largeur de fente source

Amplitude d'un coefficient d'ordre pair $D_p(z)$



Inclinaison de la fente source

$$w_e = 35 \mu\text{m}$$

$$\beta \sim 0,1^\circ !$$

Temps d'intégration $\sim 3s$

Apport de l'éclairage panchromatique

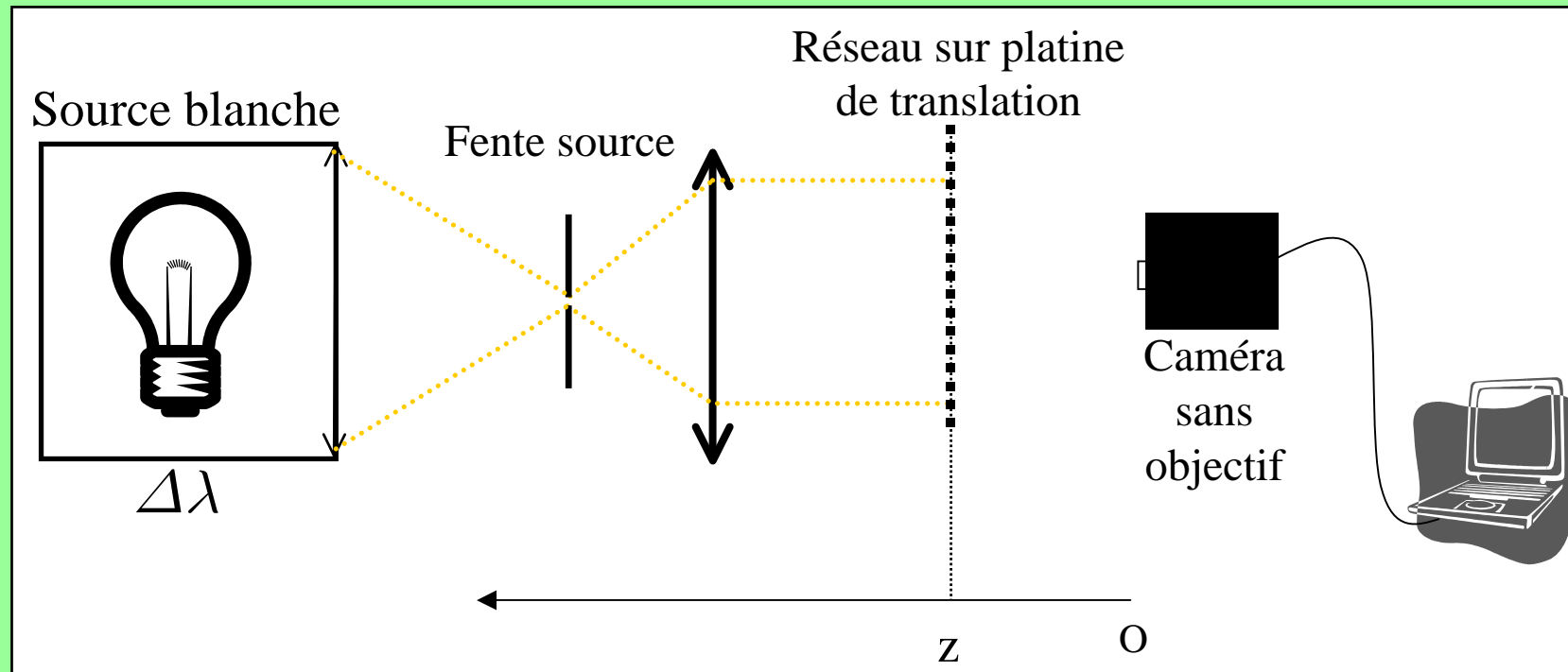
Mise en évidence expérimentale de l'« aparaxialité »

- Eclairage panchromatique spatialement cohérent du réseau utilisé pour la mise en évidence des effets non paraxiaux
- Observation de l'évolution en z pour arriver à situer la position du régime panchromatique qui dépend du spectre de source (*)
- Observation dans l'espace de Fourier pour s'affranchir des déplacements latéraux

(*) N.Guérineau & al, Opt. Exp., vol.11, p.3310-3319, 2003

Apport de l'éclairage panchromatique

Mise en évidence d'un effet Talbot panchromatique « aparaxial »

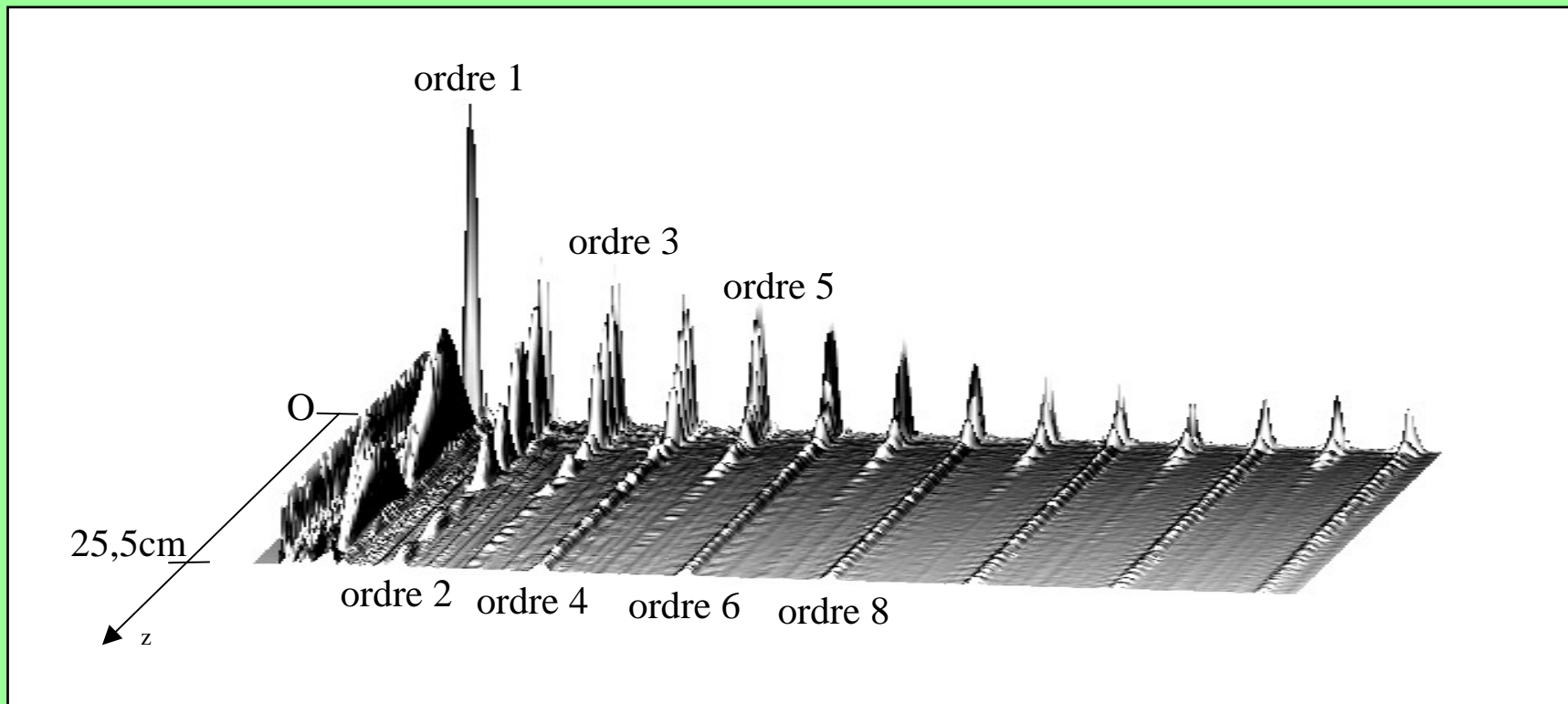


Réseau identique à l'étude des effets non paraxiaux $a=3\mu\text{m}$, $d=300\mu\text{m}$

Apport de l'éclairage panchromatique

Mise en évidence d'un effet Talbot panchromatique « aparaxial »

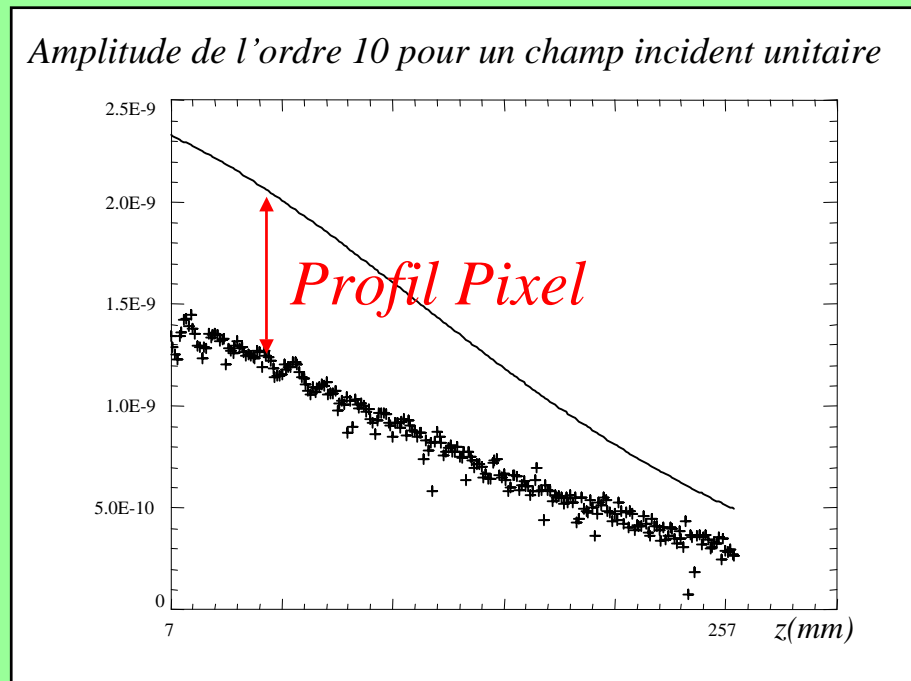
Spectre des projections directes sur la matrice de détecteur par rapport à l'éloignement du réseau



Annulation des ordres impairs, stabilisation des ordres pairs

Apport de l'éclairage panchromatique

Filtrage spatial de la source

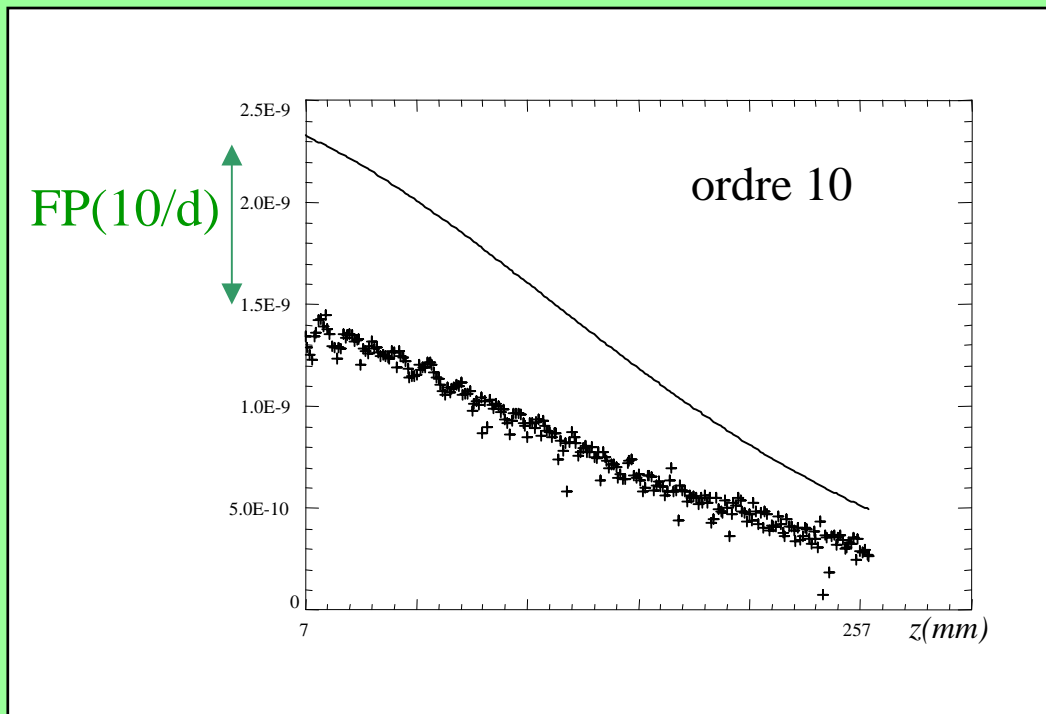


- (ligne) *Ordre 10 de l'auto-image de Talbot filtrée par la fente source $w=38\mu\text{m}$ avec focale=40cm*
- + (croix) *Relevé expérimental de l'ordre 10*

Pas de gain de finesse sur le profil produit mais possibilité d'utiliser la variation en z pour la mesure de profil pixel

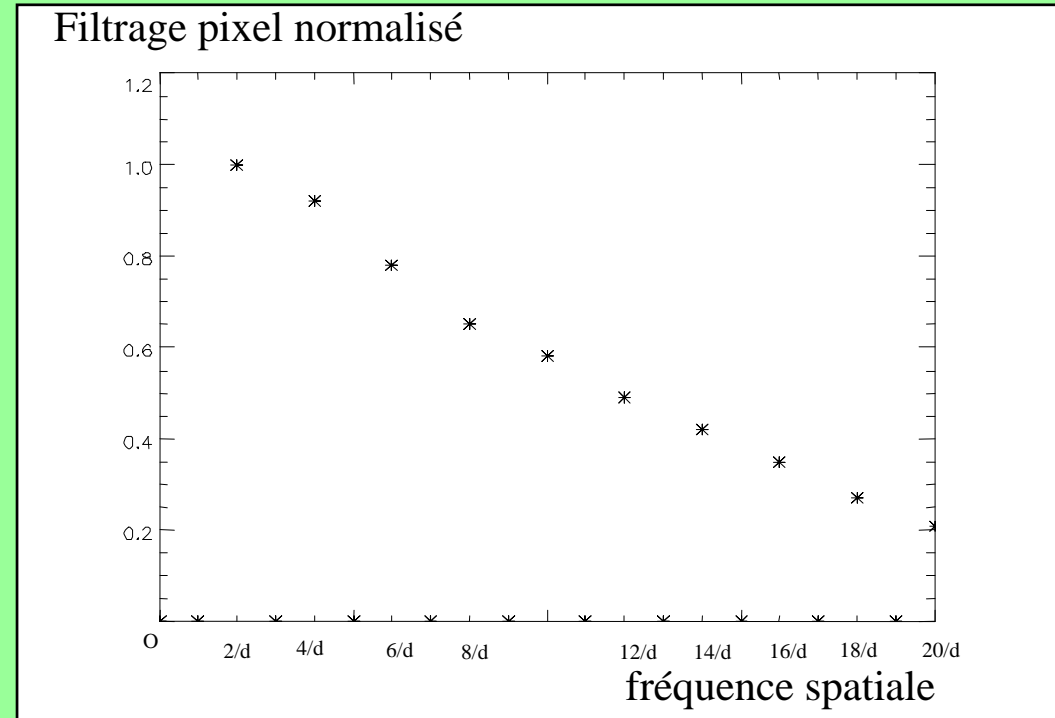
Apport de l'éclairage panchromatique

Mesure du filtrage pixel panchromatique



Interpolation de la courbe expérimentale par la courbe théorique

➡ Mesure du filtrage pixel

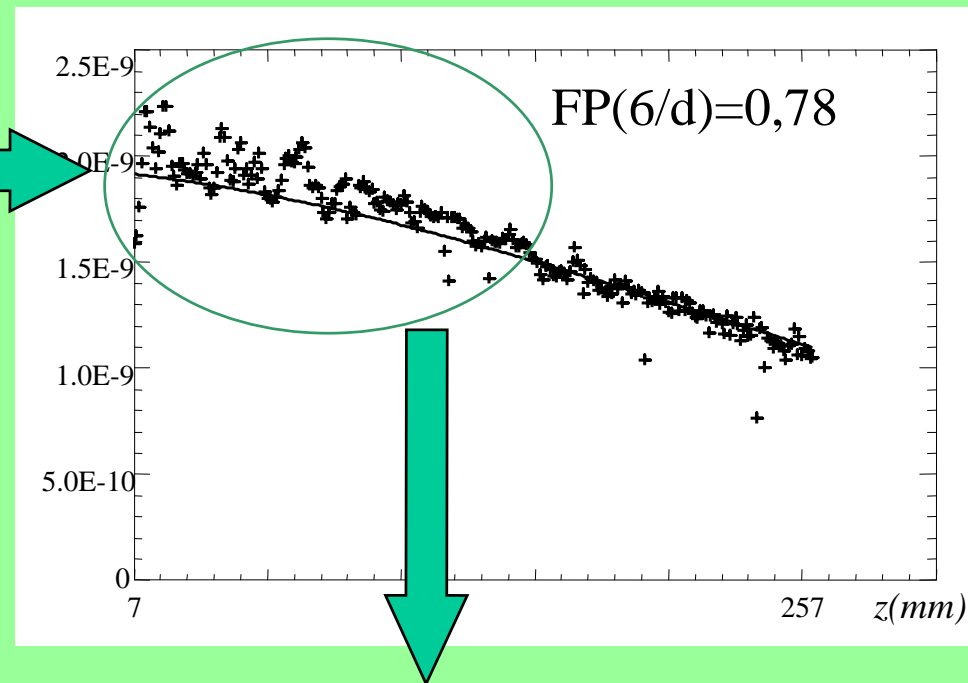
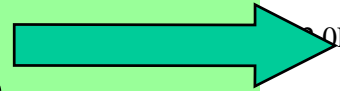


Mesure spectrale du profil pixel panchromatique

Apport de l'éclairage panchromatique

Pistes d'améliorations de la mesure

Interpolation ambiguë
dans la zone chromatique



- Réduction de la largeur de fente source

- Diminution de la distance d'apparition de l'auto-image

Plan de la présentation

I. Objectif: Caractérisation spatiale de détecteurs infrarouge

II. Méthodes

A. Effet Talbot monochromatique et ses limites

B. Apport de l'effet Talbot panchromatique

Mise en évidence de l'insensibilité de l'effet Talbot panchromatique aux effets non paraxiaux

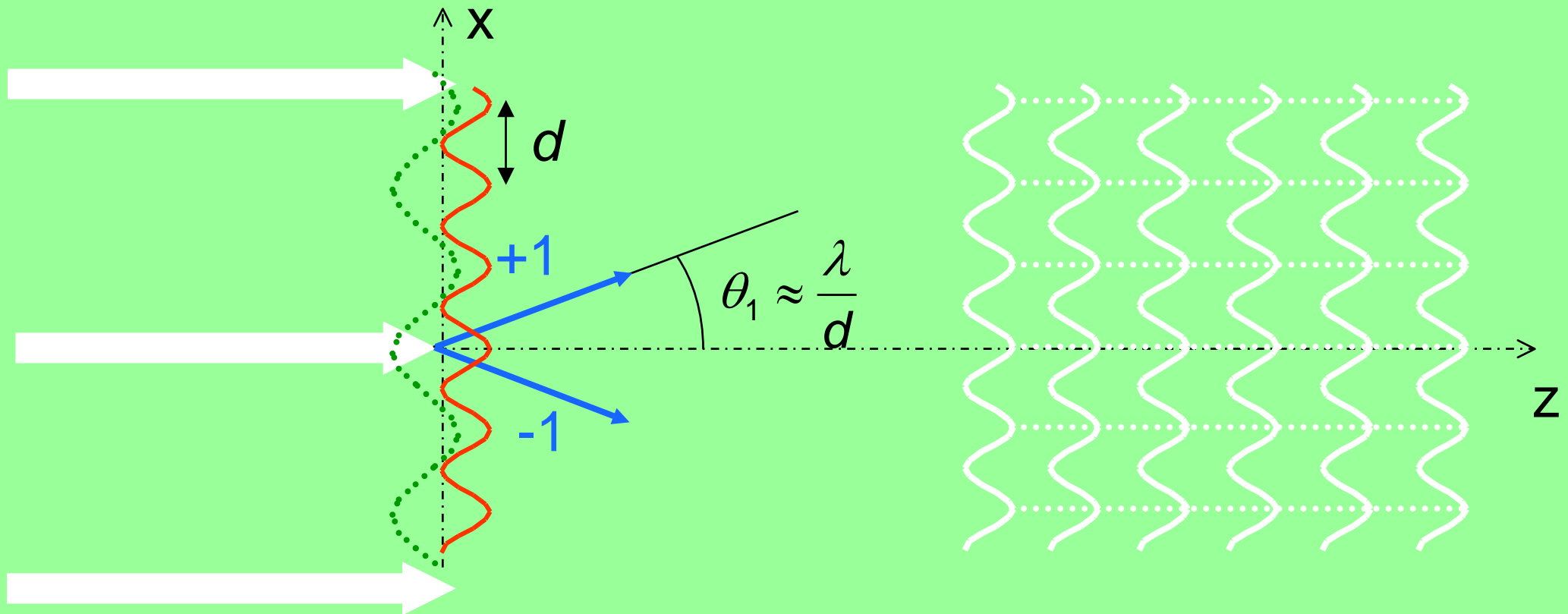
Développement d'une méthode de mesure de profil pixel panchromatique

Réduction de la zone chromatique pour améliorer la mesure?

C. Utilisation de nouveaux réseaux

Utilisation de nouveaux réseaux

Notion de réseau continûment auto-imageant

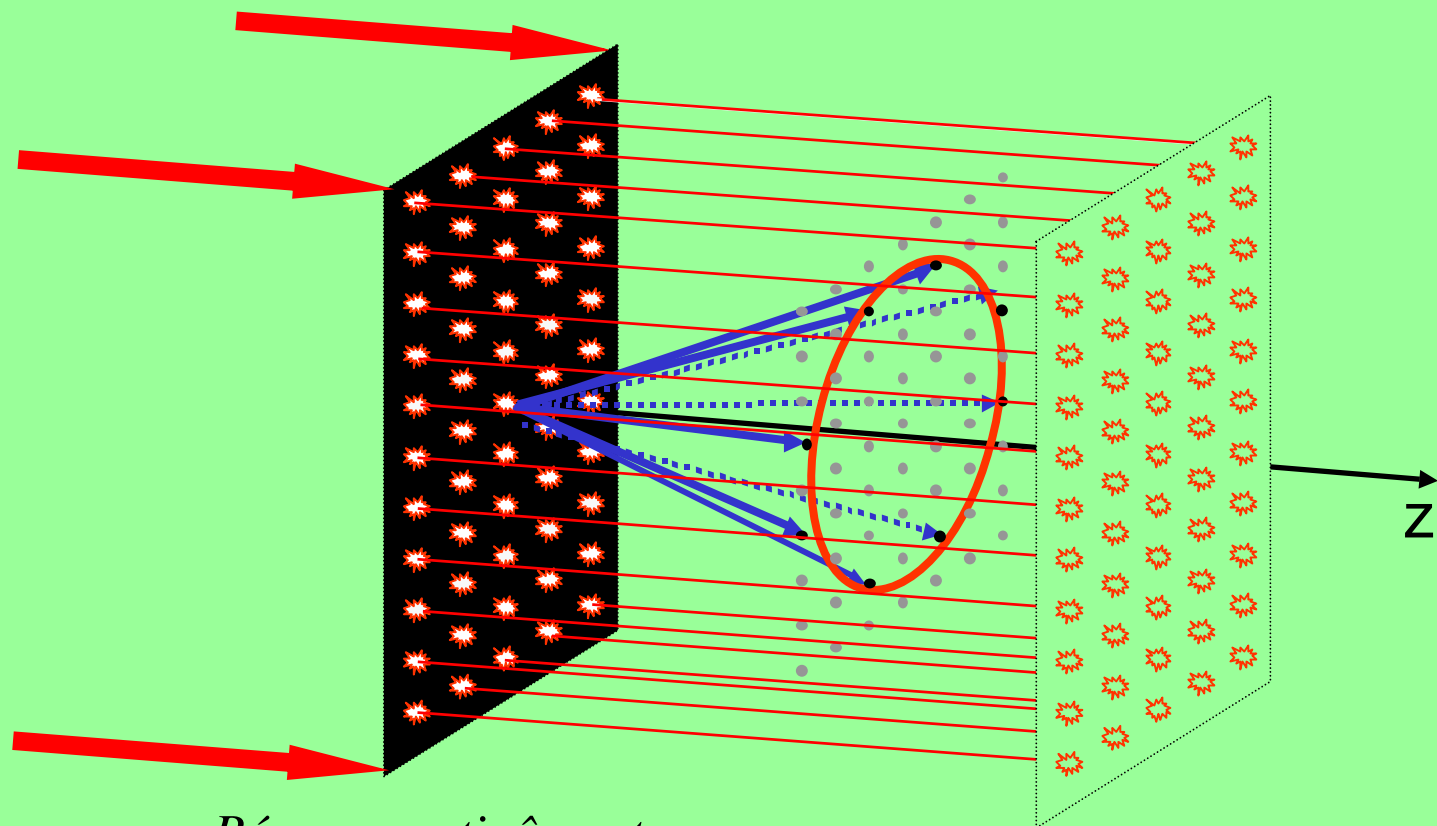


Objet périodique et
continûment auto-imageant

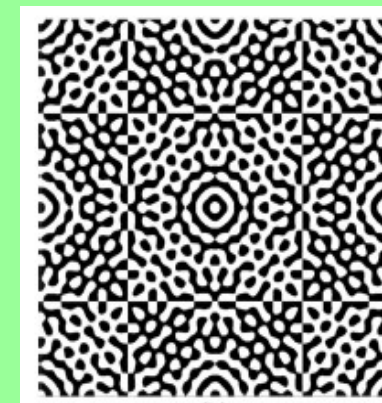
⇒ Champ continûment auto-imageant
et achromatique

Utilisation de nouveaux réseaux

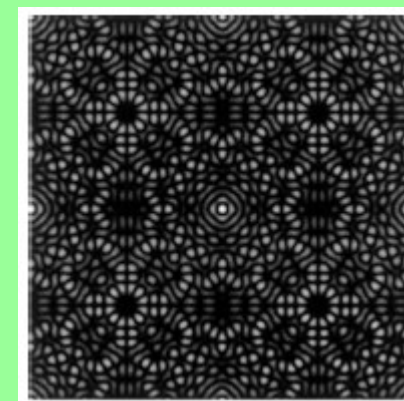
Réseau continûment auto imageant d'ordre 24



Réseau continûment auto-imageant



Phase (2 niveaux)

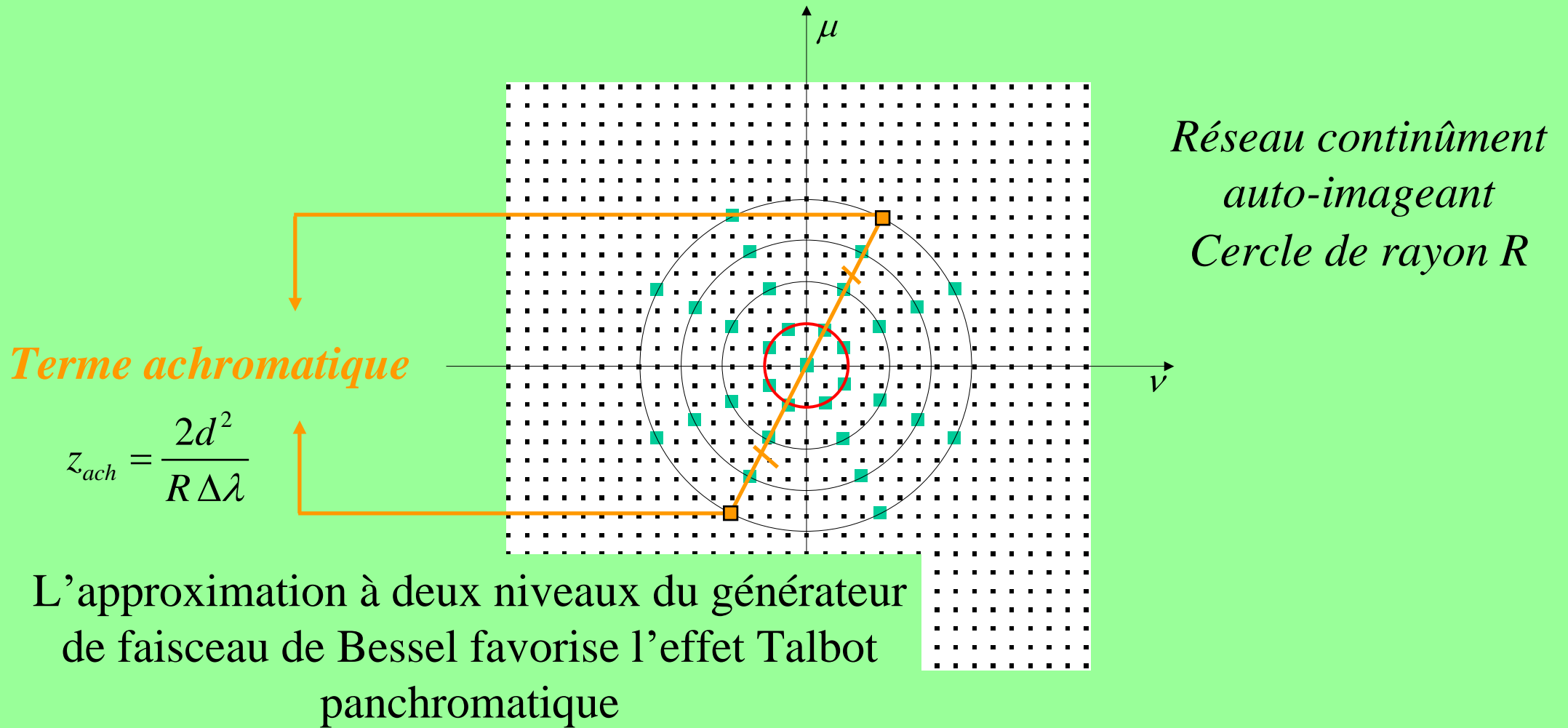


Amplitude

Exemple à 24 ordres

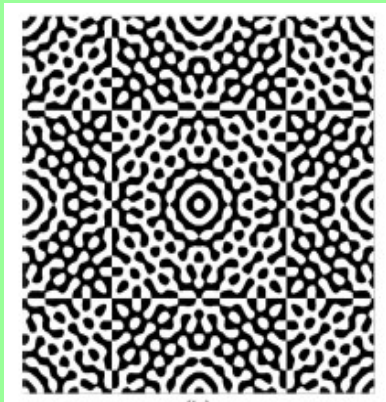
Utilisation de nouveaux réseaux

Génération d'un tableau non diffractant en lumière blanche

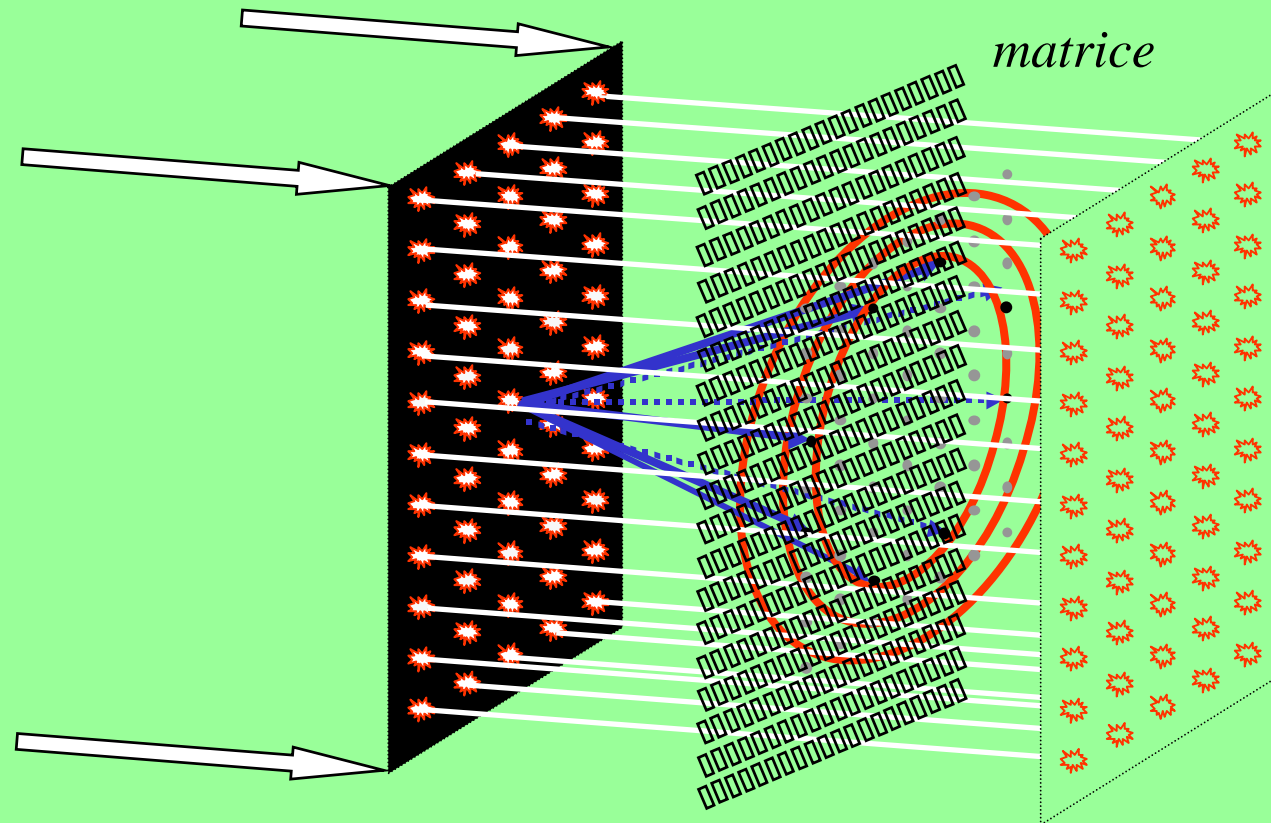


Utilisation de nouveaux réseaux

Approximation du réseau continûment auto imageant (RCAI) d'ordre 24



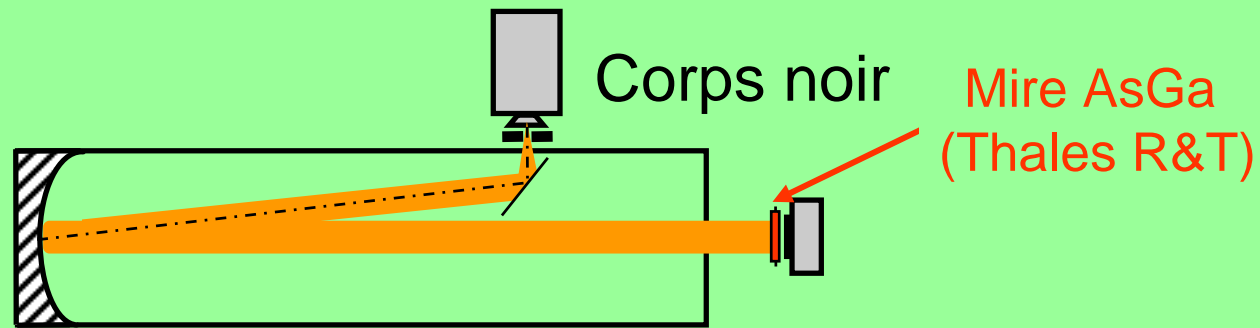
Phase (2 niveaux)



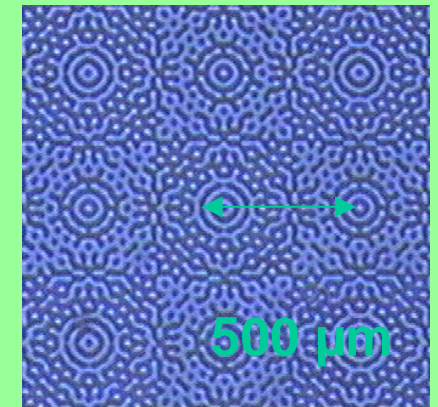
Exemple à 24 ordres

Utilisation de nouveaux réseaux

Mesure de profil pixel par utilisation du RCAI en infrarouge



Collimateur



Matrice de microbolomètres
320x240 (ULIS)
 $p=45\mu m$



Utilisation de nouveaux réseaux

Mesure de profil pixel par utilisation du RCAI en infrarouge

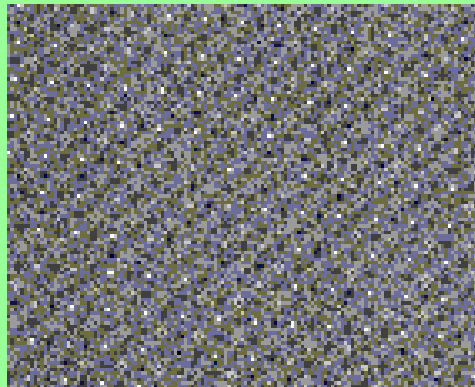


Image brute

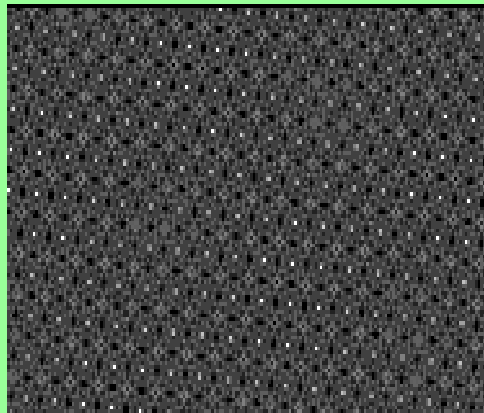
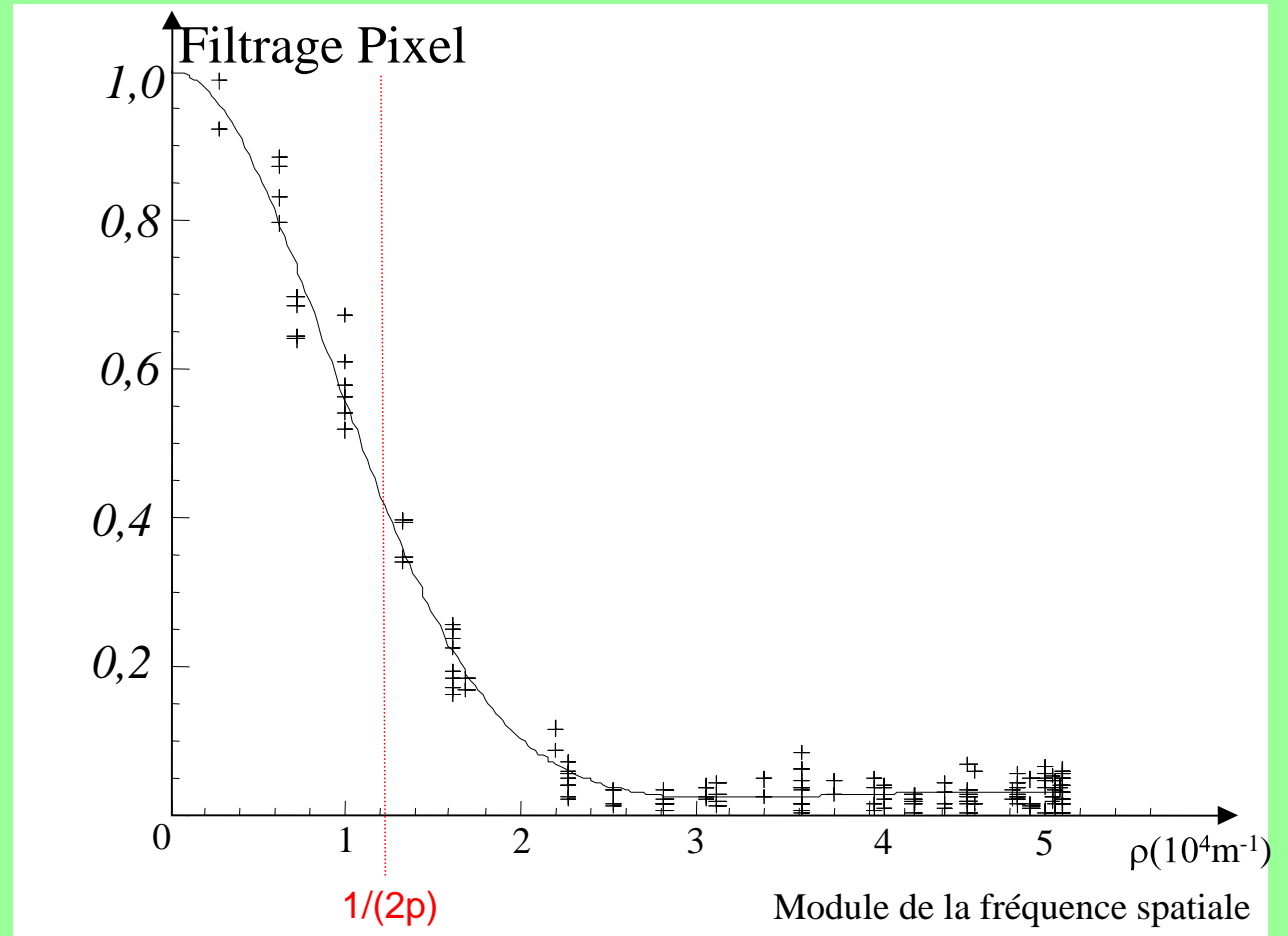


Image filtrée



Plan de la présentation

I. Objectif: Caractérisation spatiale de détecteurs infrarouge

II. Méthodes

- A. Effet Talbot monochromatique et ses limites
- B. Apport de l'effet Talbot panchromatique
- C. Utilisation de nouveaux réseaux

Réduction de la distance d'apparition de l'effet Talbot panchromatique par utilisation d'approximation de Réseaux Continument Auto-Imageant

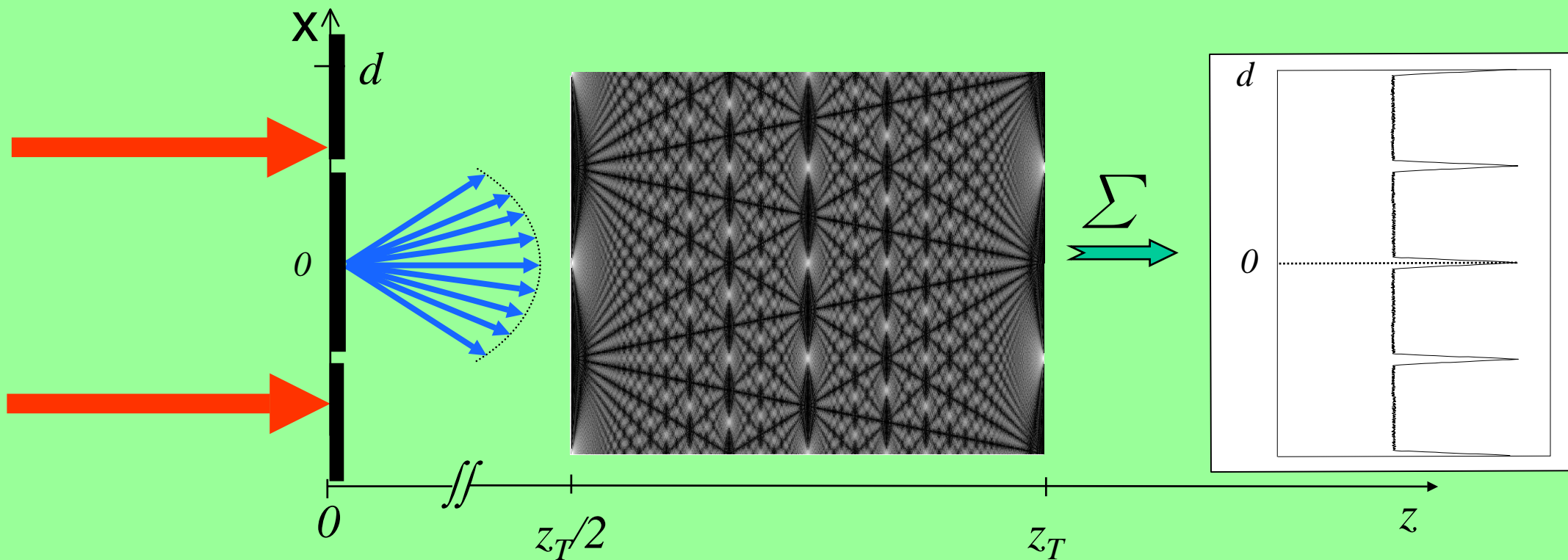
Mise en œuvre de cette amélioration sur la mesure à haute résolution d'un profil pixel en bande III

Quelle méthode pour un profil pixel monochromatique?

III. Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

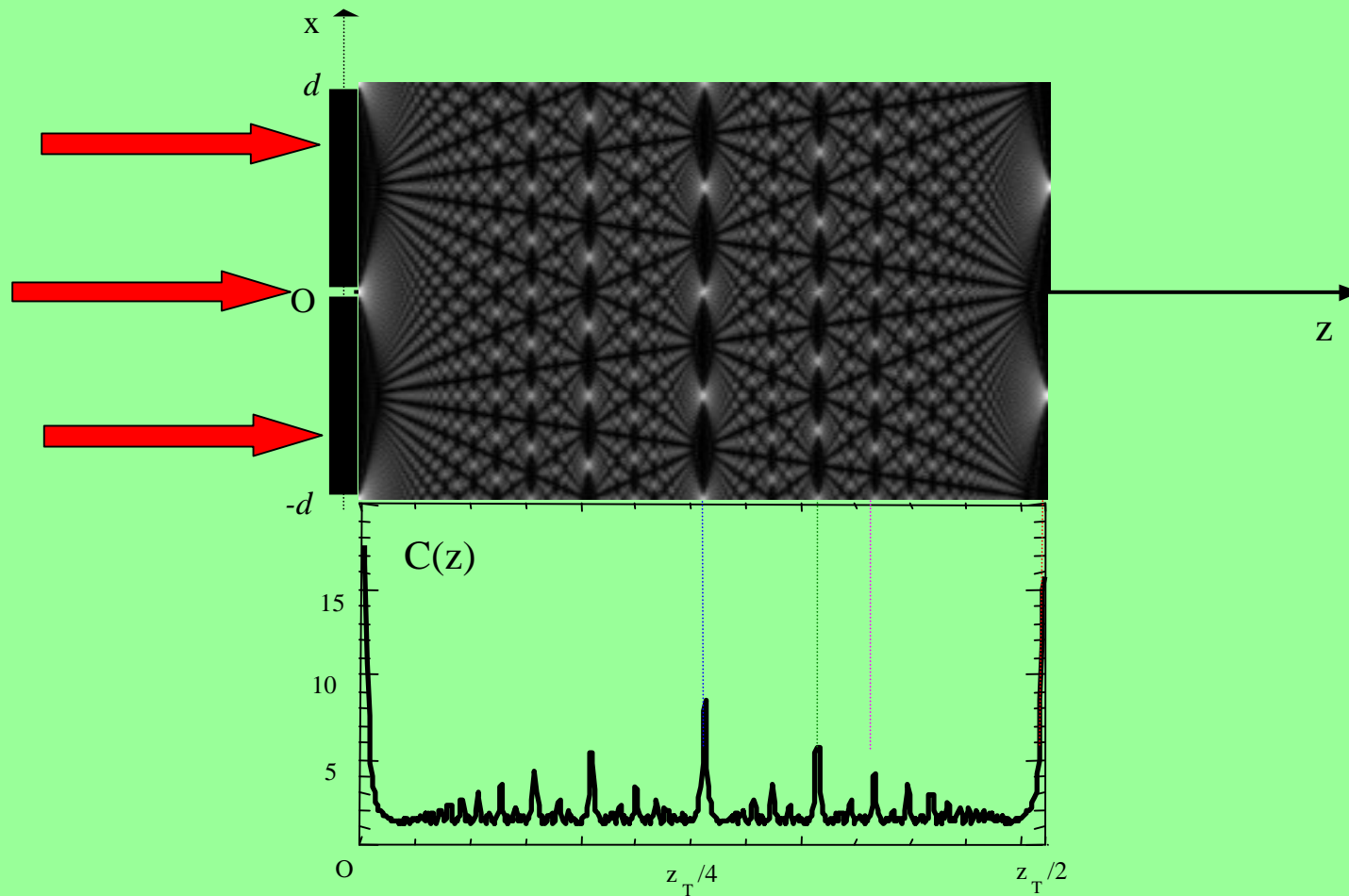
Profil pixel monochromatique en conditions non paraxiales



Remplacer l'intégration analogique de l'effet Talbot panchromatique par une intégration numérique pour une mesure de profil pixel monochromatique en conditions non paraxiales

Conclusion et perspectives

Choix des images pour l'intégration numérique



Contenu spectral et auto-images

CONCLUSION

Bilan

- Etude des limitations de la technique de projection par effet Talbot (1)
- Mise en évidence de la généralité de l'effet Talbot panchromatique (2)(3)
- Méthode de caractérisation originale des détecteurs (4)(5)
 - **Mise en œuvre de l'effet Talbot panchromatique pour la mesure de profil pixel panchromatique**
 - **Proposition de mesure de profil pixel monochromatique à haute résolution**

(1) E.di Mambro & al., J.Opt.Soc.Am.A, décembre 2004

(2) Article sur l'« aparaxialité» à paraître, JOSA A

(3) N.Guérineau & al, Opt. Exp., vol.11, p.3310-3319, 2003

(4) N.Guérineau & al., Comptes Rendus de Physique de l'Académie des sciences, Tome 4 fascicule 10, p.1175-1185, 2003

(5) E. Di Mambro et al, SPIE Aerosense,Orlando (avril 2003)

CONCLUSION

Perspectives

- Mise en œuvre de la mesure de profil pixel monochromatique à haute résolution en infrarouge
- Etude des aspects électromagnétiques des méthodes étudiées
 - **Thèse sur réseaux à nanostructures métalliques (2005)**
- Réalisation d'un banc de mesure de profil détecteur par effet Talbot complet
- Autres applications des réseaux continûment auto-imageant
 - **Thèse sur le contrôle optique (2003)**
 - **Imagerie compacte**

Remerciements

Nicolas Guérineau

Jérôme Primot

M. Caes

J.L. de Bougrenet

I. Ribet

A. Kattnig

M. Tauvy

O. Ferhani

S. Suffis

G. Dunet

D. Henry

R. Haïdar

P. Cymbalista

ONERA

B. Harchaoui

P.E. Beaudoux

P. Chavel

P. Roze

J. Deschamps

J. Dumas

A. Lardon

P. Lalanne

JP Bruyant

M. Chambon

Christophe

S. Barthod

S. Langlois

L. Labarre

V. Delrue

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.