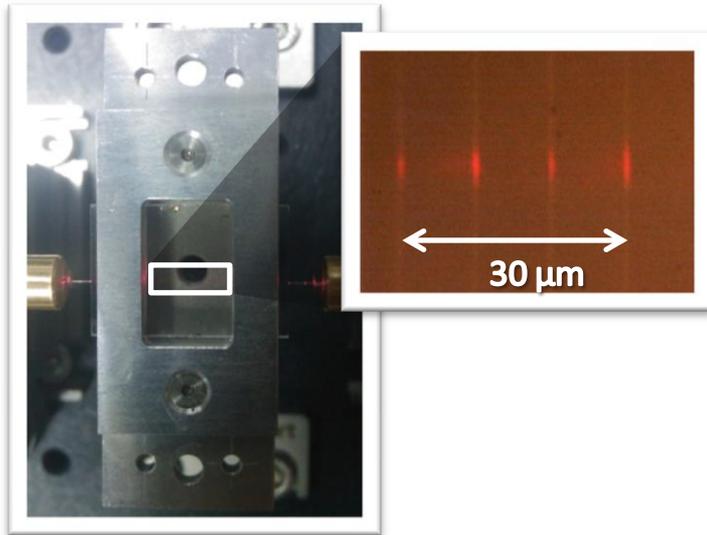


Étude et réalisation d'un spectromètre intégré à transformée de Fourier : SWIFTS



Composant SWIFTS Gabor

THÈSE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE
spécialité « Astrophysique et milieux dilués »

Présentation et soutenance publique par

JÉRÔME FERRAND

le 12 novembre 2010

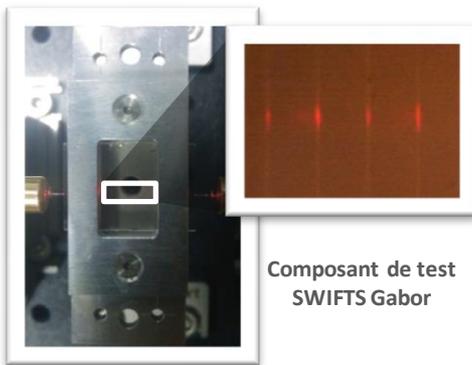
Thèse dirigée par Etienne le Coarer



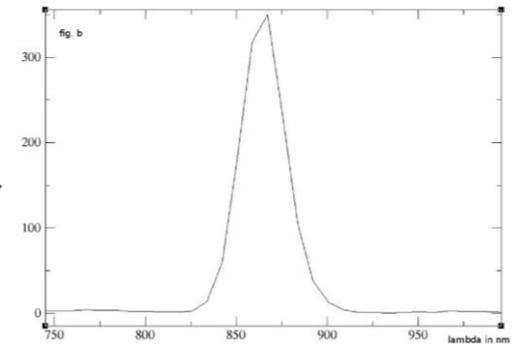
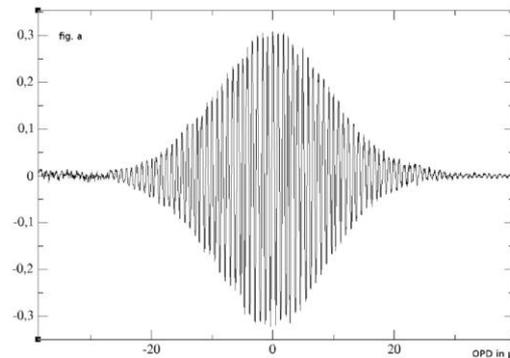
SWIFTS : Stationary Wave Integrated Fourier Transform Spectrometer



Maquette d'un SWIFTS 400-1000 nm



Composant de test
SWIFTS Gabor



Ferrand et al., Proceeding of SPIE 2008



Notions préliminaires

Présentation de SWIFTS

Modélisation et caractérisation

Utilisation possible des SWIFTS

Conclusion et perspectives



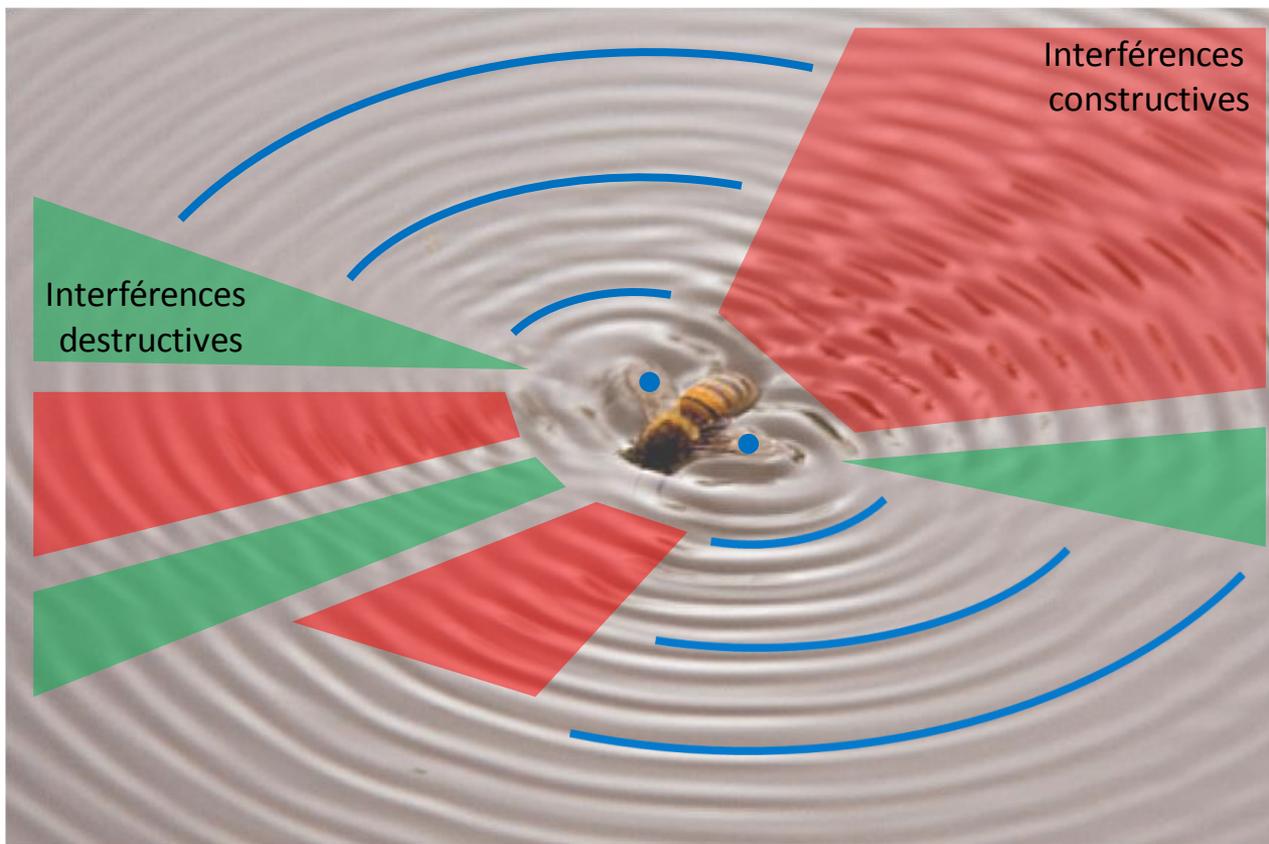
Notions préliminaires

Présentation de SWIFTS

Modélisation et caractérisation

Utilisation possible des SWIFTS

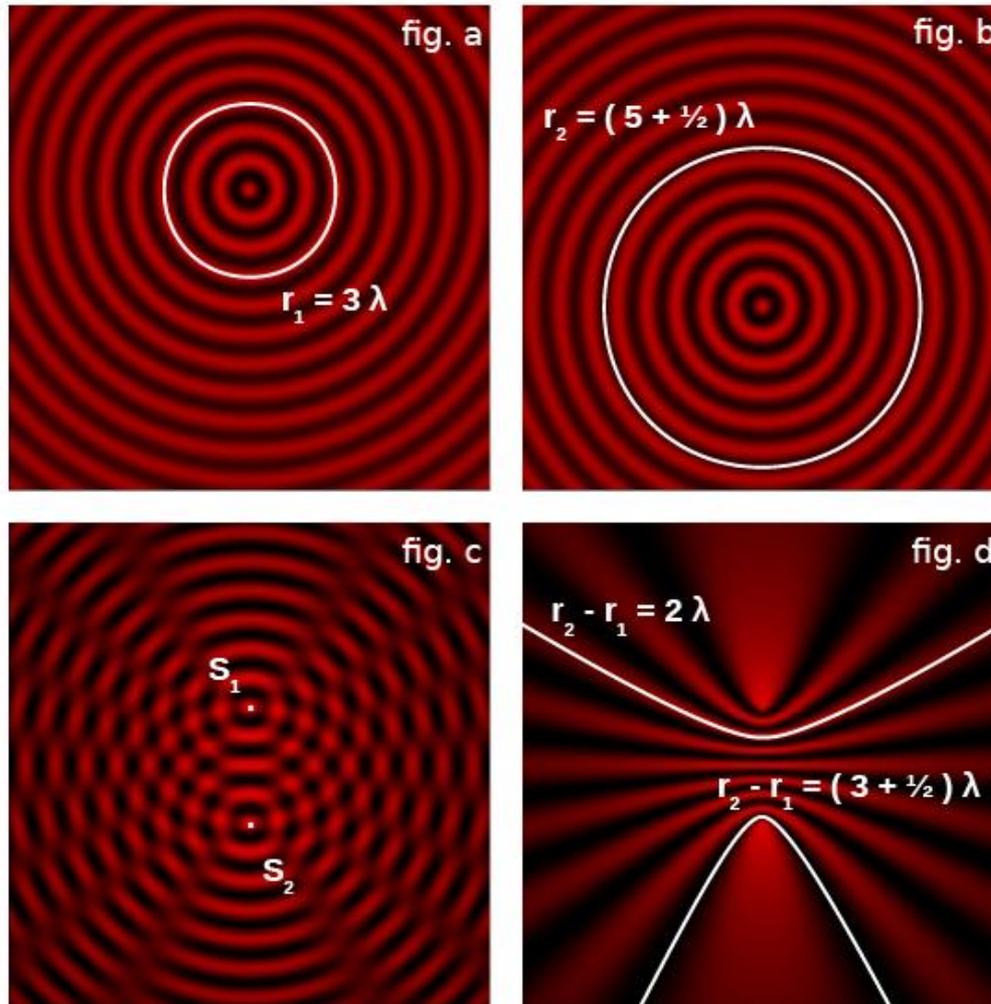
Conclusion et perspectives



Source : flickr



Sources ponctuelles isolées



Interférences de deux sources ponctuelles

Interférences moyennées temporellement

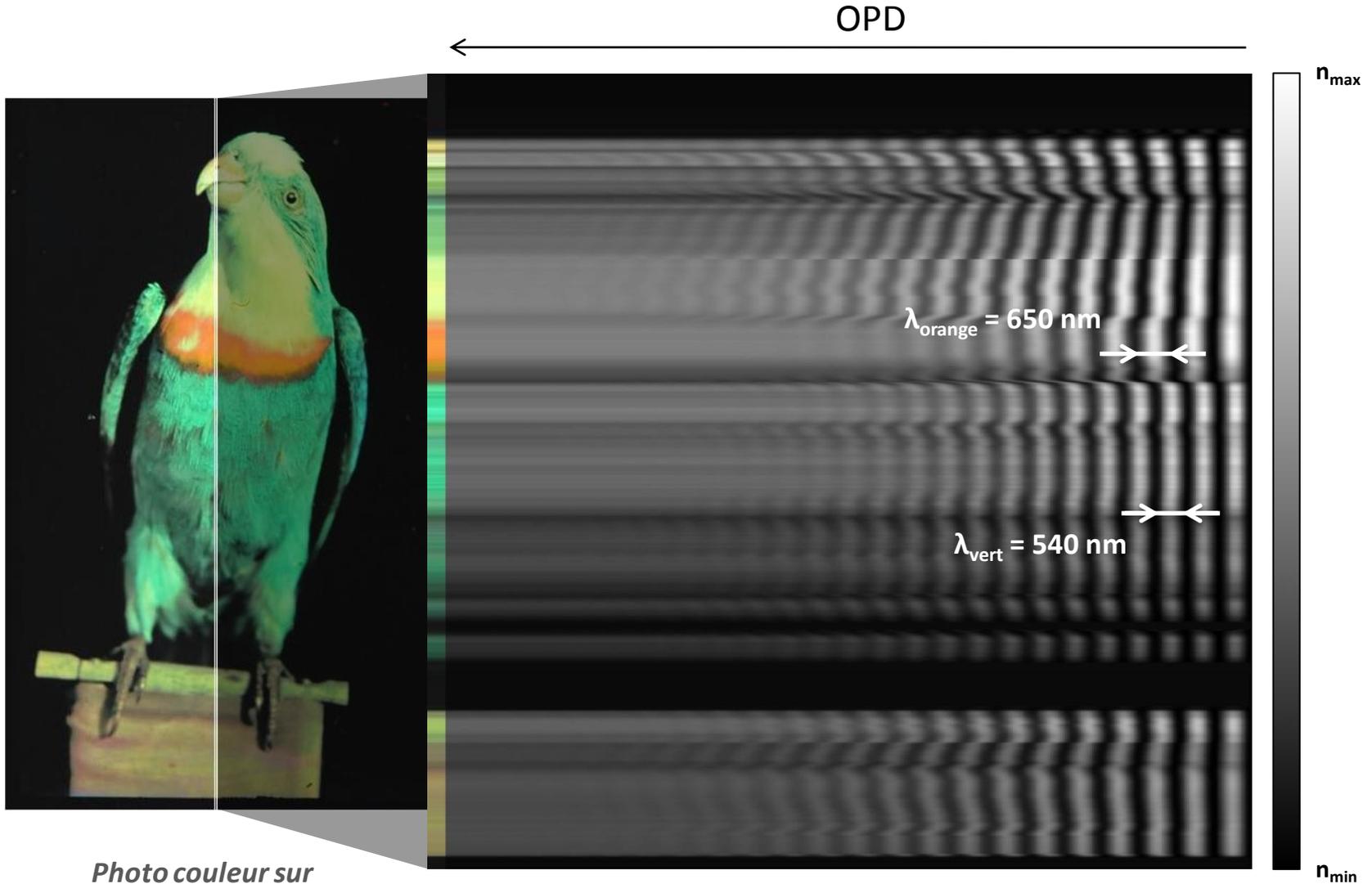
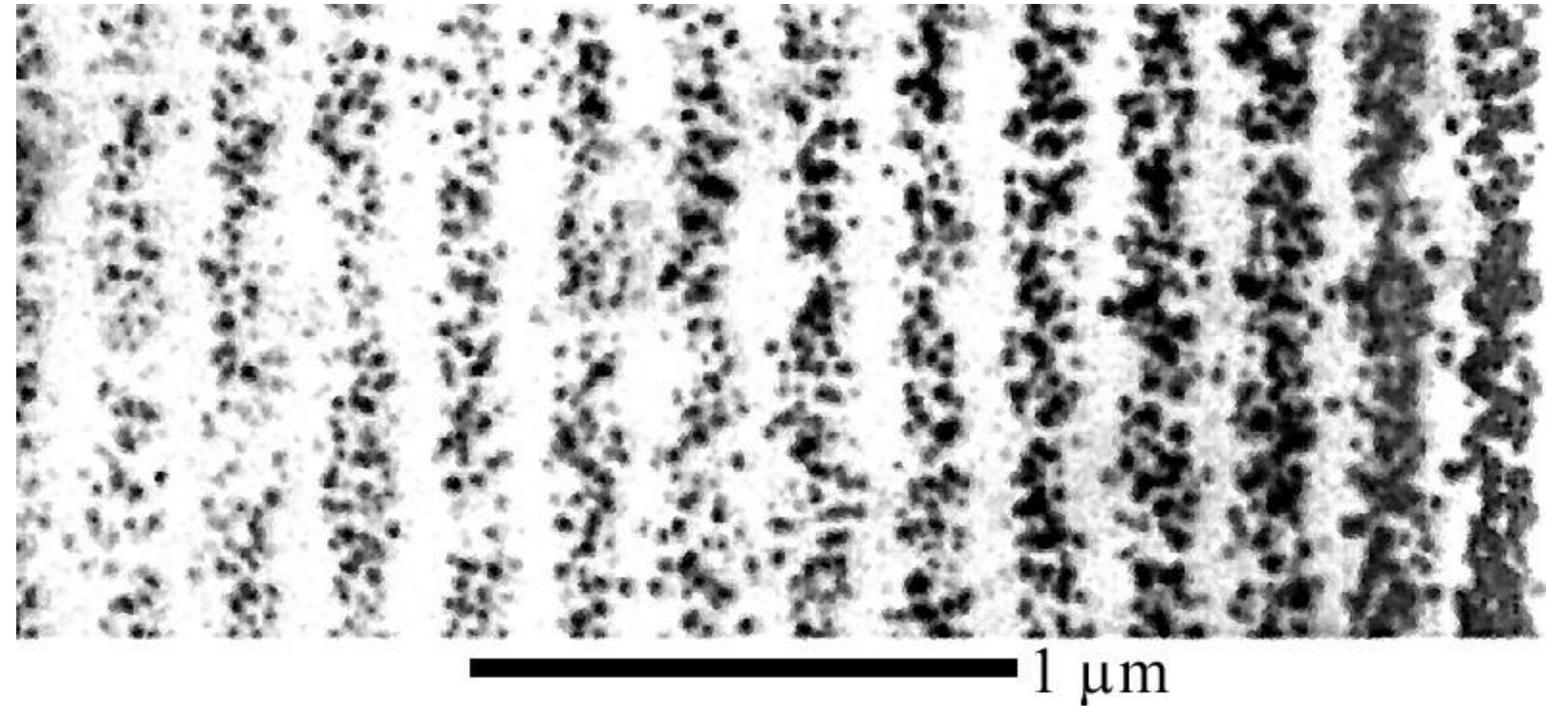


Photo couleur sur plaque de Lippmann (fin du XIX^{ème} siècle)

Vue d'artiste du profil d'indice dans l'épaisseur de la plaque photo



OPD



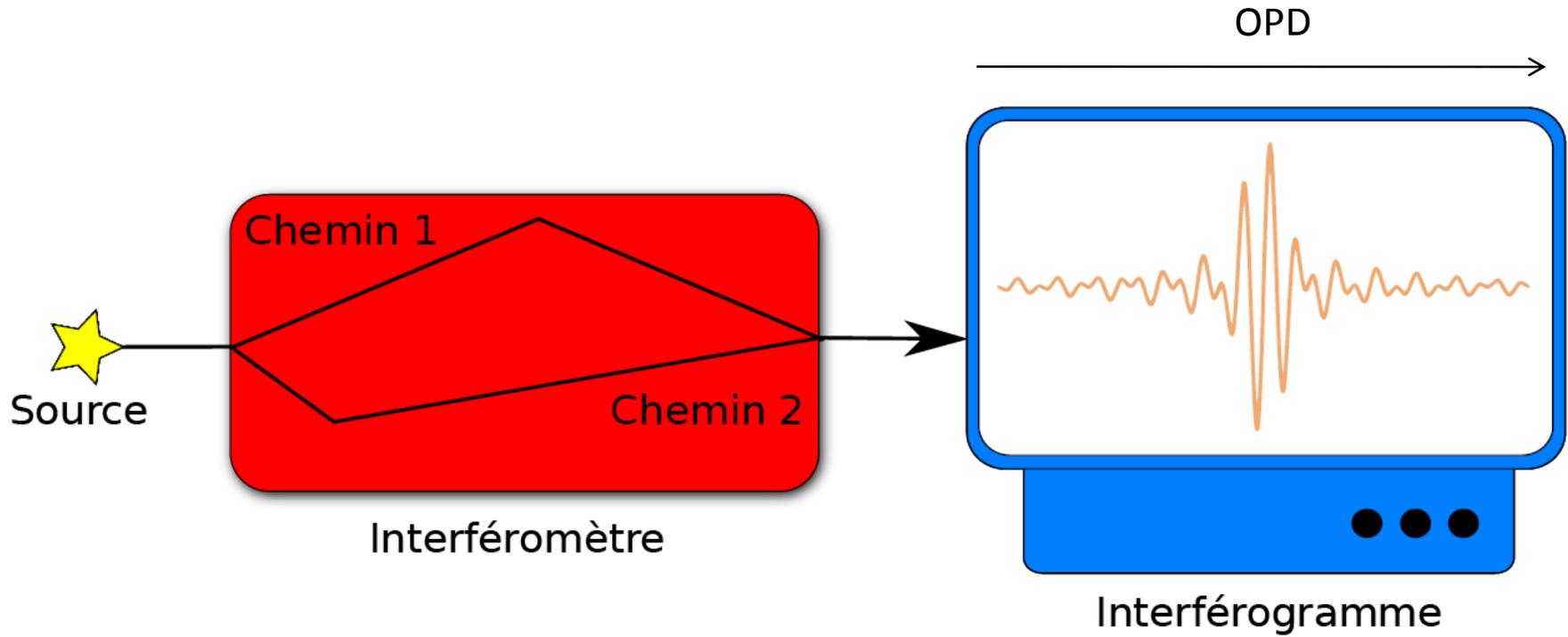
Vue microscopique d'une coupe d'une plaque photographique de Lippmann :

Un miroir de mercure est mis en contact avec le côté droit de l'émulsion, on peut voir l'interférogramme .

Spectre

En première approximation, l'équation de l'interférogramme est :

$$I_m(\delta L) = TF[B(\sigma)]$$





Notions préliminaires

Présentation de SWIFTS

Modélisation et caractérisation

Utilisation possible des SWIFTS

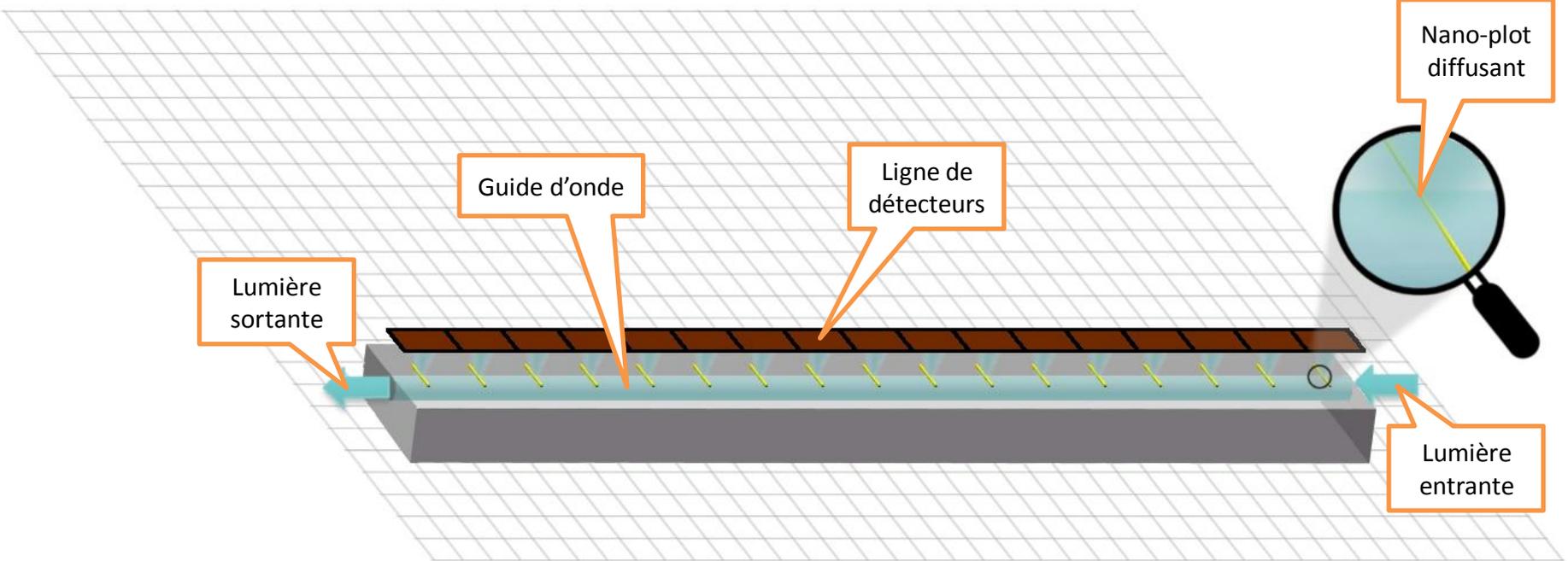
Conclusion et perspectives



Présentation de SWIFTS : éléments de base

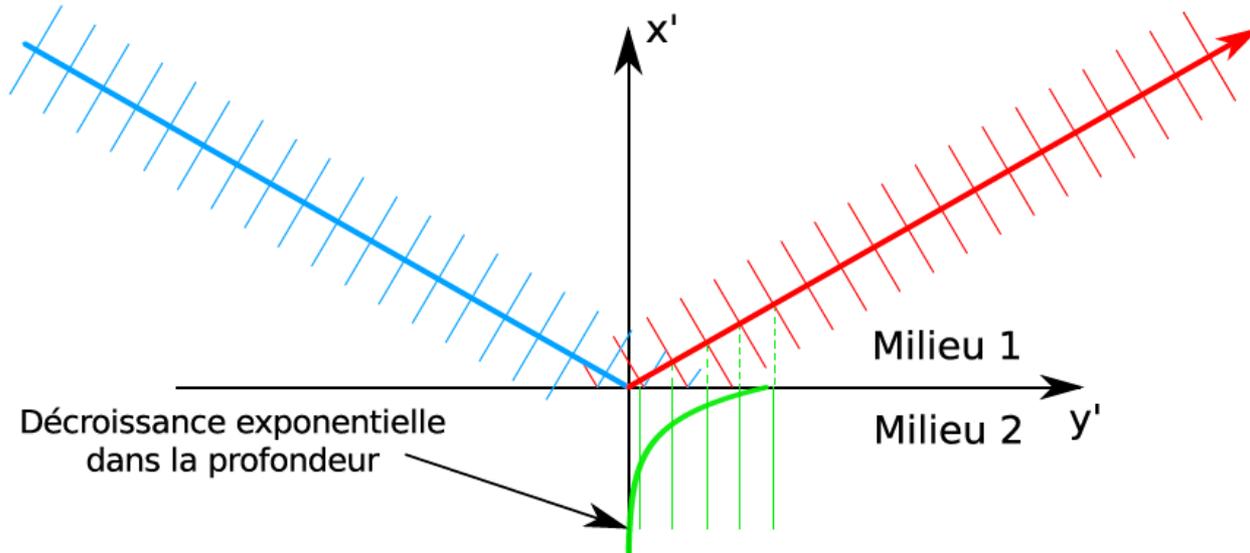


Mesure des détecteurs





Dans le milieu 1 la phase varie en fonction de x' et z' , l'amplitude reste constante en fonction de z'

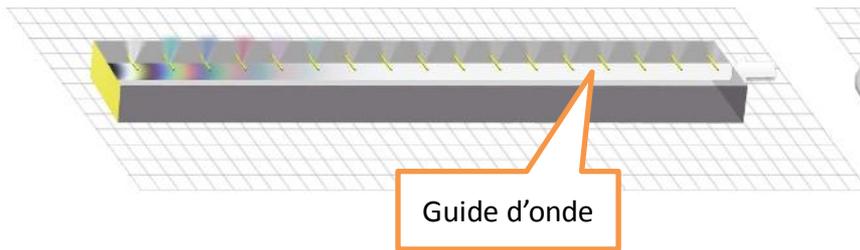


Dans le milieu 2 la phase varie uniquement en fonction de z' , l'amplitude décroît exponentiellement avec x'

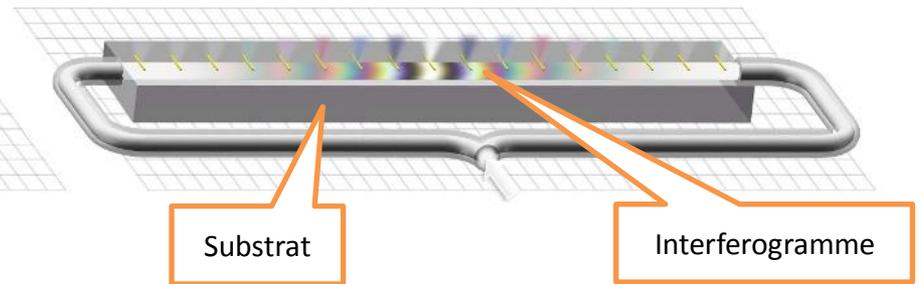


SWIFTS mode Lippmann

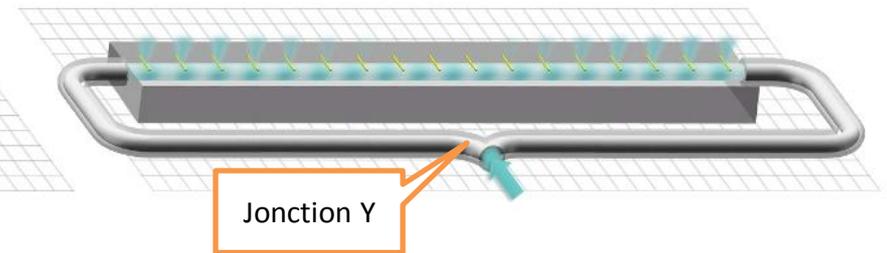
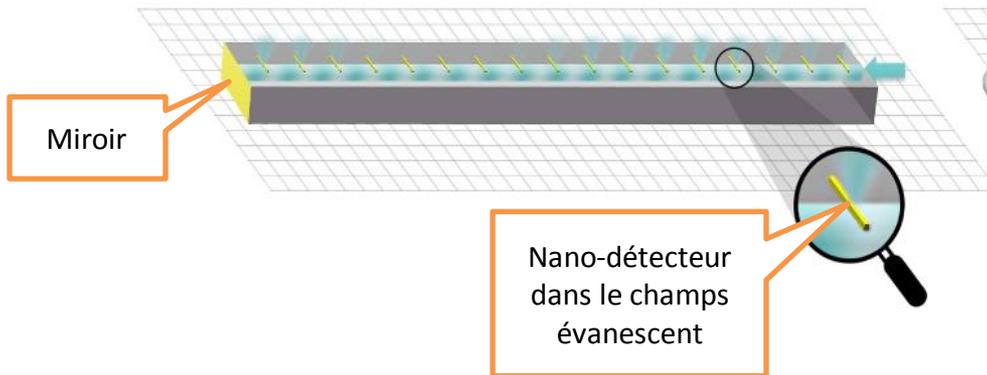
Lumière blanche



SWIFTS mode Gabor



Lumière monochromatique



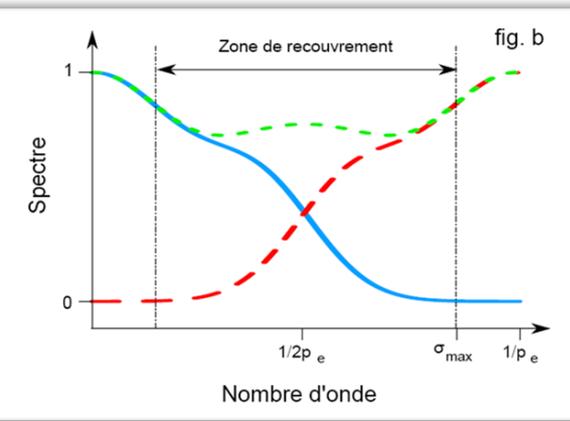
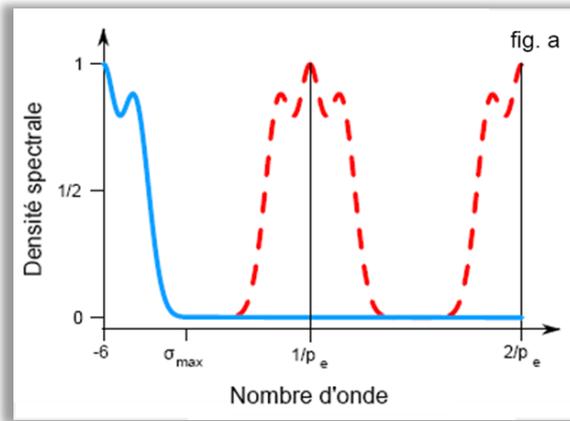
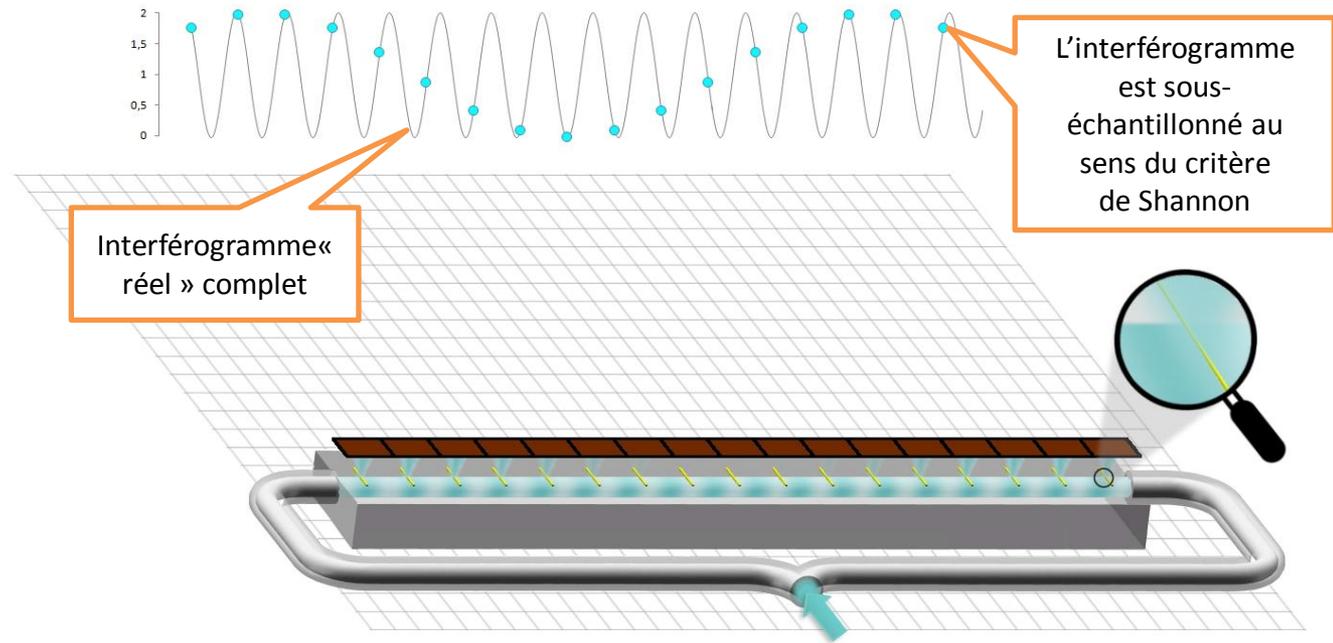
Deux brevets :

E. le Coarer et P. Benech. Interferential spectroscopy detector and camera, Brevet WO2006064134, 2006.

E. le Coarer, P. Benech, P. Kern, G. Lerondel, S. Blaize, et A. Morand. Spectrographie à onde contra-propagative, Brevet FR2889587, 2007.



Présentation de SWIFTS : le sous-échantillonnage





Deux solutions sont possible pour pallier le problème du sous-échantillonnage :

- le **Multiplex spatial**:

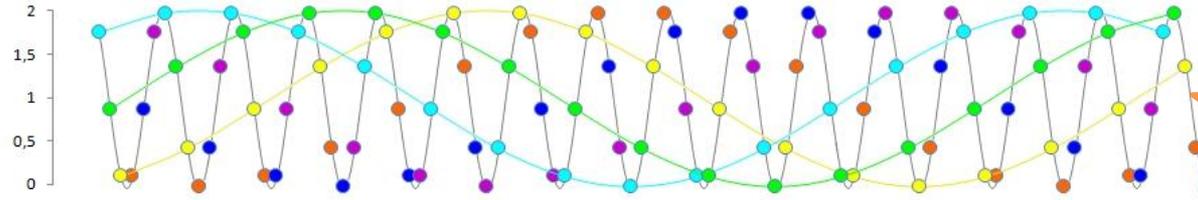
plusieurs guides d'onde sont utilisés en parallèle, et ce, de manière à ce que chaque ligne de détecteurs associée au guide « voit » une partie différente de l'interférogramme.

- le **Multiplex temporal multiplex**:

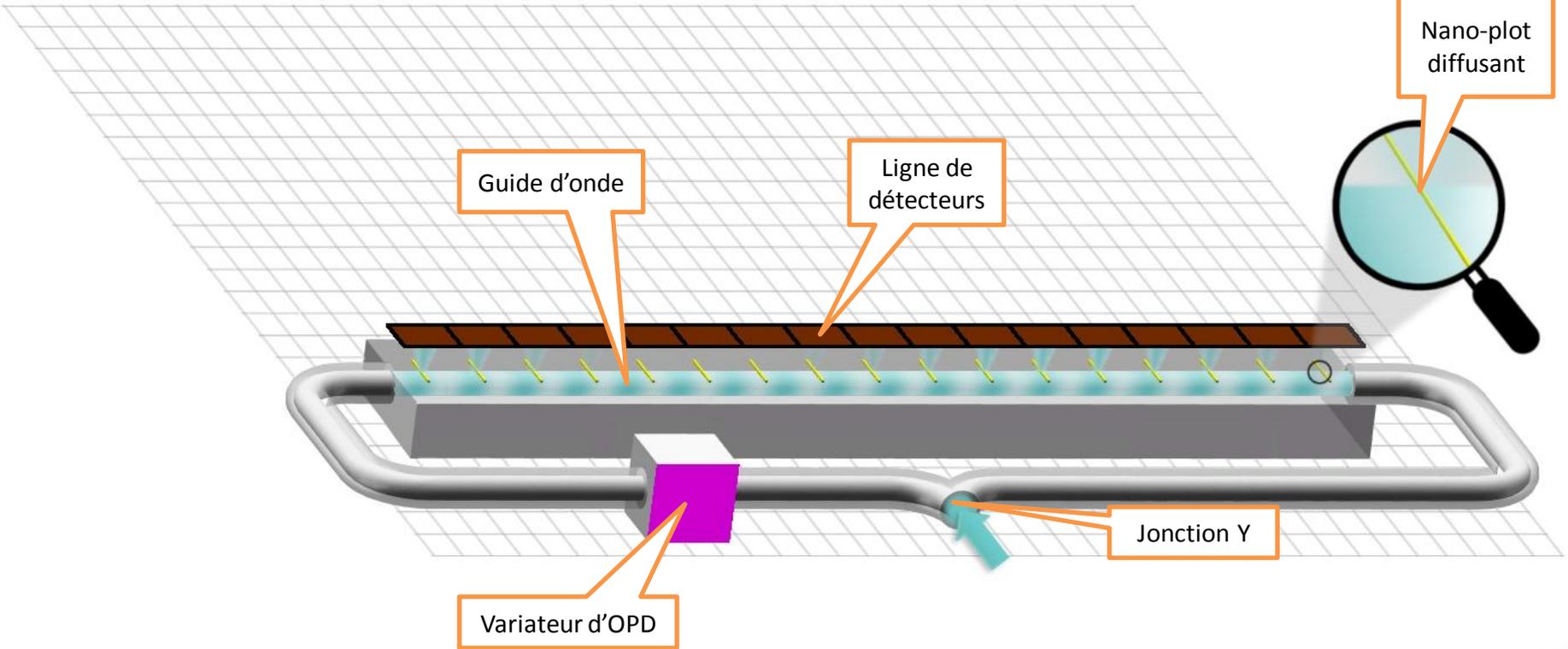
un guide d'onde unique est utilisé et l'utilisation d'un variateur de différence de chemin optique (OPD) permet de balayer l'interférogramme.



Présentation de SWIFTS : cas d'un Gabor multiplex temporel

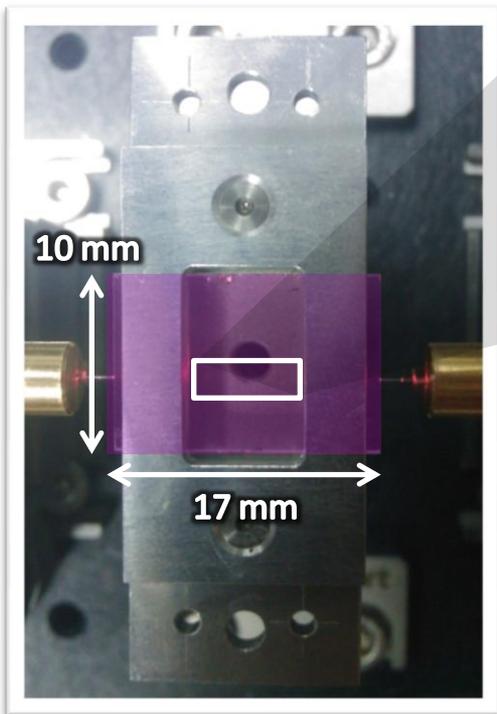


Interférogramme échantillonné :
Chaque partie est échantillonnée durant un pas de balayage différent





256 nano-plots diffusifs
distants de $10\ \mu\text{m}$

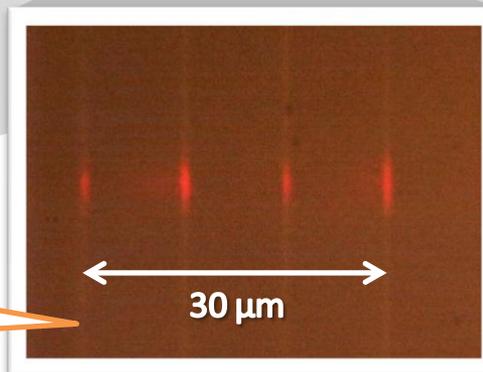


Composant :

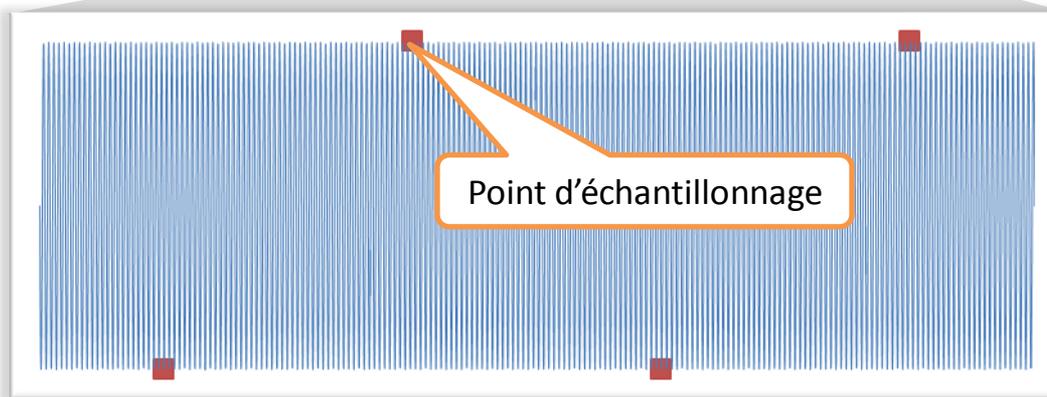
*Guide sur verre à échange d'ion
avec des nano-traités d'argent*



Nano-plot
diffusif



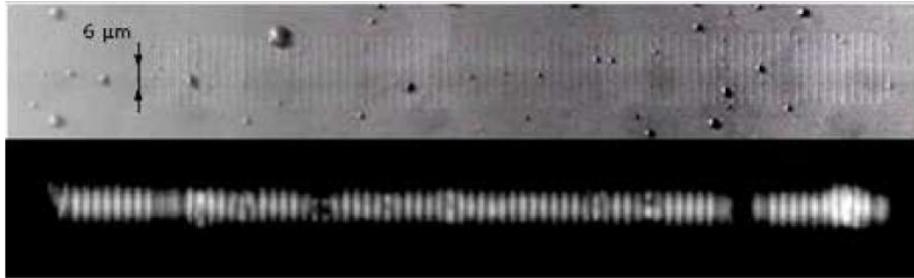
$30\ \mu\text{m}$



Point d'échantillonnage



Composant 1



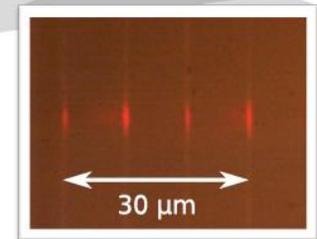
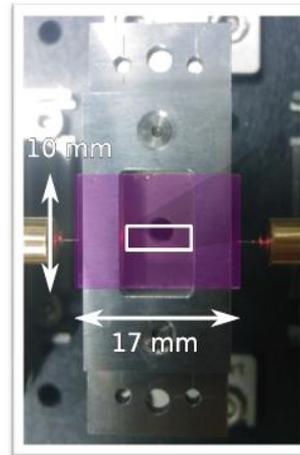
74 nano-plots diffusifs
 $\Delta x = 2,7 \mu\text{m}$ (max OPD : 200 μm)
 Indice effectif du guide $\sim 1,52$
 Resolution : 760 @ 800 nm



Composant 2

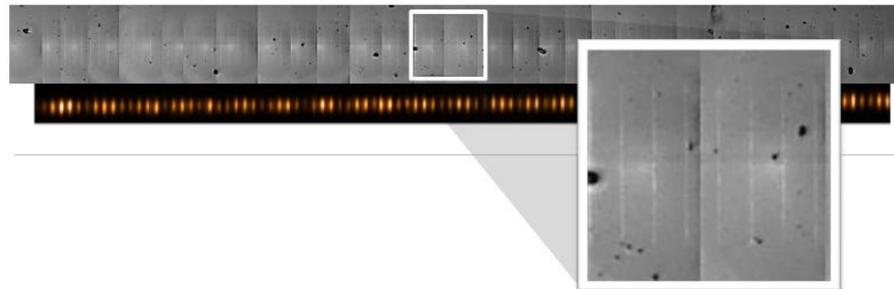


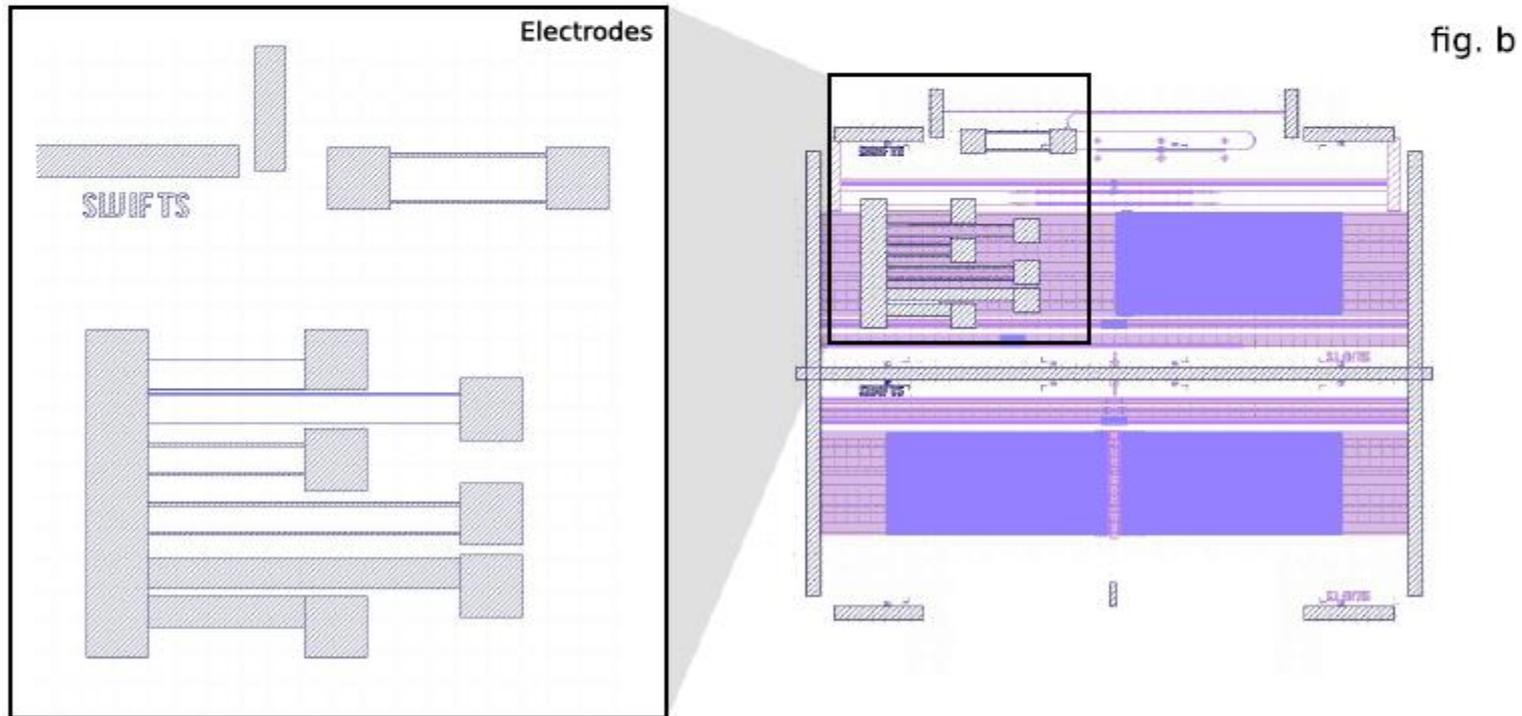
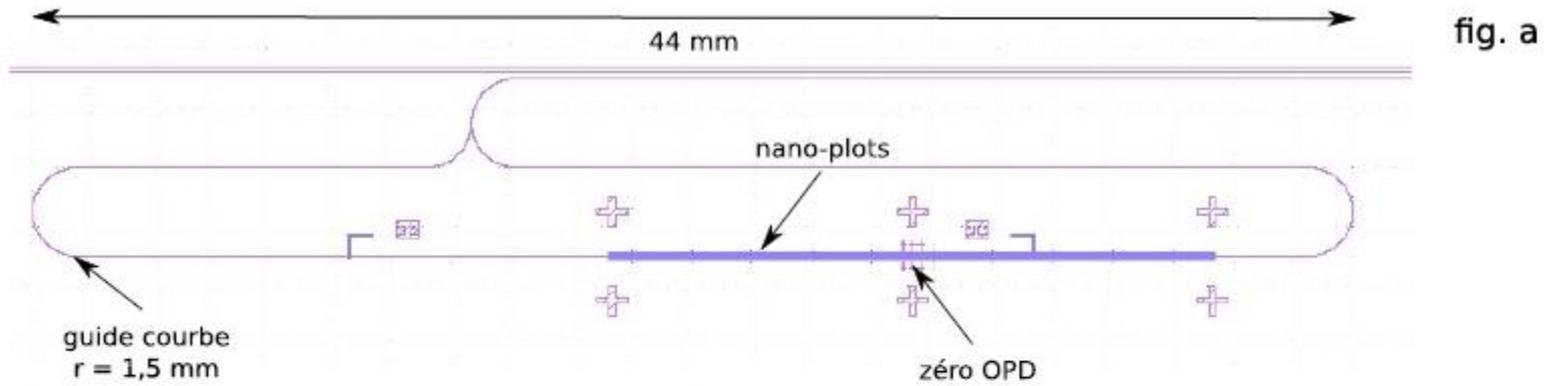
256 nano-plots diffusifs
 $\Delta x = 10 \mu\text{m}$ (max OPD : 3890 μm)
 Indice effectif du guide $\sim 1,52$
 Resolution : 3800 @ 800 nm



Série 3

1024 nano-plots diffusifs
 $\Delta x = 17 \mu\text{m}$ (max OPD : 26442 μm)
 Indice effectif du guide $\sim 1,543$
 Resolution : 66000 @ 800 nm



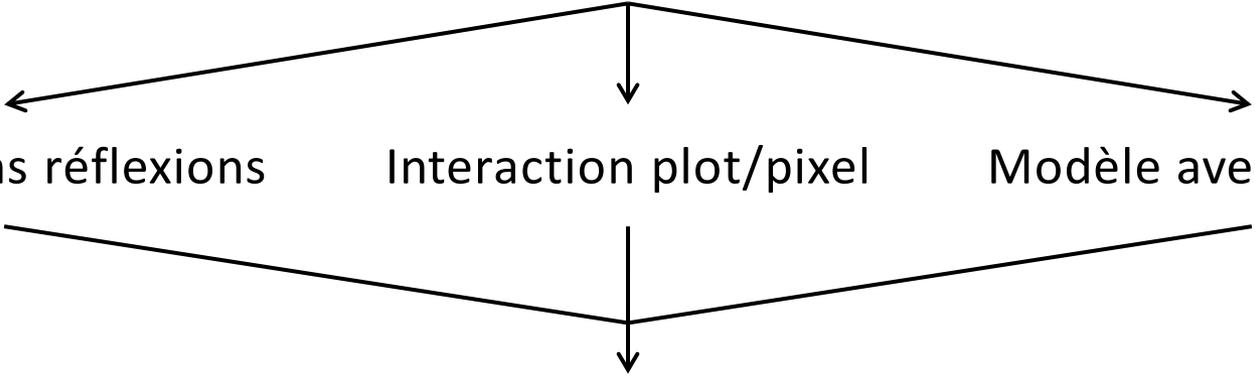




Notions préliminaires

Présentation de SWIFTS

Modélisation et caractérisation



Modèle sans réflexions

Interaction plot/pixel

Modèle avec réflexions

Besoins en moyens de caractérisation

Utilisation possible des SWIFTS

Conclusion et perspectives



- **Résolution**
- **Bande spectrale**
- **Etendue optique**
- **Résistance du concept :**
 - Stabilité en température
 - Réflexions internes
 - Positionnement des points d'échantillonnage
 - Inhomogénéités
 - ...

→ Besoin de moyens de caractérisation



Notions préliminaires

Présentation de SWIFTS

Modélisation et caractérisation

Modèle sans réflexions

Interaction plot/pixel

Modèle avec réflexions

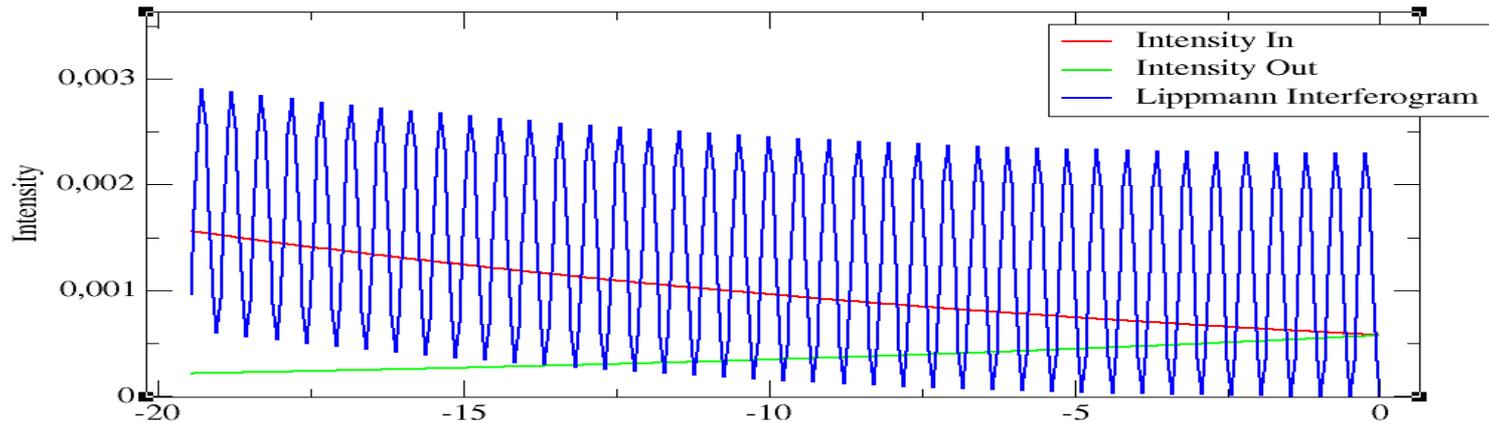
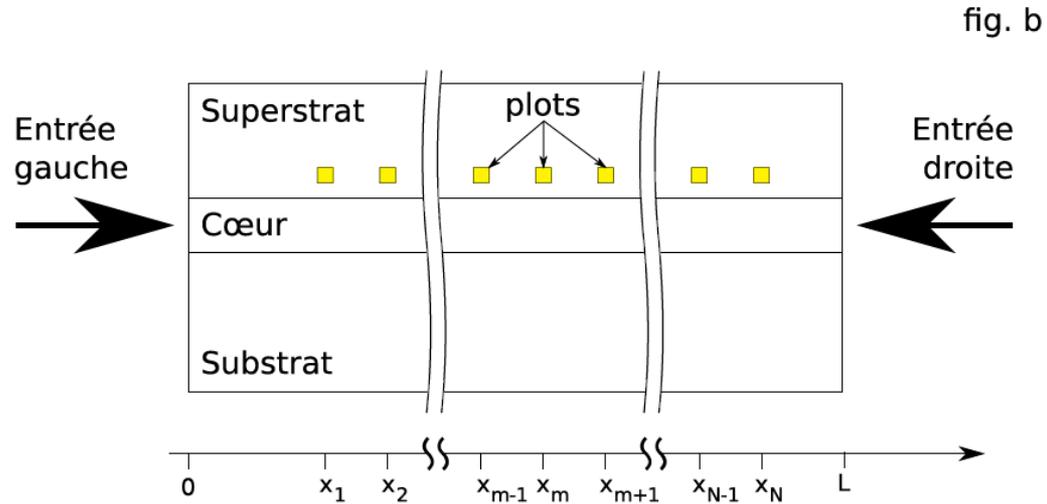
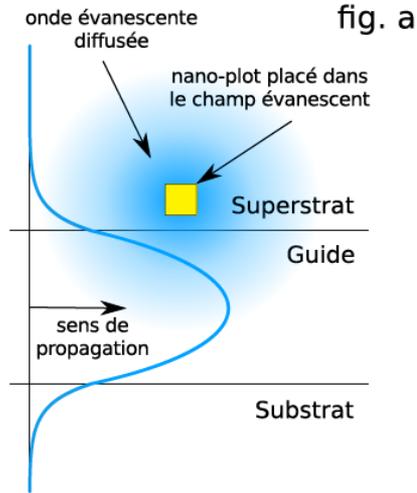
Besoins en moyens de caractérisation

Utilisation possible des SWIFTS

Conclusion et perspectives



SWIFTS Gabor vu en coupe



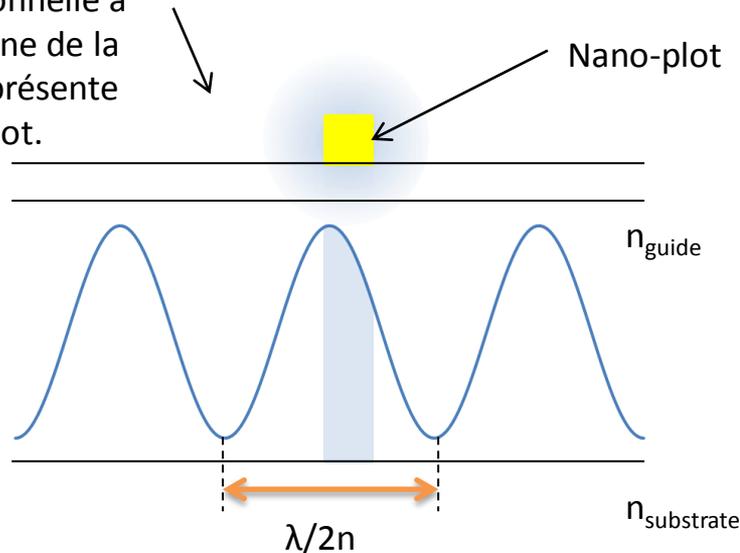
$$\frac{I(m)}{I_0} = \cosh(\alpha + \beta m) + \cos(2km + \Delta\phi)$$

L'optimum d'efficacité correspond au cas où les N plots diffusent chacun $2/(N+2)$ de l'énergie couplée dans le guide.

Dans ce cas :

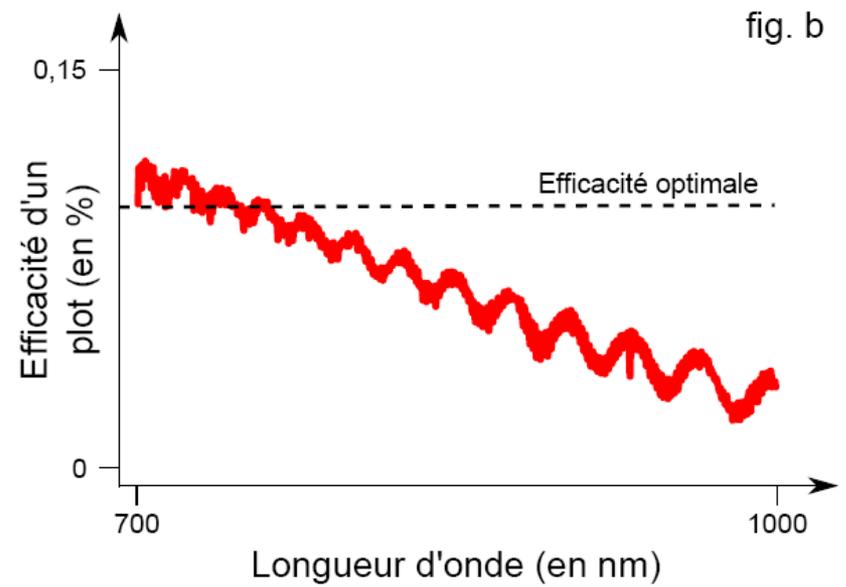
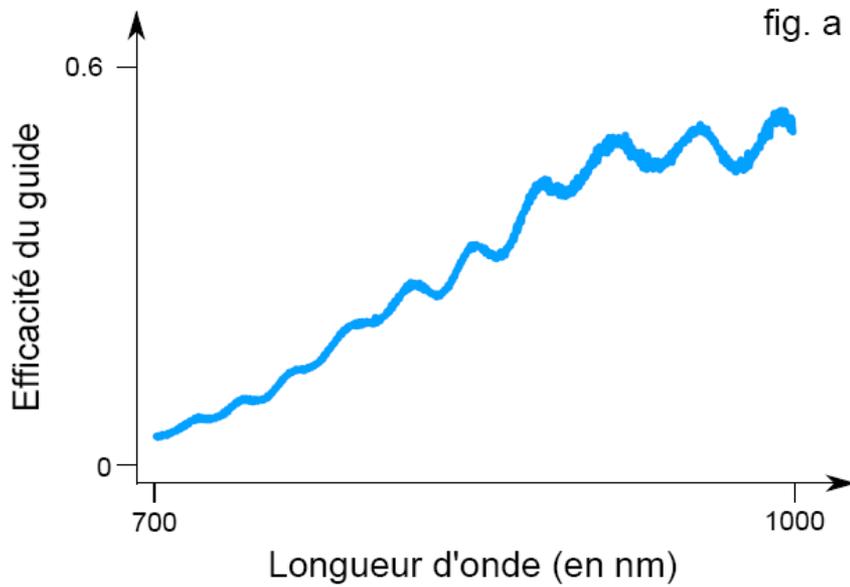
- 13% de l'énergie traverse le composant
- 13% de l'énergie n'interfère pas de manière constructive et forme un fond continu de forme hyperbolique
- **74% de l'énergie interfère de manière constructive dans l'interférogramme**

Lumière diffusée proportionnelle à la moyenne de la lumière présente sous le plot.





Données expérimentales

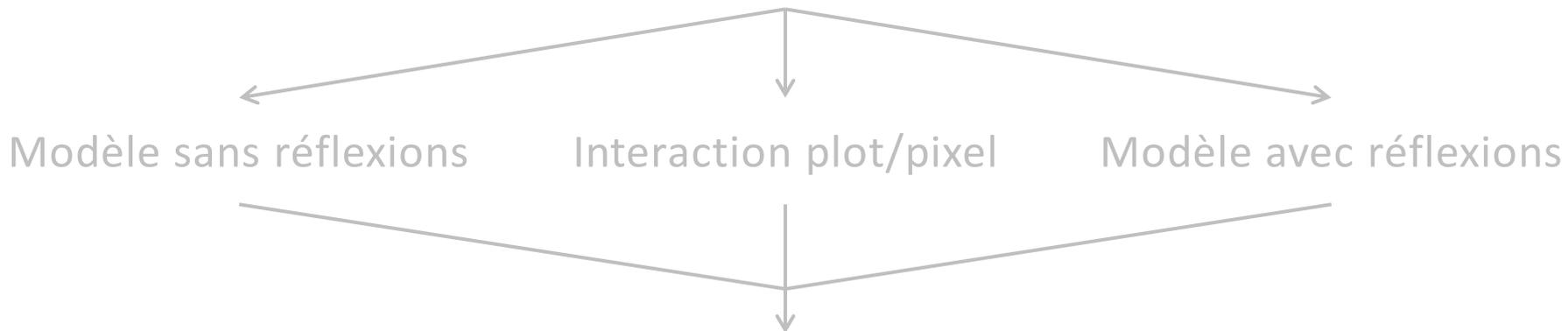




Notions préliminaires

Présentation de SWIFTS

Modélisation et caractérisation



Besoins en moyens de caractérisation

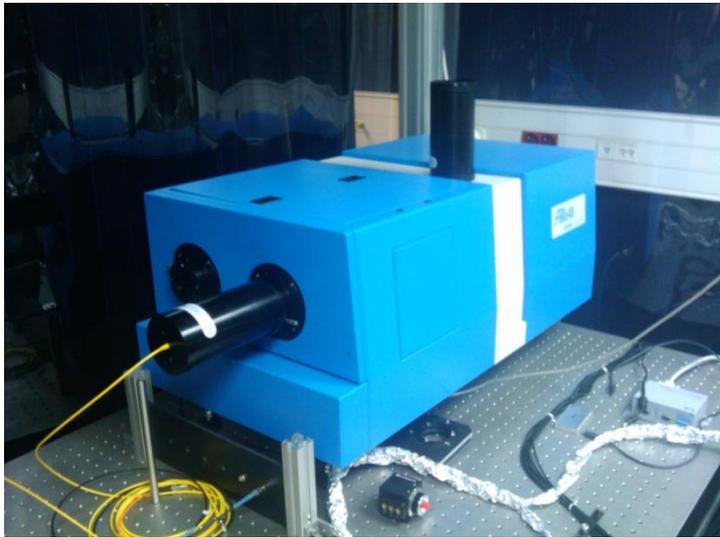
Utilisation possible des SWIFTS

Conclusion et perspectives

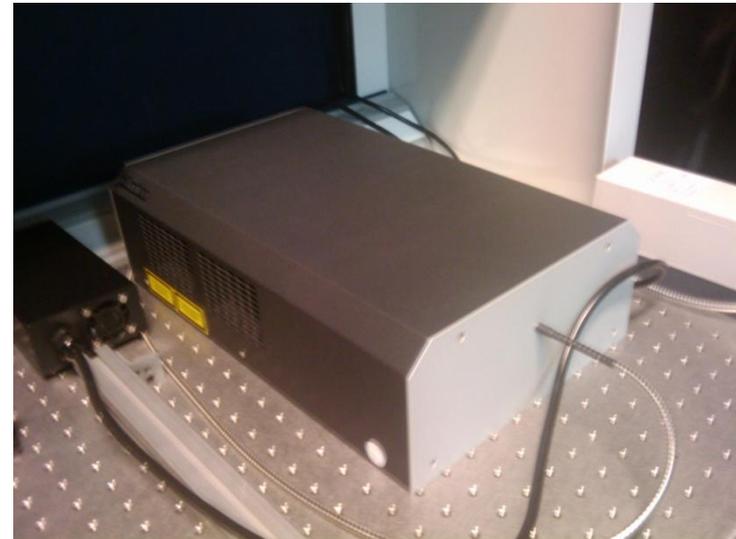


Trois types de problèmes :

Problèmes de calibration	Solutions associées
Efficacité des plots et photométrie	Injection unilatérale ou méthode OCT
Calibrations en longueur d'onde	Source large bande + monochromateur
Position des plots	TF en fonction de la longueur d'onde



Monochromateur

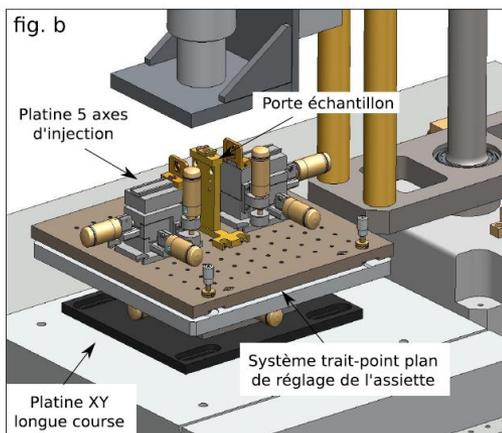
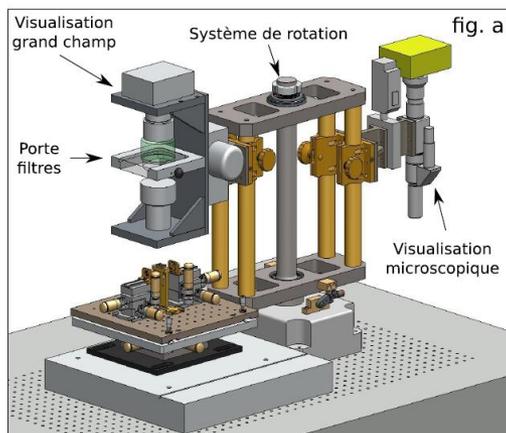


Source large bande

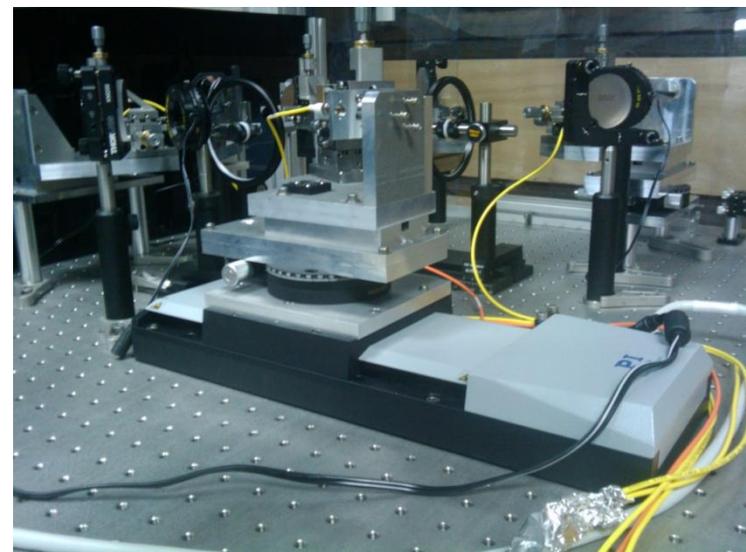


Trois types de problèmes :

Problèmes de mise en œuvre	Solutions associées
Sous-échantillonnage	Variateur d'OPD
Acquisition	Microscope



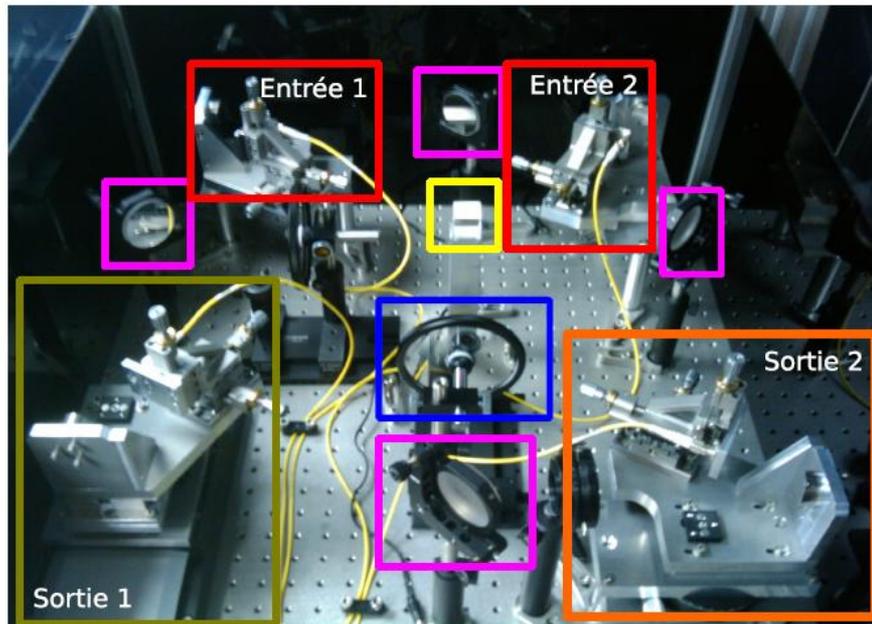
Système double de visualisation



Variateur d'OPD

Trois types de problèmes :

Problèmes expérimentaux	Solutions associées
Fluctuations thermiques	Isolation des fibres + contrôle
Réflexions parasites	Séparateur de flux sans réflexions



Séparateur de flux sans réflexions

- ▣ Paraboles d'entrées
- ▣ Mirroirs de réglage
- ▣ Cube séparateur
- ▣ Densités variables
- ▣ Parabole de sortie mobile
- ▣ Parabole de sortie fixe



Balayage en longueur d'onde :



On observe une forte variation de la longueur d'onde apparente à cause de l'effet de moiré lié au sous-échantillonnage.

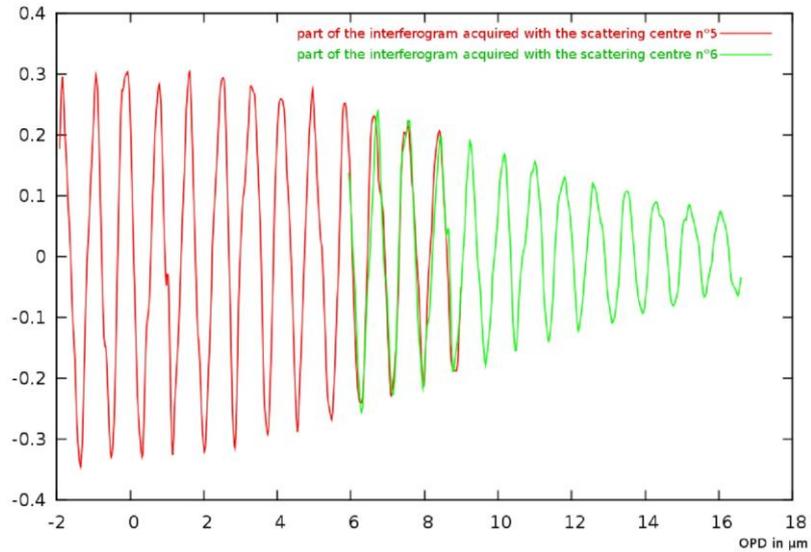
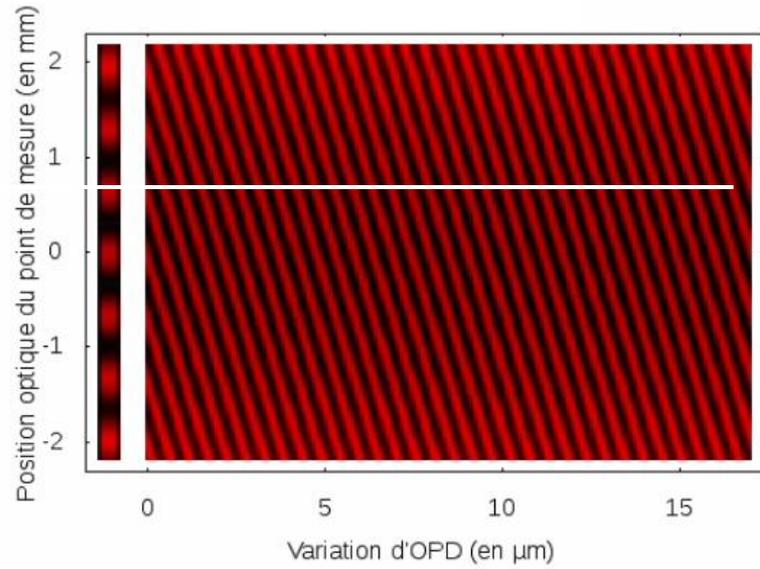
Balayage en OPD:



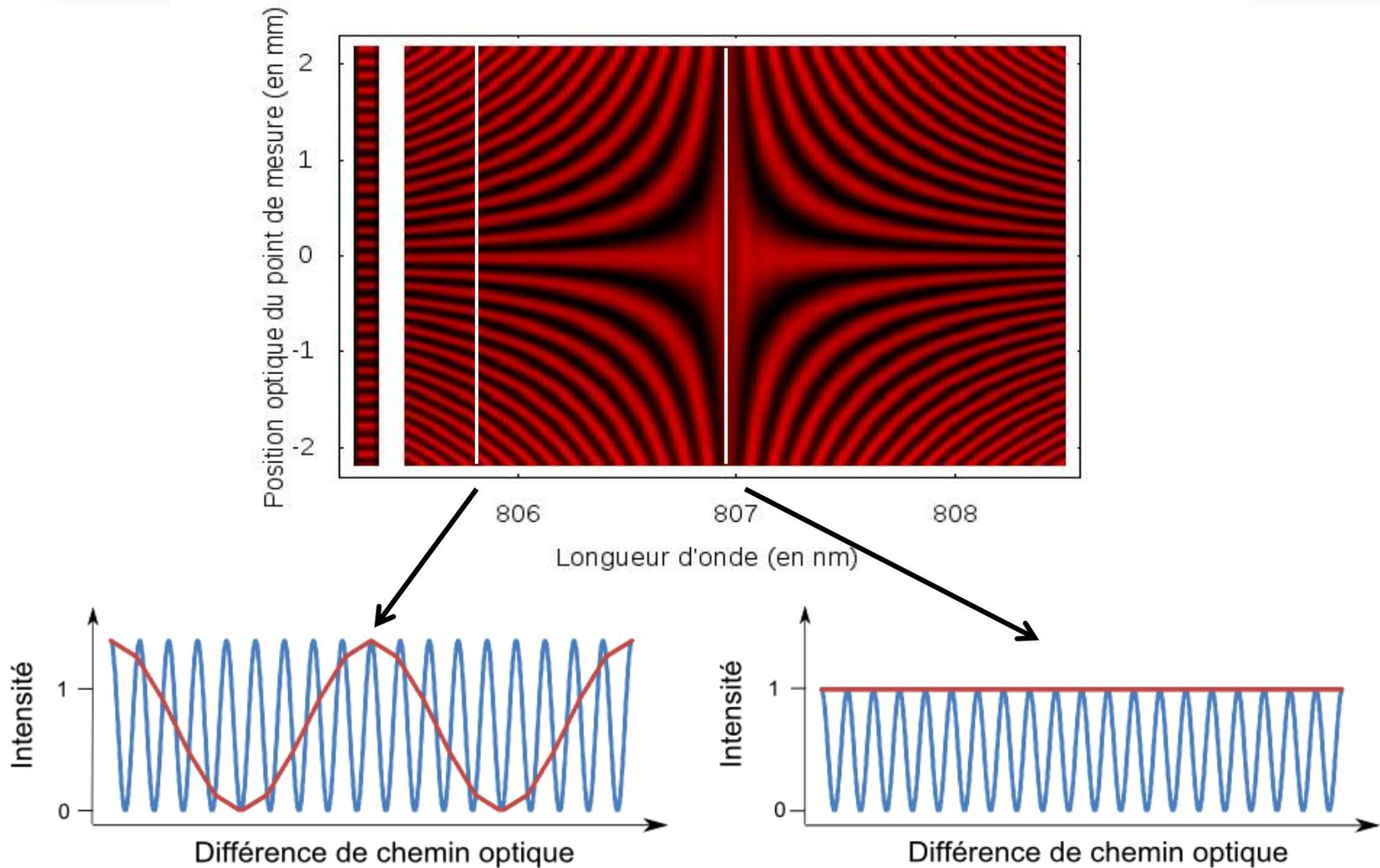
On observe un déplacement des franges qui vaut la moitié de la variation d'OPD.



Données simulées



Deux lignes
mises bout à bout



Equation de l'image dans un cas idéal :

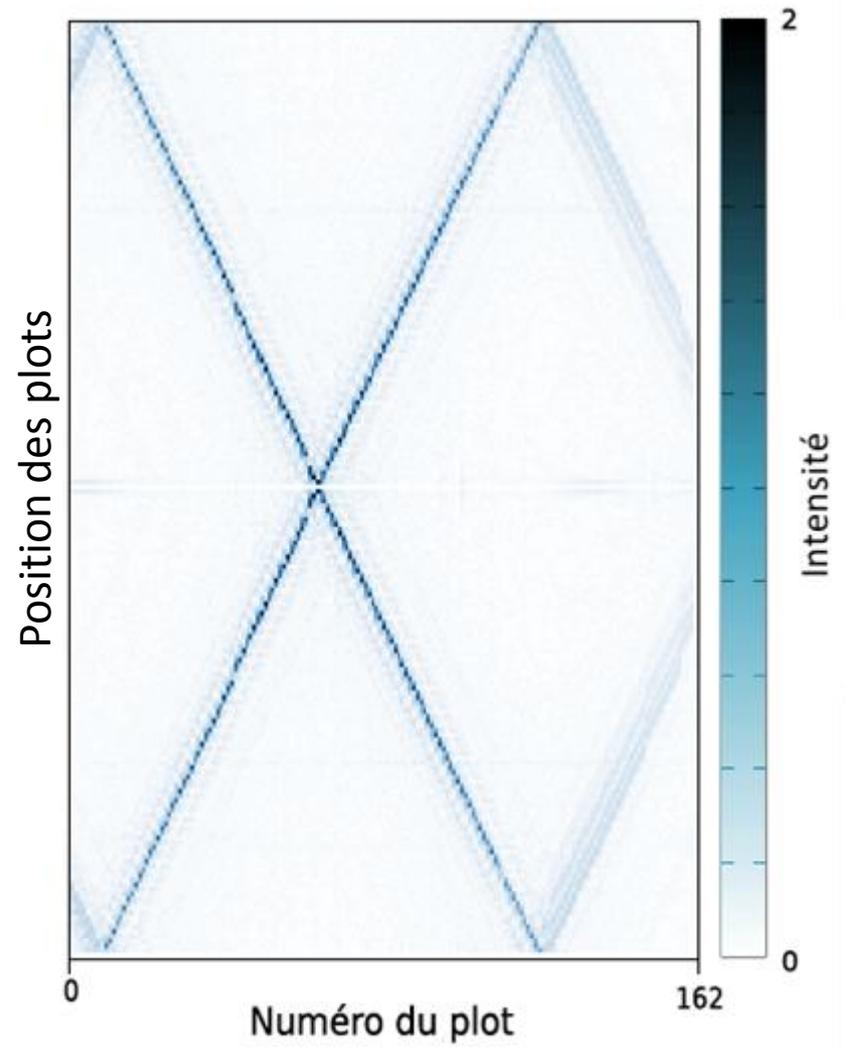
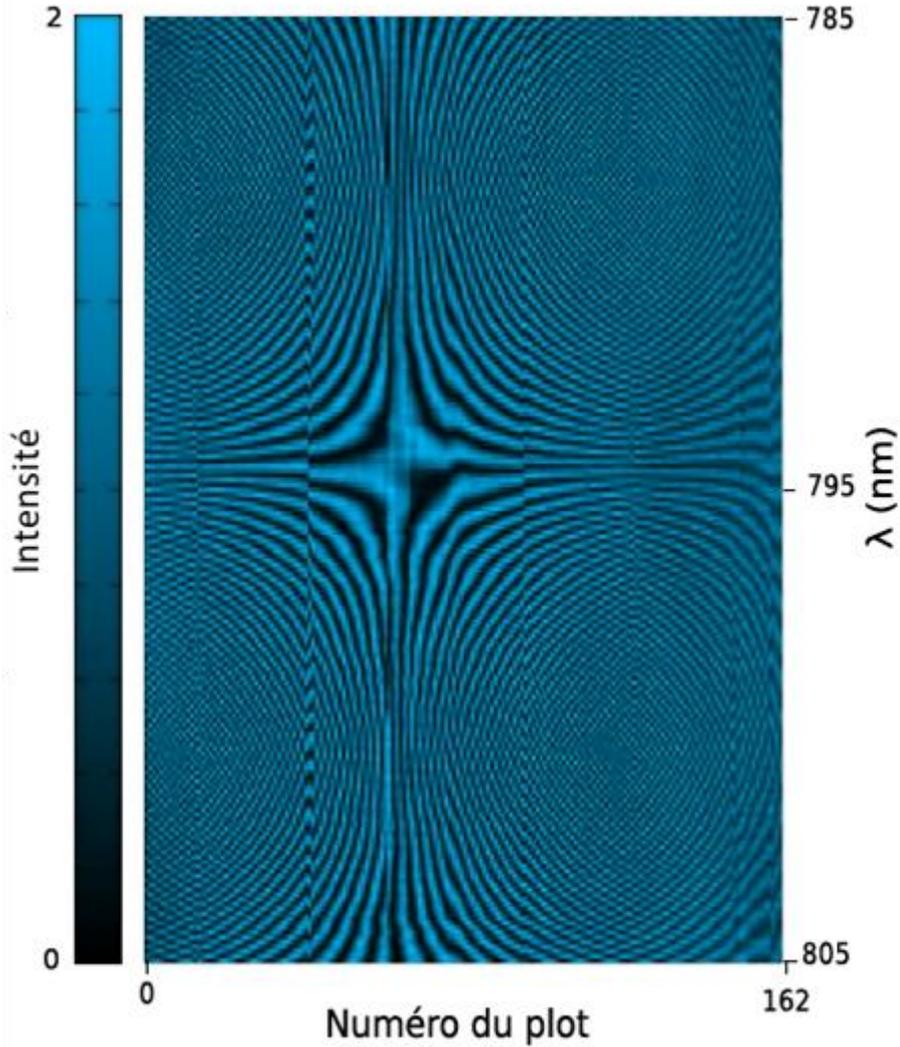
$$I(x_m, \sigma) = I_o \cos(2\pi n \sigma x_m)$$

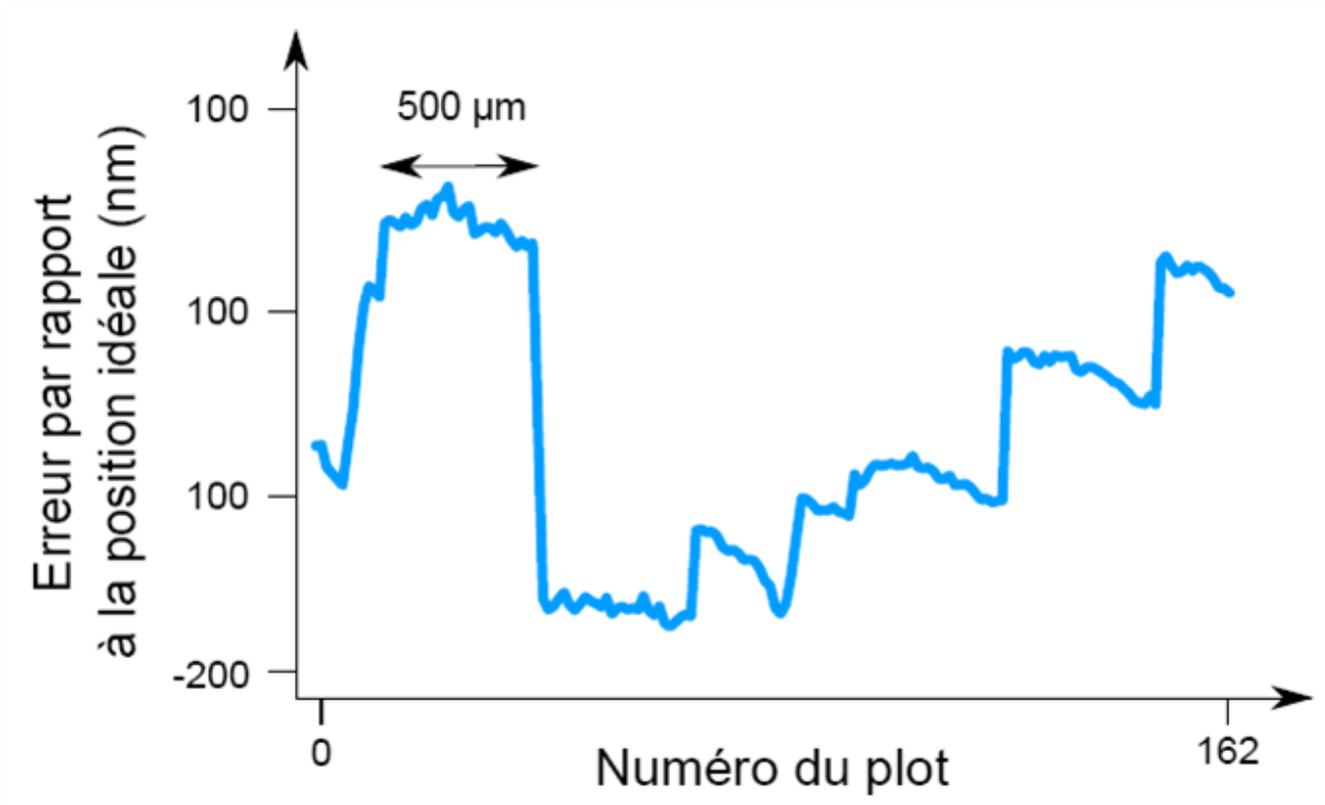
$\xrightarrow{\text{TF colonnes}}$
 $\frac{\tilde{I}_m}{\tilde{I}_{max}} = |\text{sinc}(2\pi\Delta\sigma(x + x_m)) + \text{sinc}(2\pi\Delta\sigma(x - x_m))|$
 \searrow Positions des plots



Données expérimentales

TF colonnes







Notions préliminaires

Présentation de SWIFTS

Modélisation et caractérisation

Modèle sans réflexions

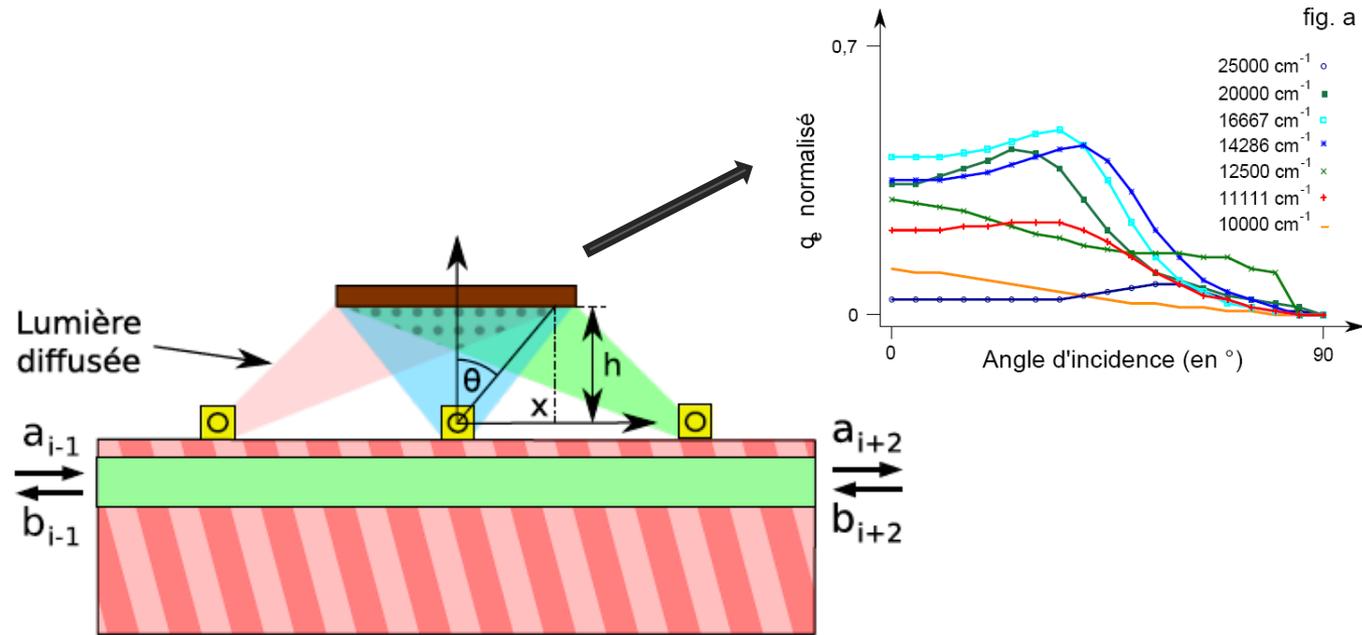
Interaction plot/pixel

Modèle avec réflexions

Besoins en moyens de caractérisation

Utilisation possible des SWIFTS

Conclusion et perspectives

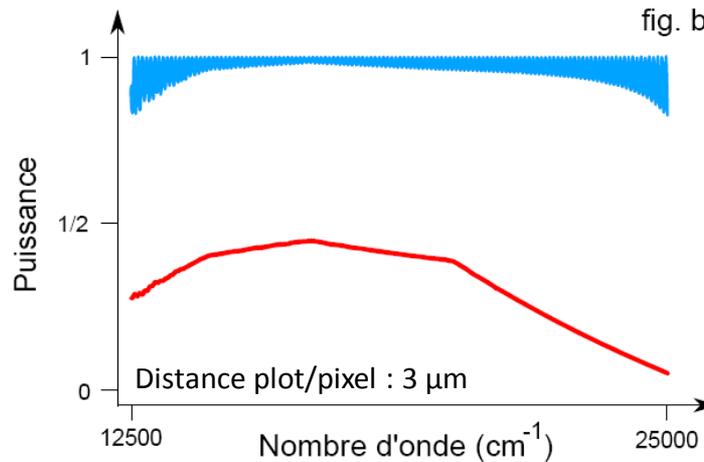
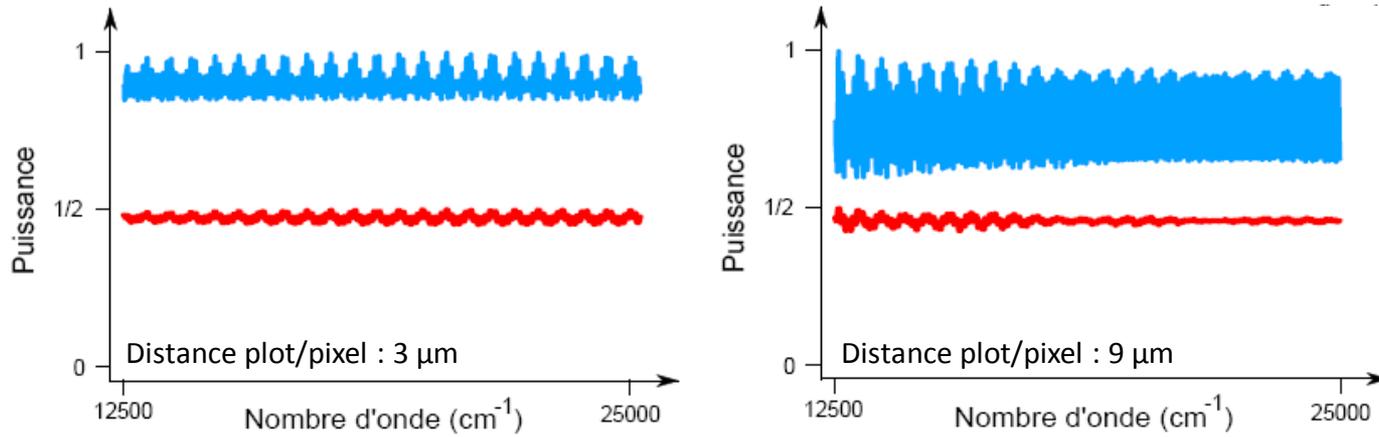


Entrée/Sortie
 Nano-plot
 Guide d'onde
 Substrat
 Zone d'interférences
 Pixel

De la lumière des plots $i - 1$ et $i + 1$ est détectée par le pixel i , ce qui provoque un phénomène de diaphonie.



Variation de la réponse spectrale d'un plot à cause du crosstalk



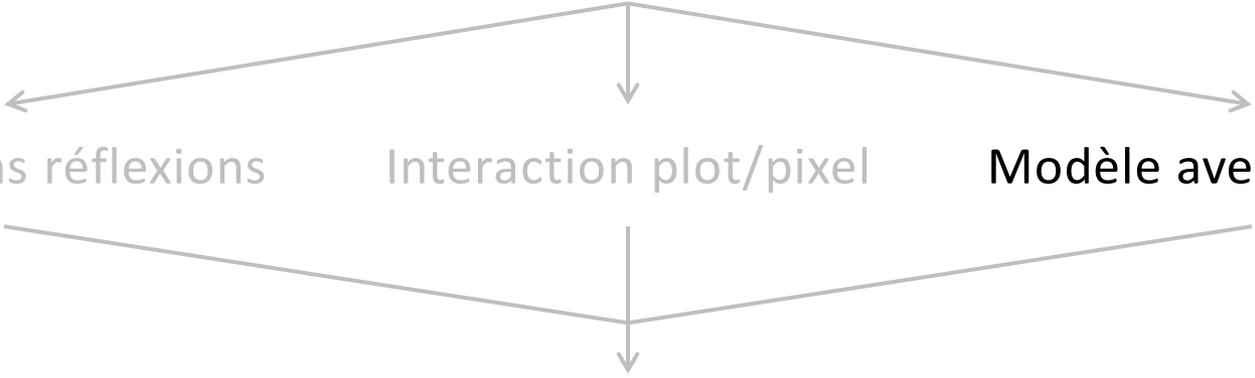
Limitation du phénomène de diaphonie grâce au filtrage angulaire effectué par le pixel



Notions préliminaires

Présentation de SWIFTS

Modélisation et caractérisation



Modèle sans réflexions

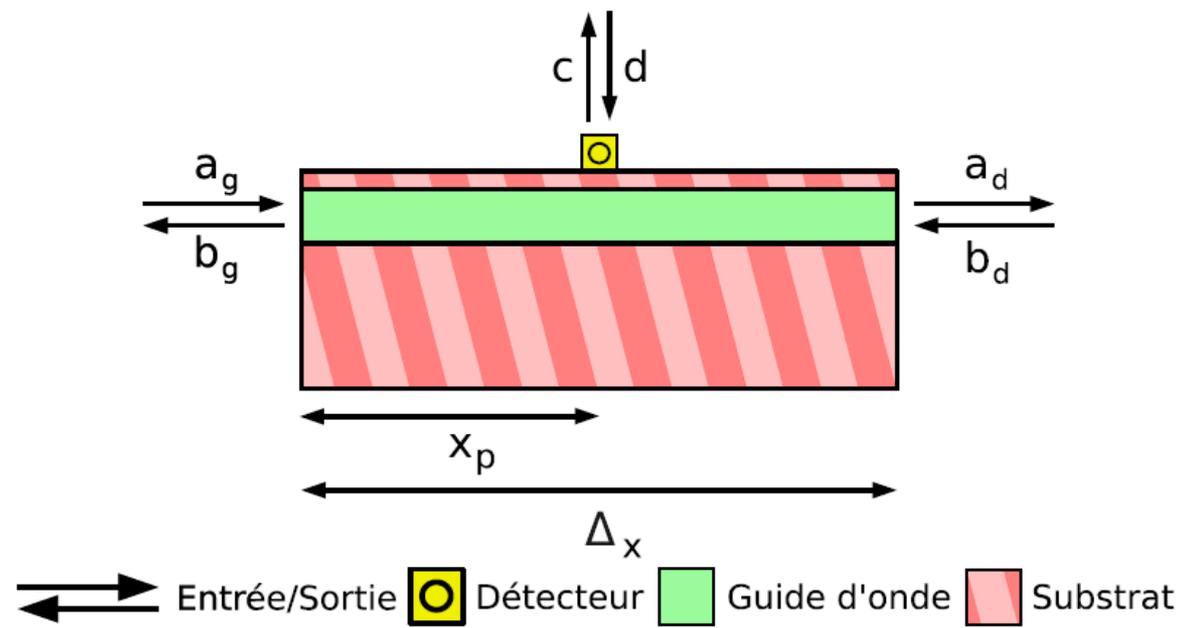
Interaction plot/pixel

Modèle avec réflexions

Besoins en moyens de caractérisation

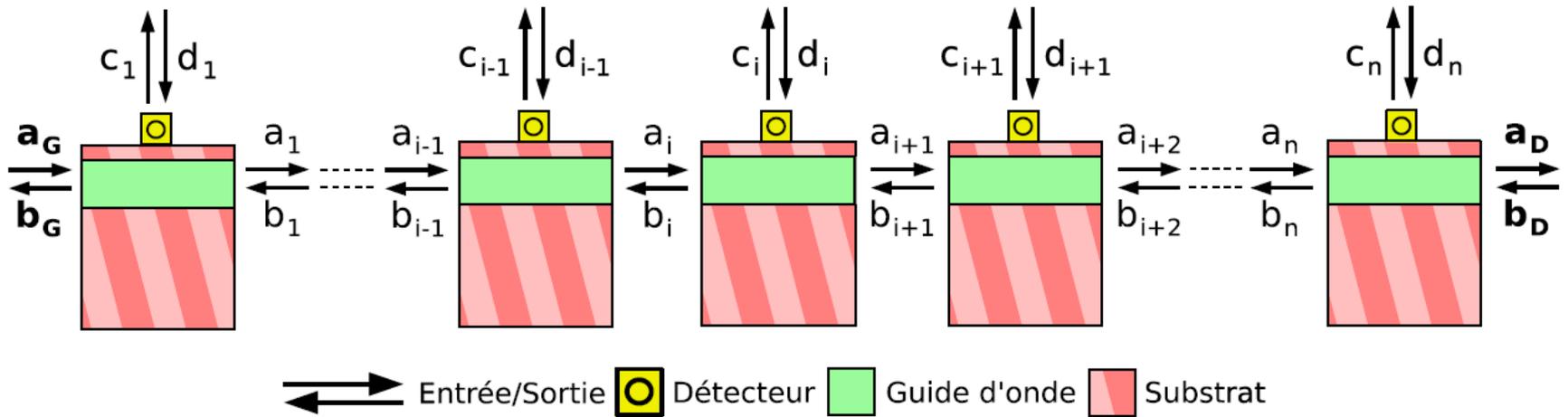
Utilisation possible des SWIFTS

Conclusion et perspectives



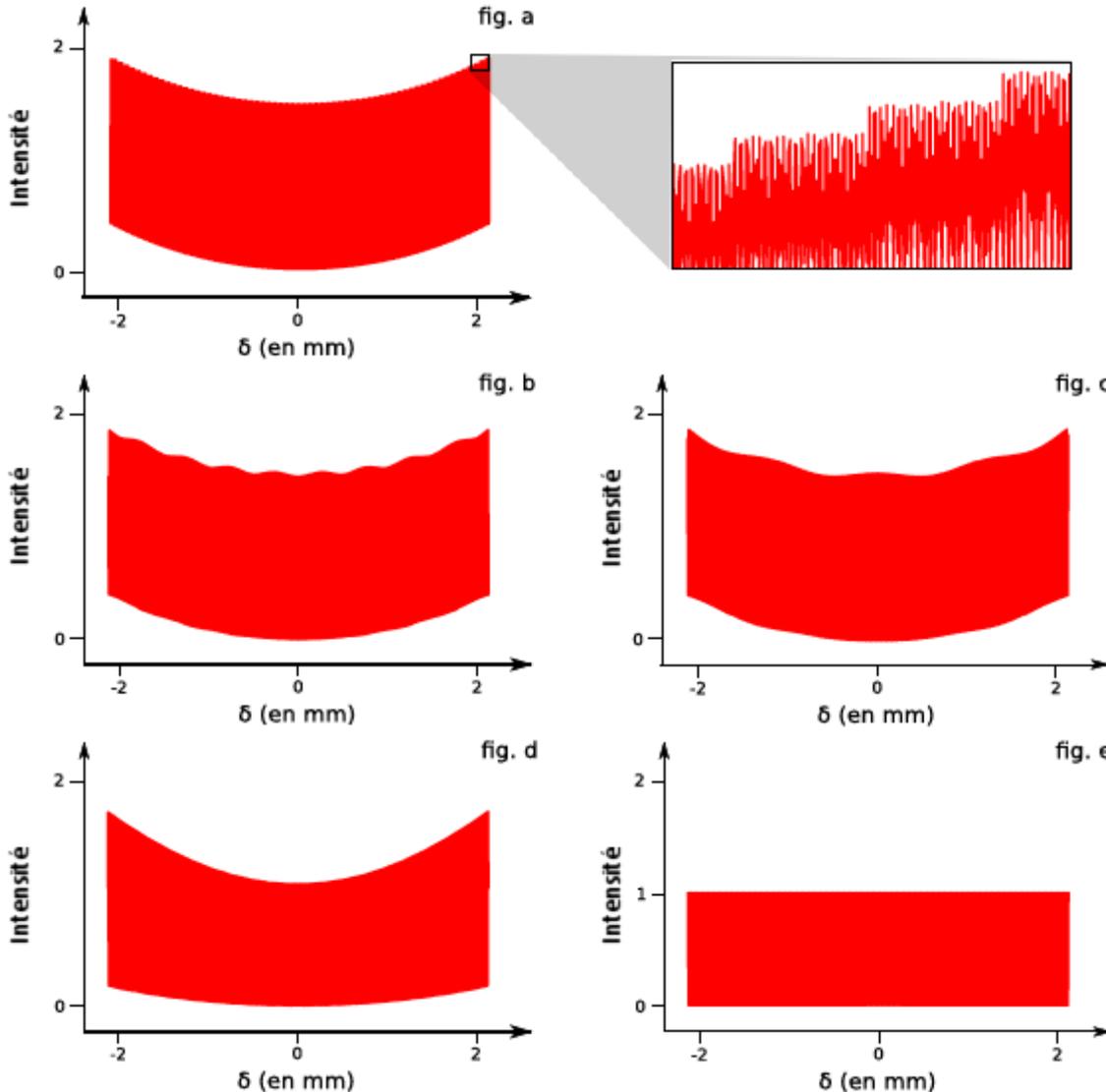
$$\begin{pmatrix} b_g \\ a_d \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} re^{-2j\phi_g} & te^{-j(\phi_g + \phi_d)} & 0 \\ te^{-j(\phi_g + \phi_d)} & re^{-2j\phi_d} & 0 \\ \eta e^{-j\phi_g} & \eta e^{-j\phi_d} & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_g \\ b_d \\ 0 \end{pmatrix}$$

↑
Matrice S : Sorties = S x Entrées



On transforme S en $T \rightarrow T_{tot} = T_N T_{N-1} \dots T_2 T_1 = \prod_{m=N}^1 T_m$

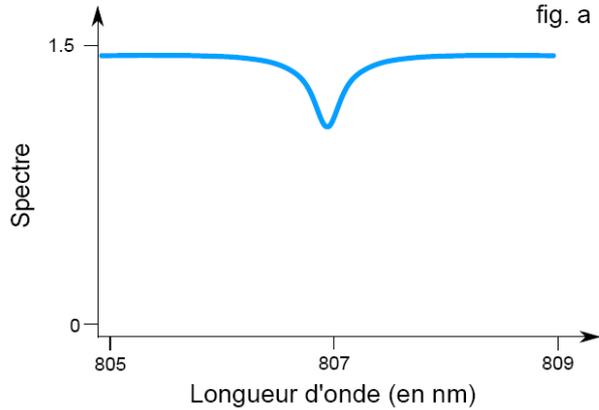
Matrice T : E/S gauche = T x E/S droite



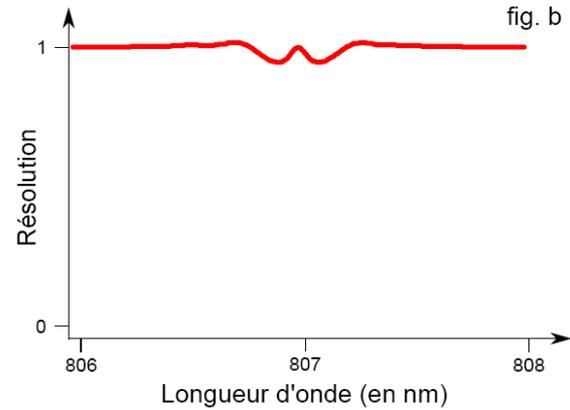
- **fig. a** : interférogamme pour une longueur d'onde quelconque ;
- **fig. b** : interférogamme pour $l = 806, 145 \text{ nm}$;
- **fig. c** : interférogamme pour $l = 806, 592 \text{ nm}$;
- **fig. d** : interférogamme pour $l = 806, 926 \text{ nm}$;
- **fig. e** : interférogamme pour $l = 132 = 806, 968 \text{ nm}$.



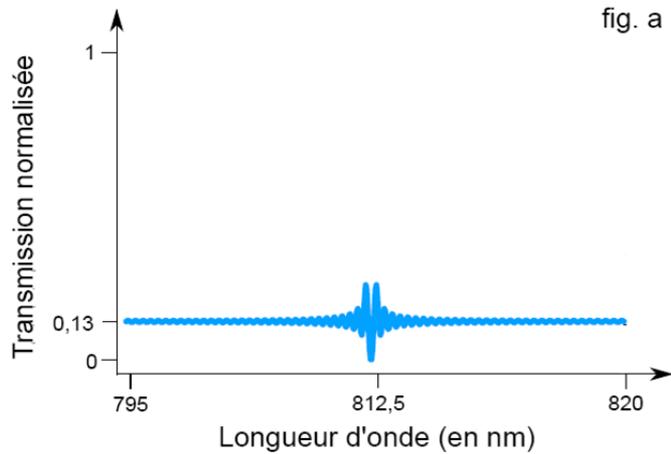
Réponse spectrale d'un SWIFTS



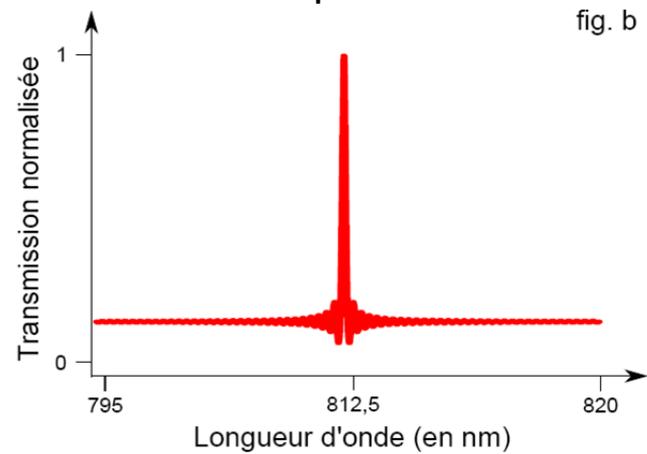
Résolution normalisée d'un SWIFTS

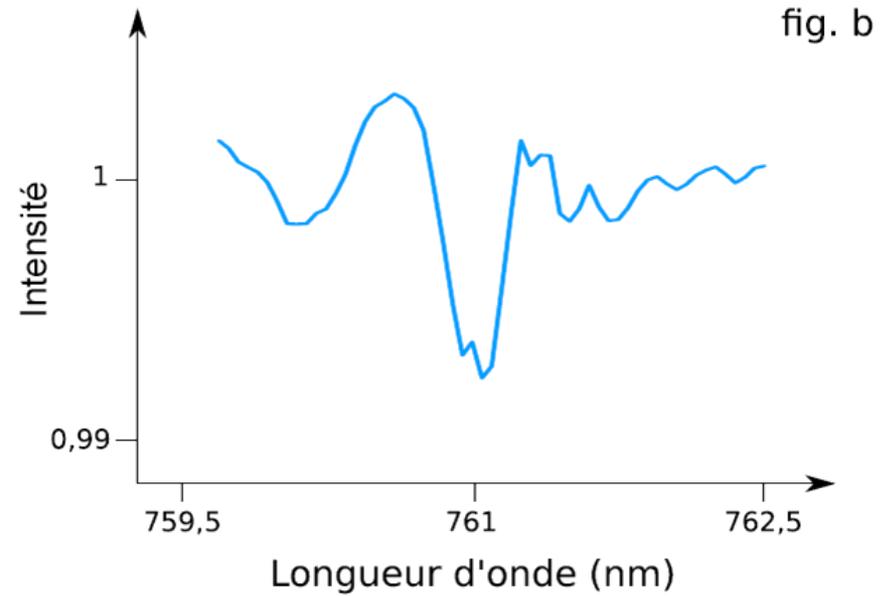
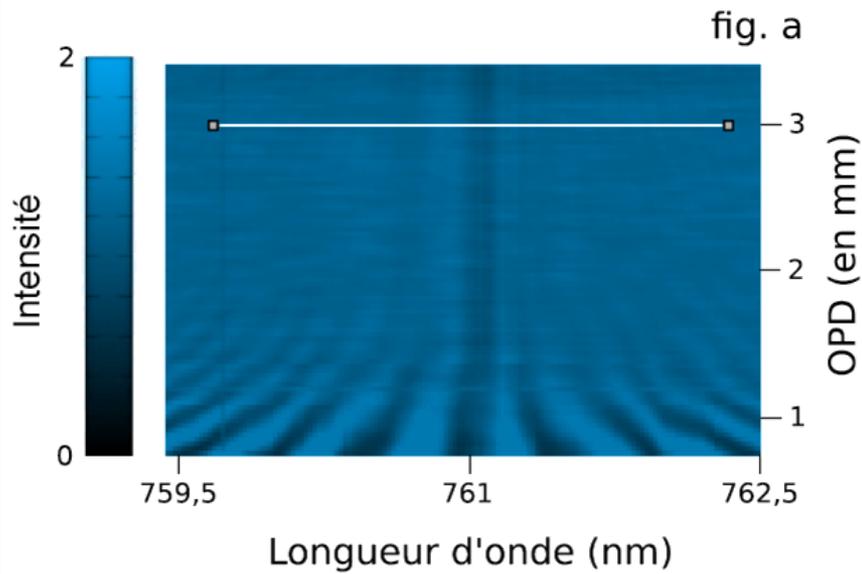


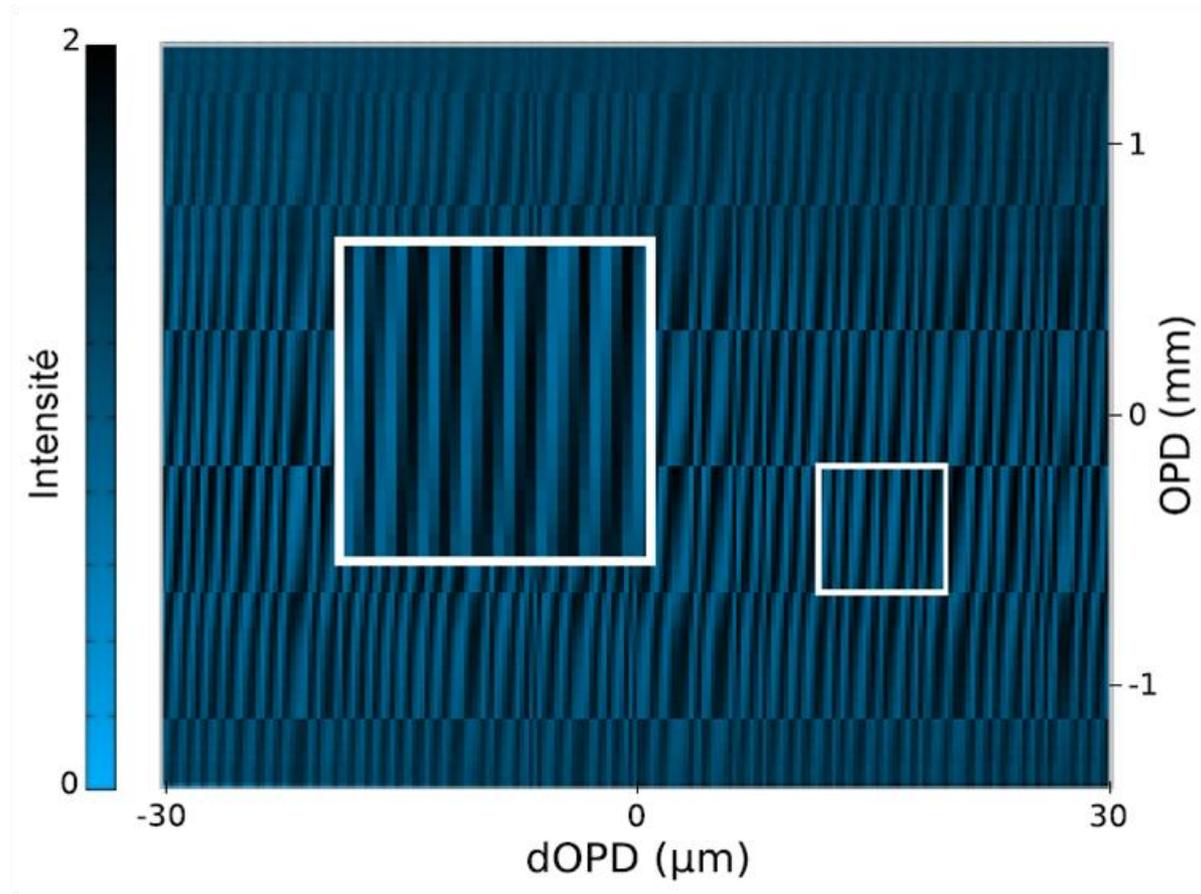
Entrées en phase



Entrées en opposition de phase

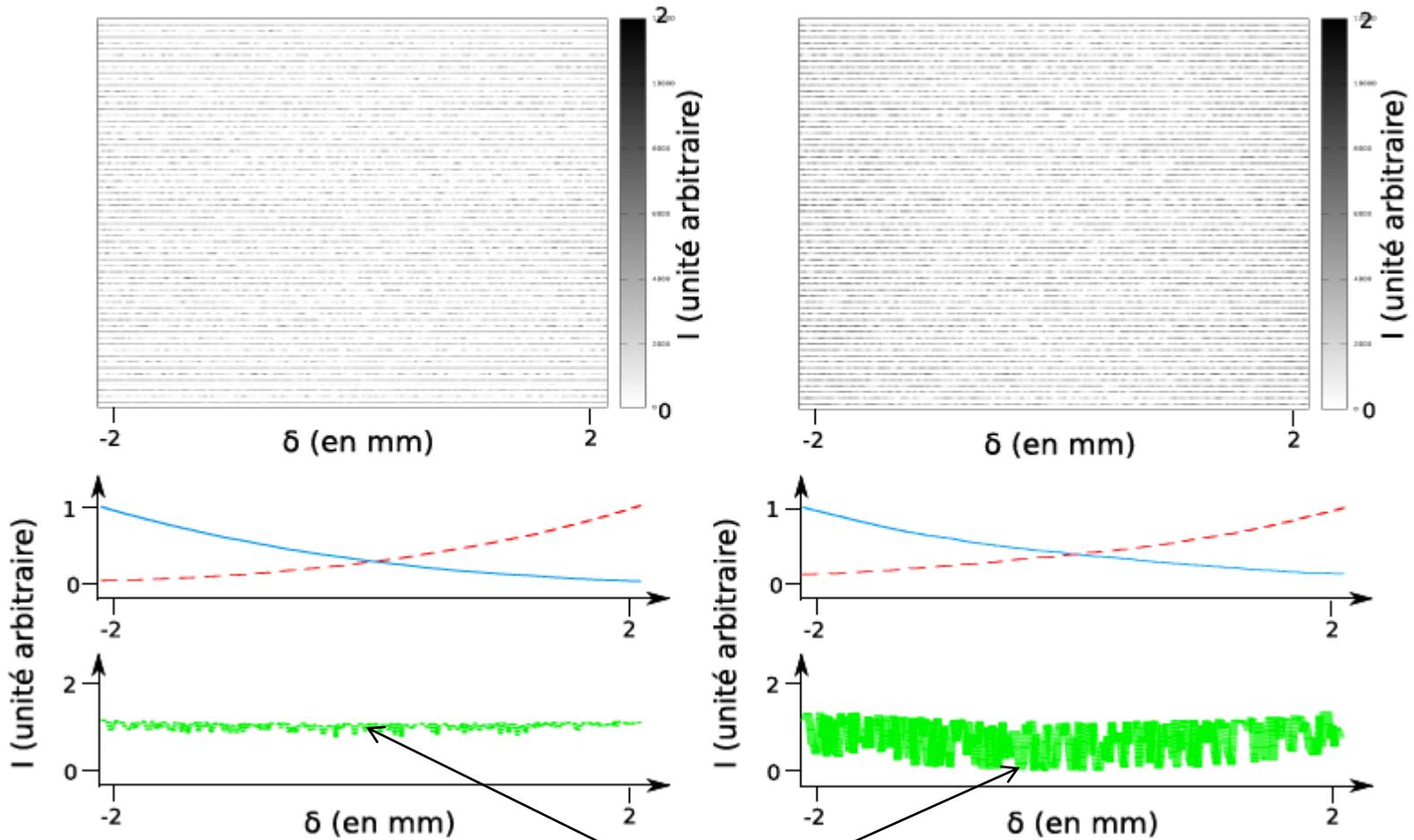








L'effet de Bragg est fortement atténué lorsque les plots ne sont pas placés de manière périodique



Interférogramme mesuré



Résultats expérimentaux : source monochromatique

1 - Acquisition des données de calibration photométrique en fonction du nombre d'onde :

acquisition d'images en balayage d'OPD ou en injectant de part et d'autre du composant

2 - Acquisition des données de calibration de la position des plots :

image composite des réponses monochromatiques d'un SWIFTS

3 - Correction photométrique des données de calibration de la position des plots

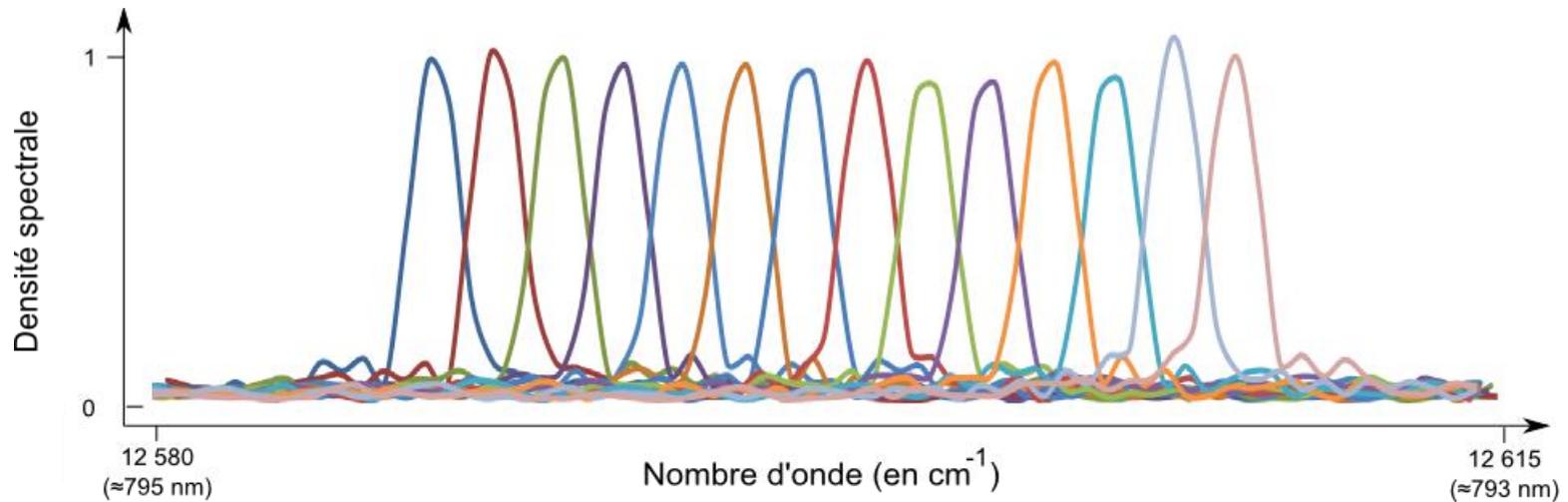
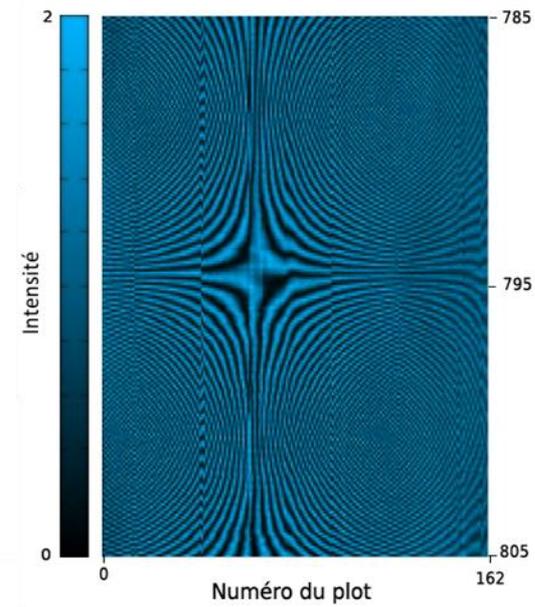
4 - Calibration de la dispersion chromatique de l'indice effectif

5 - Transformée de Fourier des colonnes de l'image de calibration après correction photométrique

6 - Calibration de la position des plots

7 - Transformée de Fourier à pas non constants des lignes de l'image de calibration :

cette dernière transformée de Fourier permet de mesurer l'erreur résiduelle



itération



Notions préliminaires

Présentation de SWIFTS

Modélisation et caractérisation

Utilisation possible des SWIFTS

Conclusion et perspectives



Les études de concepts instrumentaux ont été réalisées dans le cadre d'un rapport pour l'ESA présenté en novembre 2009 par E. le Coarer, P. Kern, J. Ferrand, P. Puget, M. Ayraud, B. Demonte, C. Bonneville et T. Gonthiez.



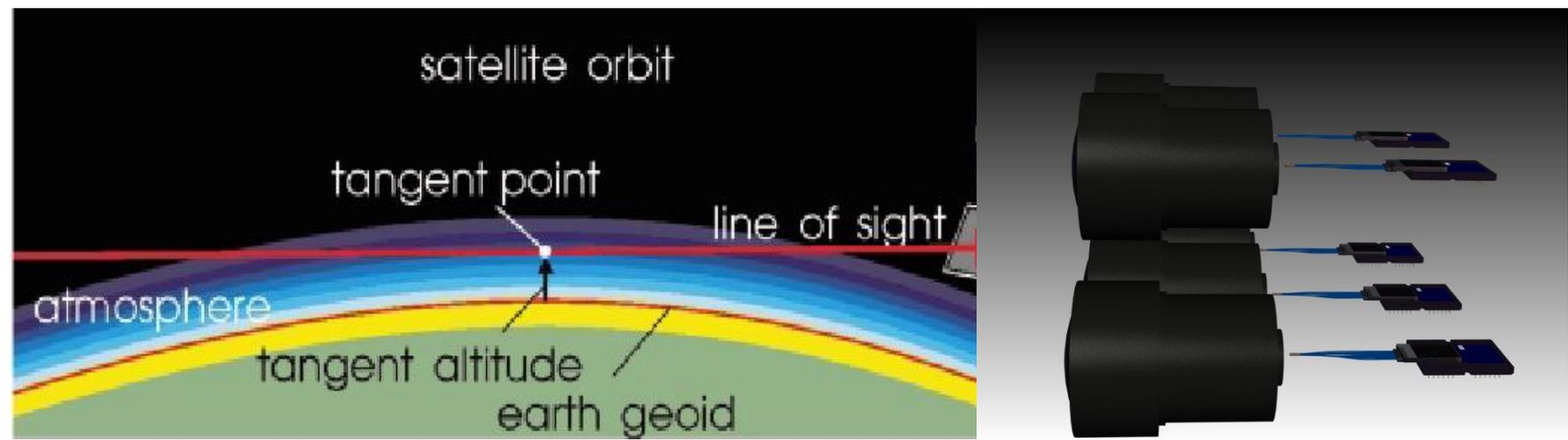


Paramètres clés de concept instrumentaux basés sur SWIFTS :

- Résolution spectrale et bande spectrale
- SNR et/ou NESR et/ou Dynamique
- Stabilité et précision absolue
- Taux d'acquisition

Limitations d'un FTS en optique intégrée :

- ⇒ étendue optique limitée
- ⇒ SNR limité dicté par un optimum entre la bande passante et la résolution



Comparaison avec MIPAS : Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding



Bandes de travail de MIPAS	A	AB	B	C	D
Bande spectrale (cm-1)	685-970	1020-1170	1215-1500	1570-1750	1820-2410
Temps d'acquisition (s)	0,005	0,005	0,010	0,010	0,005
SNR d'une image	811	789	2228	1038	302
NESR (nW/cm ² .sr.cm ⁻¹)	2084	3656	4500	12300	32100

Transmission :

MIPAS	SWIFTS
Deux détecteurs : 1	Capteur d'un seul côté : 0,4
Interférogramme bi-dimensionnel : 0,7	Polarisation : 0,5
Optique du FTS : 0,8	Facteur de couplage monomode : 0,80
Séparateur de flux : 0,9	Efficacité d'un SWIFTS : 0,74
Transmission totale : 0,5	Transmission totale : 0,12



Notions préliminaires

Présentation de SWIFTS

Modélisation et caractérisation

Utilisation possible des SWIFTS

Conclusion et perspectives



Bilan :

Modélisation précise et réaliste (Prédiction du phénomène de Bragg)

Banc de caractérisation opérationnel

Premiers résultats encourageants

A faire :

Tester les composants avec variateur d'OPD intégrés et collés sur un CCD

Obtenir un spectre « complexe »

Pistes de travail :

Amélioration de la calibration et surtout la réduction de données

Envisager l'association AWG-SWIFTS pour améliorer le SNR

Utilisation en interférométrie N télescopes (Kern et le Coarer 2009)

Application de SWIFTS à l'astrophysique



Dans l'immédiat :

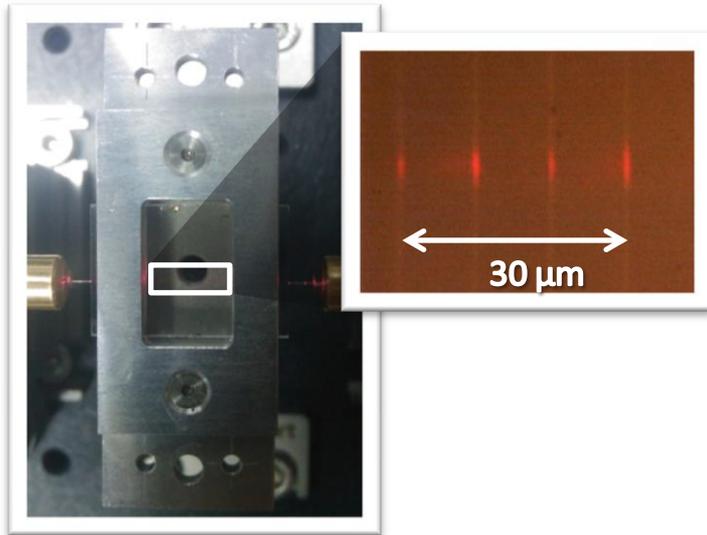
Master 2 sciences sociales à l'ENS de Lyon (spécialité administration des institutions de recherche) + Mi-temps au LAOG sur le projet SWIFTS

Demande de qualification pour Maître de conférence

Après :

Enseignant-chercheur ou cadre administratif

Étude et réalisation d'un spectromètre intégré à transformée de Fourier : SWIFTS



Composant SWIFTS Gabor

THÈSE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE
spécialité « Astrophysique et milieux dilués »

Présentation et soutenance publique par

JÉRÔME FERRAND

le 12 novembre 2010

Thèse dirigée par Etienne le Coarer